

## **Cenários de propagação para SARS-CoV-2 (Coronavírus) na região do Vale do Ivaí - Paraná**

Coronavírus - CoVs é uma família viral causadora de infecções respiratórias em diversas espécies animais. SARS-CoV-2 representa o sétimo vírus da família coronavírus que infecta humanos e é o causador da COVID-19.

COVID-19 é uma doença potencialmente fatal, com elevados níveis de transmissão e caracterizada por uma variedade de sintomas, sendo os mais comuns: febre, tosse, fadiga, dor de garganta e falta de ar. A infecção ocorre através de contato com secreções ou aerossóis de gotículas de saliva contendo o vírus. Outro ponto a ser destacado é que no período assintomático também pode ocorrer a transmissão.

Trata-se de uma emergência de saúde global e como ainda não existe vacina ou medicamentos que comprovadamente atuem no combate à doença, são adotadas medidas profiláticas como a higienização das mãos e superfícies e o distanciamento social, sendo o último apontado como uma das medidas mais eficientes para reduzir a transmissão do vírus.

Frente à pandemia de COVID-19, todos os esforços para minimizar suas consequências são de suma importância. Modelos matemáticos de disseminação de doenças são uma importante ferramenta para entender e coibir a evolução de epidemias. Entretanto, tais modelos devem atender características regionais quando se aplicam em países de grande extensão territorial, como o Brasil. Dessa forma, com o objetivo de contribuir com o processo de tomada de decisão, construímos uma simulação preditiva determinística do comportamento do espalhamento de SARS-CoV-2 na região do Vale do Ivaí para diferentes situações.

A abordagem escolhida é conhecida como SEIQRD<sup>1</sup> (Susceptible, Exposed, Infected, Quarantined, Removed, Dead). Tal modelo permite estimar o número de infectados (I), mortos (D) e infectados postos em quarentena (Q) dentre uma população estática, a partir da escolha de parâmetros relacionados à infecção e a demografia da região.

Esses parâmetros são críticos na determinação do espalhamento da doença, podendo mudar com o tempo e com as ações de combate tomadas pelos órgãos públicos. A correta determinação de seus valores só é possível após o fim do surto, porém parâmetros médios realistas podem ser determinados antes do início da infecção e melhorados no decorrer de sua evolução.

---

<sup>1</sup> Fonte: Ming Liu et-al, Epidemic-logistics Modeling: A New Perspective on Operations Research, Springer (2020).

Mesmo com parâmetros um tanto imprecisos, as predições feitas por esses modelos são completamente tangíveis dentro da realidade da região e quando aplicadas em situações passadas, como o surto na China ou mesmo os dados nacionais, conseguem descrever esses eventos com muito boa aproximação.

Portanto, o modelo matemático aqui discutido pode descrever a realidade à medida que o espalhamento acontece, mas (uma vez que o modelo é determinístico), para isso as notificações de resultados de exames e medidas de contenção precisam ser mais rápidas e claras.

A título de comparação, para mostrar como o mesmo modelo funciona para uma população maior no decorrer da pandemia, segue abaixo (Figura 01) os dados da epidemia no Brasil. Na curva em cinza, temos os valores previstos pelo modelo para o número de infectados, já considerando variações causadas por medidas do governo. Em azul, temos o número de mortos previstos. Os pontos correspondem aos dados fornecidos pelo Ministério da Saúde.

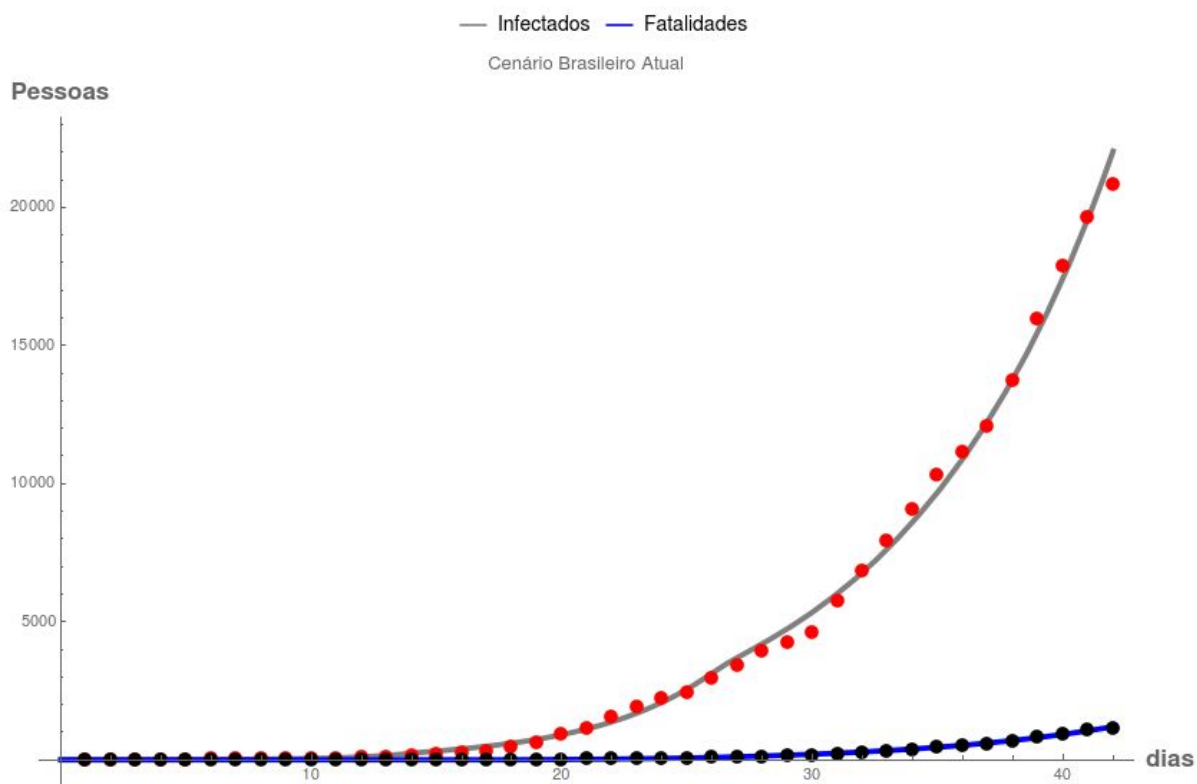


Figura 01: Modelo proposto pelos autores do trabalho (linha cinza - infectados e linha azul - mortos) e dados oficiais do Ministério da Saúde (pontos vermelhos - infectados, pontos azuis - mortos). Dados atualizados até o dia 11 de abril de 2020.

Reforçamos que os resultados do modelo têm demonstrado uma capacidade de predição elevada, o que é comprovado pelos dados nacionais disponíveis. Em outras palavras, mesmo que não seja capaz de apresentar resultados exatos, esses modelos indicam, de

forma bastante precisa, como ocorrerá a evolução da pandemia. Também cabe ressaltar que, nesse caso, o modelo pode abarcar as subnotificações de casos, fato que poderá ser corrigido facilmente com aumento da precisão de alguns parâmetros.

### Aplicação do modelo para o Vale do Ivaí

O estado do Paraná possui dados de sua população atual advindos da projeção do IBGE a partir do censo de 2010, com uma população estimada em 2019. Consideramos como Vale do Ivaí os seguintes municípios: Apucarana, Arapuã, Ariranha do Ivaí, Barbosa Ferraz, Bom Sucesso, Borrazópolis, Califórnia, Cambira, Corumbataí do Sul, Cruzmaltina, Faxinal, Godoy Moreira, Grandes Rios, Ivaiporã, Jandaia do Sul, Jardim Alegre, Kaloré, Lidianópolis, Lunardelli, Marilândia do Sul, Marumbi, Mauá da Serra, Novo Itacolomi, Rio Bom, São João do Ivaí e São Pedro do Ivaí<sup>2</sup>.

Dessa forma, partimos da estimativa de que o vale do Ivaí possui cerca de 342 mil habitantes, com densidade demográfica de 45,9 habitantes/km<sup>2</sup>, sendo que sua grande maioria vive na área urbana<sup>3</sup>. Também não existem estimativas exatas do número de idosos na região, de forma que precisamos assumir que seja a mesma da média do estado, 14,8% (pouco maior que a média nacional). Esses dados, além de características do vírus, se encontram sistematizados no quadro abaixo (Quadro 01):

Quadro 01: Dados utilizados para a modelagem de propagação do vírus.

População da região (estimada de acordo com o Censo 2010 - IBGE)	342 mil
Densidade demográfica (estimada de acordo com o Censo 2010 - IBGE)	45,9 hab/km <sup>2</sup>
R0 (número básico de reprodução do vírus/número de pessoas que pode ser contaminada por 01 pessoa) <sup>4</sup>	3
Período médio de incubação <sup>4</sup>	5 dias
Duração média da infecção <sup>4</sup>	6 dias
Casos iniciais (espalhados pela região)	4

<sup>2</sup> Fonte: Ministério do Desenvolvimento Agrário, 2015

([http://sit.mda.gov.br/download/caderno/caderno\\_territorial\\_225\\_Vale%20do%20Ivai%20-%20PR.pdf](http://sit.mda.gov.br/download/caderno/caderno_territorial_225_Vale%20do%20Ivai%20-%20PR.pdf))

<sup>3</sup> Fonte: IBGE, 2010 (<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/panoramas>)

<sup>4</sup> Fonte: Prem, K et-al. The effect of control strategies to reduce social mixing on outcomes of the COVID-19 epidemic in Wuhan, China: a modelling study. The Lancet (2020). (<https://www.thelancet.com/action/showPdf?pii=S2468-2667%2820%2930073-6>)

Com essas informações e considerando que a população seja estática (sem grandes movimentações de pessoas para fora ou para dentro do vale) e tomando os parâmetros médios do espalhamento de SARS-CoV-2 divulgado pela OMS, projetamos oito cenários distintos para a região do Vale do Ivaí. Vejamos agora o quadro apresentado para cada cenário, lembrando que o tempo começa a ser contado a partir do momento que se somam quatro casos de transmissão comunitária.

### Cenário 01:

Nesse caso, nenhuma medida de contenção é adotada. O comércio segue aberto, as escolas continuam funcionando, a população segue circulando normalmente pela cidade e existe alta taxa de deslocamento entre os municípios. O gráfico abaixo (Figura 02) apresenta a evolução do número de infectados e mortos nessa situação.

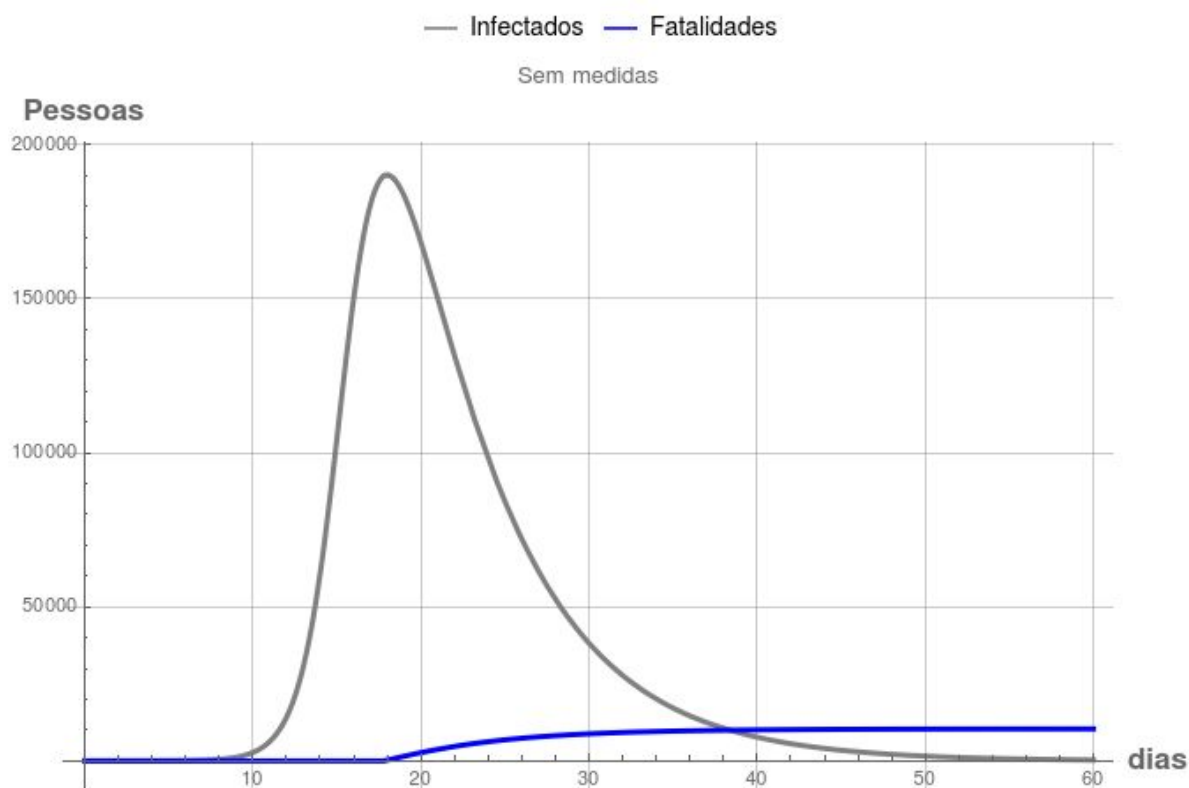


Figura 02: Projeção do modelo matemático (SEIQRD) para o número de infectados e fatalidades caso nenhuma medida de contenção da doença seja adotada

Analisando o gráfico, em cinza, temos um número total de 190 mil infectados, em menos de vinte dias, caso nada seja feito durante todo o período de espalhamento do COVID-19. Já o número de mortos, nessa situação, pode chegar a 10.000 pessoas em um intervalo de 35 a 40 dias.

Cabe ressaltar que quando falamos em casos totais, levamos em conta as pessoas testadas com resultado positivo e as que não serão testadas por não apresentarem sintomas graves.

### Cenário 02:

Nesse caso, ocorre a quarentena, mas não há restrições de circulação nem isolamento social. Isso significa que apenas parte dos infectados são separados da população, enquanto o restante segue normalmente, apenas “tomando cuidados adicionais”. Nesse caso, espera-se 54 mil infectados em menos de 30 dias, acompanhados de 2800 mortes. Esse resultado pode ser visto abaixo (Figura 03).

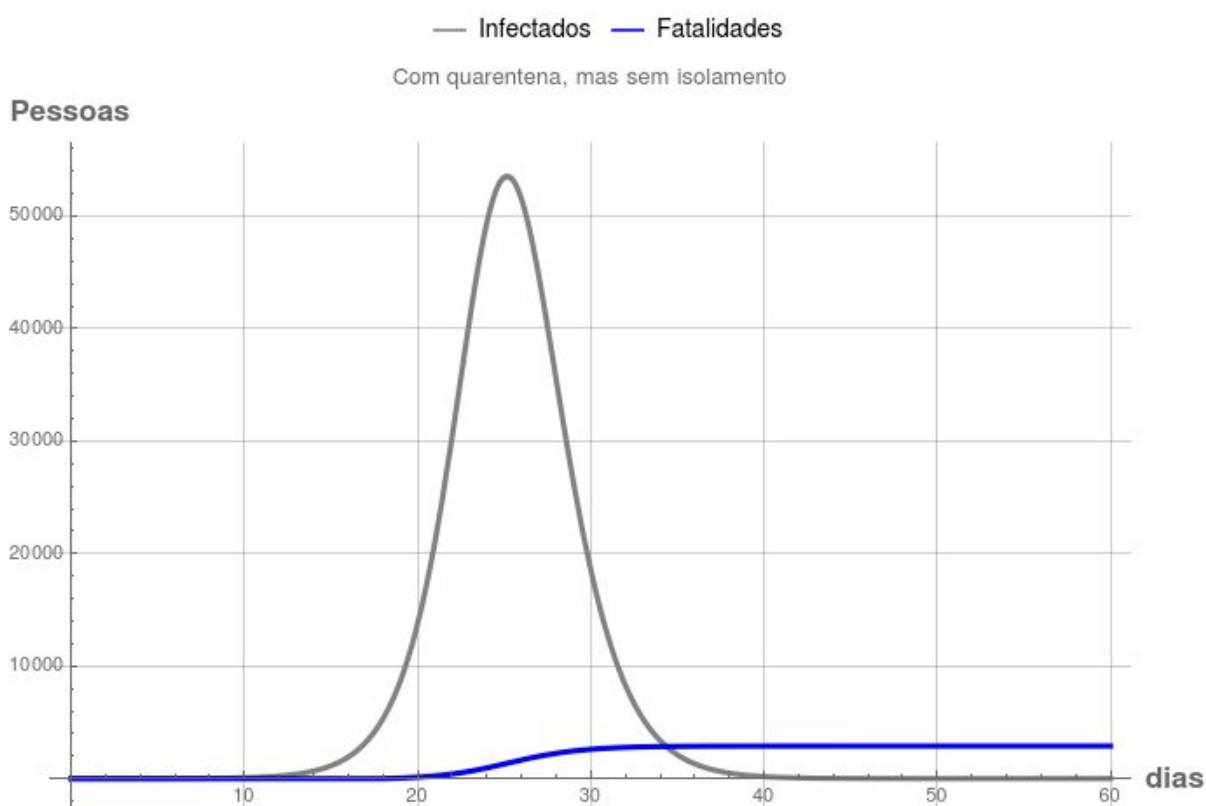


Figura 03 Projeção do modelo matemático (SEIQRD) para o número de infectados e fatalidades com a adoção de quarentena para parte da população, porém sem medidas de isolamento/distanciamento social.

### Cenário 03:

Nesse caso, as autoridades públicas tomam medidas brandas de distanciamento social, logo no início dos casos. Nesse quadro, também denominado “isolamento vertical”, as escolas e universidades são fechadas, os idosos retirados de circulação, o comércio

funciona parcialmente, grandes aglomerações são proibidas e grande parte dos infectados são colocados em quarentena. O resultado observado é o do gráfico seguinte (Figura 04).

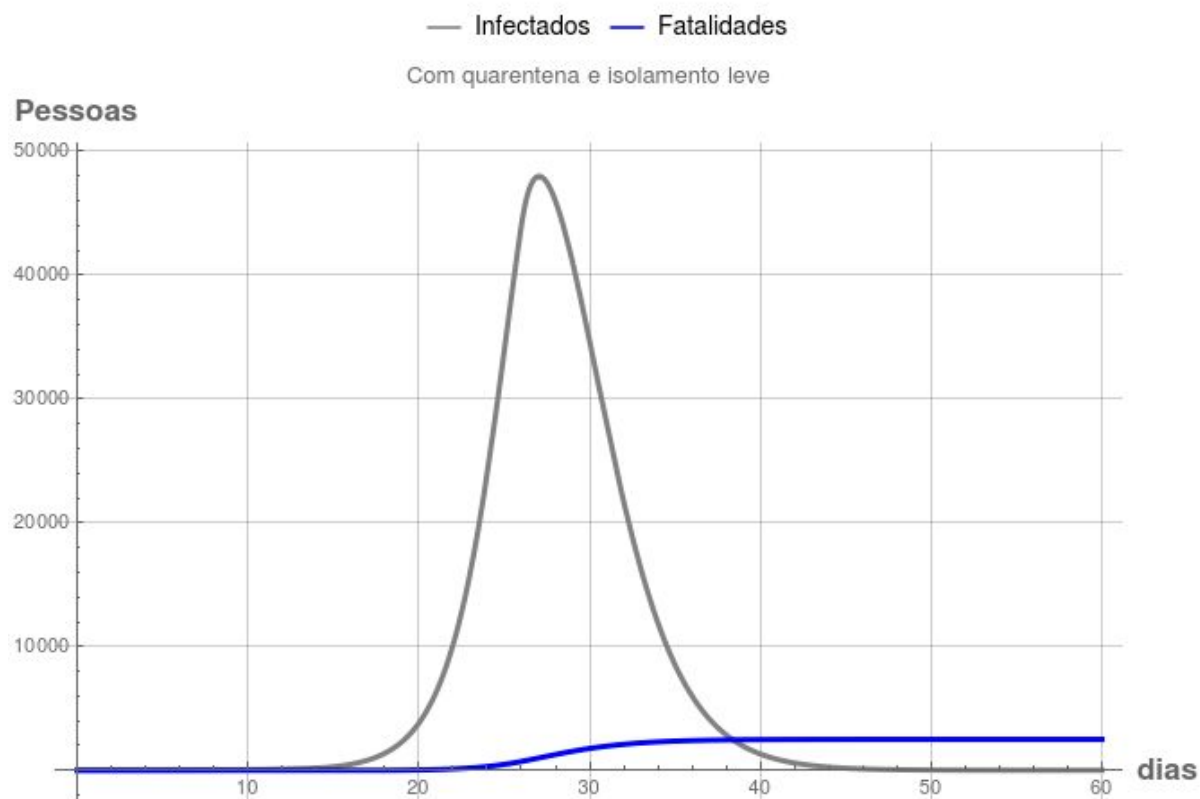


Figura 04: Projeção do modelo matemático (SEIQRD) com a adoção de medidas brandas de distanciamento social, no início do aparecimento dos casos.

Tomando ações de quarentena de infectados e medidas brandas de isolamento social, muito cedo, o resultado esperado é de 48 mil infectados em um período pouco menor que 30 dias, a contar das primeiras quatro transmissões comunitárias. Já o número de mortos pode chegar a 2700 pessoas.

#### **Cenário 04:**

Nesse cenário, se estipula quarentena e medidas severas de restrição, tardiamente. Isso significa que, inicialmente se tomam medidas brandas (comércio aberto, quarentena de infectados), alto fluxo de pessoas entre as cidades e ,depois de 14 dias do início do espalhamento comunitário, ocorre o isolamento e distanciamento social severo. Aqui, apenas os comércios essenciais ficam abertos, e no máximo 25% da população circula. Os resultados são apresentados na Figura 05, a seguir. Nesse caso é esperado um total de 26 mil infectados em pouco menos de 40 dias e 2000 mortos.

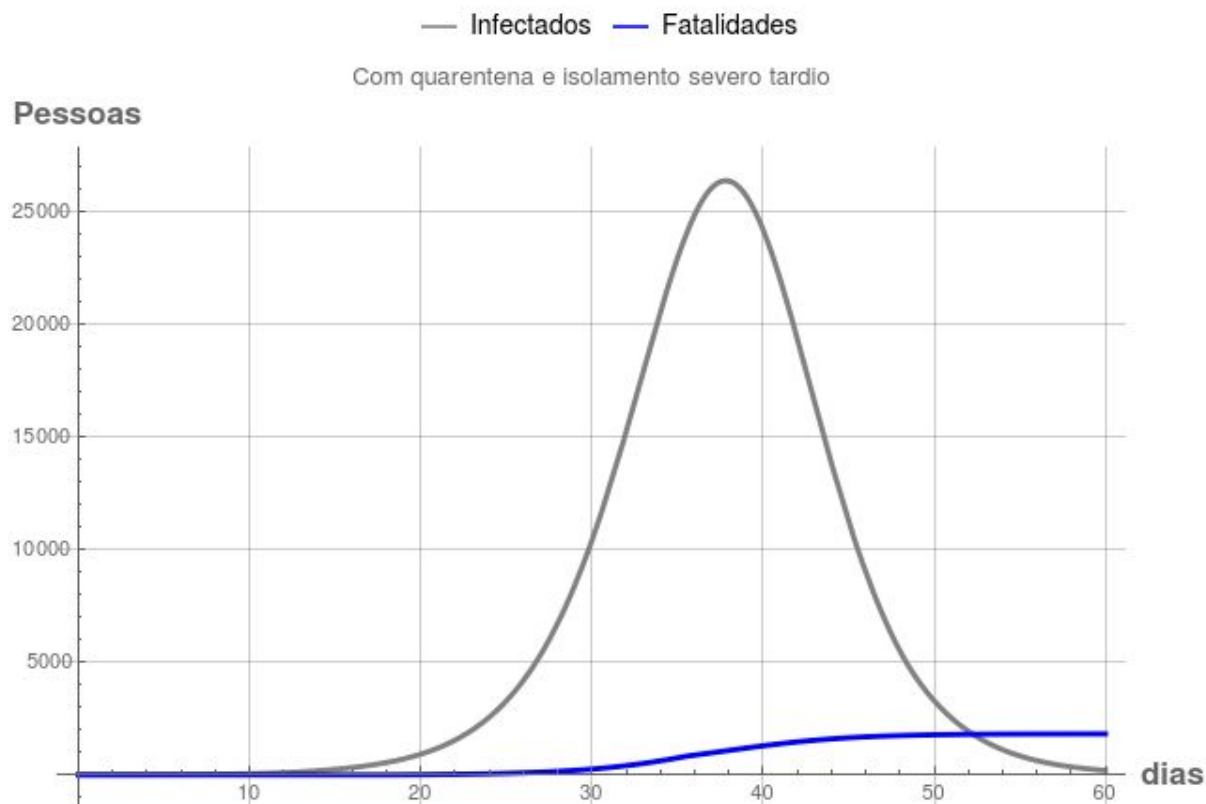


Figura 05: Projeção do modelo matemático (SEIQRD) para o número de infectados e fatalidades com a adoção da quarentena e medidas severas de restrição, tardiamente.

Em cinza vemos a estimativa de infectados caso seja adotado medidas brandas de isolamento social inicialmente e, posteriormente, sejam adotadas medidas mais severas, além da quarentena dos infectados. Em azul temos a estimativa para o número de mortos.

### **Cenário 05:**

Aqui temos o que se chama Quarentena e *Lockdown* tardio. Isso significa que medidas brandas são tomadas no início e, depois de 14 dias aproximadamente, as cidades são fortemente isoladas. Apenas os comércios realmente fundamentais se encontram em funcionamento e o número de pessoas circulando se limita a 5% da população. Nesse caso, as estimativas são de um pouco mais de 4 mil infectados em cerca de 25 dias, e o número de mortes pode chegar a 200 (Figura 06).

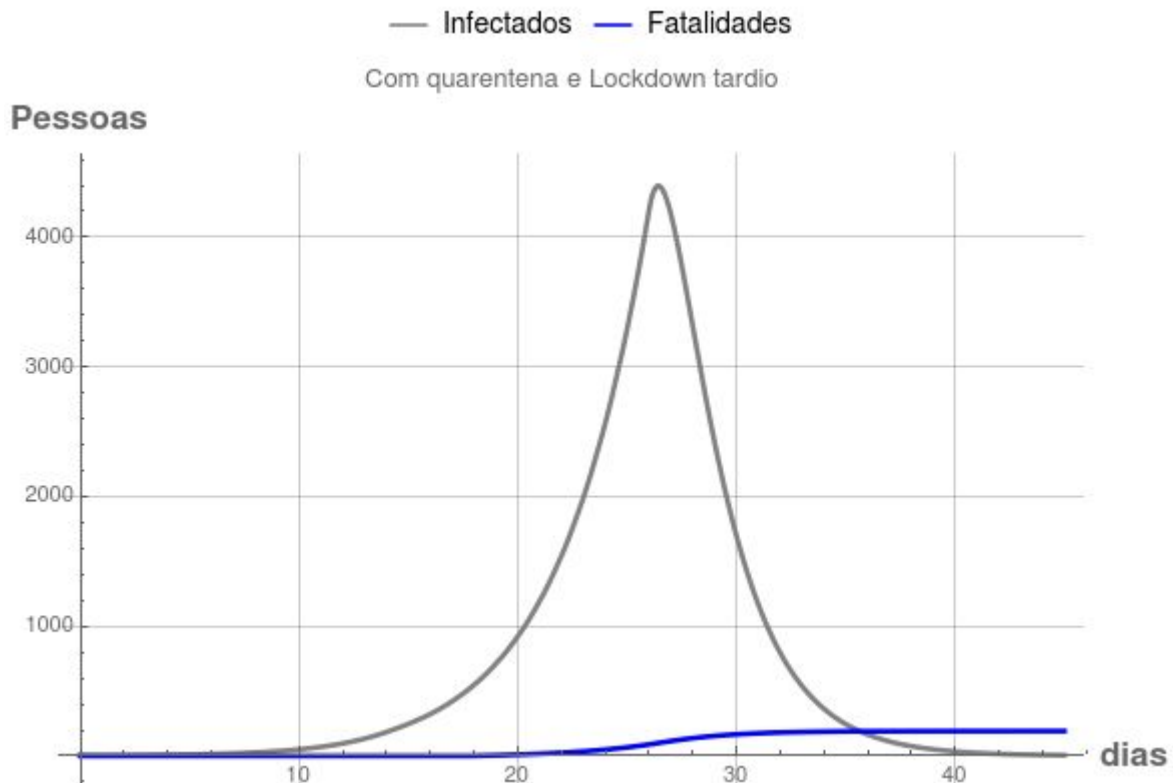


Figura 06: Projeção do modelo matemático (SEIQRD) para o número de infectados e fatalidades caso sejam adotadas medidas brandas de isolamento social inicialmente e, posteriormente, sejam adotadas medidas de Lockdown, além da quarentena dos infectados.

### Cenário 06:

Aqui, a simulação considera que além da quarentena dos infectados, medidas severas de restrição social foram tomadas cedo e, posteriormente, se realizou *Lockdown*. Em outras palavras, logo após os primeiros 4 casos, apenas serviços essenciais ficam em funcionamento, com no máximo 25% da população em circulação. 14 dias após os primeiros casos, o isolamento se torna rigoroso, apenas profissionais de saúde, policiais e distribuição de alimentos funcionando (5% da população circulando). Nesse caso, o número total de infectados pode chegar a pouco mais de 1000 pessoas em 25 dias, enquanto o número de mortes alcança até 60 pessoas (Figura 07).



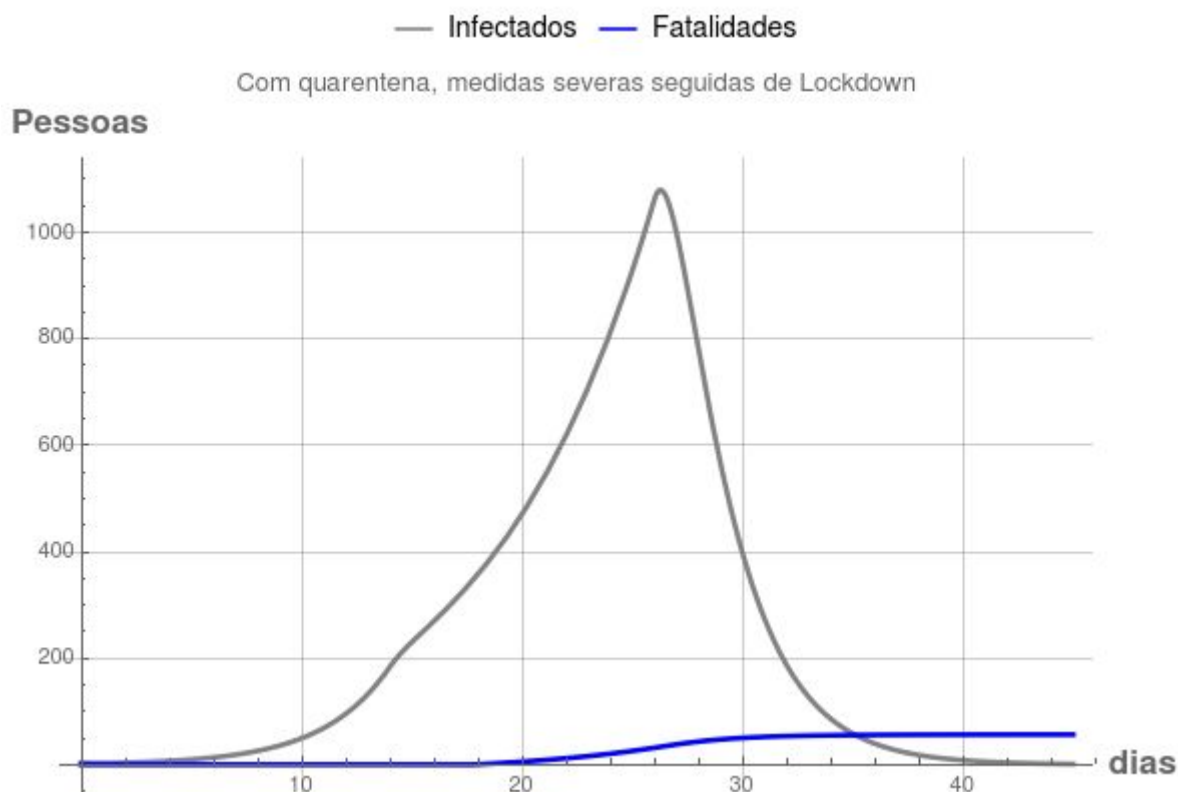


Figura 07. Projeção do modelo matemático (SEIQRD) para o número de infectados e fatalidades caso seja adotado medidas severas de isolamento social e, posteriormente, sejam adotadas medidas de *Lockdown*, além da quarentena dos infectados.

### Cenário 07:

Tal cenário é o mais improvável de ocorrer, pois exige medidas radicais tomadas logo no início da propagação. Aqui, a quarentena e *Lockdown* ocorrem logo nos primeiros 4 casos, apenas funções essenciais continuam funcionando e 5% da população fica em circulação. Os resultados dessa escolha são um pouco mais de 200 infectados em 15 dias e um número aproximado de 10 mortes (Figura 08).

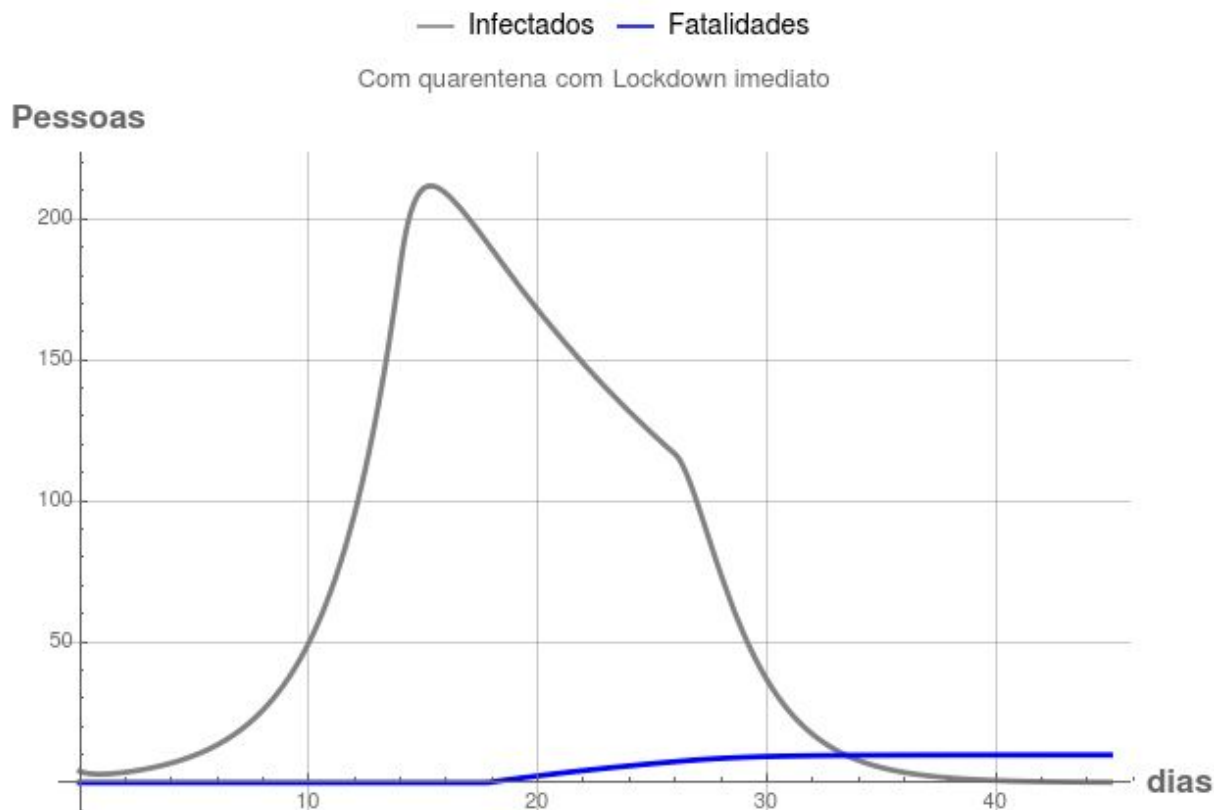


Figura 08. Projeção do modelo matemático (SEIQRD) para o número de infectados e fatalidades caso sejam adotadas medidas de *Lockdown*, além da quarentena dos infectados logo no início.

### Cenário 08:

Este é o cenário que consideramos mais realista, pois é baseado na aplicação do modelo para o Brasil. Partimos do fato de que existem quatro infectados iniciais espalhados em quatro cidades diferentes. Uma vez que o fluxo de pessoas está razoavelmente reduzido entre os municípios, algumas poucas medidas de distanciamento continuam sendo adotadas e não há aulas nas escolas e universidades, não é razoável considerar que os quatro infectados iniciais possam estar em contato com todo o vale, isso reduz o potencial inicial para disseminação de SARS-CoV-2.

Assim que os primeiros casos comunitários começam a aparecer, as cidades iniciam um processo gradual de isolamento social, até que com aumento repentino dos casos, são tomadas medidas mais rígidas. Diante desse cenário, semelhante ao adotado no nosso país, traçamos a projeção que se vê na figura abaixo (Figura 09). Nela é possível notar que o número de casos chega por volta de 27 mil infectados, enquanto que o número de fatalidades chega próximo a 1800. Um cenário como esse prevê o pico de casos em 40 dias após o início da contaminação comunitária.

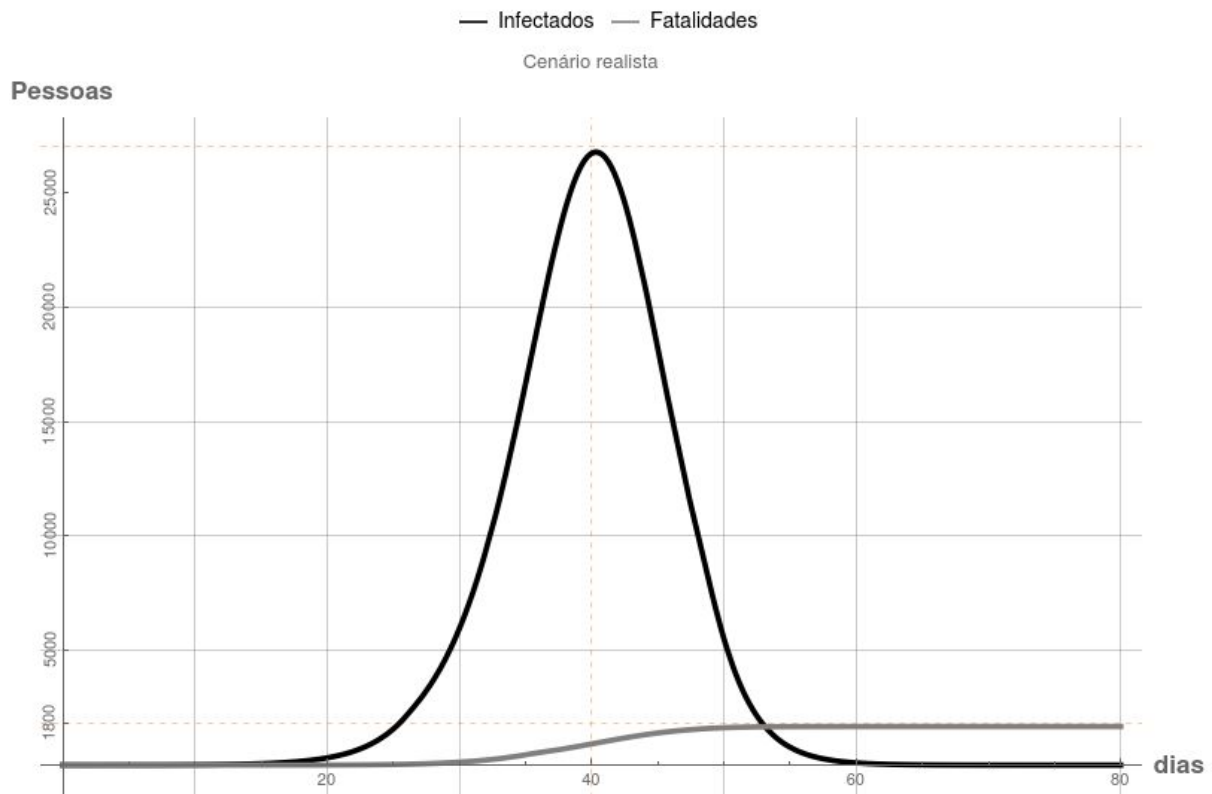


Figura 09: Projeção do modelo matemático (SEIQRD) para o número de infectados e fatalidades no Vale do Ivaí, caso as medidas sigam o mesmo ritmo do Brasil.

### Análise geral dos cenários

Como podemos observar, as consequências das decisões tomadas em relação às ações de inibição de propagação do vírus são consideravelmente diferentes. Os dados indicam que quanto mais cedo e mais severas são as medidas tomadas, menor o número de infectados, de mortes e, também, mais rapidamente a situação pode retomar a normalidade.

Portanto, outra informação importante é a estimativa do momento para flexibilização do isolamento social. Na figura abaixo (Figura 10) plotamos uma situação em que medidas de isolamento severo são adotadas precocemente, porém, essas não duram tempo suficiente, levando a um novo pico de contaminação mais tardiamente.

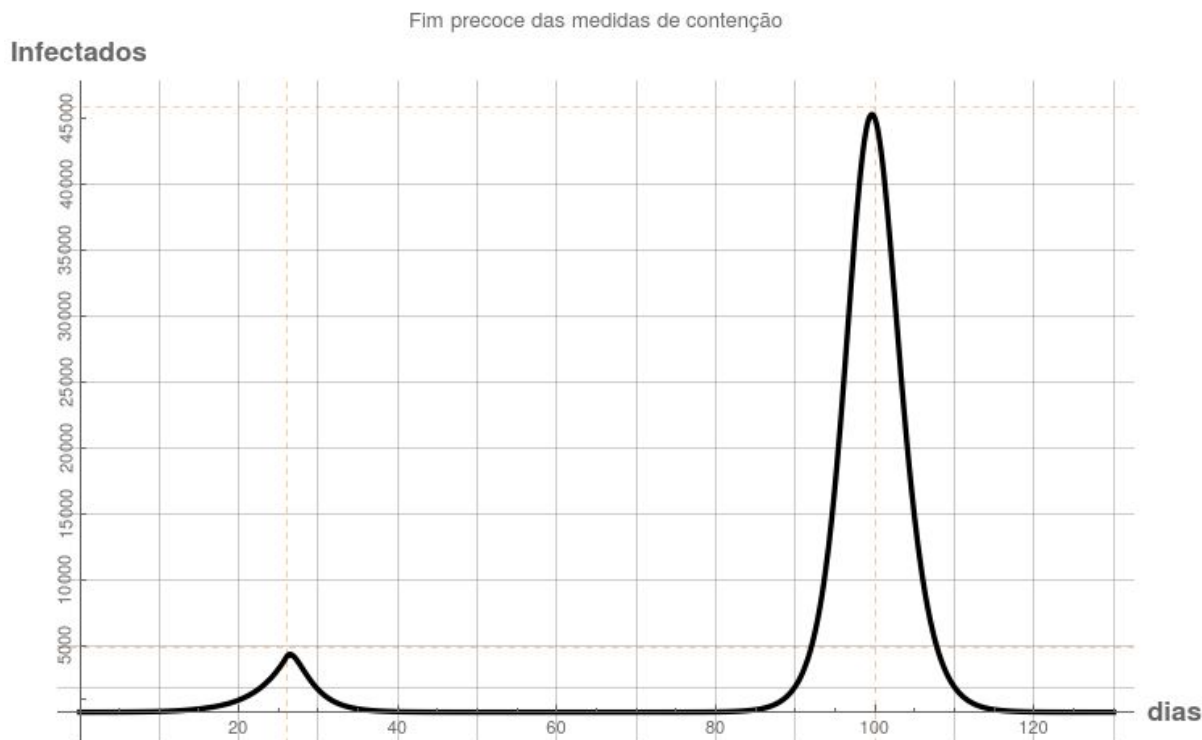


Figura 10. A curva em preto mostra dois picos de infecção, caso as medidas de isolamento social sejam abandonadas de forma precoce.

A curva acima, em preto, mostra que as medidas severas surtem efeito rapidamente, levando a um número de infectados menor que 5 mil nos primeiros 26 dias, porém se essas medidas forem flexibilizadas precocemente, existe uma grande possibilidade de haver novo pico de contaminação cerca de 70 dias após o primeiro, porém dessa vez o número de infectados poderia chegar em 46 mil pessoas.

Dessa forma, é evidente a necessidade de se estruturar corretamente o momento e a forma de reduzir as medidas de isolamento social. Devemos apontar que esse comportamento é amparado por trabalhos anteriores<sup>4,5, 6</sup>.

A título de comparação, decisões como liberar a abertura do comércio e afrouxar a quarentena, implicam que a pandemia pode atingir seu pico entre 25 e 30 dias, acarretando até 54 mil infectados e 2800 mortes. No outro extremo, a adoção de medidas severas logo

<sup>5</sup> Fonte: Walker, P et-al. Report 12: The Global Impact of COVID-19 and Strategies for Mitigation and Suppression. Imperial College (26 de março de 2020). (<https://www.imperial.ac.uk/media/imperial-college/medicine/mrc-gida/2020-03-26-COVID19-Report-12.pdf>)

<sup>6</sup> Fonte: Ferguson, N. et-al. Report 9: Impact of non-pharmaceutical interventions (NPIs) to reduce COVID-19 mortality and healthcare demand. Imperial College (16 de março de 2020). (<https://www.imperial.ac.uk/media/imperial-college/medicine/mrc-gida/2020-03-16-COVID19-Report-9.pdf>)

no início do surto, reduz o período para se atingir o pico do número de casos para 15 dias, e limita o número de infectados a 200 casos e óbitos a 10.

Segundo nosso modelo matemático, quanto mais cedo as medidas de restrição forem tomadas, mais 'controlável' o pico de infectados se torna. Comparando os cenários 2 (linha cinza) e 3 (linha azul), nota-se que as medidas brandas de isolamento social surtem pouco efeito no achatamento da curva de infectados. Além disso, percebe-se que o controle inicial da disseminação é sumariamente importante, pois o espalhamento do vírus é exponencial quando medidas de contenção não são adotadas. Essas informações podem ser observadas nos gráficos abaixo, que concentram o número de infectados (Figuras 11 e 12) e mortos (Figuras 13 e 14) para todos os cenários, note que aqui a letalidade oscilou entre 5 e 6%, estando dentro da média nacional.

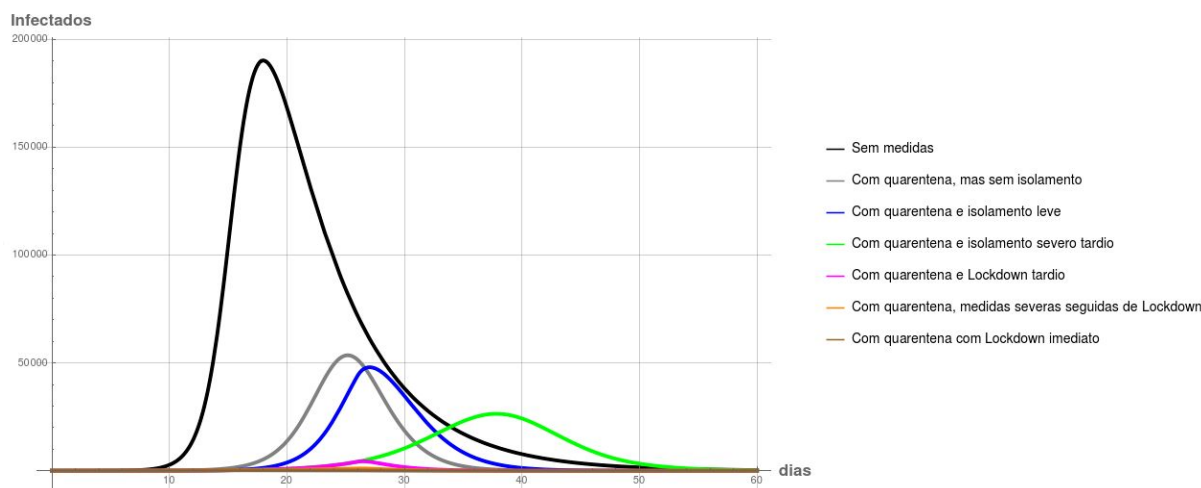


Figura 11: Comparação da evolução de infecções para diferentes medidas restritivas, comparada a não adoção de medidas de restrição.

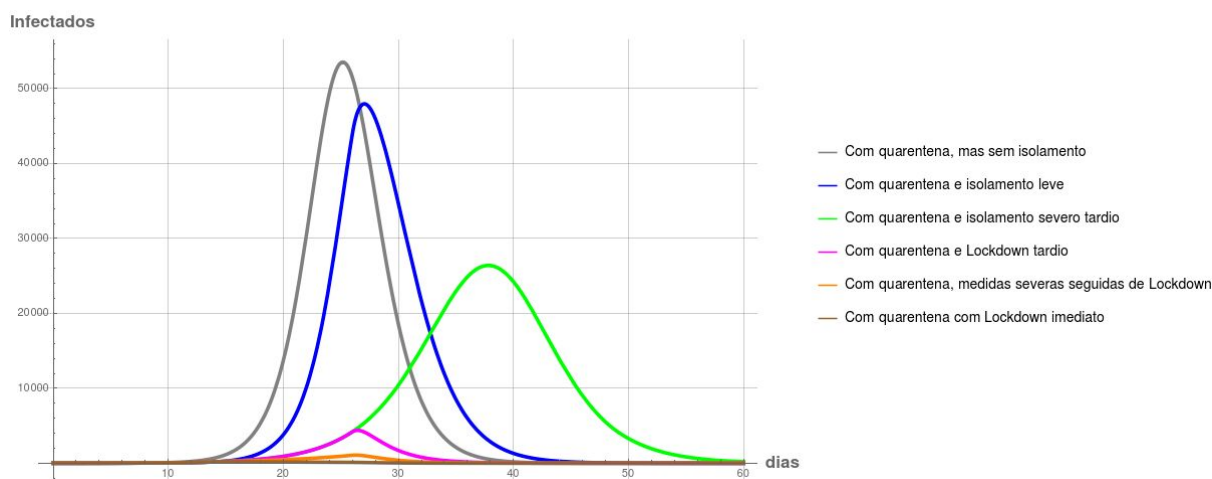


Figura 12: Comparação da evolução do número de infectados em diferentes medidas restritivas.

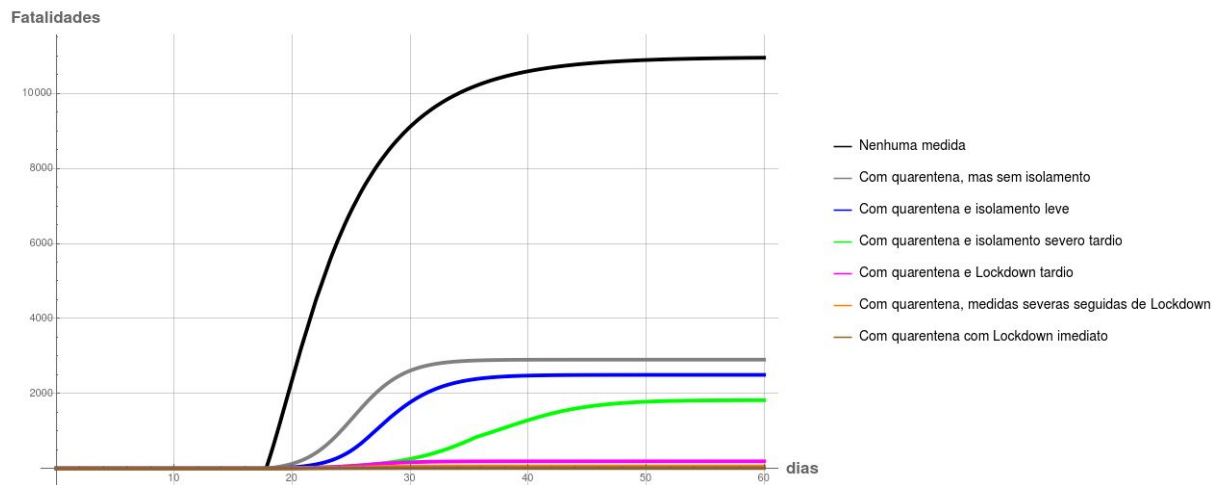


Figura 13: Sobreposição entre o número provável de mortes caso nada seja feito e diferentes medidas de restrição sejam tomadas.

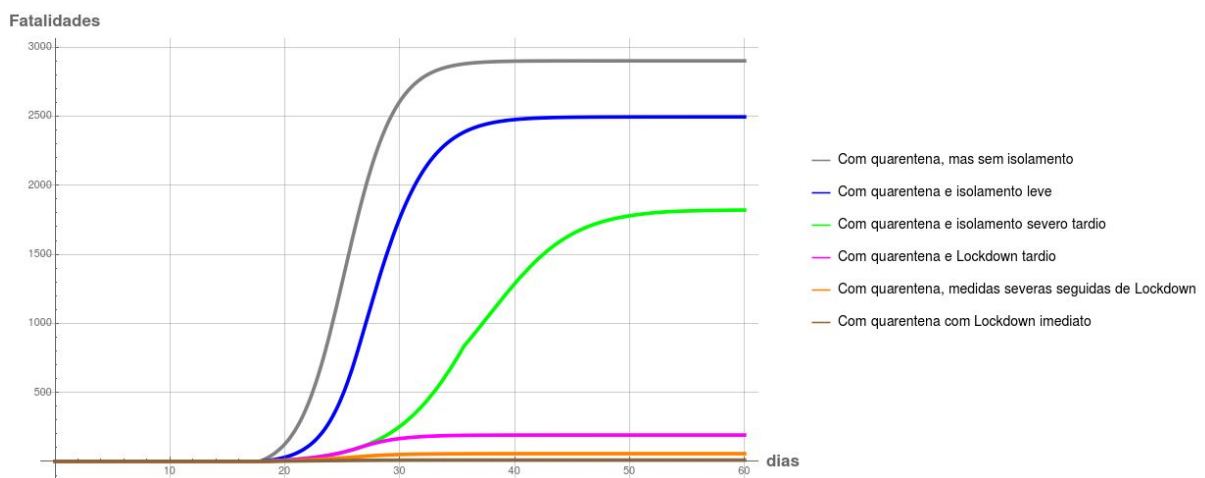


Figura 14: Sobreposição entre o número provável de mortes para as diferentes medidas de restrição.

Diante desses cenários, reforçamos que as medidas tomadas no momento inicial de propagação são fundamentais e impactarão não apenas no número de infectados e mortos, mas na duração da crise. Além disso, medidas de isolamento leve (ou isolamento vertical, como tem sido chamado), apresentam um impacto muito pouco significativo em comparação ao não isolamento.

Por último, cabe ressaltar, de forma contundente, que esses dados tratam de um modelo que parte de informações previamente disponíveis. No decorrer do tempo, é provável que os dados não se verifiquem exatamente como expostos nesse trabalho, mesmo que o Vale do Ivaí seja perfeitamente descrito por essa abordagem, pelos seguintes fatores:

1 - A confirmação dos dados depende da disponibilidade, da capacidade de processamento e da divulgação dos testes por parte do estado, o que poderia chegar em algo entre 10 a 15% do valor real de infectados, se estimarmos pela média atual do país. Um melhor levantamento do número real de infectados e mortos poderá ser feito após o surto, comparando o aumento registrado como Síndrome Respiratória Aguda Grave (SRAG) em relação a média do mesmo período dos anos anteriores. Dessa forma, os números divulgados como COVID-19 podem divergir para mais ou para menos dessa simulação. Quanto mais dados sobre os casos totais estiverem disponíveis, mais preciso o modelo será.

2 - Até o presente momento, os testes demoram cerca de 7 a 10 dias para serem emitidos, somando esses valores aos 14 dias de incubação do vírus, podemos ter um atraso de 21 a 24 dias no que os dados nos mostram (isso vale para qualquer modelo aplicado ao Brasil, pois é característica do vírus e do sistema de saúde). Esse modelo matemático começa suas previsões a partir do primeiro caso de transmissão comunitária, que pode ser testado e notificado mais de 20 dias após ter ocorrido, fazendo com que o vírus possa ser espalhado sem muitas barreiras durante todo esse tempo. Qualquer medida adotada hoje está baseada em dados de no mínimo 7 dias atrás e surtirá efeitos, no mínimo, em 14 dias no futuro. Isso explica porque, mesmo sobre supressão, os casos na Itália e na Espanha continuaram a subir por semanas.

3 - Fatores estocásticos (aleatórios) também podem influenciar severamente o espalhamento, para o bem, diminuindo seu potencial de infecção, ou para o mal, permitindo que ele seja espalhado mais rapidamente.

Entretanto, os resultados apresentados pelo modelo quando aplicado em regiões cuja a propagação do vírus está mais avançada, inclusive no cenário nacional, reforçam a efetividade do seu poder preditivo, cujos erros observacionais/experimentais, inerentes a toda e qualquer atividade científica, não invalidam os resultados finais identificados.

## **Conclusão**

De acordo com as previsões do modelo, construído a partir dos dados regionais do Vale do Ivaí disponibilizados pelo IBGE, a região pode atingir a marca de até até 190 mil pessoas infectadas sem a adoção de medidas de restrição. Se medidas menos severas de distanciamento social fossem tomadas desde o início do aparecimento dos primeiros casos da doença na região, esse número pode cair para cerca de 50 mil infectados. No caso de serem tomadas medidas severas tardiamente, após 14 dias de espalhamento desenfreado, o número seria pouco maior que 20 mil casos, e no caso de um *Lockdown* tardio ser implementado, teríamos cerca de 4 mil contaminados. Relativo ao número de mortes, as medidas de restrição, podem reduzir os casos de 10.000 (em caso de nenhuma medida ser tomada), para entre 10 (*Lockdown* imediato) e 2.800 (quarentena dos infectados, sem

isolamento social para a população), a depender do momento e da severidade das medidas.

Embora esses números possam parecer alarmantes para a região, eles ainda são bem mais modestos do que se fizermos adaptações dos trabalhos realizados pelo Imperial College<sup>7</sup> para nosso país.

Por fim, relatamos que, neste momento, nos disponibilizamos a fazer as mesmas simulações para as principais cidades da região, necessitando para isso que as cidades interessadas disponibilizem dados atualizados a respeito da população.

A medida que o SARS-CoV-2 se espalhar pelo Vale do Ivaí, novas adaptações nas projeções poderão ser feitas, abarcando os dados fornecidos pela Secretaria Regional de Saúde e pelas medidas tomadas pelos municípios. Assim poderemos entender a realidade do espalhamento da doença na região e conseguir prever com muito mais precisão o comportamento deste vírus, tanto em número de infectados quanto sua letalidade.

Prof. Dr. Thiago V. M. Guimarães - IFPR Ivaiporã

Dr. Francisco Q. Camargo - Universidade de Oxford

Prof. Dr. Adriano J. Ortiz - IFPR Ivaiporã

Profa. Dra. Andréa M. R. Gonçalves - IFPR Ivaiporã

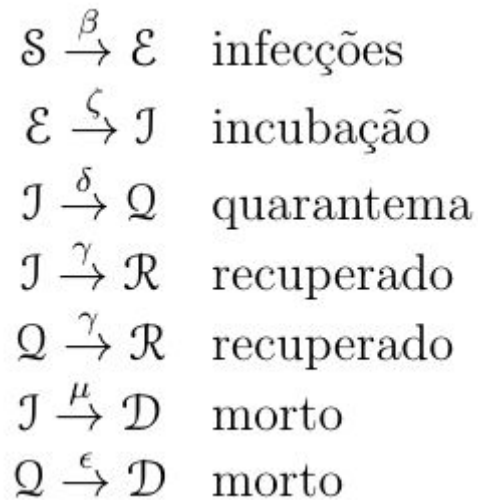
Profa. Dra. Mariana C. Salvador-Shiinoki - IFPR Ivaiporã

Prof. Dr. Ailton S. Ferreira - IFPR Ivaiporã



## Apêndice

O Modelo SEIQRD utilizado foi elaborado da seguinte forma



Cujo sistema de equações diferenciais ordinárias é

$$\begin{aligned}
 \mathcal{S}'(t) &= -\frac{\beta \mathcal{S}(t)\mathcal{J}(t)}{\mathcal{N} - \mathcal{D}(t) - \mathcal{Q}(t)}, \\
 \mathcal{E}'(t) &= \frac{\beta \mathcal{S}(t)\mathcal{J}(t)}{\mathcal{N} - \mathcal{D}(t) - \mathcal{Q}(t)} - \zeta \mathcal{E}(t), \\
 \mathcal{J}'(t) &= \zeta \mathcal{E}(t) - \gamma \mathcal{J}(t) - \delta \mathcal{J}(t) - \mu(t)\mathcal{J}(t), \\
 \mathcal{Q}'(t) &= -\gamma \mathcal{Q}(t) - \epsilon \mathcal{Q}(t) + \delta \mathcal{J}(t), \\
 \mathcal{R}'(t) &= \gamma \mathcal{Q}(t) + \gamma \mathcal{J}(t), \\
 \mathcal{D}'(t) &= \epsilon \mathcal{Q}(t) + \mu(t)\mathcal{J}(t)
 \end{aligned}$$

Sendo os parâmetros:

$N \rightarrow$  População suscetível inicial;

$\beta \rightarrow$  Taxa de contato efetivo associado a  $R_0$ ;

$\zeta \rightarrow$  Taxa de exposição para pessoas se tornarem infectadas;

$\gamma \rightarrow$  Taxa com que os infectados se tornam imunes ou morrem;

$\mu \rightarrow$  Taxa de mortalidade;

$\epsilon \rightarrow$  Taxa com que pessoas de quarentena morrem;

$\delta \rightarrow$  Taxa de isolamento;

$I_0 \rightarrow$  Números inicial de infectados.

As equações foram tratadas por meio do software Mathematica®.