
NOTA TÉCNICA 03

IMPACTO DAS MUDANÇAS DE POLÍTICAS DE MITIGAÇÃO AO LONGO DO TEMPO: CARACTERIZAÇÃO E PROJEÇÕES PARA A PANDEMIA COVID-19 DO BRASIL, MINAS GERAIS, JUIZ DE FORA E SÃO JOÃO DEL-REI

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

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

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

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

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

ruyfreitas@ice.ufjf.br, sachetto@ufsj.edu.br, carolinaxavier@ufsj.edu.br
rodrigo.weber@ufjf.edu.br

17 de julho de 2020

1 Introdução

Até o dia 13 de julho de 2020, a doença provocada pelo novo Coronavírus (COVID-19) havia infectado mais de 13 milhões de pessoas em todo o mundo, representando mais de 574 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 a Coreia do Sul e a Alemanha. Outros, ainda estão enfrentando o auge da pandemia, como o Brasil e os Estados Unidos.

Até o momento, de acordo com os Boletins Epidemiológicos municipais e Estaduais do dia 13 de julho de 2020, Juiz de Fora possui 2654 casos confirmados e 83 registros de óbitos, São João del-Rei possui 301 casos confirmados e 8 registros de óbito, enquanto o Estado de Minas Gerais possui 76822 casos confirmados e 1615 registros de óbito [9]. Até o momento o país contabiliza um total de 1.884.967 infectados e 72.833 mortes, conforme relatado pelas secretarias estaduais de saúde [5].

Até o dia 12 de julho, dos 853 municípios mineiros, 743 já tiveram ao menos um caso do novo coronavírus. Isso representa mais de 87% do total de cidades no estado. O município com mais casos da doença é Belo Horizonte, com 10.618 casos, com 249 mortes. Em seguida, aparecem Uberlândia (9161), com 139 mortes, Ipatinga (6.630), com 58 mortes, Juiz de Fora (2.579), com 70 mortes e Governador Valadares (2.217), com 55 mortes. Na primeira nota publicada [7], Nova Lima era a segunda cidade com maior número casos, na segunda nota [8] Juiz de Fora era a segunda cidade com mais casos confirmados no estado (82), seguida de Uberlândia (62), Nova Lima (45) e Divinópolis (35). Até a data desta nota, Uberlândia se tornou o segundo município com mais casos confirmados no estado de Minas Gerais. A Figura 1 mostra as 5 cidades com mais casos em MG, além da cidade de São João del-rei.

A Figura 2 apresenta o relato de casos confirmados em Juiz de Fora por parte da Prefeitura de Juiz de Fora. Podemos perceber um crescimento do número de casos confirmados desde março. Já na Figura 3, temos os casos confirmados, de forma acumulada e diária, relatados pela Prefeitura de São João del-Rei, mostrando um aumento de casos principalmente a partir do mês de maio. A Figura 4 apresenta a progressão do número de notificações, confirmações e óbitos, de forma acumulada e por dia, para o estado de Minas Gerais. Assim como discutido nas Nota Técnicas

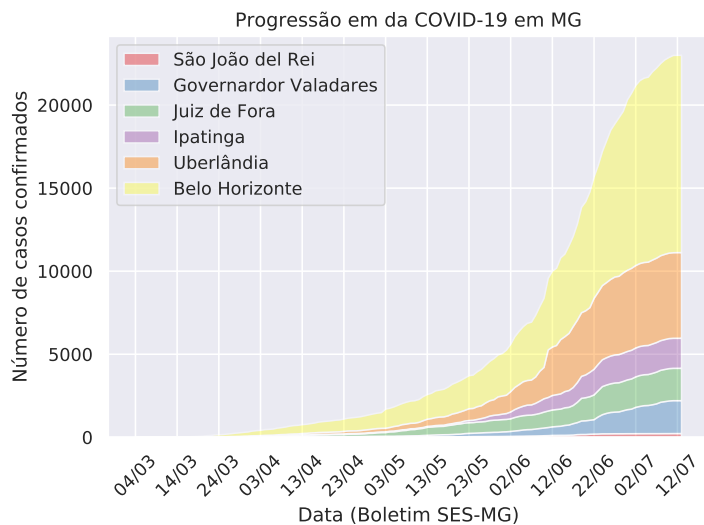


Figura 1: Progressão do número confirmações em 6 cidades no estado de Minas Gerais conforme dados da Secretaria de Estado de Saúde de Minas Gerais (SES-MG).

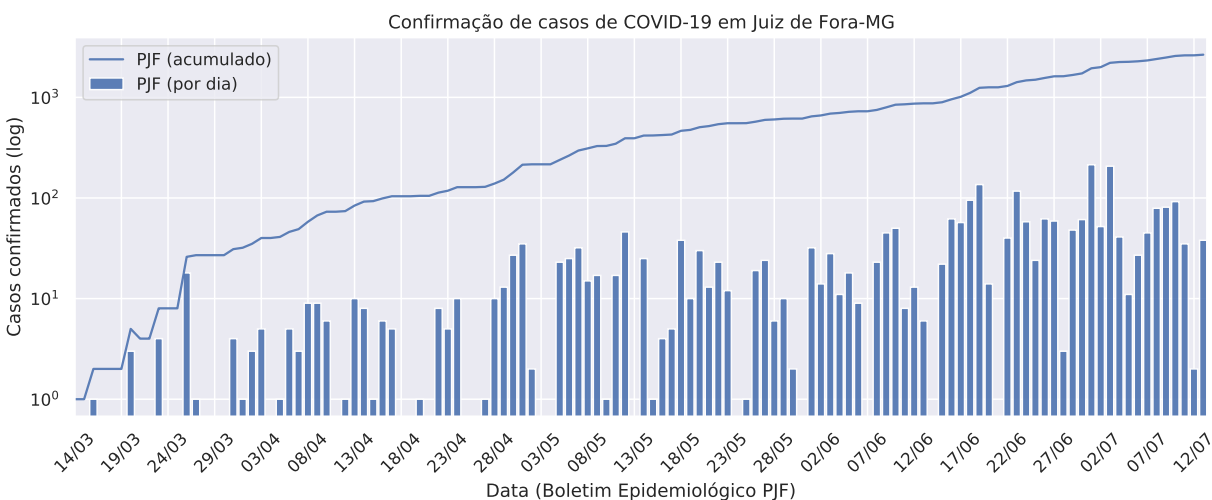


Figura 2: Progressão do número de casos confirmados (acumulados e diários) na cidade de Juiz de Fora conforme informações da Prefeitura de Juiz de Fora (PJJF).

01 [7] e 02 [8], 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.

Nesta nova nota técnica, utilizamos o modelo matemático apresentado anteriormente [7] 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, Juiz de Fora e São João del-Rei.

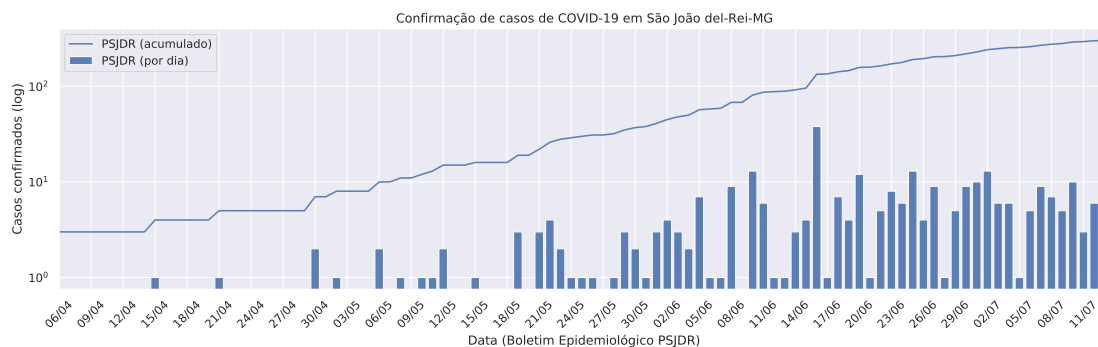


Figura 3: Progressão do número de casos confirmados (acumulados e diários) na cidade de São João del-Rei conforme informações da Prefeitura de São João del-Rei (PSJDR).

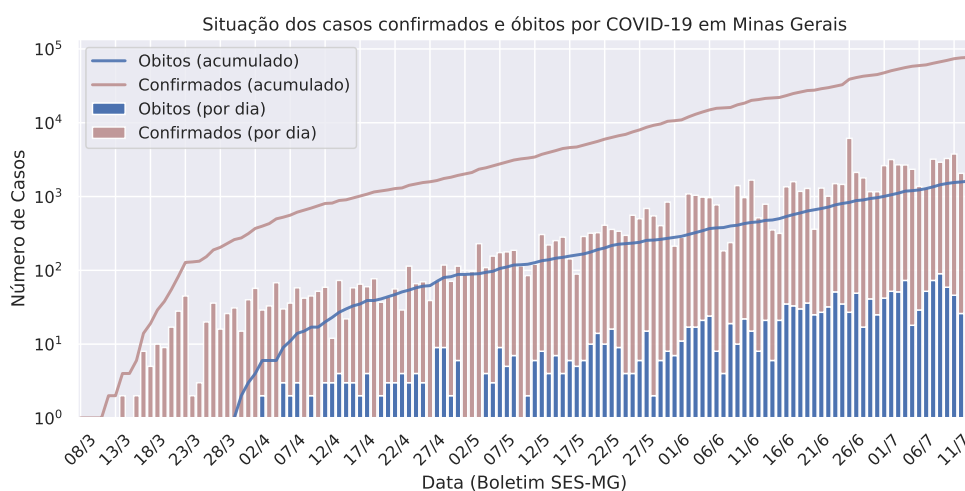


Figura 4: Progressão do número confirmações e óbitos no estado de Minas Gerais conforme dados da Secretaria de Estado de Saúde de Minas Gerais (SES-MG). Este é apresentado em escala logarítmica.

2 Análise das projeções anteriores

No dia 18 de abril, foi divulgada a segunda nota técnica (NT02) [8] com a caracterização da pandemia COVID-19 no Brasil, MG e JF e projeções sobre o avanço da pandemia até o dia 1 de maio, além de projeções sobre o uso de leito de tratamento intensivo em JF, até o dia 06 de maio. Aqui fazemos uma breve análise dos resultados anteriores.

A Tabela 1 compara as projeções feitas para o dia 1 de maio com os dados obtidos, quando possível, para a mesma data ou datas próximas. Observamos que os valores notificados para infectados (I), óbitos (O) e em leitos de UTI (IC) (somente para JF) estão dentro das faixas das previsões ou próximos. Para os dados de infectados do Brasil, o modelo subestimou o número de infectados (entre 68.675 e 85.213 no modelo e 92.109 nos dados).

Tabela 1: Comparação entre as projeções da Nota 2 para Brasil, MG e JF, e os dados obtidos, quando possível, para a mesma data do dia 1 de maio. *I* e *O* representam o número de infectados e mortes, respectivamente. *IC* é o número de leitos em UTIs ocupados por pacientes com coronavírus.

	Brasil		Minas Gerais		Juiz de Fora	
	Modelo	Dado	Modelo	Dado	Modelo	Dado
I	(66.362 – 85.213)	92.109 [13]	(1.976 – 2.913)	1.935 [10]	(175 – 270)	214 [6]
O	(4.830 – 5.852)	6.410 [13]	(82 – 103)	88 [10]	(10 – 14)	6 [6]
IC	—	—	—	—	(26 – 49)	31 [6]

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 nas NT01 [7] e NT02 [8].

Em resumo, o modelo considera as variáveis S , I , R , O , I_n e R_n 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.

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 [7] e os dados reportados na literatura [1, 2, 4, 5, 11, 13]. Os valores e os intervalos utilizados para o ajuste dos parâmetros são apresentados na Tabela 8.

Os parâmetros do modelo foram ajustados utilizando o método da Evolução Diferencial (ED) implementado na linguagem de programação C. O algoritmo foi utilizado para estimar cada um dos parâmetros do modelo proposto, respeitando os limites estabelecidos na Tabela 8, os quais correspondem a dados oficiais da pandemia em cada um dos países considerados. O ajuste foi feito considerando os dados de infectados confirmados (infectados acumulados), infectados ativos, recuperados e óbitos representados por $\hat{C}(t)$ e $\hat{I}(t)$, $\hat{R}(t)$ e $\hat{O}(t)$, respectivamente. Para isso, a seguinte função objetivo foi usada para minimizar o erro relativo entre os dados e o modelo:

$$\min_p \left(p_c \times \|C(t, p) - \hat{C}(t)\|_1 / \|\hat{C}(t)\|_1 + p_i \times \|I(t, p) - \hat{I}(t)\|_1 / \|\hat{I}(t)\|_1 + \right. \\ \left. + p_r \times \|R(t, p) - \hat{R}(t)\|_1 / \|\hat{R}(t)\|_1 + p_o \times \|O(t, p) - \hat{O}(t)\|_1 / \|\hat{O}(t)\|_1 \right) \quad (1)$$

onde p é o conjunto de parâmetros do modelo a ser estimado e p_* é um peso que pode ser multiplicado por cada parcela do erro.

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 [3].

A Tabela 8 (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, Juiz de Fora e São João del-Rei

Os valores dos parâmetros encontrados pelo ajuste, assim como pelo procedimento descrito anteriormente para caracterização das distribuições dos parâmetros, são apresentados na Tabela 2 para os casos de SJDR e MG.

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, 22) do que em SJDR (0, 11). A taxa de mortalidade, m , é maior em SJDR (1, 7%) do que em MG (1%).

O parâmetro r representa a redução da transmissão via políticas de distanciamento social. Para o MG e SJDR os valores encontrados para r estão em torno de 50% e 35%, respectivamente, ou seja um isolamento social de 50% e 65% para MG e SJDR, respectivamente.

O parâmetro θ modela o percentual de notificação de casos positivos COVID-19. Para MG e SJDR os valores encontrados foram 30% e 9%, respectivamente. Ou seja, os parâmetros indicam que o total acumulado de casos em SJDR é três vezes maior que o notificado, enquanto que esse valor em MG reflete que os total acumulado de casos é 10 vezes maior que o notificado.

Tabela 2: Caracterização da pandemia de COVID-19 em termos dos parâmetros do modelo para SJDR e MG: 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 θ casos infectados notificados.

Parâmetro	SJDR		MG	
	Média	DP	Média	DP
b	0,11	0,0013	0,22	0,0064
r	0,35	0,034	0,52	0,0094
t_i	29,60	2,12	38,16	1,93
Δ	58,30	2,00	5,11	6,05
θ	0,35	0,054	0,089	0,0079
τ_1	15,47	0,67	6,57	0,98
τ_2	13,14	3,93	38,65	1,59
τ_3	25,89	0,73	8,15	1,07
m	0,017	0,00145	0,01	0,00053

Para o Brasil e JF não conseguimos ajustar o modelo inicialmente proposto a todos os dados. Analisando essa discrepância, observamos a existência de ao menos duas dinâmicas diferentes, tanto no Brasil quanto em JF. Assim, para realizarmos o ajuste para JF e Brasil, tivemos que dividir o ajuste em 2 partes. Para ajustarmos os dados para o Brasil, realizamos uma primeira simulação, levando em consideração somente os 70 dias iniciais. Após este primeiro ajuste, restringimos o valor do parâmetro b no segundo ajuste para $b_{ajuste1} * r_{ajuste1}$. Assim, garantimos uma continuidade entre o ajuste da primeira e da segunda dinâmica. Essa mesma abordagem foi adotada para ajustarmos os dados de JF, utilizando 85 dias para o primeiro ajuste. Esta técnica foi necessária pois a dinâmica da pandemia, tanto em JF como no Brasil, sofreu uma mudança significativa, fazendo com que o modelo falhasse em ajustar os dados de maneira satisfatória.

As Tabelas 3 e 4, mostram os parâmetros estimados para as duas partes em JF e Brasil, respectivamente. Analisando os resultados de JF apresentados na Tabelas 3, observamos que a grande diferença entre a primeira fase e a segunda fase está no parâmetro r , o parâmetro que modela o isolamento social. Observamos que da primeira para a segunda fase, ocorreu uma flexibilização do isolamento. A taxa de transmissão efetiva, dada por $b * r$ sofreu um aumento de 65%. Isso explica a diferença entre a curva mais achatada da primeira fase e a curva com crescimento exponencial da segunda fase.

Analisando os resultados do Brasil apresentados na Tabelas 4, observamos que a grande diferença entre a primeira fase e a segunda fase está no parâmetro θ , o parâmetro que modela a notificação de infectados. Observamos que da primeira para a segunda fase a notificação aumentou no Brasil de 8% para 16%. Ou seja, a notificação de infectados dobrou. Além dessa diferença, observamos também uma diminuição de 30% na taxa de transmissão efetiva, dada por $b * r$, entre a primeira e segunda fase.

Tabela 3: Caracterização da pandemia de COVID-19 em termos dos parâmetros do modelo para Juiz de Fora (mostrando os parâmetros de cada parte do ajuste): 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 θ casos infectados notificados.

Parâmetro	JF parte 1		JF parte 2	
	Média	DP	Média	DP
b	0,20	0,006	0,052	0,0018
r	0,25	0,011	1,65	0,092
t_i	1,90	3,49	0,043	0,28
Δ	68,21	4,15	2,1	0,8
θ	0,11	0,01	0,12	0,021
τ_1	8,34	3,21	14,7	1,66
τ_2	18,03	4,46	39,03	2,88
τ_3	13,32	3,22	15,15	1,53
m	0,013	0,0007	0,01	0,00057

Tabela 4: Caracterização da pandemia de COVID-19 em termos dos parâmetros do modelo para o Brasil (mostrando os parâmetros de cada parte do ajuste): 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 θ casos infectados notificados.

Parâmetro	Brasil parte 1		Brasil parte 2	
	Média	DP	Média	DP
b	0,23	0,012	0,11	0,0059
r	0,48	0,026	0,7	0,055
t_i	18,07	2,22	5,15	3,6
Δ	4,23	2,71	5,16	6,9
θ	0,079	0,014	0,166	0,029
τ_1	7,28	3,013	5,9	2,19
τ_2	27,62	6,62	23,02	6,88
τ_3	13,3	3,04	11,01	2,22
m	0,022	0,0046	0,013	0,0025

4.2 Projeções para Brasil, Minas Gerais, Juiz de Fora e São João del-Rei

Com os modelos ajustados, pode-se usá-los para analisar diferentes cenários quanto a evolução da pandemia para dias futuros. Assim como na NT02 [8], nesta nota técnica, avaliamos três diferentes cenários:

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 $0.5r$, onde r possui o valor estimado e usado no Cenário Atual (Figura 5a). 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 $1.5r$, onde r possui o valor estimado e usado no Cenário Atual (Figura 5b). Este cenário, portanto, simula uma flexibilização do isolamento social.

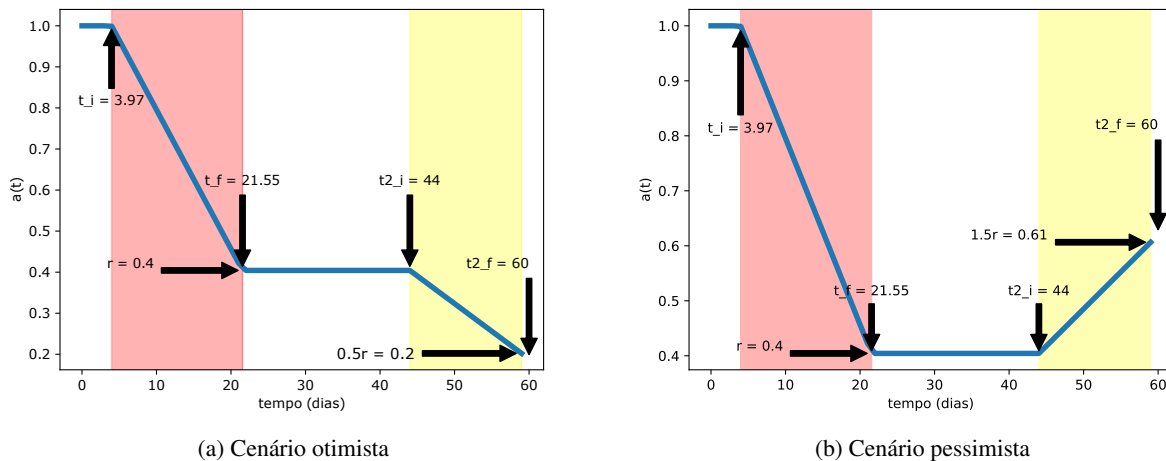


Figura 5: Exemplo de função $a(t)$ que modela a modificação da probabilidade de contato entre pessoas ao longo do tempo. Nesse exemplo, apresentamos duas fases. Na fase inicial, a política de contenção é implementada entre os tempos t_i e t_f , e reduz a probabilidade de contato por um fator r . Essa 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).

As Figuras 6-9 apresentam os resultados das projeções para o Brasil (BR), Minas Gerais (MG), Juiz de Fora (JF) e São João del-Rei (SJDR), respectivamente, usando o **Cenário Atual**. Para cada tempo t , em dias, são apresentadas as distribuições correspondentes ao número de infectados, confirmados, recuperados e os óbitos obtidas pelo processo de propagação de incertezas. Nota-se 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 cidades de diferentes portes (Juiz de Fora e São João del-Rei). Além disso, a Tabela 5 apresenta as previsões para dia 28 de julho (Média e Intervalo de confiança para o último dia simulado) nos quatro locais simulados. Observamos aumentos significativos para o Brasil, Minas Gerais, Juiz de Fora e São João del-Rei tanto para o número de óbitos como para o total de casos confirmados com COVID-19.

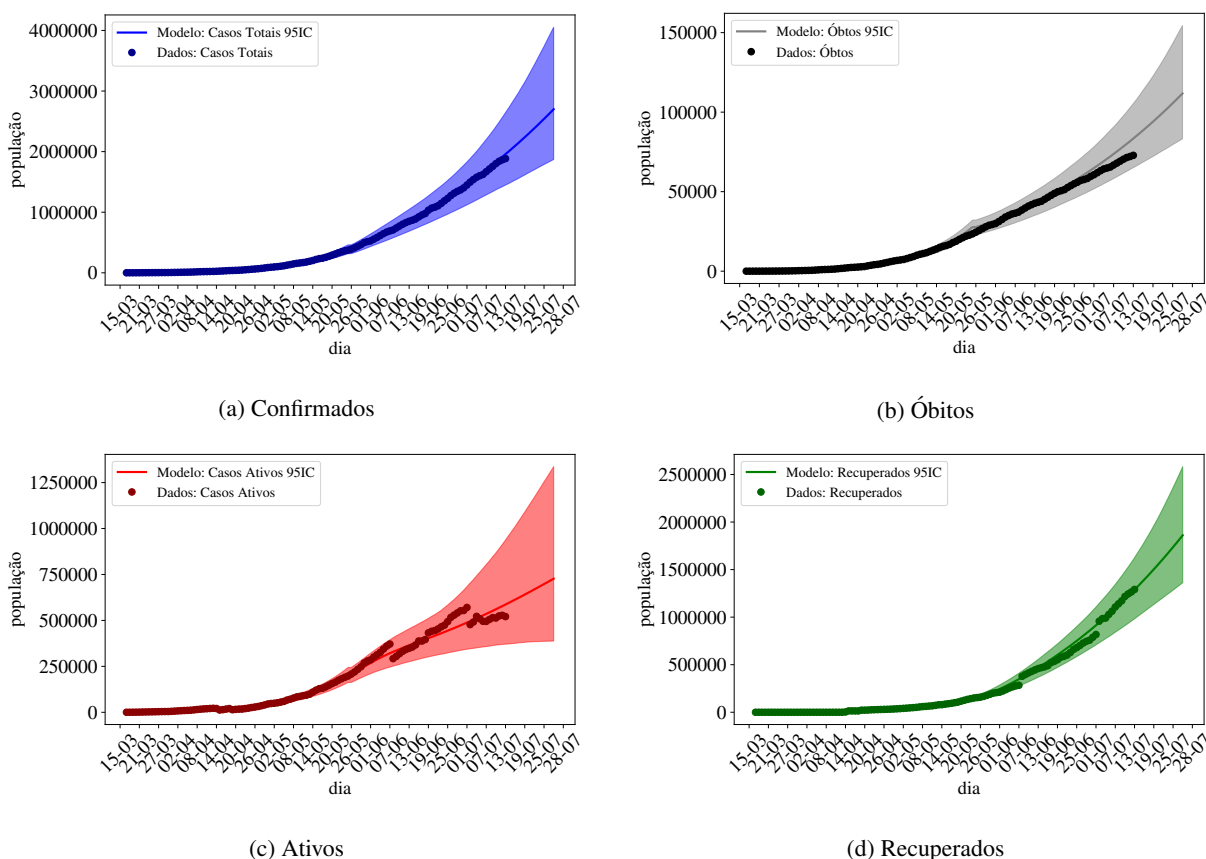


Figura 6: Projeções para o **Cenário Atual**. Resultado das simulações para o **Brasil**, onde o modelo é ajustado usando os dados até o dia 13 de julho e então uma previsão é realizada para os próximos 15 dias. O dia final corresponde ao dia 28 de julho. São apresentados o número de casos confirmados (C), óbitos (O), infectados ativos (I), e recuperados (R) ao longo dos dias. As linhas sólidas indicam o valor médio, regiões hachuradas o intervalo de confiança (IC) de 95% dos resultados das simulações, enquanto os pontos são os dados disponíveis até o momento.

Tabela 5: Resultado das previsões para Brasil, Minas Gerais, Juiz de Fora e São João del-Rei no dia 28 de julho para o **Cenário Atual** (Conf. representa o número de casos confirmados). Apresentamos a faixa de possíveis resultados considerando os valores para Média (M) e 95% de Intervalo de confiança (IC).

	BR		MG		JF		SJDR	
	M	IC	M	IC	M	IC	M	IC
Conf.	2699748	[1863518, 4030746]	159447	[132918, 196847]	5291	[4381, 6169]	422	[396, 453]
Óbitos	111617	[82954, 152263]	3692	[3106, 4647]	130	[114, 148]	14	[12, 16]

A Figura 10 apresenta o número de infectados para Brasil, Minas Gerais, Juiz de Fora e São João del-Rei, considerando o **Cenário Pessimista** e o **Cenário Otimista**. A Tabela 6 apresenta os resultados no dia 28 de julho (último dia simulado)

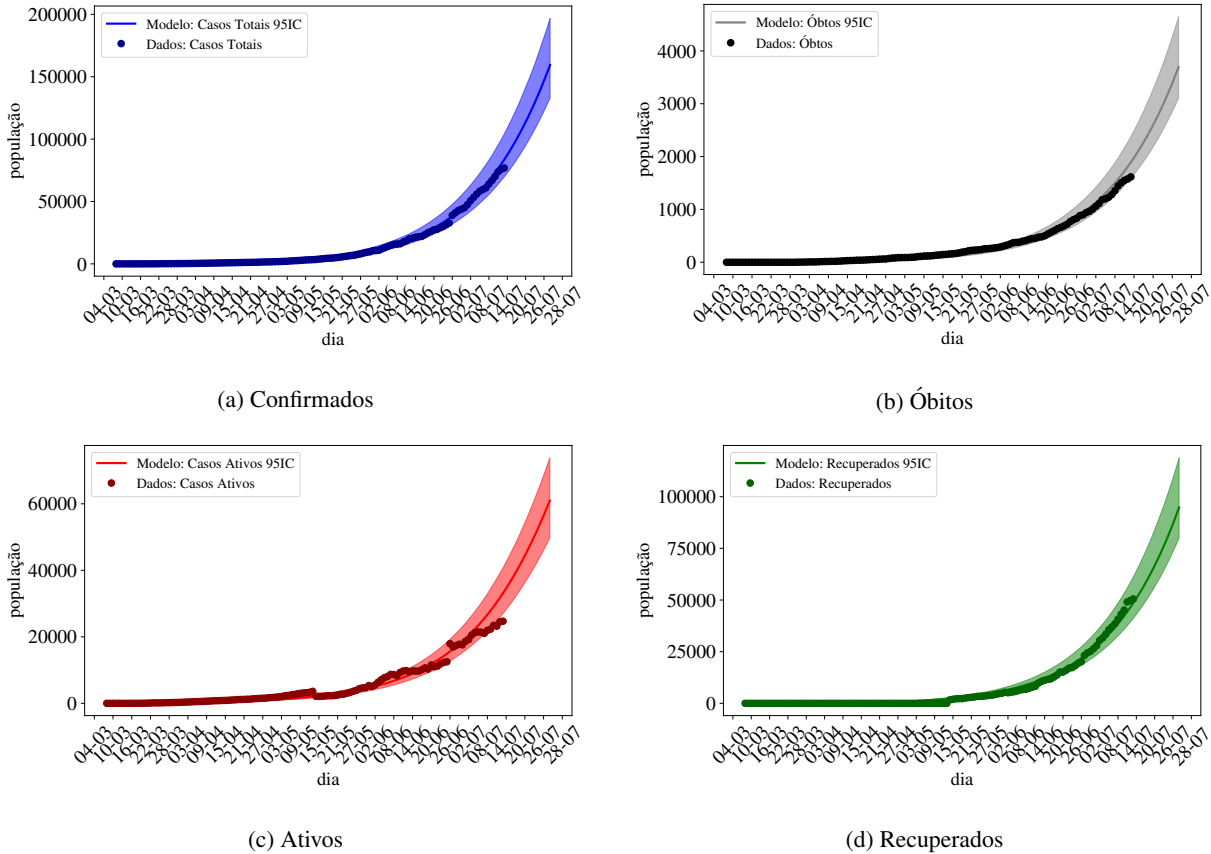


Figura 7: Projeções para o **Cenário Atual**. Resultado das simulações para **Minas Gerais**, onde o modelo é ajustado usando os dados até o dia 13 de julho e então uma previsão é realizada para os próximos 15 dias. O dia final corresponde ao dia 28 de julho. São apresentados o número de casos confirmados (C), óbitos (O), infectados ativos (I), e recuperados (R) ao longo dos dias. As linhas sólidas indicam o valor médio, regiões hachuradas o intervalo de confiança (IC) de 95% dos resultados das simulações, enquanto os pontos são os dados disponíveis até o momento.

para o **Cenário Otimista** e a Tabela 7 apresenta os mesmos resultados para **Cenário Pessimista**. É importante ressaltar que a evolução dos casos confirmados (nos Painéis 10a, 10b, 10c e 10d) mudou de uma tendência de crescimento para uma tendência de queda (BR, MG e SJDR) ou estabilização (JF) confirmando, mais uma vez [7, 8], **que o esforço pelo aumento do isolamento social é uma medida não farmacológica essencial para se controlar a disseminação descontrolada COVID-19 e evitar o colapso dos serviços de saúde do país**. A evolução dos óbitos (Figura 11) 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.

Tabela 6: Resultado das projeções para Brasil, Minas Gerais, Juiz de Fora e São João del-Rei no dia 28 de julho para o **Cenário Otimista** (Conf. representa o número de casos confirmados). Apresentamos a faixa de possíveis resultados considerando os valores para Média (M) e 95% de Intervalo de confiança (IC).

	BR		MG		JF		SJDR	
	M	IC	M	IC	M	IC	M	IC
Conf.	2358934	[1684693, 3373998]	120538	[100162, 148819]	4014	[3422, 4598]	375	[357, 396]
Óbitos	107416	[80503, 144525]	3280	[2761, 4112]	121	[107, 137]	13	[12, 15]

Se compararmos os resultados mostrados nas Tabelas 6 e 7 podemos observar claramente o impacto das medidas de isolamento social na evolução da pandemia. A diferença no número de casos confirmados entre os cenários **Otimista** e **Pessimista** é de mais de 800 mil no Brasil, 104 mil em MG, 4.014 em JF e 105 em SJDR respectivamente. O mesmo

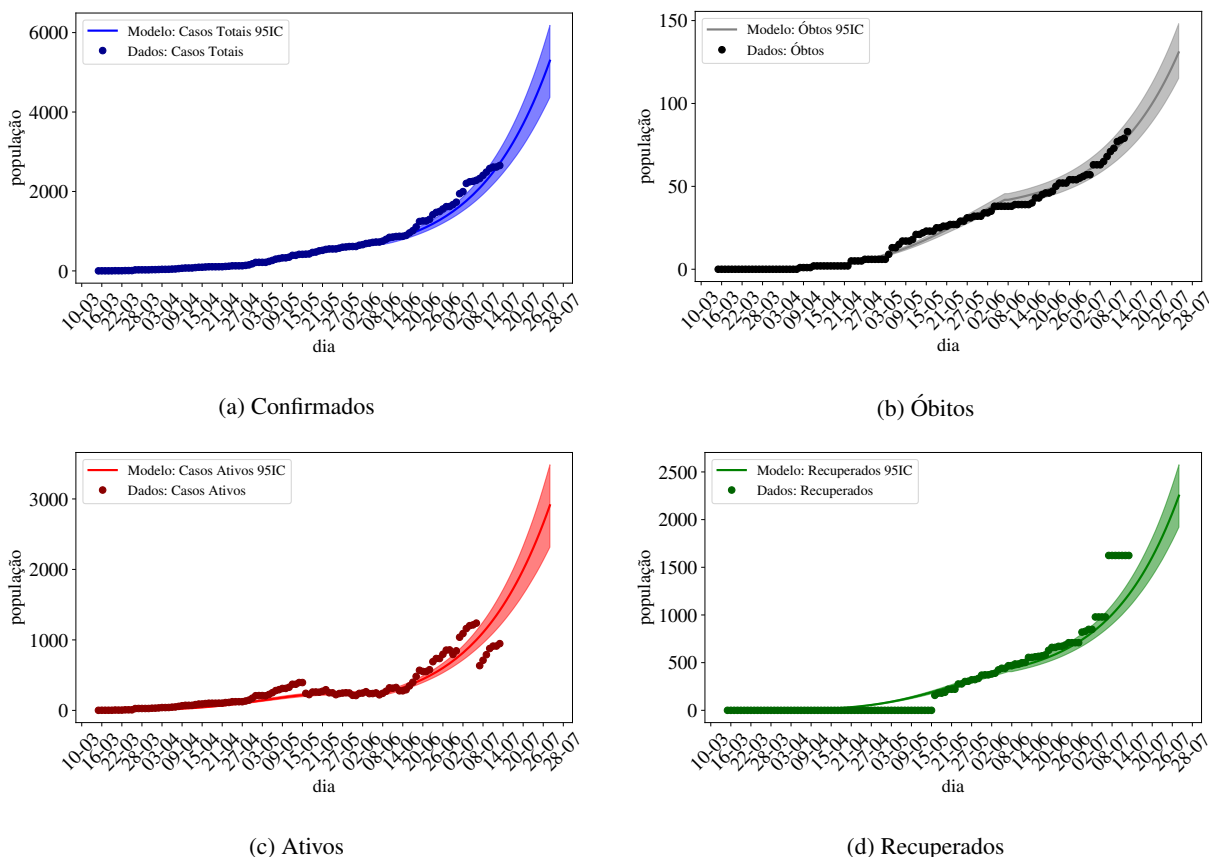


Figura 8: Projeções para o **Cenário Atual**. Resultado das simulações para **Juiz de Fora**, onde o modelo é ajustado usando os dados até o dia 13 de julho e então uma previsão é realizada para os próximos 15 dias. O dia final corresponde ao dia 28 de julho. São apresentados o número de casos confirmados (C), óbitos (O), infectados ativos (I), e recuperados (R) ao longo dos dias. As linhas sólidas indicam o valor médio, regiões hachuradas o intervalo de confiança (IC) de 95% dos resultados das simulações, enquanto os pontos são os dados disponíveis até o momento.

Tabela 7: Resultado das projeções para Brasil, Minas Gerais, Juiz de Fora e São João del-Rei no dia 28 de julho para o **Cenário Pessimista** (Conf. representa o número de casos confirmados). Apresentamos a faixa de possíveis resultados considerando os valores para Média (M) e 95% de Intervalo de confiança (IC).

	BR		MG		JF		SJDR	
	M	IC	M	IC	M	IC	M	IC
Conf.	3187824	[2093361, 4981002]	224941	[189100, 274538]	7213	[5832, 8586]	480	[439, 530]
Óbitos	117266	[855742, 163984]	4302	[3648, 5406]	143	[126, 162]	13	[14, 15]

ocorre para o número de óbitos. De acordo com os resultados do modelo, uma política de isolamento mais restritiva e eficaz pode salvar **quase quatro mil** pessoas no Brasil nas próximas duas semanas.

5 Conclusões

Apresentamos nessa nova Nota Técnica atualizações das caracterizações e projeções feitas para a pandemia de COVID-19 no Brasil, Minas Gerais, Juiz de Fora e São João del-Rei. Comparamos as projeções feitas na Nota Técnica anterior, para o dia 1 de maio 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.

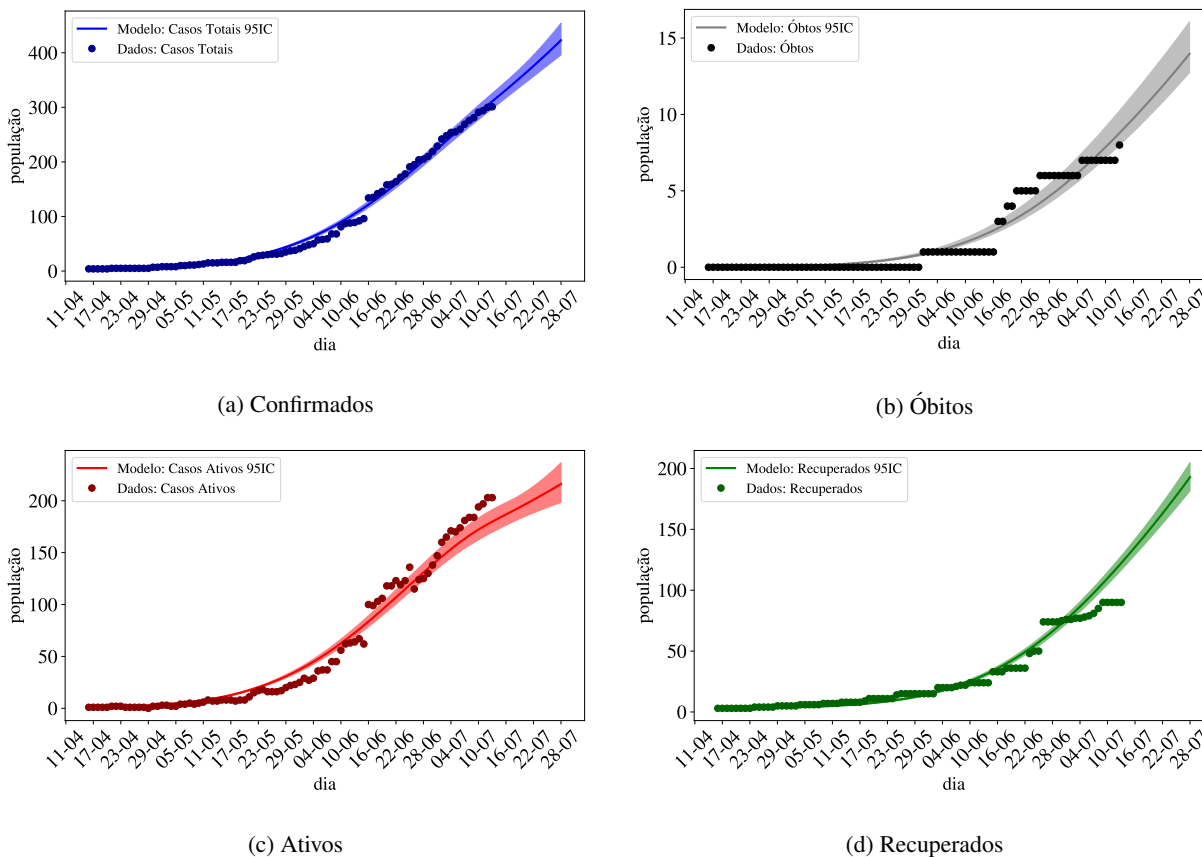


Figura 9: Projeções para o **Cenário Atual**. Resultado das simulações para **São João del-Rei**, onde o modelo é ajustado usando os dados até o dia 13 de julho e então uma previsão é realizada para os próximos 15 dias. O dia final corresponde ao dia 28 de julho. São apresentados o número de casos confirmados (C), óbitos (O), infectados ativos (I), e recuperados (R) ao longo dos dias. As linhas sólidas indicam o valor médio, regiões hachuradas o intervalo de confiança (IC) de 95% dos resultados das simulações, enquanto os pontos são os dados disponíveis até o momento.

Com relação as novas simulações computacionais sobre a caracterização da Pandemia COVID-19 no Brasil, MG, JF e SJDR, podemos destacar os seguintes resultados:

- Em 18 de abril estimamos uma notificação de casos positivos no Brasil de apenas 7,4%. A nova estimativa (16,6%), sugere, conforme o esperado, que houve um aumento nas notificações, uma vez que houve um aumento do número de testes por milhão de habitantes. Porém, o modelo ainda indica que existem 6 vezes mais casos de COVID-19 no Brasil do que os casos reportados.
- Em 18 de abril estimamos uma notificação de casos positivos para o estado de Minas Gerais eram de 9,15%. A nova estimativa (8,9%), sugere que o estado manteve a taxa de notificação e não acompanhou o aumento da notificação observado no país.
- Em 18 de abril estimamos uma notificação de casos positivos para Juiz de Fora de apenas 8,08%. A nova estimativa (12%) sugere o aumento de quatro pontos percentuais da taxa de notificação na cidade.
- Em São João del-Rei a taxa de notificação observada foi de 30% um valor superior a média nacional. Não foram feitas estimativas para esta cidade na última nota técnica para fins de comparar a evolução. Vale destacar que, como verificado anteriormente, há uma correlação grande entre a taxa de notificação e a taxa de mortalidade. Essa correlação pode ter influenciado também essa estimativa.
- Observamos uma diminuição no fator de redução de contato via políticas de distanciamento social em MG. A estimativa de 18 de abril sugeria que 60% da população se encontrava isolamento social. A nova estimativa aponta para cerca de 48% da população em distanciamento social voluntário, nos afastando ainda mais dos números encontrados em países que conseguiram controlar a pandemia, que fica entre 75% e 90%.

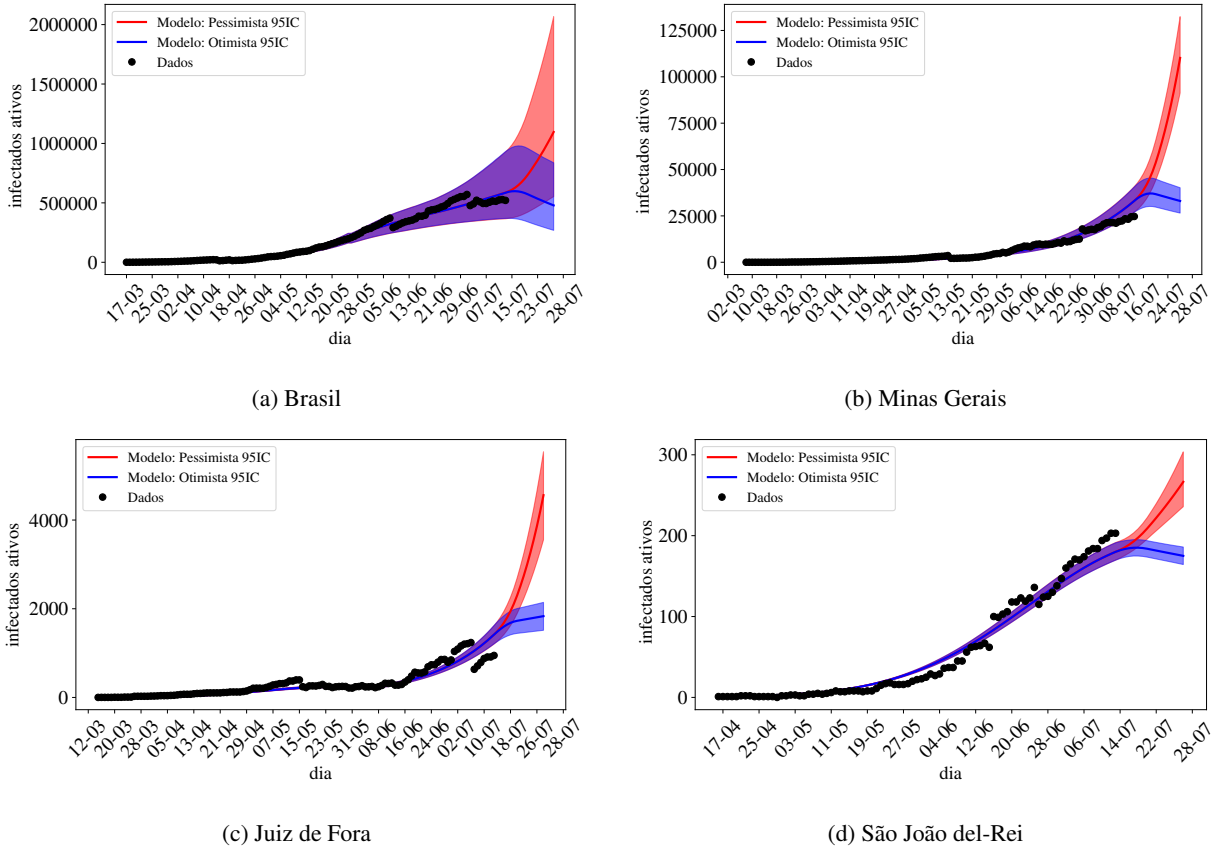


Figura 10: **Cenário Otimista e Cenário Pessimista.** Resultados das simulações para Brasil, Minas Gerais e Juiz de Fora, onde o modelo é ajustado usando os dados até o dia 13 de julho e então uma previsão é realizada para os próximos 15 dias usando cenários otimistas e pessimistas em relação ao isolamento social. O dia final corresponde ao dia 28 de julho. São apresentados o número **infectados ativos (I)** ao longo dos dias. As linhas sólidas indicam o valor médio, regiões hachuradas o intervalo de confiança (IC) de 95% dos resultados das simulações, enquanto os pontos são os dados disponíveis até o momento.

- O distanciamento social em SJDR foi estimado em 65%. Apesar de maior que a média de Minas Gerais, ainda não apresenta o valor ideal para controlar de forma eficiente a pandemia.
- A estimativa de letalidade real para Brasil (diferente da calculada somente com os dados notificados) diminuiu de 1,8% (previsão anterior) para 1,3% (provavelmente devido a alta nas notificações). Os valores estimados para MG e JF foram um pouco menores, 1,0% em ambos. Já para SJDR tivemos uma taxa de mortalidade média estimada em 1,7%.
- Em destaque, observamos pela primeira vez a necessidade de ajustar o modelo para duas fases distintas para conseguir reproduzir as dinâmicas observadas em Juiz de Fora e no Brasil.
- Analisando os resultados de JF observamos que a grande diferença entre a primeira fase e a segunda fase está no parâmetro r , o parâmetro que modela o isolamento social. Observamos que da primeira para a segunda fase, ocorreu uma flexibilização do isolamento. A taxa de transmissão efetiva, sofreu um aumento de 65%. Isso explica a diferença entre a curva mais achatada da primeira fase e a curva com crescimento exponencial da segunda fase.
- Analisando os resultados do Brasil, observamos que a grande diferença entre a primeira fase e a segunda fase está no parâmetro θ , o parâmetro que modela a notificação de infectados. Observamos que da primeira para a segunda fase a notificação aumentou no Brasil de 8% para 16%. Ou seja, a notificação de infectados dobrou. Além dessa diferença, observamos também uma diminuição de 30% na taxa de transmissão efetiva entre a primeira e segunda fase.

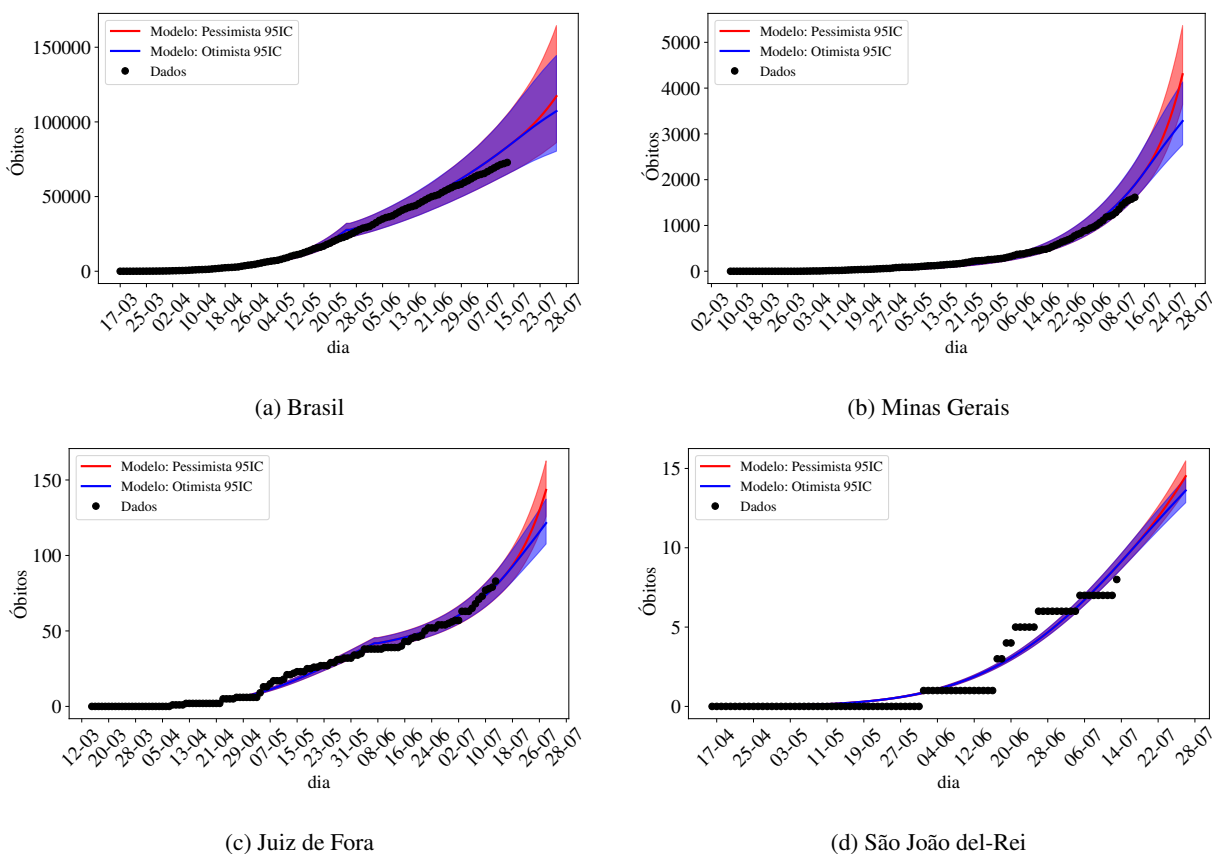
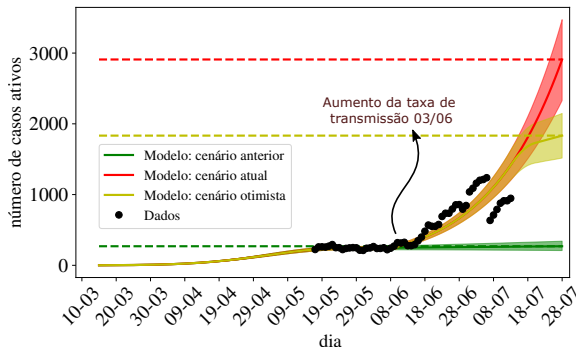


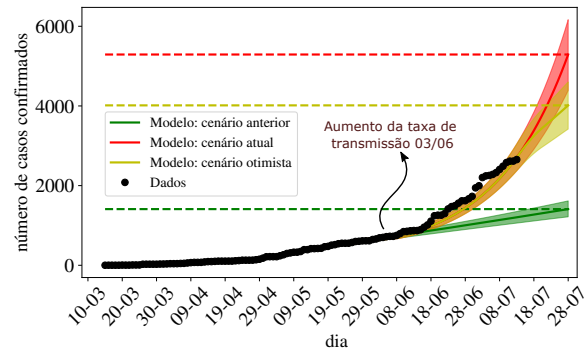
Figura 11: **Cenário Otimista e Cenário Pessimista.** Resultados das simulações para Brasil, Minas Gerais, Juiz de Fora e São João del-Rei, onde o modelo é ajustado usando os dados até o dia 13 de julho e então uma previsão é realizada para os próximos 15 dias usando cenários otimistas e pessimistas em relação ao isolamento social. O dia final corresponde ao dia 28 de julho. São apresentados o **número óbitos (O)** ao longo dos dias. As linhas sólidas indicam o valor médio, regiões hachuradas o intervalo de confiança (IC) de 95% dos resultados das simulações, enquanto os pontos são os dados disponíveis até o momento.

Projeções da Pandemia COVID-19 para 28 de julho no Brasil, MG, JF e SJDR:

- 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 queda (BR, MG e SJDR) ou estabilização (JF).
- A comparação entre as simulações usando o cenário pessimista e o otimista revelam diferenças quantitativas significativas. A diferença entre as duas projeções é de mais de 800 mil casos confirmados de COVID-19 no Brasil, 104 mil em MG, 4.014 em JF e 105 em SJDR para o dia 28 de julho. O mesmo ocorre para o número de óbitos. Este estudo sugere que uma política de isolamento mais restritiva e eficaz pode salvar mais quatro 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.
- Finalmente, a Figura 12 faz diferentes projeções para a cidade de Juiz de Fora. Os gráficos indicam que caso o isolamento social se mantivesse no mesmo valor observado até o dia 3 de junho (cenário anterior), a pandemia em Juiz de Fora já estaria sob controle, com um número total de confirmados abaixo de 2000 casos



(a) Infectados ativos em Juiz de Fora



(b) Casos confirmados em Juiz de Fora

Figura 12: **Cenário de Anterior** (Juiz de Fora parte 1), **Cenário Otimista** e **Cenário Atual** (Juiz de Fora parte 2) simulados até o dia 28 de julho. A Figura 12a mostra a evolução de infectados ativos e a Figura 12b a evolução dos casos confirmados para a cidade de Juiz de Fora. As linhas sólidas indicam o valor médio, regiões hachuradas o intervalo de confiança (IC) de 95% dos resultados das simulações, enquanto os pontos são os dados disponíveis até o momento. Os gráficos indicam que caso o isolamento social se mantivesse no mesmo valor observado até o dia 3 de junho (cenário anterior), a pandemia em Juiz de Fora já estaria sob controle (12a), com um número total de confirmados abaixo de 2000 casos até o final de julho (12a). Nosso modelo indicou um aumento significativo na taxa de transmissão da doença em JF, o que levou a um crescimento exponencial acelerado dos números de infectados e óbitos. Usando o cenário atual, nossa projeção aponta para um número de infectados acumulados acima de 5000 até o final de julho. Usando o cenário otimista, com aumento do isolamento social, nossa projeção aponta para uma estabilização do número de infectados na cidade até o final de julho, com um número de infectados acumulados em torno de 4000.

até o final de julho (Figura 12a). Nosso modelo indicou um aumento significativo na taxa de transmissão da doença em JF no último mês, o que levou a um crescimento exponencial acelerado dos números de infectados e óbitos. Usando os parâmetros estimados atualmente (cenário atual), nossa projeção aponta para um número de infectados acumulados acima de 5000 para o final de julho. Porém, para o cenário otimista, com aumento do isolamento social, nossa projeção aponta para uma estabilização do número de infectados na cidade até o final de julho, com um número de infectados acumulados em torno de 4000. Assim, as projeções indicam que um isolamento social mais eficaz beneficiaria a cidade, reduzindo a velocidade de transmissão e antecipando a fase de estabilização, ou mesmo a fase de decaimento do número de infectados.

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 e ao número de pacientes recuperados. 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 número 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. 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 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:

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

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

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

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

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

$$R_n = \theta R, \quad (7)$$

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:

$$a(t) = \begin{cases} 1 & t < t_i \\ \frac{1-r}{t_i-t_f}(t-t_i) + 1 & t_i \leq t \text{ e } t \leq t_f \\ r & \text{c. c.} \end{cases} \quad (8)$$

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.
- θ representa o percentual de pessoas infectadas e notificadas.

Para mais detalhes, consulte a NT01 e NT02 [7, 8].

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 8.

Referências

- [1] E. DONG, H. DU, AND L. GARDNER, *An interactive web-based dashboard to track COVID-19 in real time*, The Lancet infectious diseases, (2020).
- [2] 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.

¹O limite superior para t_i é 14 dias antes do fim da simulação.

Tabela 8: Dados utilizados para a calibração dos parâmetros do modelo de COVID-19 utilizado.

Parâmetro	Descrição (Unidade)	Intervalo	Ref.
b	Taxa de infecção (1/dia)	$[5, 5 \times 10^{-9}, 1, 0 \times 10^{-7}]$	[4]
θ	Percentual de casos infectados notificados (-)	$[0, 1]$	-
r	Fator de redução do contato (-)	$[0, 1]$	-
t_i	Início da política de contenção (dia)	$[0, t_f - 14]^1$	-
Δ	Duração da política de contenção (dia)	$[2, 30]$	-
m	Taxa de mortalidade (-)	$[1\%, 3, 4\%]$	[12]
τ_1	Período de incubação (dia)	$[2, 14]$	[11]
τ_2	Tempo dos sintomas ao óbito (dia)	$[6, 22]$	[13]
τ_3	Tempo dos sintomas à recuperação (dia)	$[7, 17]$	[13]
e	Taxa de migração / políticas de restrição (-)	$[0, 1, 0 \times 10^{-3}]$	-

- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] —, *Nota técnica 02 – características e projeções da pandemia do covid-19 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.
- [9] SES-MG, *Informe Epidemiológico Coronavírus 05/07/2020 | Secretaria de Estado de Saúde de Minas Gerais - SES*, 2020. Acessado em 07 de abril de 2020.
- [10] —, *Informe Epidemiológico Coronavírus 07/04/2020 | 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] WORLDOMETERS.INFO, *Covid-19 coronavirus pandemic*. <https://www.worldometers.info/coronavirus/>, 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.