
NOTA TÉCNICA 02

CARACTERÍSTICAS E PROJEÇÕES DA PANDEMIA COVID-19 NO BRASIL, MINAS GERAIS E JUIZ DE FORA

Ruy Freitas Reis¹, Bárbara de Melo Quintela^{1,2}, Joventino de Oliveira Campos^{3,4}, Johnny Moreira Gomes³, Lara Turetta Pompei⁵, Bernardo Martins Rocha^{1,3}, Marcelo Lobosco^{1,3}, Rodrigo Weber dos Santos^{1,3}

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

² Department of Industrial Engineering, Alma Mater Studiorum - University of Bologna (IT)

³ Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Universidade Federal de Juiz de Fora

⁴ Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas de Gerais, Leopoldina

⁵ Graduanda em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora

ruyfreitas@ice.ufjf.br, barbara@ice.ufjf.br, joventino@cefetmg.br,
johnny.gomes@ufjf.edu.br, pompeil.lara@engenharia.ufjf.br, bernardomartinsrocha@ice.ufjf.br,
marcelo.lobosco@ice.ufjf.br, rodrigo.weber@ufjf.edu.br

18 de Abril de 2020

1 Introdução

Até o dia 17 de abril de 2020, a doença do Coronavírus 2019 (COVID-19) havia infectado 2,2 milhões de pessoas em todo o mundo, representando mais de 150 mil mortes em 209 países e territórios ao redor do mundo. A rápida dinâmica da pandemia está desafiando os sistemas de saúde e socio-econômicos de diferentes países. Na ausência de vacinas ou tratamentos eficazes, políticas de mitigação, como distanciamento social e fechamento de cidades, foram adotadas, mas os resultados variam entre os diferentes países. Alguns países conseguiram controlar a doença no momento, como é o caso da Coreia do Sul. Outros, como a Itália, agora estão enfrentando o auge da pandemia. Finalmente, países com economias emergentes e questões sociais, como o Brasil, estão na fase inicial da pandemia.

O primeiro caso da infecção reportado no Brasil ocorreu no dia 26 de fevereiro de 2020. Até o momento, de acordo com o Informe Epidemiológico Coronavírus do dia 17 de abril de 2020 da Secretaria de Estado de Saúde de Minas Gerais, Juiz de Fora possui 82 dos 986 casos confirmados (ativos) no estado e dois registros de óbitos dos 35 confirmados no estado [15]. A Prefeitura de Juiz de Fora passou a reportar boletins a partir do dia 26/03/2020 e, até o fechamento dessa nota técnica, o boletim de 17 de Abril de 2020 reportava 104 casos confirmados (Figura 1) [12]. Até o momento o país contabiliza um total de 33.682 infectados e 2.141 mortes, conforme relatado pelas secretarias estaduais de saúde [10].

O maior número de casos confirmados de COVID-19 no estado de Minas Gerais se concentra na capital do estado, Belo Horizonte, que apresentava 398 casos confirmados no dia 17/04/2020. Na primeira nota que publicamos [13], Nova Lima era a segunda cidade com maior número casos, mas Juiz de Fora atualmente é a segunda cidade com mais casos confirmados no estado (82), seguida de Uberlândia (62), Nova Lima (45) e Divinópolis (35) (Figura 2).

A Figura 3 apresenta a progressão do número de notificações, confirmações e óbitos, de forma acumulada e por dia, para o estado de Minas Gerais. Além do crescimento do número de casos confirmados desde março, nota-se a discrepância entre as informações oficiais apresentadas. Assim como discutido na Nota Técnica 01 [13], no Brasil o número de casos confirmados da doença ainda é muito baixo com relação ao número de notificações o que dificulta as previsões e estratégias de combate à pandemia.

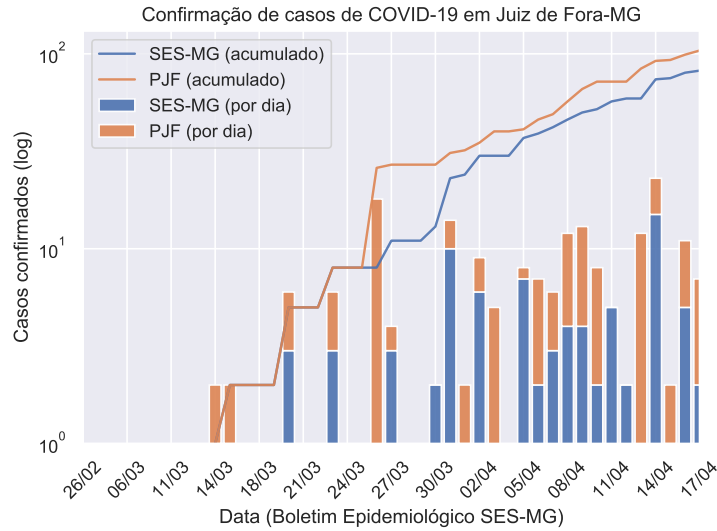


Figura 1: Progressão do número de casos confirmados (acumulados e diários) na cidade de Juiz de Fora conforme informações da Prefeitura de Juiz de Fora (PJF) e pela Secretaria de Estado de Saúde de Minas Gerais (SES-MG).

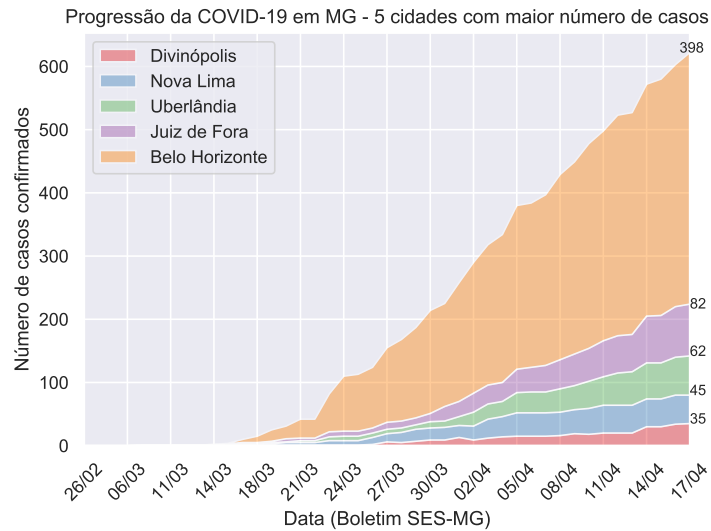


Figura 2: Progressão da COVID-19 nas 5 cidades com maior número de casos confirmados de Minas Gerais conforme dados da Secretaria de Estado de Saúde de Minas Gerais (SES-MG). O gráfico apresenta a quantidade de casos acumulados e o total de casos confirmados ativos em cada cidade no dia 17/04 está anotado à direita.

Nesta nova nota técnica, utilizamos o modelo matemático apresentado anteriormente [13] e técnicas de quantificação de incertezas de problemas inversos para caracterizar aspectos essenciais da COVID-19. Com base em um novo ajuste dos parâmetros do modelo, uma nova previsão de 15 dias é feita para o Brasil, Minas Gerais e Juiz de Fora.

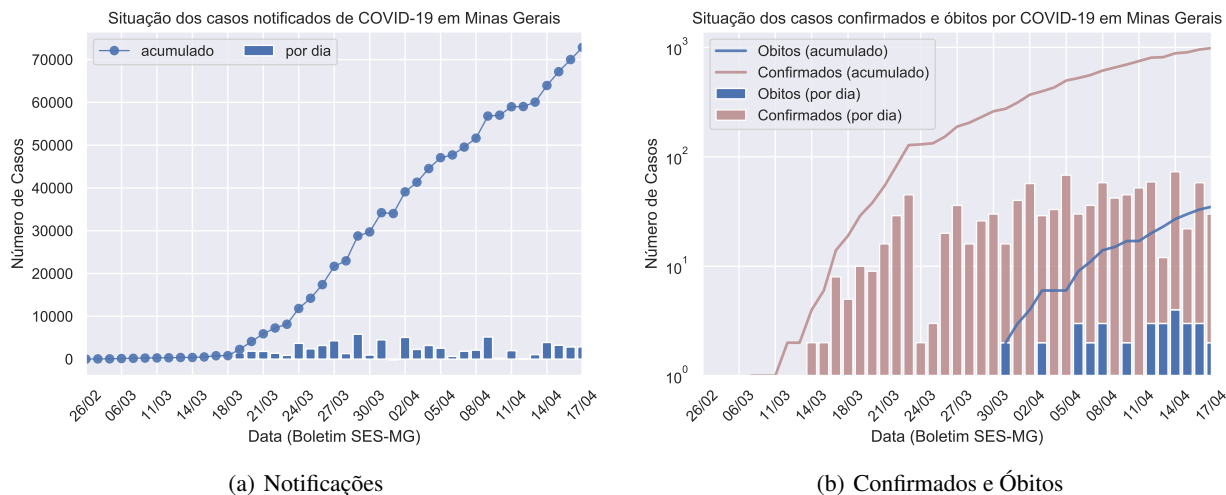


Figura 3: Progressão do número de notificações (a), confirmações e óbitos (b) no estado de Minas Gerais conforme dados da Secretaria de Estado de Saúde de Minas Gerais (SES-MG). Este é apresentado em escala logarítmica.

2 Análise das projeções anteriores

No dia 30 de março, divulgamos a primeira nota técnica com caracterizações da pandemia COVID-19 no Brasil, MG e JF e projeções para o dia 7 de abril. Aqui fazemos uma breve análise dos resultados anteriores. Com relação a caracterização da pandemia no Brasil, nossa estimativa inicial de subnotificação de casos, apenas 8, 1%, foi confirmada posteriormente por diversos outros grupos de pesquisa brasileiros [2]. Além disso, a estimativa para a redução efetiva de contato, que sugeria um isolamento voluntário de cerca de 40%, também foi verificada por outros grupo de pesquisa, através de outros métodos¹.

A Tabela 1 compara as projeções feitas para o dia 7 de abril com os dados obtidos, quando possível, para a mesma data ou datas próximas. Observamos que os valores notificados para infectados (I), óbitos (O), internações hospitalares em leitos simples (IH) e em leitos de UTI (IC) estão dentro das faixas das previsões ou muito próximos.

Tabela 1: Comparação entre as projeções da Nota 1 para Brasil, MG e JF, e os dados obtidos, quando possível, para a mesma data do dia 7 de abril. *I* e *O* representam o número de infectados e mortes, respectivamente. *IH* é o número de infectados hospitalizados, *IC* é o número de leitos em UTIs. * dados do dia 15/04; ** dados do dia 02/04.

Brasil			Minas Gerais			Juiz de Fora	
	Modelo	Dado	Modelo	Dado	Modelo	Dado	
I	(8.317 33.005)	14.034 [19]	(454 1298)	559 [14]	(64 112)	58 [12]	
O	(284 838)	686 [19]	(15 32)	11 [14]	(2 4)	1 [12]	
IH	(3.891 25.074)	3.661 [8]*	(310 566)	286 [1]**	(30 50)		
IC	(1.222 5.474)	6.043 [8]*	(35 91)	66 [1]**	(5 11)	16 [5]*	

3 Material e Métodos

3.1 Modelo matemático

O modelo matemático utilizado é uma modificação de modelos do tipo SIR, baseado em equações diferenciais ordinárias, e foi apresentado com maiores detalhes na NT01 [13].

¹Dados de localização de celulares mostram redução no isolamento social no Brasil pela 2ª semana seguida. Acesse: <https://g1.globo.com/economia/tecnologia/noticia/2020/04/17/dados-de-localizacao-de-celulares-mostram-reducao-no-isolamento-social-no-brasil-pela-2a-semana-seguida.ghtml>

Em resumo, o modelo considera as variáveis S , I , R , O e I_r , que variam ao longo do tempo e representam o número de indivíduos de uma população, com um total de tamanho N , que estão suscetíveis, infectados, recuperados, que foram a óbitos e o número de indivíduos notificados (reportados) como infectados, respectivamente. O número de leitos em hospitais é modelado pela soma do número de infectados hospitalizados, IH , e o número de leitos em UTIs, IC .

A função que modela o controle de bordas do local, $f(t)$, nesta nota técnica utilizou de um conceito hierárquico. Em todos os cenários tomou-se $f(t) = eP(t)$, onde $P(t)$ é uma função na forma $c_0 e^{c_1 t}$ ajustada pelo método dos mínimos quadrados. Para o cenário Brasil, $P(t)$ foi ajustado com os casos no mundo, para o cenário Minas Gerais, $P(t)$ foi ajustado com os casos do Brasil, e para Juiz de Fora, $P(t)$ foi ajustado com os casos de Minas Gerais.

3.2 Ajuste dos parâmetros e propagação de incertezas

Considerando as atualizações publicadas periodicamente com relação ao número de mortes e infectados com COVID-19, os parâmetros do modelo foram novamente calibrados utilizando o método descrito na NT01 e os dados reportados na literatura [4, 6, 9, 10, 17, 19]. Os valores e os intervalos utilizados para o ajuste dos parâmetros são apresentados na Tabela 6.

Os parâmetros do modelo foram ajustados, assim como na NT01 [13], utilizando o método da Evolução Diferencial (ED) implementado na linguagem de programação Python [11, 16]. O algoritmo foi utilizado para estimar cada um dos parâmetros do modelo proposto, respeitando os limites estabelecidos na Tabela 6, os quais correspondem a dados oficiais da pandemia em cada um dos países considerados. O ajuste foi feito considerando os dados de infectados (infectados confirmados acumulados) e de óbitos (acumulados) representados por $I(t)$ e $O(t)$ e, para isso, a seguinte função objetivo foi usada para minimizar o erro relativo entre os dados e o modelo:

$$\min_p kI(t, p) - I(t)k_1 / kI(t)k_1 + kO(t, p) - O(t)k_1 / kO(t)k_1, \quad (1)$$

onde p é o conjunto de parâmetros do modelo a ser estimado.

Para cada parâmetro do modelo a sua função distribuição de probabilidade (FDP) foi estimada a partir do procedimento de ajuste dos parâmetros pelo método da ED. Dentre todas as soluções candidatas geradas pela ED, 15% dos indivíduos com o melhor valor de *fitness* foram selecionados. A partir dessas amostras, a distribuição marginal dos parâmetros, a matriz de covariância e a correlação entre os parâmetros foram estimados. Esses dados, por sua vez, foram usados para o procedimento de propagação de incertezas pelo método de Monte Carlo usando a biblioteca ChaosPy [7].

O mesmo procedimento de calibração dos modelos, via quantificação de incertezas direta e inversa, foi adotado para a modelagem do número de leitos.

A Tabela 6 (do Apêndice) apresenta uma descrição dos parâmetros do modelo e os intervalos utilizados para o ajuste dos parâmetros.

4 Resultados e discussões

4.1 Ajuste e caracterização da pandemia para Brasil, Minas Gerais e Juiz de Fora

Os valores dos parâmetros encontrados pelo ajuste, assim como pelo procedimento descrito anteriormente para caracterização das distribuições dos parâmetros, são apresentados na Tabela 2.

A análise dos parâmetros estimados permite a identificação de importantes características da pandemia. Em particular, observamos que a taxa de infecção b é maior no estado de Minas Gerais (0,32) do que a média Brasileira (0,20). A taxa de mortalidade, m , é maior no Brasil (1,8%) do que em MG e JF, 1,3% e 1,6%, respectivamente.

O parâmetro r representa a redução da transmissão via políticas de distanciamento social. Para o Brasil, MG e JF os valores para r encontrados estão em torno de 40% com desvio padrão em torno de 4%. A nova estimativa aponta para cerca de 60% da população em distanciamento social voluntário.

O parâmetro θ modela o percentual de notificação de casos positivos COVID-19. Para o Brasil, MG e JF os valores encontrados foram 7,4%, 9,1% e 8,1%, respectivamente. O maior desvio padrão encontrado foi para a estimativa de JF. Isto reflete que há ainda poucos dados disponíveis para um ajuste mais preciso para a cidade de JF.

4.2 Projeções para Brasil, Minas Gerais e Juiz de Fora

Com os modelos ajustados, pode-se usá-los para analisar diferentes cenários quanto a evolução da pandemia para dias futuros. Nesta nota técnica, avaliamos três diferentes cenários:

Tabela 2: Caracterização da pandemia de COVID-19 em termos dos parâmetros do modelo: b é a taxa de infecção, m taxa de mortalidade; r fator de redução do contato; t_i início da política de intervenção; Δ duração da intervenção; τ_1 período de incubação; τ_2 tempo dos sintomas ao óbitos; τ_3 tempo dos sintomas até a recuperação; e efeito da restrição nas fronteiras; θ casos infectados notificados; e N a população total.

Parâmetro	Brasil				Minas Gerais				Juiz de Fora			
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
b	2,01	10^{-1}	5,39	10^{-3}	3,19	10^{-1}	5,66	10^{-3}	2,71	10^{-1}	2,31	10^{-2}
m	1,84	10^{-2}	1,76	10^{-3}	1,33	10^{-2}	3,78	10^{-4}	1,63	10^{-2}	2,87	10^{-3}
r	3,99	10^{-1}	3,38	10^{-2}	3,09	10^{-1}	1,42	10^{-2}	4,04	10^{-1}	4,61	10^{-2}
t_i	2,91	10^1	1,30	10^0	5,94	10^0	6,60	10^{-1}	3,97	10^0	1,74	10^0
Δ	2,08	10^1	6,71	10^{-1}	2,79	10^1	1,15	10^0	1,76	10^{-1}	4,37	10^0
τ_1	1,21	10^1	1,11	10^0	1,32	10^1	9,05	10^{-1}	1,20	10^{-1}	1,39	10^0
τ_2	1,63	10^1	2,29	10^0	2,12	10^1	1,25	10^0	1,87	10^{-1}	2,75	10^0
τ_3	1,13	10^1	1,26	10^0	8,47	10^0	9,59	10^{-1}	1,03	10^{-1}	1,74	10^0
e	5,95	10^{-4}	6,30	10^{-5}	2,20	10^{-4}	2,00	10^{-4}	3,68	10^{-4}	2,74	10^{-4}
θ	7,39	10^{-2}	6,37	10^{-3}	9,15	10^{-2}	2,64	10^{-3}	8,08	10^{-2}	1,04	10^{-2}
N	2,09	10^8	-	-	2,12	10^7	-	-	5,69	10^5	-	-

1. **Cenário Atual.** Onde usamos os parâmetros estimados na Seção anterior para fazer a projeção para os próximos 15 dias.
2. **Cenário Otimista.** Neste cenário, $a(t)$ diminui gradualmente até atingir $1.5r$, onde r possui o valor estimado e usado no Cenário Atual (Figura 4a). Este cenário, portanto, simula um isolamento social mais eficaz, com uma circulação mais restrita.
3. **Cenário Pessimista.** Este cenário é semelhante ao cenário adotado na Nota 1. Mantemos os parâmetros estimados na Seção anterior com exceção da função $a(t)$, que simula a influência das políticas de isolamento social. A partir da data atual, consideramos uma segunda fase, onde $a(t)$ aumenta gradualmente até atingir 50% de r , onde r possui o valor estimado e usado no Cenário Atual (Figura 4b). Este cenário, portanto, simula uma flexibilização do isolamento social.

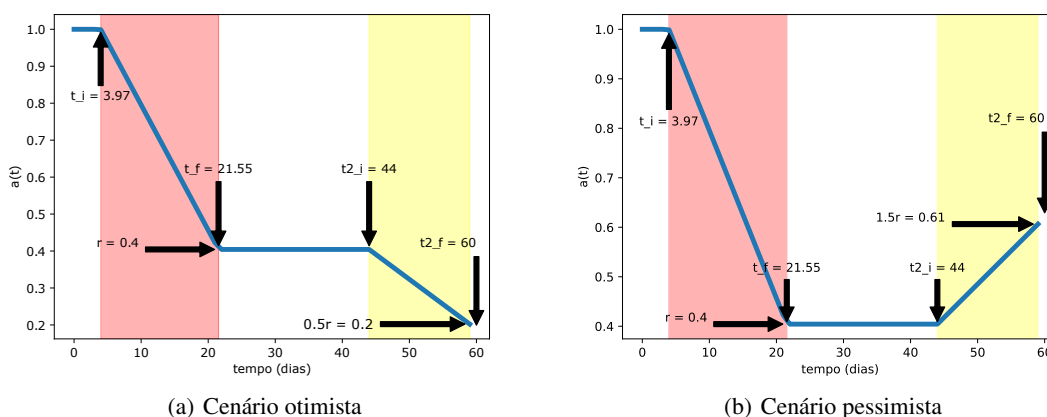


Figura 4: Exemplo de função $a(t)$ que modela a modificação da probabilidade de contato entre pessoas ao longo do tempo. Nesse exemplo, apresentamos duas fases. Na fase inicial, a política de contenção é implementada entre os tempos t_i e t_f , e reduz a probabilidade de contato por um fator r . Essa fase é seguida por uma segunda fase de flexibilização da política de contenção, entre os tempos $t2_i$ e $t2_f$, onde durante esta fase $a(t)$ reduz para 50% de r (otimista, ilustrado por **a**) ou aumenta para 50% de r (pessimista, ilustrado por **b**).

A Figura 5 apresenta os resultados das projeções para o Brasil, Minas Gerais e Juiz de Fora, usando o **Cenário Atual**. Para cada tempo t , em dias, as distribuições correspondentes ao número de infectados confirmados e os óbitos obtidas pelo processo de propagação de incertezas são apresentadas. Note que o mesmo modelo, com diferentes parâmetros,

foi capaz de reproduzir a dinâmica de diferentes cenários da pandemia de COVID-19 tanto para um país (Brasil), quanto para um estado (Minas Gerais), ou uma cidade (Juiz de Fora). Além disso, a Tabela 3 apresenta os resultados numéricos no dia 1º de maio (último dia simulado) nos três locais simulados. Observamos aumentos significativos para o Brasil, MG e JF, tanto para o número de óbitos como para o total de casos confirmados com COVID-19. Além disso, o intervalo de confiança, desvio padrão, ou faixa de incerteza é maior em Juiz de Fora do que em MG e Brasil. Isto reflete que há ainda poucos dados disponíveis para um ajuste mais preciso para JF.

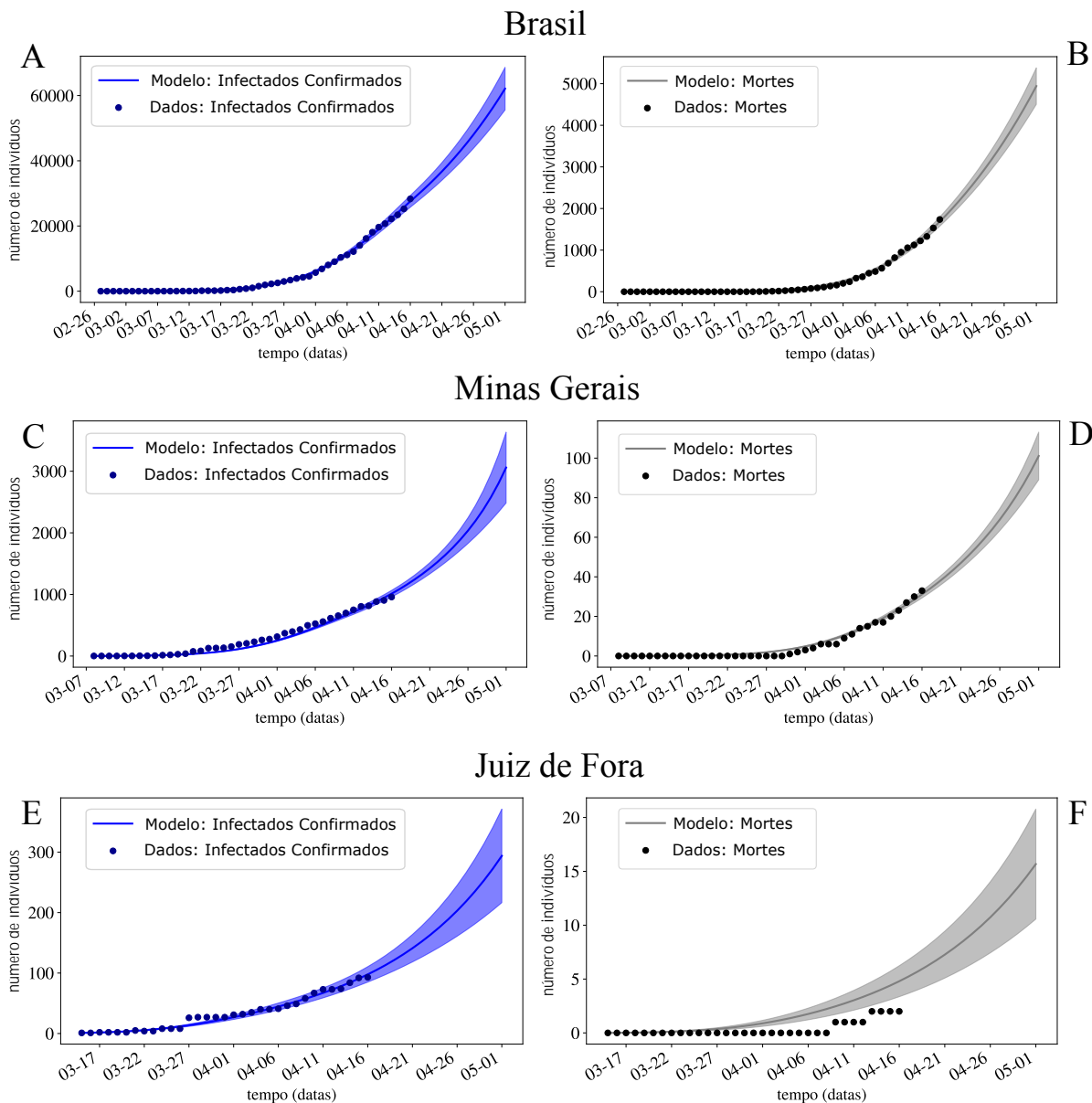


Figura 5: Projeções para o **Cenário Atual**. Resultado das simulações para Brasil, Minas Gerais e Juiz de Fora, onde o modelo é ajustado usando os dados até o dia 15 de abril e então uma previsão é realizada para os próximos 15 dias. O dia final corresponde ao dia 1º de maio. São apresentados o número de casos confirmados (C), painéis A, C e E, e óbitos (O), painéis B, D e F, ao longo dos dias. As linhas sólidas indicam o valor médio, regiões hachuradas o desvio padrão (DP) dos resultados das simulações, enquanto os pontos são os dados disponíveis até o momento.

A Figura 6 apresenta os resultados para Brasil, Minas Gerais e Juiz de Fora, considerando o **Cenário Pessimista** e o **Cenário Otimista**. A Tabela 4 apresenta os resultados no dia 1º de maio (último dia simulado) para o **Cenário Otimista** e a Tabela 5 apresenta os mesmos resultados para **Cenário Pessimista**. É importante ressaltar que a evolução dos casos confirmados (nos Painéis 6A, C e E) mudou de uma tendência de crescimento para uma tendência de

Tabela 3: Resultado das previsões para Brasil, Minas Gerais e Juiz de Fora no dia 1º de maio para o **Cenário Atual** (Conf. representa o número de casos confirmados). Apresentamos a faixa de possíveis resultados considerando os valores para Média (M) e Desvio Padrão (DP).

	Brasil			Minas Gerais			Juiz de Fora		
	M-DP	M	M+DP	M-DP	M	M+DP	M-DP	M	M+DP
Conf.	55.561	62.118	68.675	2.484	3.059	3.634	216	294	372
Óbitos	4.504	4.942	5.380	89	101	113	11	16	21

Tabela 4: **Cenário Otimista**. Resultado das previsões para Brasil, Minas Gerais e Juiz de Fora no dia 1º de maio em um cenário onde a circulação ficou 50% mais restrita (otimista). Apresentamos a faixa de possíveis resultados considerando os valores para Média (M) e Desvio Padrão (DP).

	Brasil			Minas Gerais			Juiz de Fora		
	M-DP	M	M+DP	M-DP	M	M+DP	M-DP	M	M+DP
Conf.	46.834	51.485	56.135	1.976	2.444	2.913	175	222	270
Óbitos	4.207	4.593	4.978	82	92	103	10	14	18

estabilização, confirmando que o esforço pelo aumento do isolamento social é uma medida não farmacológica essencial para se controlar a pandemia de COVID-19. Por outro lado, a evolução dos óbitos (nos Painéis 6B, D e F) apresentou uma redução significativa, mas não chegou a inverter a tendência, uma vez que o reflexo nesta curva se dará com um atraso da ordem de $\tau_1 + \tau_2$, ou seja, o tempo de contrair a doença ao óbito.

Comparando as Tabelas 4 e 5 observamos a importância quantitativa das medidas de isolamento social. Há aumentos significativos na previsão da média do número de casos confirmados. A diferença entre os dois cenários é de mais de 24 mil casos confirmados de COVID-19 no Brasil, 1.500 e 200 casos a mais em MG e JF, respectivamente. O mesmo ocorre para o número de óbitos. Uma política de isolamento mais restritiva e eficaz pode salvar mil pessoas no Brasil nas próximas duas semanas.

4.3 Projeções do uso de leitos de UTI em Juiz de Fora

A Figura 7 apresenta uma projeção de demanda de leitos em UTIs para Juiz de Fora nos próximos 20 dias, considerando os três cenários distintos, como na seção anterior. Para o ajuste, usamos a informação que 16 dos 37 leitos de UTI para COVID-19 estavam ocupados na cidade de JF no dia 15 de abril [5]. Observamos diferenças significativas entre os três diferentes cenários. No **Cenário Atual** a taxa de ocupação de leitos UTI para COVID-19 em JF pode chegar a 100% na última semana do mês de abril, com uma incerteza de cerca de 6 dias. No **Cenário pessimista**, onde ocorre a flexibilização do distanciamento social, a taxa de ocupação de leitos UTI para COVID-19 em JF pode chegar a 100% no dia 26 de abril, com uma incerteza de cerca de 4 dias. Apenas no **Cenário otimista**, onde o distanciamento social é mais restritivo a partir da data de hoje, não observamos a saturação dos de leitos UTI para COVID-19 em JF, até o dia final da projeção, dia 6 de maio.

A Figura 8 destaca a comparação entre as projeções do **Cenário Atual** e **Cenário Otimista**, onde observamos que apenas através de um distanciamento social mais restritivo (cenário otimista) o sistema de saúde (no caso particular do número de leitos UTI para COVID-19 em JF) não entra em colapso. É importante enfatizar que os países que

Tabela 5: **Cenário Pessimista**. Resultado das previsões para Brasil, Minas Gerais e Juiz de Fora no dia 1º de maio em um cenário onde a circulação ficou 50% menos restrita (pessimista). Apresentamos a faixa de possíveis resultados considerando os valores para Média (M) e Desvio Padrão (DP).

	Brasil			Minas Gerais			Juiz de Fora		
	M-DP	M	M+DP	M-DP	M	M+DP	M-DP	M	M+DP
Conf.	66.362	75.788	85.213	3.188	3.921	4.653	274	400	527
Óbitos	4.830	5.341	5.852	99	113	127	12	18	24

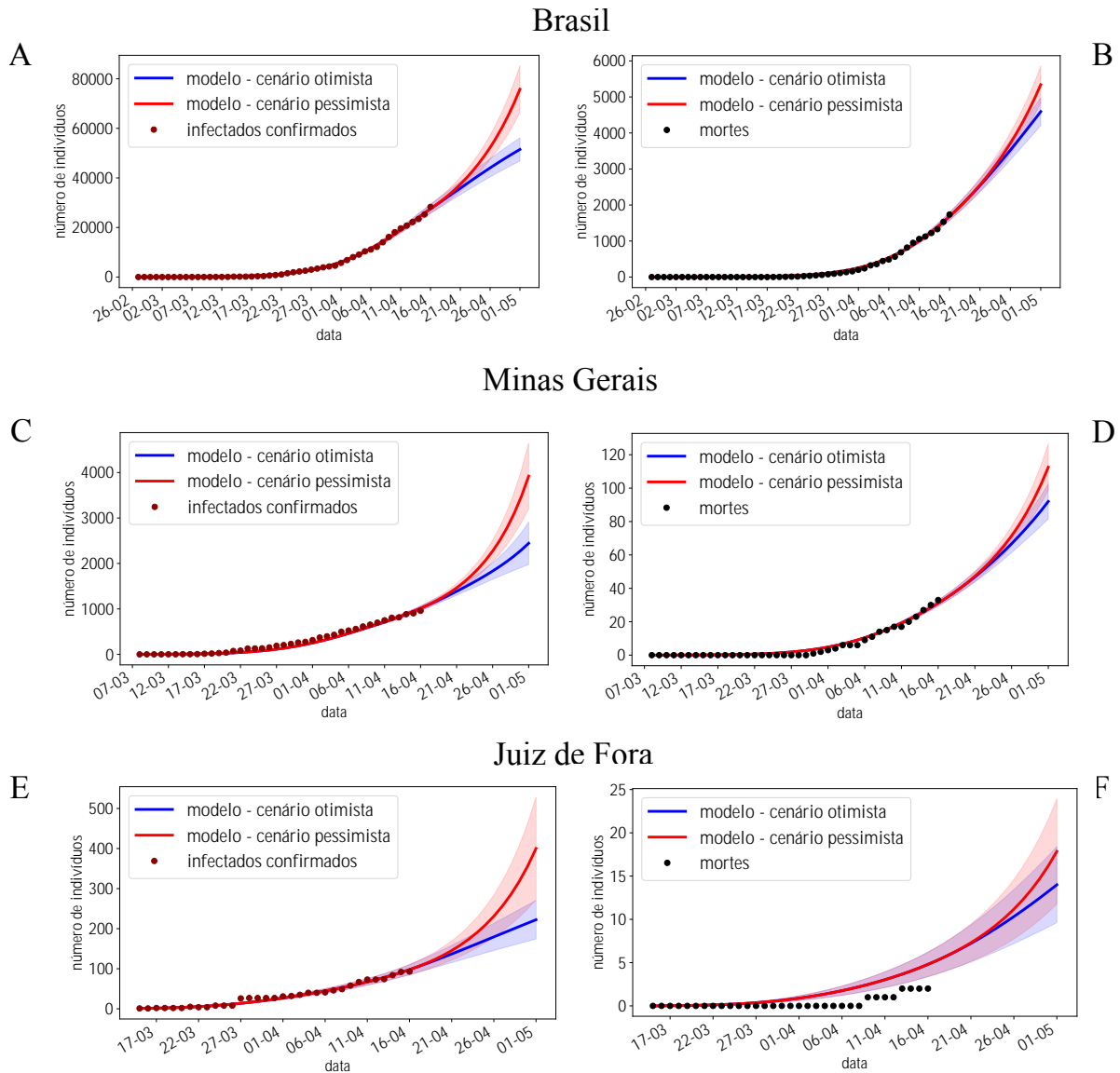


Figura 6: **Cenário Otimista e Cenário Pessimista.** Resultados das simulações para Brasil, Minas Gerais e Juiz de Fora, onde o modelo é ajustado usando os dados até o dia 15 de abril e então uma previsão é realizada para os próximos 15 dias usando cenários otimistas e pessimistas em relação ao isolamento social. O dia final corresponde ao dia 1º de maio. São apresentados o número de casos confirmados (C), painéis A, C e E, e óbitos (O), painéis B, D e F, ao longo dos dias. As linhas sólidas indicam o valor médio, regiões hachuradas o desvio padrão (DP) dos resultados das simulações, enquanto os pontos são os dados disponíveis até o momento.

experimentaram a falta de leitos de UTI, por exemplo a Itália [3, 20], apresentaram um aumento expressivo no número de óbitos, levando a escolhas difíceis, como a de qual paciente deveria receber os cuidados hospitalares ².

²Em colapso: a dramática situação dos hospitais da Itália na crise do coronavírus. Acesse: <https://noticias.uol.com.br/ultimas-noticias/bbc/2020/03/19/em-colapso-dramatica-situacao-dos-hospitais-da-italia-na-crise-do-coronavirus.htm>

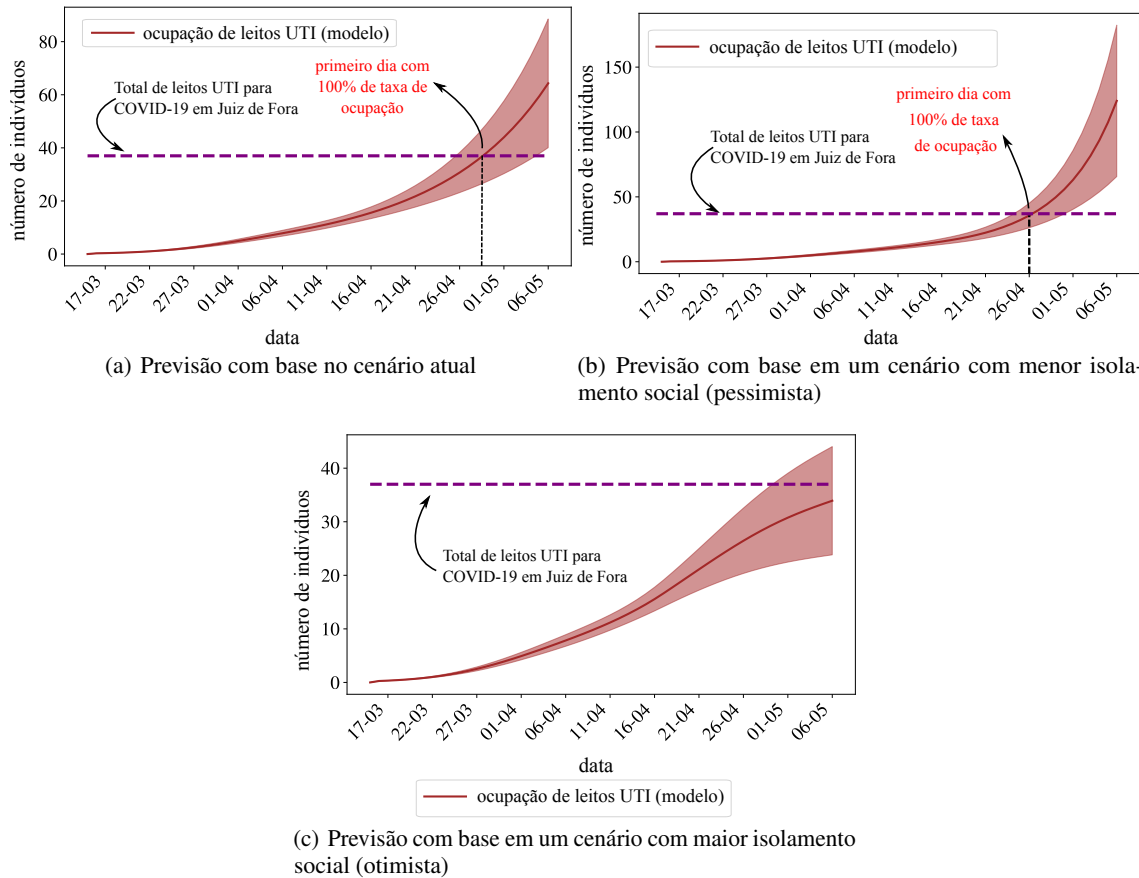


Figura 7: Resultados das simulações da demanda de leitos em UTI para Juiz de Fora para os próximos 20 dias considerando 3 cenários: (a) **Cenário Atual**. Apresenta uma projeção de demanda para leitos em UTIs baseada no cenário atual para a cidade de Juiz de Fora. (b) **Cenário pessimista**. Apresenta uma projeção de demanda para leitos em UTIs baseada em um cenário onde haja menor isolamento social (pessimista) para a cidade de Juiz de Fora. (c) **Cenário otimista**. Apresenta uma projeção de demanda para leitos em UTIs baseada em um cenário onde haja maior isolamento social (otimista) para a cidade de Juiz de Fora.

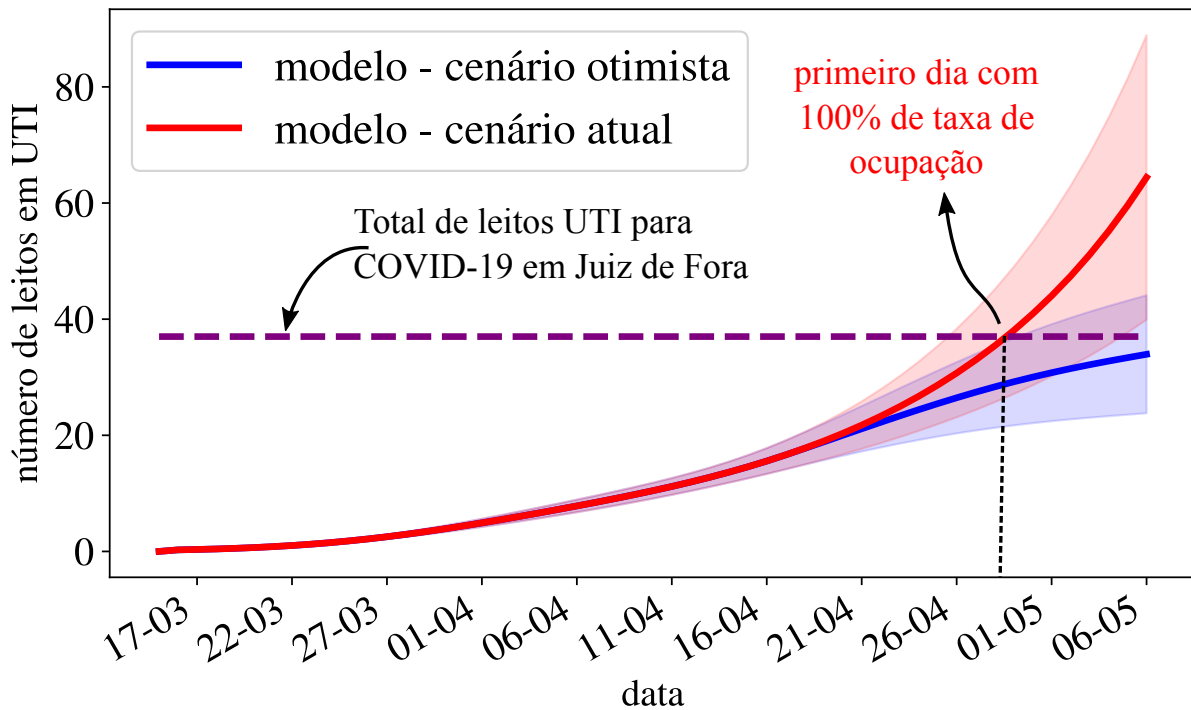


Figura 8: Resultados das simulações da demanda de leitos em UTI para Juiz de Fora para os próximos 20 dias considerando 2 cenários: **Cenário Atual**. Apresenta uma projeção de demanda para leitos em UTIs baseada no distanciamento social atual. **Cenário otimista**. A projeção para um cenário que considera uma política de distanciamento social mais restritiva durante os próximos 20 dias na cidade de Juiz de Fora. Apenas o último cenário não ultrapassa o número total de leitos de UTI para Coronavírus em Juiz de Fora (37 leitos) até o dia 6 de maio.

5 Conclusões

Apresentamos nessa nova Nota Técnica atualizações das caracterizações e projeções feitas para a pandemia de COVID-19 no Brasil, Minas Gerais e Juiz de Fora. Em uma breve análise comparamos as projeções feitas na Nota Técnica anterior, para o dia 7 de Abril com os dados obtidos, quando possível, para a mesma data ou datas próximas. Observamos que os valores notificados para infectados, óbitos, internações hospitalares em leitos simples e em leitos de UTI estavam dentro das faixas das previsões ou muito próximos destas, o que dá credibilidade ao método adotado.

Com relação aos novas simulações computacionais, podemos destacar os seguintes resultados:

Caracterização da Pandemia COVID-19 no Brasil, MG e JF:

Em 30 de março estimamos uma notificação de casos positivos no Brasil de apenas 8,1%. A nova estimativa continua próxima, 7,4%, o que sugere que existem 13 vezes mais casos de COVID-19 no Brasil do que os casos reportados.

Para MG e JF os valores encontrados foram semelhantes ao do Brasil, 9,1% e 8,1%, respectivamente. O maior desvio padrão encontrado foi para a estimativa de JF. Isto ocorre porque ainda existem poucos dados disponíveis para um ajuste mais preciso para a cidade de JF.

Observamos uma diminuição no fator de redução de contato entre indivíduos saudáveis e infectados, via políticas de distanciamento social. A estimativa de 30 de março sugeria que apenas 40% da população se encontrava isolamento social. A nova estimativa aponta para cerca de 60% da população em distanciamento social voluntário. Porém este número ainda está distante dos números de países que conseguiram controlar a pandemia, que fica entre 80% e 90%.

A estimativa de letalidade real para Brasil (diferente da calculada somente com os dados notificados) aumentou de 1,4% (previsão anterior) para 1,8%. Os valores estimados para MG e JF foram um pouco menores, 1,3% e 1,6%, respectivamente.

Projeções da Pandemia COVID-19 para 1º de Maio no Brasil, MG e JF:

Foram apresentados três cenários distintos com relação às medidas de isolamento social para os próximos 15 dias de projeção: a continuação do cenário atual, um cenário otimista e um cenário pessimista. No cenário otimista considerou-se o aumento do distanciamento social, e no pessimista a flexibilização do distanciamento social.

Tanto no cenário pessimista quanto no cenário atual, o crescimento de casos confirmados de COVID-19 não apresentou queda no número de novos casos por dia. Por outro lado, em um cenário otimista, onde medidas mais restritivas de circulação e isolamento social são adotadas, a curva de casos confirmados parece diminuir o crescimento, levando para uma tendência de estabilização.

A comparação entre as simulações usando o cenário pessimista e o otimista revelam diferenças quantitativas significantes. A diferença entre as duas projeções é de mais de 24 mil casos confirmados de COVID-19 no Brasil, 1.500 em MG e 200 em JF para o dia 1º de Maio. O mesmo ocorre para o número de óbitos. Este estudo sugere que uma política de isolamento mais restritiva e eficaz pode salvar mil pessoas no Brasil nas próximas duas semanas. Estes resultados corroboram com outros estudos nacionais e internacionais que sugerem que políticas de distanciamento social são essenciais para o controle da pandemia de COVID-19.

Projeções do uso de leitos de UTI em Juiz de Fora

Os modelos foram ajustados para reproduzir os dados recentemente divulgados sobre a taxa de ocupação de leitos de UTI para COVID-19 em Juiz de Fora. No dia 15 de abril, foi divulgado que dos 37 leitos específicos para tratamento de coronavírus, 16 estavam ocupados.

Novamente, foram apresentados três cenários distintos com relação às medidas de isolamento social para os próximos 20 dias de projeção: a continuação do cenário atual, um cenário otimista e um cenário pessimista. No cenário otimista considerou-se o aumento do distanciamento social, e no pessimista a flexibilização do distanciamento social.

No cenário atual, a taxa de ocupação de leitos UTI para COVID-19 em JF deve chegar a 100% na última semana do mês de abril, com uma incerteza de cerca de 6 dias. No cenário pessimista, onde ocorre a flexibilização do distanciamento social, a taxa de ocupação de leitos UTI para COVID-19 em JF deve chegar a 100% no dia 26 de abril, com uma incerteza de cerca de 4 dias. Apenas no cenário otimista, onde o distanciamento social é mais restritivo a partir da data de hoje, não observamos a saturação dos de leitos UTI para COVID-19 em JF, até o dia final desta projeção, dia 6 de maio.

Portanto, para evitar uma situação onde há falta de leitos UTI específicos para COVID-19 em JF, os resultados das simulações computacionais sugerem duas soluções que poderiam ser implementadas em paralelo nas próximas semanas: políticas mais restritivas de distanciamento social e o aumento do número total de leitos UTI para COVID-19 em JF.

Como todo modelo computacional, os aqui apresentados também possuem limitações. Devem-se destacar a escassez e falta de qualidade dos dados, principalmente os referentes a internações hospitalares. A essa escassez aumenta as incertezas dos resultados obtidos. Outra limitação é que a população foi tratada de modo homogêneo, não sendo considerada a pirâmide populacional, cujo emprego poderia refinar os resultados, em especial os relativos ao uso de leitos e de óbitos. Também por conta da homogeneização, não foram diferenciados no modelo os chamados “superespalhadores”, pessoas que possuem uma maior rede de contato social e que, portanto, podem ser consideradas maiores disseminadores do vírus que causa a doença. Vale destacar, também, que as projeções de 10 dias realizadas na Nota Técnica 1 passaram para 15 e 20 dias, sendo assim é esperado que as incertezas também sejam maiores na projeções. Por fim, modelos determinísticos, como é o caso do modelo SIR proposto neste trabalho, podem superestimar os números de infectados, recuperados e óbitos, durante os períodos de confinamento social. Isto porque, durante o confinamento social o contato entre pessoas é reduzido. Dependendo do grau de redução do contato, um modelo estocástico poderia ser mais adequado na modelagem. A quantificação de incerteza adotada neste trabalho tenta reduzir este efeito.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos pesquisadores Guilherme Côrtes Fernandes, Thaiz Ruberti Schmal e Luis Paulo da Silva Barra e Rafael Sachetto Oliveira pelas discussões motivadoras.

A Apêndice

A.1 Modelo matemático

Com o intuito de responder às questões levantadas optou-se por um modelo matemático-computacional baseado em equações diferenciais ordinárias (EDOs) do tipo SIR, onde foram incluídas algumas modificações específicas.

As equações do modelo utilizado para este estudo são dadas por:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\alpha(t)}{N}SI, \quad (2)$$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{\alpha(t)}{N}SI + f(t) - \beta I - \gamma I, \quad (3)$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I, \quad (4)$$

$$\frac{dO}{dt} = \beta I, \quad (5)$$

$$I_n = \theta I, \quad (6)$$

Os parâmetros do modelo são detalhados a seguir:

$\frac{\alpha(t)}{N} = a(t)b/N$ representa a taxa com a qual um indivíduo suscetível se torna infectado; sendo que $a(t)$ representa a probabilidade de contato e b é a taxa de infecção. Como a probabilidade de contato $a(t)$ pode variar dependendo da adoção de políticas de contenção do espalhamento do vírus, este é representado como uma função do tempo, dada por:

$$a(t) = \begin{cases} \geq 1 & t < t_i \\ \frac{1-r}{t_i-t_f}(t-t_i) + 1 & t_i \leq t \leq t_f \\ \geq r & \text{c. c.} \end{cases} \quad (7)$$

Essa é uma abordagem simples que assume que as políticas de contenção começam a ser adotadas em t_i , e no tempo final (t_f) a mesma consegue reduzir a probabilidade de contato em $r\%$.

$\beta = m(1/\tau_o)$ representa a taxa de mortalidade dos indivíduos infectados, onde m é a taxa de mortalidade e τ_o o número de dias da infecção até o óbito.

$\tau_o = \tau_1 + \tau_2$, onde τ_1 é o tempo de incubação do vírus e τ_2 é o tempo entre o aparecimento dos primeiros sintomas e o óbito. De forma similar, $\tau_r = \tau_1 + \tau_3$, onde τ_3 é o tempo entre o aparecimento dos primeiros sintomas e a recuperação.

γ representa a taxa com que indivíduos infectados se recuperam, $\gamma = (1 - m)(1/\tau_r)$, onde τ_r é o número de dias da infecção até a recuperação.

$f(t) = eP(t)$ é um termo que representa o número de pessoas infectadas que entram na cidade. A hipótese considerada é que pode-se representar esse termo pelo produto de uma função $P(t)$ do número de pessoas infectadas no mundo por uma taxa e de movimentação. Essa taxa pode ser modificada para representar as políticas de restrição.

θ representa o percentual de pessoas infectadas e notificadas.

Para estimar o número necessário de leitos para casos com necessidade de hospitalização e de atendimento intensivo, assume-se que esse valor pode ser derivado a partir da população infectada notificada (I_n) e do percentual dessa população que apresenta complicações severas (c) ou graves (h). Assim, o número de leitos em hospitais é dado pelo número de infectados hospitalizados, IH , e o número de leitos em CTIs, IC , onde:

$$IH(t) = hI_n(t - \theta\tau_1), \quad (8)$$

$$IC(t) = cI_n(t - \theta\tau_1). \quad (9)$$

Também foi assumido que o tempo notificado entre o contágio e o aparecimento dos primeiros sintomas na população notificada também é proporcional ao percentual de notificação, ou seja, igual a $\theta\tau_1$.

Para mais detalhes, consulte a NT01 [13].

A.2 Parâmetros

Para a calibração dos parâmetros do modelo foram utilizados dados reportados na literatura a respeito da COVID-19, como apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Dados utilizados para a calibração dos parâmetros do modelo de COVID-19 utilizado.

Parâmetro	Descrição (Unidade)	Intervalo	Ref.
b	Taxa de infecção (1/dia)	$[5, 5 \cdot 10^9, 1, 0 \cdot 10^7]$	[9]
θ	Percentual de casos infectados notificados (-)	$[0, 1]$	-
r	Fator de redução do contato (-)	$[0, 1]$	-
t_i	Início da política de contenção (dia)	$[0, t_f - 14]^3$	-
Δ	Duração da política de contenção (dia)	$[2, 30]$	-
m	Taxa de mortalidade (-)	$[1\%, 3, 4\%]$	[18]
τ_1	Período de incubação (dia)	$[2, 14]$	[17]
τ_2	Tempo dos sintomas ao óbito (dia)	$[6, 22]$	[19]
τ_3	Tempo dos sintomas à recuperação (dia)	$[7, 17]$	[19]
e	Taxa de migração / políticas de restrição (-)	$[0, 1, 0 \cdot 10^{-3}]$	-

Referências

- [1] AGÊNCIA MINAS, *Situação da pandemia covid-19 em minas gerais é atualizada em coletiva de imprensa virtual*. <http://agenciaminas.mg.gov.br/noticia/situacao-da-pandemia-covid-19-em-minas-gerais-e-atualizada-em-coletiva-de-imprensa-virtual>, 2020. Acessado em 17 de abril de 2020.
- [2] AMANDA BATISTA ET. AL., *Nota técnica 8 - 15/04/2020 - projeção de casos de infecção por COVID-19 no brasil até 24 de abril de 2020*, Tech. Rep. 8, Núcleo de Operações e Inteligência em Saúde, 4 2020.
- [3] B. ARMOCIDA, B. FORMENTI, S. USSAI, F. PALESTRA, AND E. MISSONI, *The italian health system and the covid-19 challenge*, The Lancet Public Health, (2020).
- [4] E. DONG, H. DU, AND L. GARDNER, *An interactive web-based dashboard to track COVID-19 in real time*, The Lancet infectious diseases, (2020).
- [5] ESTADO DE MINAS, *Decreto vai exigir uso de máscaras em juiz de fora*. https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2020/04/15/interna_gerais,1139090/decreto-vai-exigir-uso-de-mascaras-em-juiz-de-fora.shtml, 2020. Acessado em 17 de abril de 2020.
- [6] A. R. FEHR AND S. PERLMAN, *Coronaviruses: an overview of their replication and pathogenesis*, Methods in Molecular Biology (Clifton, N.J.), 1282 (2015), pp. 1–23.
- [7] J. FEINBERG AND H. P. LANGTANGEN, *Chaospy: An open source tool for designing methods of uncertainty quantification*, Journal of Computational Science, 11 (2015), pp. 46–57.
- [8] G1, *Brasil tem 14 mil pessoas que se recuperaram do novo coronavírus; 9,7 mil seguem internadas*. <https://g1.globo.com/bemestar/coronavirus/noticia/2020/04/15/brasil-tem-14-mil-pessoas-que-se-recuperaram-do-novo-coronavirus-97-mil-seguem-internados.ghtml>, 2020. Acessado em 17 de abril de 2020.
- [9] J. JIA, J. DING, S. LIU, G. LIAO, J. LI, B. DUAN, G. WANG, AND R. ZHANG, *Modeling the control of covid-19: Impact of policy interventions and meteorological factors*, 2020.
- [10] MINISTÉRIO DA SAÚDE, *Painel do surto de vírus COVID-19 no brasil*. <https://covid.saude.gov.br/>, 2020. Acessado em 17 de abril de 2020.
- [11] T. E. OLIPHANT, *Python for scientific computing*, Computing in Science & Engineering, 9 (2007), pp. 10–20.
- [12] PREFEITURA DE JUIZ DE FORA, *Informe epidemiológico coronavirus*. <https://www.pjf.mg.gov.br/jfcontracoronavirus/boletim.php>, 2020. Acessado em 15 de abril de 2020.

³O limite superior para t_i é 14 dias antes do fim da simulação.

- [13] R. F. REIS, B. D. M. QUINTELA, J. D. O. CAMPOS, J. M. GOMES, L. T. POMPEI, B. M. ROCHA, M. LOBOSCO, AND R. W. DOS SANTOS, *Nota técnica 01 – características da pandemia do covid-19 e o impacto das políticas de isolamento no brasil, minas gerais e juiz de fora*, Tech. Rep. 1, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de Juiz de Fora, 3 2020.
- [14] SES-MG, *Informe Epidemiológico Coronavírus 07/04/2020 j Secretaria de Estado de Saúde de Minas Gerais - SES*. <https://www.saude.mg.gov.br/component/gmg/story/12429-informe-epidemiologico-coronavirus-07-04-2020>, 2020. Acessado em 17 de abril de 2020.
- [15] ———, *Informe Epidemiológico Coronavírus 17/04/2020 j Secretaria de Estado de Saúde de Minas Gerais - SES*, 2020. Acessado em 17 de abril de 2020.
- [16] R. STORN AND K. PRICE, *Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces*, Journal of global optimization, 11 (1997), pp. 341–359.
- [17] H. WANG, Z. WANG, Y. DONG, R. CHANG, C. XU, X. YU, S. ZHANG, L. TSAMLAK, M. SHANG, J. HUANG, ET AL., *Phase-adjusted estimation of the number of coronavirus disease 2019 cases in wuhan, china*, Cell Discovery, 6 (2020), pp. 1–8.
- [18] WORLD HEALTH ORGANIZATION, *Who director-general’s opening remarks at the media briefing on covid-19 - 3 march 2020*. <https://www.who.int/dg/speeches/detail/who-director-general-s-opening-remarks-at-the-media-briefing-on-covid-19---3-march-2020>, 2020. Acessado em 24 de março de 2020.
- [19] WORLDOMETERS.INFO, *Covid-19 coronavirus pandemic*. <https://www.worldometers.info/coronavirus/>, 2020. Acessado em 17 de abril de 2020.
- [20] ———, *Italy coronavirus*. <https://www.worldometers.info/coronavirus/country/italy/>, 2020. Acessado em 17 de abril de 2020.

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.