

Macroeconomia e Epidemiologia: Uma aplicação do modelo SIR-Macro para o estado de Roraima

Macroeconomics And Epidemiology: An application of the SIR-Macro model for the state of Roraima

Macroeconomía y Epidemiología: Una aplicación del modelo SIR-Macro para el estado de Roraima

**Luiz Eduardo de
Oliveira COSTA**

luizeducosta123@gmail.com

Graduado em Ciências Econômicas pela Universidade Federal de Roraima (UFRR).

**Yuri Cesar de
Lima e SILVA**

yuricesar_silva@hotmail.com

Departamento de Economia
- Universidade Federal de Roraima (UFRR).

111

Neste trabalho utilizamos o modelo SIR-Macro de Eichenbaum et al. (2020), que é uma extensão do modelo epidemiológico SIR de Kermack e McKendrick (1927), para analisar como decisões econômicas influenciam o desenvolvimento de epidemias como a da Covid-19 e quais os impactos econômicos da adoção de políticas públicas de contenção. Para isso, utilizando os dados do estado de Roraima para calibrar o modelo, simulamos o cenário de uma política de contenção ótima e comparamos os resultados com a simulação do equilíbrio competitivo do modelo, onde não é adotada nenhuma política de contenção. Os resultados mostram que a adoção de uma política de contenção reduz significativamente o número de infectados e mortos, mas gera uma recessão econômica comparativamente maior que a gerada no cenário de equilíbrio competitivo. Por outro lado, a não adoção de uma política de contenção não extingue a recessão econômica, pois os agentes passam a diminuir seus níveis de consumo e oferta de trabalho para reduzirem sua exposição e suas chances de serem infectados pelo vírus. Além disso, neste cenário, o número de infectados e mortos é significativamente maior.

Palavras-Chave: Modelo SIR-Macro; Covid-19; Política de contenção ótima; Roraima

In this work, we use the SIR-Macro model developed by Eichenbaum et al. (2020), which is an extension of the epidemiological SIR model by Kermack and McKendrick (1927), to analyze how economic decisions influence the development of epidemics such as Covid-19 and the economic impacts of adopting public containment policies. To do so, using data from the state of Roraima to calibrate the model, we simulate the scenario of an optimal containment policy and compare the results with the simulation of the competitive equilibrium of the model, where no containment policy is adopted. The results show that the adoption of a containment policy significantly reduces the number of infected and dead, but generates a comparatively larger economic recession than that generated in the competitive equilibrium scenario. On the other hand, the non-adoption of a containment policy does not extinguish the economic recession, as agents reduce their levels of consumption and labor supply to reduce their exposure and chances of being infected by the virus. Moreover, in this scenario, the number of infected and dead is significantly higher.

Keywords: humanitarian crisis; place and social networks; Venezuelan migration; refugees.

En este trabajo utilizamos el modelo SIR-Macro de Eichenbaum et al. (2020), que es una extensión del modelo epidemiológico SIR de Kermack y McKendrick (1927), para analizar cómo las decisiones económicas influyen en el desarrollo de epidemias como la de la Covid-19 y cuáles son los impactos económicos de la adopción de políticas públicas de contención. Para ello, utilizando los datos del estado de Roraima para calibrar el modelo, simulamos el escenario de una política de contención óptima y comparamos los resultados con la simulación del equilibrio competitivo del modelo, en el que no se adopta ninguna política de contención. Los resultados muestran que la adopción de una política de contención reduce significativamente el número de infectados y muertos, pero genera una recesión económica comparativamente mayor que la generada en el escenario de equilibrio competitivo. Por otro lado, la no adopción de una política de contención no elimina la recesión económica, ya que los agentes tienden a reducir sus niveles de consumo y oferta de trabajo para disminuir su exposición y sus posibilidades de infectarse con el virus. Además, en este escenario, el número de infectados y muertos es significativamente mayor.

Palabras clave: crisis humanitaria; lugar y redes sociales; migración venezolana; refugiados.

1. Introdução

A síndrome respiratória aguda grave de coronavírus (SARS-CoV-2 ou Covid-19) foi descoberta em Wuhan, na China, no início de 2020. O vírus da Covid-19 se espalhou pelo mundo inteiro e em 2022, dois anos depois do início da pandemia, já havia infectado cerca de 534.495.291 pessoas no mundo, provocando 6.311.088 mortes, de acordo com a Organização Mundial da

Saúde (OMS). A pandemia da Covid-19 foi considerada a maior crise sanitária da atualidade pela OMS, sendo responsável por impactos sociais e econômicos negativos no mundo todo.

Os governos de vários países tiveram dificuldades em planejar políticas para conter a propagação do vírus, pelo caráter de incerteza envolvida no aparecimento e rápido contágio da população mundial.

A principal política de contenção adotada consistiu no fechamento de estabelecimentos comerciais para reduzir a transmissão da doença. Por consequência, o consumo agregado foi afetado negativamente. Esse é um exemplo de como as políticas de contenção entram em conflito com o equilíbrio econômico nesse período. Esse conflito entre o equilíbrio econômico e as políticas de contenção foi o principal motivo de dificuldade dos governos no gerenciamento da pandemia.

Nesse cenário é importante recorrer à epidemiologia, para analisar a dinâmica de evolução da epidemia, e a análise econômica, para estudar os impactos da pandemia no bem-estar econômico da população. Nesse trabalho, utilizamos o modelo SIR-Macro de Eichenbaum *et al.* (2020), que é uma adaptação do modelo epidemiológico SIR de Kermack e McKendrick (1927), para analisar o impacto da pandemia de Covid-19 em dois cenários, o de equilíbrio competitivo (onde não são adotadas políticas de contenção) e outro com a adoção de uma política ótima de contenção.

O modelo SIR é um modelo epidemiológico utilizado para estudar o percurso da epidemia e sua evolução na população de suscetíveis, infectados e recuperados. Já o modelo SIR-Macro é uma expansão do modelo SIR que relaciona as decisões econômicas individuais, como o risco de infecção dos agentes. Neste modelo, os indivíduos, ao reduzirem o tempo gasto em suas interações econômicas provenientes das compras para consumo e permanência no local de trabalho, diminuem as chances de serem infectados pelo vírus. Dessa forma, existe um claro impacto da epidemia na oferta de trabalho e consumo agregado da economia.

Nesse trabalho, calibraramos o modelo SIR-Macro para os dados do estado de Roraima e simulamos os cenários de equilíbrio competitivo e com a adoção de uma política ótima de contenção. O trabalho busca compreender as principais características dos agentes econômicos quando enfrentam crises epidemiológicas da magnitude da ocorrida com a Covid-19 e quais os impactos da utilização de políticas de contenção no comportamento desses agentes. As políticas de contenção postas em prática no Brasil não foram homogêneas e a avaliação do comportamento dos agentes econômicos proveniente dessas diferentes estratégias de políticas públicas de contenção devem ser estudadas separadamente. Este estudo busca suprir essa lacuna ao calibrar o modelo SIR-Macro para um estado pequeno e razoavelmente isolado dos grandes centros urbanos, sendo um caso que pode ajudar a literatura econômica/epidemiológica a compreender melhor o fenômeno ocorrido.

Os resultados mostraram que as políticas de contenção são eficazes em reduzir o número de mortos e infectados, porém geram uma recessão maior. Por outro lado, no cenário de equilíbrio competitivo, mesmo que reduzida, a recessão econômica se mantém, uma vez que existe uma queda voluntária no consumo e na oferta de horas trabalhadas dos agentes, que buscam diminuir as chances de serem infectados, já que o número de infectados e mortos é maior neste cenário.

O trabalho está estruturado da seguinte forma: na próxima seção, faremos uma breve revisão da literatura, que busca cobrir conceitos importantes para nossa análise; na terceira seção, apresentamos

formalmente o modelo SIR-Macro; na quarta, abordamos as estratégias de calibração do modelo; após isso, na quinta seção, apresentamos os resultados para os dois cenários analisados; e, por fim, apresentamos as conclusões do trabalho.

2. Revisão da literatura

2.1. Relação entre economia e epidemias

A análise da relação entre as epidemias e a economia é essencial para avaliar o comportamento dos agentes econômicos e as consequências da adoção de políticas públicas de contenção/prevenção.

Além de servir de base para políticas públicas, ponderar os impactos econômicos das epidemias (e vice-versa) é necessário para que se possa considerar as possíveis externalidades negativas que esses períodos geram para a humanidade. Um exemplo desse fato foi a epidemia da gripe espanhola (1918-1920), que é considerada o pior surto de doença de século XX. Neste período, “estima-se que cerca de 500 milhões de pessoas ou um terço da população mundial foram infectadas com este vírus” (CDC, 2018). No Brasil, de acordo com Marson e Siviero (2024), a epidemia de gripe espanhola teve externalidades que afetaram vários setores da economia de São Paulo tanto no lado da oferta quanto da demanda, principalmente no último trimestre de 1918. Eles identificaram que houve queda no registro de empresas, empréstimos bancários, diminuição física e de valor na produção industrial de produtos não essenciais e aumento dos essenciais em um contexto de crise de saúde pública.

Esse estudo indica que epidemias respiratórias, como a da gripe espanhola ou da Covid-19, têm efeitos negativos na oferta de trabalho, por conta da mortalidade, e na oferta de bens e serviços, que diminui por conta das restrições ao funcionamento de estabelecimentos e fábricas. Pelo lado da oferta, essa queda na produção de bens e serviços gera aumento nos níveis de preços. Pelo lado da demanda, as pessoas reduzem o consumo para diminuir as chances de serem infectadas. Esse cenário de incerteza afeta negativamente o investimento agregado da economia.

Outro importante exemplo de epidemia que atingiu o Brasil foi o surto de febre amarela, que ocorreu no século XVII. Na Bahia, “o número de doentes foi calculado em 25.000 e o de mortos em 900” (Franco, 1969, p. 23). O estudo de Sampaio (2021) examina os impactos da epidemia da febre amarela na província da Bahia, observando que os mercadores começaram a evitar a cidade de Salvador, o que levou a uma dramática redução no abastecimento. A consequente diminuição na oferta de alimentos levou a um aumento significativo nos preços, dificultando a sobrevivência, especialmente da população pobre de Salvador. O cônsul inglês John Morgan relatou que, em seis meses de pandemia, os preços dos alimentos básicos aumentaram 50%, os aluguéis subiram 200% em cerca de um ano e os empregados domésticos elevaram o preço de seus serviços em 100%. Os efeitos da epidemia de febre amarela na oferta de produtos da Bahia é outro exemplo de como as epidemias podem afetar as economias.

2.2. A crise da Covid-19 e sua relação com a economia

O surto da Covid-19 gerou impactos em vários setores da economia mundial. Para conter a propagação do vírus, alguns países implantaram bloqueios de fronteira, prejudicando o comércio internacional. “A Organização Mundial do Comércio (OMC) estimou a redução do comércio internacional entre 13 e 32%, devido a pandemia” (Gama Neto, 2020, p.119).

O transporte internacional de passageiros também foi afetado pelas medidas de contenção. “Quase 15 mil aviões deixaram de viajar semanalmente e no Brasil as principais companhias aéreas reduziram seus voos em mais de 90%” (Gama Neto, 2020, p. 119). Com isso, como mostra o estudo de Mecca e Gedoz (2020), a suspensão de viagens e o fechamento de fronteiras em todo o mundo tornaram a atividade turística inviável. Isso se deve ao fato de que as pessoas não podiam se deslocar para outras áreas para atividades de consumo, além de suas áreas de residência. Além disso, mesmo os residentes não podiam frequentar áreas de lazer devido ao risco de contágio, já que pontos turísticos são locais de grande aglomeração de pessoas. Como resultado, a cadeia de setores relacionados ao turismo também é afetada.

As medidas de isolamento social e fechamento de fronteira resultaram na paralisação do comércio de bens e serviços e da indústria como um todo. Todos os países foram prejudicados por conta dos efeitos da Covid-19 no mercado internacional, incluindo o Brasil.

O estudo de Porsse et al. (2020) projeta os impactos da Covid-19 na economia brasileira. Os resultados indicam uma redução de 1,87% na taxa de crescimento do PIB nacional para 2020 no Cenário 1, e uma queda de 1,21% no Cenário 2. As medidas governamentais avaliadas neste estudo contribuem para atenuar cerca de 35% da queda projetada para a taxa de crescimento do PIB.

No cenário 1, a oferta de trabalho é afetada pela mortalidade, pelos efeitos do isolamento social e morbidade da Covid-19. No cenário 2, são mantidas as mesmas condições do cenário 1, mas considera um aumento no gasto do governo e das famílias devido a estímulos fiscais do governo para harmonizar a recessão econômica gerada pela epidemia de Covid-19. O estudo de Porsse et al. (2020) utiliza o modelo inter-regional dinâmico de equilíbrio geral computável (EGC), que é uma ferramenta para simular cenários econômicos.

Além disso, é importante destacar que o risco de contágio causado pela epidemia gerou uma forte e rápida reestruturação no mercado de trabalho. Em poucos dias, grande parte dos trabalhadores ao redor do mundo teve que se adaptar à nova rotina do trabalho remoto, fazendo com que a produtividade no período de transição fosse drasticamente comprometida, trazendo queda na renda de grande parte da população. Isso fez com que o nível de consumo fosse reduzido por problemas gerados tanto por essa queda de renda, como pelas políticas de contenção postas em prática pelos governos, ou até mesmo pelo medo do contágio nos ambientes de trabalho ou nos mercados.

2.3. Histórico da utilização dos modelos SIR e SIR-Macro

A epidemiologia pode ser definida como a ciência que estuda o processo saúde-doença em coletividades humanas analisando doenças e procurando métodos de prevenção (Gomes, 2015, p. 6). O modelo epidemiológico SIR, de Kermack e McKendrick (1927), é uma ferramenta matemática que analisa a dinâmica da propagação de epidemias e simula cenários para diferentes tipos de políticas de contenção. Esse modelo divide a população de acordo com o estado da infecção (suscetíveis, infectados e recuperados) e estuda o comportamento e as interações entre esses grupos.

Um exemplo de estudo que se utilizou dessa classe de modelo para entender os efeitos da vacinação contra a Hepatite-A foi o de Cristovão (2015). Seus resultados apontaram que os efeitos da vacinação na transmissão da doença estão relacionados ao intervalo etário escolhido e à cobertura vacinal desejada. As estratégias de vacinação no intervalo etário de 1 a 2 anos mostraram-se úteis para o controle da doença, mas exigem uma grande cobertura vacinal para levar à erradicação da doença. Por outro lado, as estratégias no intervalo de 5 a 6 anos não tiveram grande impacto na força de infecção da doença.

Esse estudo simulou dois cenários: um com a vacinação para criança de 1 a 2 anos e outro com vacinação para crianças de 5 a 6 anos. Os resultados mostraram que a vacinação em crianças de 1 a 2 anos tem melhor efeito.

Por outro lado, o modelo SIR-Macro, de Eichenbaum et al. (2020), é uma extensão do modelo SIR para considerar os efeitos das decisões dos agentes na economia. Os autores utilizaram o modelo SIR-Macro para analisar os efeitos da epidemia de Covid-19 nos Estados Unidos, considerando dois cenários: um com políticas de contenção e outro sem. De acordo com os autores, foi observado que a adoção de uma política de contenção ótima durante a grande recessão apresentou benefícios na forma de uma epidemia menos grave. Ao comparar com o equilíbrio competitivo, foi possível verificar uma redução no pico da taxa de infecção de 4,7% para 2,5% da população inicial. Além disso, a política ótima contribuiu para a redução da taxa de mortalidade em 0,40% da população inicial para 0,26%, o que equivale, para os Estados Unidos, a cerca de meio milhão de vidas salvas.

Além disso, os resultados obtidos por Euchenbaum et al. (2020) indicam que a política de contenção reduz a taxa de mortalidade a custo de uma recessão mais grave. Borelli e Góes (2020) também utilizaram o modelo SIR-Macro, mas para analisar os efeitos da Covid-19 em cinco estados brasileiros. Seus resultados mostraram que, como cada estado possui características diferentes, as políticas de contenção deveriam ser planejadas individualmente, observando as peculiaridades caso a caso. Os autores demonstraram que as diferenças intrínsecas de cada estado do Brasil influenciam as trajetórias ótimas de políticas de contenção diferentes para cada um deles. Essas diferenças intrínsecas não apenas afetam a severidade inicial

das medidas de contenção adotadas por cada estado, como também influenciam a dinâmica da evolução dessas taxas de contenção ao longo do tempo. Assim, cada estado deveria ser estudado individualmente para criar políticas de contenção específicas para sua realidade.

Nesta seção foi realizada uma breve exemplificação de como a literatura empírica vem utilizando os modelos SIR e SIR-Macro para estudar epidemiologia e sua relação com a economia. Na próxima seção, o modelo utilizado nesse trabalho será apresentado, assim como a estratégia de calibração utilizada para representar o caso do estado de Roraima.

3. Metodologia

3.1. O modelo SIR-Macro

O Modelo SIR, de Kermack e McKendrick (1927), é um modelo epidemiológico que mostra a evolução da população ao decorrer de uma epidemia, mensurando o número de suscetíveis, infectados e recuperados, e o percurso da epidemia para diferentes tipos de políticas de contenção. O modelo SIR-Macro (Eichenbaum et al., 2020), por sua vez, é uma adaptação ao modelo SIR original, considerando que as pessoas podem ser infectadas durante as interações com outros agentes econômicos. Assim, com o avanço no número de infectados, as pessoas buscam reduzir o tempo que gastam para comprar bens de consumo e o tempo que ofertam trabalho para as empresas para evitar a propagação da doença, causando recessão na economia. Nesta seção, apresentamos formalmente o modelo SIR-Macro.

3.2. A economia antes da epidemia

No estado pré-epidêmico, os agentes buscam maximizar seu próprio bem-estar. A função objetivo desses agentes é representada por:

$$U = \sum_t^{\infty} \beta^t u(c_t, n_t)$$

onde, $\beta \in (0,1)$ representa o fator desconto intertemporal, c_t representa as horas dedicadas a consumo e n_t indica as horas trabalhadas. A função de utilidade instantânea dos indivíduos é definida como:

$$u(c_t, n_t) = \ln \ln c_t - \frac{\theta}{2} n_t^2$$

onde θ é um parâmetro que mede o peso das horas trabalhadas na função utilidade. Se for grande, o impacto de n_t na função utilidade é maior que o de c_t . E se for baixo, c_t tem mais impacto na função utilidade que n_t .

A restrição orçamentária dos agentes é:

$$(1 + \mu_t)c_t = w_t n_t + \Gamma_t$$

onde, w_t representa o salário real e Γ_t são as transferências diretas (*lump-sum*) recebidas do governo. Por sua vez, μ_t é um imposto sobre o consumo, que serve de proxy para nossa política de contenção, uma vez que o governo pode elevar μ_t para reduzir o consumo e assim diminuir as interações entre os agentes. Portanto, consideraremos t como a taxa de contenção do modelo. Quando o modelo é simulado para o cenário de equilíbrio competitivo (sem política de contenção), μ_t assume o valor zero em todos os períodos. Mas, quando simulamos o cenário da política ótima de contenção,

estamos assumindo a adoção de uma política pública realizada por um governo benevolente, que tem o objetivo de maximizar a utilidade dos indivíduos. Portanto, a cada período, μ_t assume os valores necessários para maximizar a função utilidade acima. Logo, assim como c_t e n_t são variáveis de escolha para os indivíduos, μ_t também passa a ser uma variável de escolha, só que do governo benevolente.

Aplicando o método de Lagrange somos capazes de encontrar as condições de primeira ordem para o problema de maximização da utilidade dos indivíduos:

$$L = \sum_t^{\infty} \beta^t \left(\ln \ln C_t - \frac{\theta}{2} n_t^2 \right) + \lambda [w_t n_t + \Gamma_t - (1 + \mu_t) c_t]$$

onde, temos a seguinte condição de primeira ordem:

$$(1 + \mu_t) \theta n_t = c_t^{-1} w_t$$

Essa equação representa como o agente pode maximizar o bem-estar, dada a sua restrição orçamentária.

Por outro lado, as firmas produzem bens de consumo (C_t) utilizando horas de trabalho (N_t) de acordo com a tecnologia (A), a função de produção das firmas é representada por:

$$C_t = AN_t$$

As firmas escolhem quantas horas de trabalho precisam para maximizar seus lucros (Π) no tempo t :

$$\Pi = AN_t - w_t N_t$$

Essa equação mostra que o lucro das empresas é igual à receita das empresas ($AN_t = C_t$) menos os custos de produção ($w_t N_t$).

Além disso, a restrição orçamentária do governo é dada por:

$$\mu_t c_t = \Gamma_t$$

O governo gasta com as transferências *lump-sum* (t) tudo o que arrecada através do imposto sobre o consumo (tc_t).

Por fim, os mercados de trabalho e de bens de consumo se encontram em equilíbrio, respectivamente, quando: $n_t = N_t$ e $c_t = C_t$.

3.3. O início da epidemia

No modelo, a população é classificada em quatro grupos, os suscetíveis (S_t), os infectados (I_t), os recuperados (R_t) e os mortos (D_t). Os suscetíveis são os indivíduos que não contraíram a doença, mas podem ser infectados de três maneiras diferentes: no trabalho, durante o consumo ou em outras atividades não relacionadas nem ao trabalho, nem ao consumo.

A parcela de indivíduos suscetíveis que se infectam realizando atividades de consumo, durante o tempo t , é determinada por $\pi_1(S_t C^s_t)(I_t C'_t)$. Onde $S_t C^s_t$ e $I_t C'_t$ representam o total de despesas com consumo dos indivíduos suscetíveis e infectados, respectivamente. O parâmetro π_1 simboliza a probabilidade de um indivíduo ser infectado durante atividades de consumo.

Por outro lado, o número de infectados durante o trabalho, no período t , é determinado por $\pi_2(S_t N^s_t)(I_t N'_t)$. Onde $S_t N^s_t$ e $I_t N'_t$ representam o tempo dedicado ao trabalho dos indivíduos suscetíveis e infectados, respectivamente. O parâmetro π_2 simboliza a probabilidade de uma pessoa ser infectada durante o trabalho.

Por fim, o número de infectados durante outras atividades não relacionadas ao consumo ou ao trabalho, durante o período t , é dado por $\pi_3 S_t I_t$. Onde π_3 representa a probabilidade de uma pessoa ser infectada durante outras atividades não relacionadas ao consumo e trabalho.

Assim, o número total de novos infectados no período t é obtido por:

$$T_t = \pi_1(S_t C^s_t)(I_t C^I_t) + \pi_2(S_t N^s_t)(I_t N^I_t) + \pi_3 S_t I_t$$

Agora trataremos da evolução das populações de suscetíveis, infectados, recuperados e mortos ao decorrer da epidemia.

A evolução do número de pessoas suscetíveis no período $t+1$ é igual ao número de suscetíveis no período t , menos os novos infectados (T_t) no período t :

$$S_{t+1} = S_t - T_t$$

Por outro lado, o número de infectados no período $t+1$ é igual ao número de infectados no período t , mais os novos infectados no período t , menos os recuperados e os mortos no período t .

$$I_{t+1} = I_t + T_t - (\pi_r + \pi_d)I_t$$

Onde π_r é a probabilidade de uma pessoa infectada se recuperar e π_d é a probabilidade de uma pessoa infectada morrer. A redução gradual da capacidade do sistema de saúde afeta diretamente a taxa de mortalidade, esse efeito é representado como uma função convexa de uma fração da população infectada

$$\pi_{dt} = \pi_d + \kappa I_t^2$$

O número de recuperados no período $t+1$ é igual ao número de recuperados no período t , mais o número de recém-recuperados no mesmo período.

$$R_{t+1} = R_t + \pi_r I_t$$

Por fim, o número de mortos no período $t+1$ é igual ao número de mortos no período t , mais o número de novas mortes.

$$D_{t+1} = D_t + \pi_d I_t$$

A população no tempo $t+1$ é igual à população do tempo t , menos as novas mortes.

$$POP_{t+1} = POP_t - \pi_d I_t$$

Além disso, como no período pré-epidemia a população equivale a 100%, consideramos a população inicial igual a 1:

$$POP_0 = 1$$

Agora abordamos o problema de otimização de um indivíduo genérico do tipo j (tipo $j = S, I, R$).

A variável U_t^j representa a utilidade do indivíduo tipo j . No tempo t , a restrição orçamentária desse indivíduo é representada por:

$$(1 + \mu_t)c_t^j = w_t \phi^j n_t^j + \Gamma_t$$

Onde c_t^j e n_t^j representam o consumo e as horas trabalhadas do indivíduo tipo j , respectivamente. E, ϕ^j é um parâmetro que governa a produtividade do trabalho. Para os indivíduos suscetíveis e recuperados $\phi=1$, para os infectados $\phi<1$, isso significa

que os indivíduos infectados produzem menos que os suscetíveis e recuperados, por estarem doentes.

Agora apresentamos o problema da otimização dos suscetíveis, infectados e recuperados individualmente.

3.3.1. Suscetíveis

Utilidade das pessoas suscetíveis é representada por:

$$U_t^s = u(c_t^s, n_t^s) + \beta \left[(1 - \tau_t) U_{t+1}^s + \tau_t U_{t+1}^i \right]$$

Onde, a variável τ_t representa a probabilidade de uma pessoa suscetível ser infectada.

$$\tau_t = \pi_1 c_t^s (I_t C_t^i) + \pi_2 n_t^s (IN_t^i) + \pi_3 I_t$$

A expressão $[(1-\tau_t)U_{t+1}^s + \tau_t U_{t+1}^i]$ diz que a probabilidade do indivíduo ser infectado no período $t+1$ afeta a utilidade no período t . Pois, as pessoas têm consciência que se trabalharem e consumirem menos, terão menos chances de serem infectadas.

Assim, as condições de primeira ordem dos indivíduos suscetíveis, para consumo e trabalho são:

$$u_1(c_t^s, n_t^s) - (1 + \mu_t) \lambda_{bt}^s + \lambda_{\tau t} \pi_1 (I_t C_t^i) = 0$$

$$u_2(c_t^s, n_t^s) + w_t \lambda_{bt}^s + \lambda_{\tau t} \pi_2 (IN_t^i) = 0$$

Onde λ_{bt}^s e $\lambda_{\tau t}$ são os multiplicadores de Lagrange associados à restrição dos indivíduos suscetíveis e à probabilidade dos indivíduos suscetíveis serem infectados, respectivamente.

Por outro lado, a condição de primeira ordem para τ_t é

$$\beta(U_{t+1}^i - U_{t+1}^s) - \lambda_{\tau t} = 0$$

3.3.2 Infectados

A utilidade dos infectados é dada por:

$$U_t^i = u(c_t^i, n_t^i) + \beta \left[(1 - \pi_r - \pi_d) U_{t+1}^i + \pi_r U_{t+1}^r \right]$$

As condições de primeira ordem para os indivíduos infectados são

$$u_1(c_t^i, n_t^i) = \lambda_{bt}^i (1 + \mu_t)$$

$$u_2(c_t^i, n_t^i) = - \phi_t^i w_t \lambda_{bt}^i$$

onde, λ_{bt}^i representa o multiplicador de Lagrange associado à restrição do indivíduo infectado.

3.3.3 Recuperados

A utilidade dos indivíduos recuperados é dada por:

$$U_t^r = u(c_t^r, n_t^r) + \beta U_{t+1}^r$$

As condições de primeira ordem para os recuperados no consumo e no trabalho:

$$u_1(c_t^r, n_t^r) = \lambda_{bt}^r (1 + \mu_t)$$

$$u_2(c_t^r, n_t^r) = - w_t \lambda_{bt}^r$$

onde, λ_{bt}^r representa o multiplicador de Lagrange associado à restrição do indivíduo recuperado.

3.3.4. Restrição orçamentária do governo e equilíbrio dos mercados

A restrição orçamentária do governo é dada por:

$$\mu_t (S_t c_t^s + I_t c_t^i + R_t c_t^r) = \Gamma_t (S_t + I_t + R_t)$$

No equilíbrio, cada tipo de indivíduo maximiza sua respectiva função utilidade, a restrição do governo é satisfeita e os mercado de consumo e trabalho estão em equilíbrio, logo:

$$S_t C_t^s + I_t C_t^i + R_t C_t^\Gamma = AN_t$$

$$S_t N_t^s + I_t N_t^i \phi^i + R_t N_t^\Gamma = N_t$$

4. Estratégia de calibração do modelo

Assim como Borelli e Góes (2020), decidimos normalizar o tempo total de simulação do modelo para 1, assim podemos analisar os dados pelo progresso da epidemia (%) e não por datas específicas, o que não é o foco do trabalho. Além disso, a calibração é realizada com dados semanais.

Para calibrar os valores de π_1 , π_2 e π_3 , usamos a mesma estratégia de Borelli e Góes (2020): calculamos o valor das parcelas das transmissões que ocorrem no trabalho (α_2) e em outras atividades (α_3) e obtemos a parcela de transmissões ocorridas no consumo (α_1) por resíduo, pois $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$. Além disso, seguimos o princípio proposto por Ferguson *et al.* (2006) e utilizado por Eichenbaum *et al.* (2020), em que a importância relativa entre os meios de transmissão da doença é semelhante para várias doenças respiratórias. Esse padrão sugere que 30% das transmissões ocorreram em casa, 33% ocorreram em atividades comunitárias gerais e 37% ocorreram na escola ou no trabalho, portanto:

$$\alpha_2 = \frac{4 \cdot (\text{Trabalhadores})}{4 \cdot (\text{Trabalhadores}) + 10 \cdot (\text{Estudantes})} \cdot 37\%$$

onde, “Trabalhadores” representa o número total de pessoas com 14 anos ou mais ocupadas na força de trabalho no estado de Roraima, obtido no Sistema IBGE de recuperação automática (Sidra). “Estudantes” representa o número total de estudantes no estado de Roraima, também obtido no Sidra do IBGE. Os pesos 4 e 10 dizem respeito à quantidade média de contatos físicos por dia na escola e no trabalho, respectivamente, que foram utilizadas em Borelli e Góes (2020) e são provenientes do estudo de Lee *et al.* (2010).

Por outro lado, α_3 representa a parcela das infecções que não são relacionadas ao consumo ou trabalho. Por conta da disponibilidade de dados, α_3 é simplificado nas transmissões que ocorrem em casa (α_3^{casa}), no transporte ($\alpha_3^{transporte}$) e nas escolas ($\alpha_3^{escolas}$). Cada parcela é calibrada individualmente, e depois obtém-se $\alpha_3 = \alpha_3^{casa} + \alpha_3^{transporte} + \alpha_3^{escolas}$.

$$\alpha_3^{escolas} = \frac{10 \cdot (\text{Estudantes})}{4 \cdot (\text{Trabalhadores}) + 10 \cdot (\text{Estudantes})} \cdot 37\%$$

$$\alpha_3^{casa} = 30\% \cdot \frac{(\text{Afazeres domésticos})}{16} \cdot (\text{pessoas por residência})$$

onde, “Afazeres domésticos” representa o tempo médio de horas diárias dedicado a afazeres domésticos e cuidados pessoais da população, obtido no Sidra do IBGE; “pessoas por residência” representa o número médio de pessoas por domicílio, também obtido no Sidra do IBGE. O tempo de sono não é considerado tempo suscetível à infecção; considerando o tempo médio de 8 horas de sono por dia, o tempo suscetível à infecção é de 16 horas diárias (24 h - 8 h), logo:

$$\alpha_3^{transporte} = 33\% \cdot \frac{(\text{Tempo médio de transporte})}{16 - (\text{afazeres domésticos}) - (\text{Trab. ou escola})} \cdot 10$$

onde, “*Tempo médio de transporte*” representa o tempo habitual de deslocamento para o trabalho dos indivíduos, obtido no Sidra do IBGE. Assim, o tempo diário das atividades gerais é considerado 24 h menos o tempo gasto de sono, afazeres domésticos, trabalho e escola.

Após o cálculo de α_1 , α_2 e α_3 , os valores de π_1 , π_2 e π_3 são obtidos através do modelo:

$$\frac{\pi_1 C^2}{\pi_1 C^2 + \pi_2 N^2 + \pi_3} = \alpha_1$$

$$\frac{\pi_2 N^2}{\pi_1 C^2 + \pi_2 N^2 + \pi_3} = \alpha_2$$

$$\frac{\pi_3}{\pi_1 C^2 + \pi_2 N^2 + \pi_3} = \alpha_3$$

As variáveis C e N representam o consumo e as horas trabalhadas no estado estacionário pré-epidêmico, que são calculadas diretamente pelo modelo.

Segundo a Organização Pan-Americana da Saúde - OPAS (2020), a taxa de

$$IFR = \frac{\text{Número de mortes pela doença}}{\text{Número de indivíduos infectados}} \times 100$$

mortalidade por infecção (IFR) é obtida por:

Entretanto, com os números de mortes e infectados obtidos no site do Governo Federal¹, a IFR calculada foi de 1,6%, mas

esse valor é extremamente superior aos valores encontrados na literatura para outros estados/países. Para superar esse problema, decidimos utilizar um IFR igual a 0,9%, que é a média dos IFRs estimados para 16 estados brasileiros por Mellan *et al.* (2020). Entretanto, fizemos uma análise de sensibilidade neste parâmetro para medir efeitos maiores e menores na seção robustez.

Calibraramos o valor de κ para que os picos de taxas de mortalidade no equilíbrio competitivo adequem-se às taxas de fatalidade entre os infectados (IFR). Para o valor de κ , aplicamos o mesmo valor utilizado por Borelli e Góes (2020) e Rabelo e Soares (2020).

O valor de θ e A foram calibrados de maneira que no período estacionário pré-epidêmico, o indivíduo trabalhe o equivalente à média de horas trabalhadas no estado de Roraima (26,85 horas por semana) e receba o equivalente à renda per capita média do estado de Roraima (R\$ 263,75 por semana). Os dados do tempo médio de trabalho e a renda per capita, para o ano de 2019, foram obtidos no Sidra do IBGE. Das condições de primeira ordem do problema de maximização dos indivíduos no estado estacionário, temos que:

$$\theta = 1/N^2$$

$$A = C/N$$

Para ϕ , utilizamos o mesmo valor que Borelli e Góes (2020), que é equivalente a 0,8, isso se baseia na hipótese de que a população

¹ www.covid.saude.gov.br

sintomática não trabalha e, segundo o *China Center for Disease Control and Prevention*, 80% dos infectados são assintomáticos.

O tamanho inicial da população foi normalizado para 1. A população inicial de infectados (ε) representa um número inicial de 100 infectados no período $t = 0$, é dada por:

$$\varepsilon = \frac{100}{POP}$$

onde, POP representa a população residente no estado de Roraima; esse dado foi obtido no Sidra do IBGE. A Tabela 1 resume a calibração utilizada nas simulações.

5. Resultados²

Nesta seção, discutimos os resultados do modelo. Inicialmente, simulamos um cenário de equilíbrio competitivo, onde nenhuma política de contenção é

Tabela 1. Valores dos parâmetros utilizados nas simulações

VARIÁVEL	DESCRÍÇÃO	VALOR	FONTE
α_1	Parcela de transmissões ocorridas no consumo	IFR	Dados do Sidra/IBGE
α_2	Parcela de transmissões ocorridas no trabalho IFR	0,320	Dados do Sidra/IBGE
α_3	Parcela de outros tipos de transmissão	0,118	Dados do Sidra/IBGE
IFR	Taxa de mortalidade por infecção	0,526	Report 21 (2020)
ε	População inicial de infectados	0,9	Dados do Sidra/IBGE
K	Redução da capacidade do sistema de saúde	0,00015273	Borelli e Góes (2020)
β	Taxa de desconto intertemporal	0,966	Borelli e Góes (2020)
A	Produtividade total dos fatores	9,8231	Calibrado no modelo
θ	Parâmetro da função utilidade	0,0013871	Calibrado no modelo
ϕ^i	Produtividade do trabalho dos infectados	0,80	Borelli e Góes (2020)

Fonte: Elaboração própria.

² Após a calibragem, o modelo foi simulado utilizando o software MATLAB para obter os resultados.

realizada. Logo após, simulamos o modelo para o caso da adoção de uma política de contenção ótima.

5.1. Equilíbrio competitivo

No equilíbrio competitivo, nenhuma política de contenção é aplicada pelo governo ($\mu_t=0$), porém, o progresso da epidemia afeta e é afetado pelas decisões individuais dos agentes econômicos, que buscarão diminuir a probabilidade de serem infectados reduzindo o próprio consumo e horas trabalhadas.

Em nossa simulação, a epidemia inicia com uma população de 100 infectados. O número de infectados aumenta até atingir um pico. À medida que a população de infectados cresce, a população de suscetíveis diminui. Os infectados podem se tornar mortos ou recuperados, portanto, com o aumento dos infectados, a população de mortos e recuperados inevitavelmente cresce.

Assim, o consumo agregado e o trabalho agregado caem, devido a produtividade reduzida dos infectados e a redução, por mortes, da força de trabalho. E, com o aumento da taxa de mortalidade, os agentes econômicos reduzem as interações econômicas (consumo e trabalho) entre si para reduzir a probabilidade de serem infectados.

O modelo SIR, de Kermack e McKendrick (1927), pressupõe que na ausência de vacinas, a epidemia acaba quando uma porcentagem da população é infectada ao ponto de atingir a imunidade de rebanho. O modelo de Eichenbaum *et al.* (2020) foi desenvolvido no início da pandemia de Covid-19, quando ainda não existiam vacinas (nem perspectiva de

quando elas iriam chegar) e a possibilidade de reinfeção ainda não estava no radar. Portanto, assumiremos como hipótese que não existe vacina (e nem remédio) para a Covid-19 e que a tese de imunidade de rebanho de Kermack e McKendrick (1927) é válida. Porém, como não existe um número exato para a parcela de infectados necessários para atingir a imunidade de rebanho, por simplicidade, assim como Eichenbaum *et al.* (2020) e Borelli e Góes (2020), nós assumimos que a imunidade de rebanho ocorre quando 60% da população é infectada.

Agora abordamos os dados para o estado de Roraima. A Figura 1 mostra o progresso da epidemia, apresentando os dados epidemiológicos como percentual do valor inicial da população, expondo a evolução dos indivíduos suscetíveis, infectados, recuperados e mortos. Além disso, mostra os efeitos da epidemia no consumo e trabalho agregados, como variações percentuais do estado estacionário, e as variações percentuais na taxa de mortalidade e na política de contenção (que aqui é nula). A Figura 2 apresenta apenas as variáveis epidemiológicas, porém em valor absoluto da população de Roraima.

A análise das figuras 1 e 2 mostra que o pico de infectados ocorre em 23,50% do progresso da epidemia, com 3,75% da população infectada (23.688 pessoas) e com a taxa de mortalidade de 0,90%. Conforme o número de mortos e infectados aumenta, o consumo agregado e o trabalho agregado caem 15,98% em relação ao estado estacionário. O vale da recessão ocorre em 23% do progresso da epidemia.

Por fim, o percentual da população infectada ao longo da epidemia é de 47,41% (299.247 infectados), e o percentual de mortos é de 0,29% (1.854 mortos).

Figura 1. Modelo SIR-Macro: Evolução da Covid-19 no cenário de equilíbrio competitivo no estado de Roraima (% da população inicial)

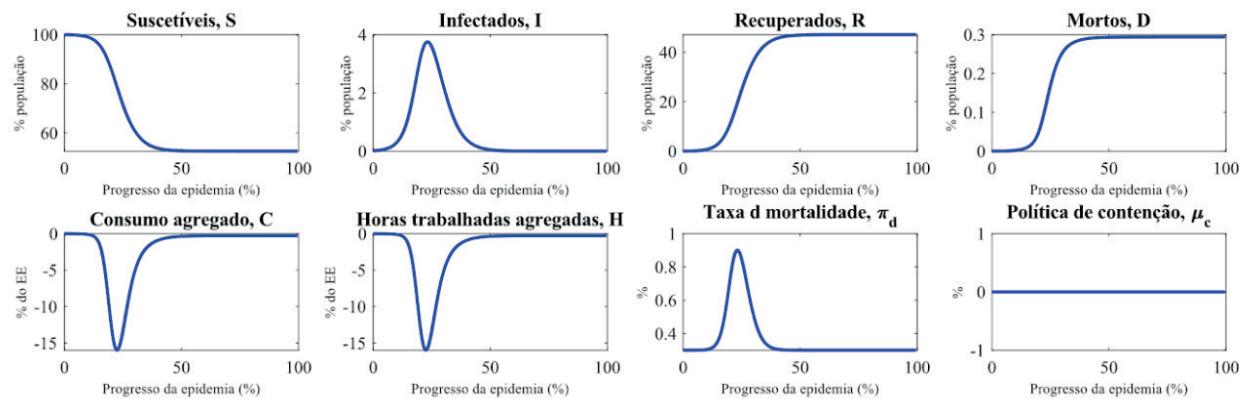
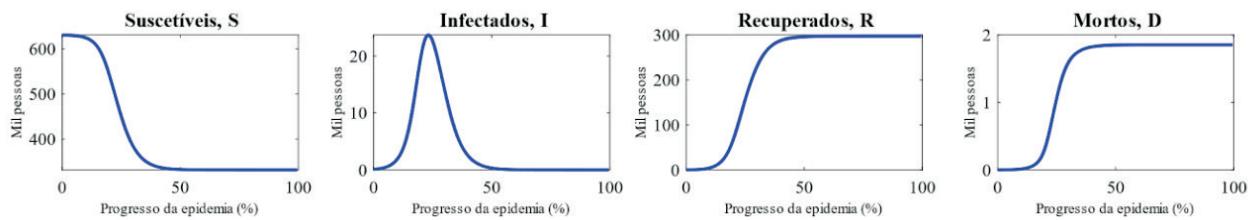


Figura 2. Modelo SIR-Macro: Evolução da Covid-19 no cenário de equilíbrio competitivo no estado de Roraima (valor absoluto da população)



5.2. Política ótima de contenção

Agora iremos apresentar os resultados para o cenário com a adoção da política ótimade contenção. Neste cenário, além dos agentes econômicos reduzirem por conta própria o consumo e as horas trabalhadas, para diminuírem as chances de serem infectados, o governo impõe medidas de contenção para evitar a propagação da doença. Existem vários tipos de políticas de contenção que podem ser aplicadas pelos governos, como exemplo, isolamento social, fechamento de atividades não essenciais como restaurantes e bares,

entre outras. No modelo SIR-Macro, as medidas de contenção são realizadas através de manipulações do imposto sobre consumo, que é considerado como uma taxa de contenção. A intensidade da política de contenção aumenta progressivamente, seguindo paralelamente a evolução da taxa de infectados. Isso foi observado por Eichenbaum *et al.* (2020), no início da epidemia ($t=0$), quando a população de infectados é baixa, o impacto das externalidades negativas é baixo, portanto, as políticas de contenção têm menos intensidade. Uma política de contenção intensa em $t=0$, teria um custo alto para

pouco resultado. Conforme a população de infectados aumenta, o impacto das externalidades se agrava, exigindo uma taxa de contenção maior. Além disso, para alcançar a imunidade de rebanho é necessário aumentar as taxas de contenção conforme a infecção se agrava e diminuir a taxa de contenção gradualmente quando a taxa de novos infectados declina.

Em nossa simulação para o estado de Roraima, no período $t=0$, quando a população de infectados é de 100 pessoas, a taxa de contenção é de 2,88%. Esse valor simboliza que o estado não requer políticas

de contenção drásticas logo no início. O pico da taxa de contenção é de 79,88% e só ocorre em 24% do progresso da epidemia.

Agora são apresentados nossos resultados para este cenário, na Figura 3 apresentamos os mesmos resultados da Figura 1, mas para o cenário da política ótima de contenção. Por sua vez, na Figura 4 apresentamos os dados da evolução epidemiológica, porém com percentual da população inicial (antes da epidemia).

O pico de infectados ocorre em 26% do progresso da epidemia, com 1,56% da população infectada (9.846 infectados), a taxa de mortalidade no pico é de 0,40%. O

Figura 3. Modelo SIR-Macro: Evolução da Covid-19 no cenário da política ótima de contenção no estado de Roraima (% da população inicial)

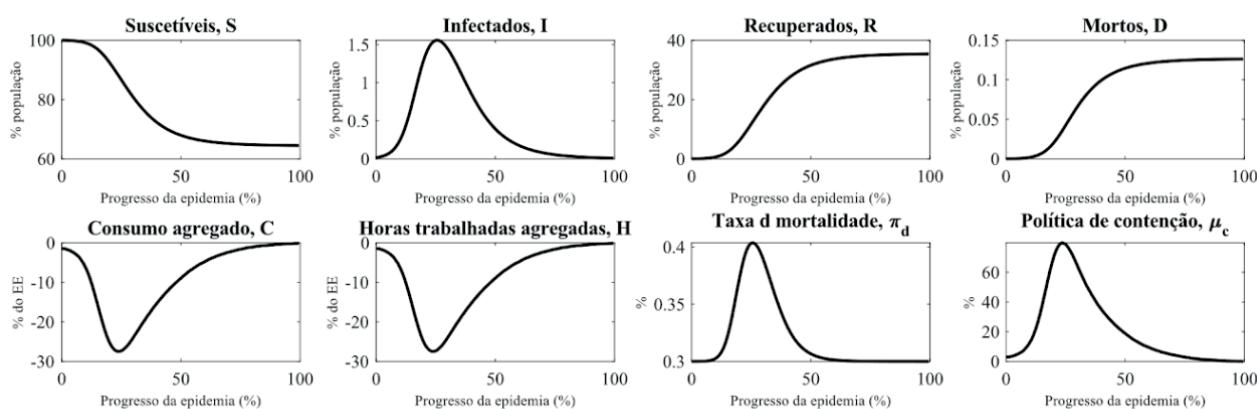
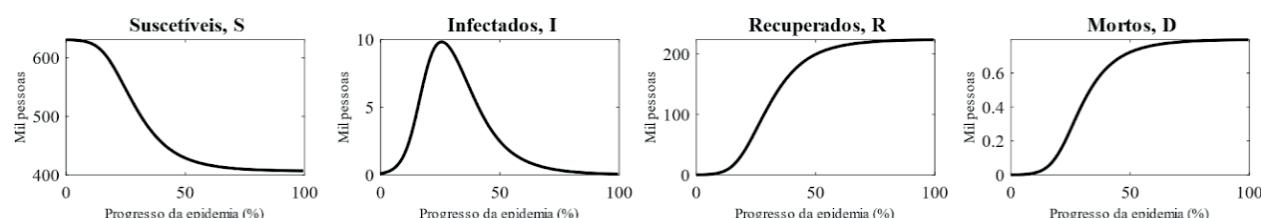


Figura 4. Modelo SIR-Macro: Evolução da Covid-19 no cenário da política ótima de contenção no estado de Roraima (valor absoluto da população)



consumo agregado e o trabalho agregado caem 26,44%. O vale da recessão ocorre em 24% do progresso da epidemia.

O percentual da população infectada é de 35,52% (224.171 infectados) e o percentual de mortos no fim da epidemia é de 0,13% (796 mortos).

5.3. As consequências da política de contenção

Nessa seção iremos apresentar o resultado comparado das políticas de contenção em relação ao equilíbrio competitivo. As figuras 5 e 6 apresentam

a comparação entre os resultados do equilíbrio competitivo com a política de contenção, considerando o mesmo padrão das figuras apresentadas anteriormente.

Com a política de contenção, o percentual de infectados no pico tem uma redução de 2,19%, isso representa uma redução de 13.842 infectados. Em relação ao tempo, o pico ocorre 2,5% mais tarde com as políticas de contenção, ou seja, ocorre um achatamento da curva. A taxa de mortalidade reduz 0,5%.

Entretanto, a recessão econômica se agrava com a política de contenção. O consumo agregado e o trabalho agregado

Figura 5. Modelo SIR-Macro: Comparação entre os cenários de equilíbrio competitivo e política ótima de contenção (% da população inicial)

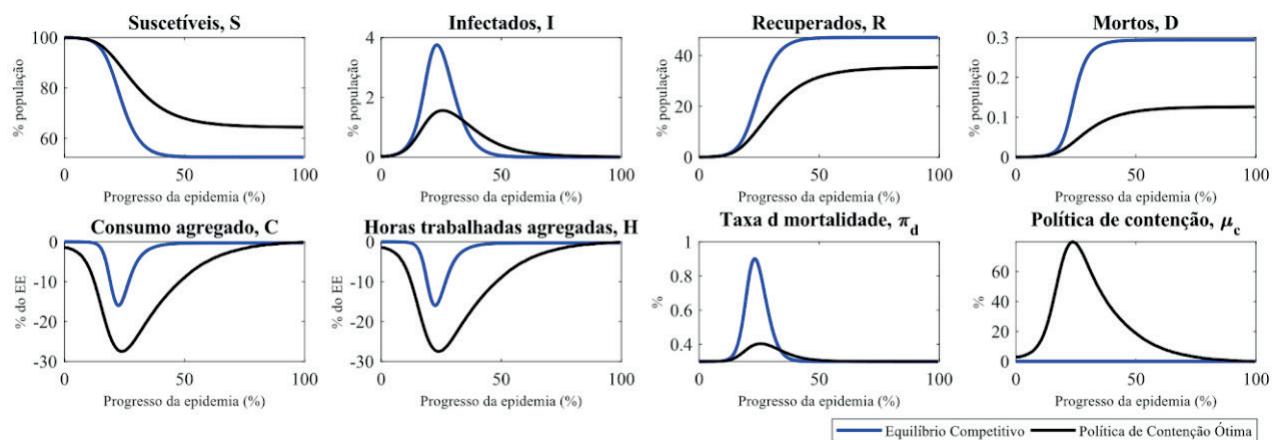
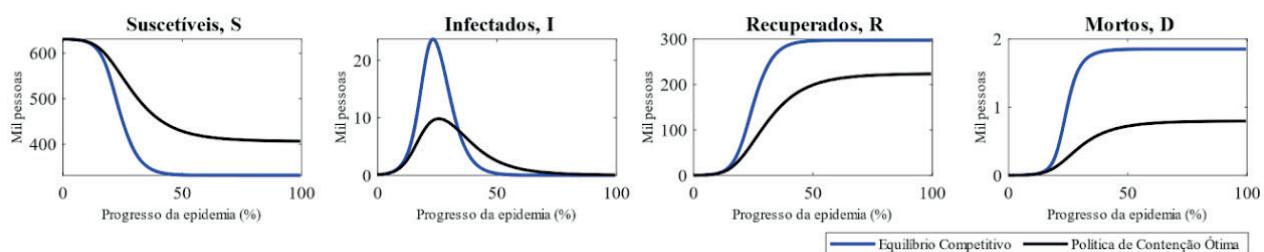


Figura 6. Modelo SIR-Macro: Comparação entre os cenários de equilíbrio competitivo e política ótima de contenção (valor absoluto da população)



caem 10,46% mais que no cenário do equilíbrio competitivo. Além disso, a recessão é mais longa no cenário de política ótima de contenção, pois o vale da recessão ocorre 1% mais tarde.

Com as políticas de contenção, o percentual da população infectada ao longo da epidemia cai 11,89%, o que representa uma redução de 55.076 infectados. Por fim, o percentual de mortos no fim da epidemia cai 0,16%, o que representa um total de 1.058 vidas preservadas com as políticas de contenção.

5.4. Análise de robustez da taxa de mortalidade pela infecção (IFR)

Nessa seção realizamos uma análise de robustez para medir como o modelo reage às alterações da IFR. A Figura 7 apresenta os resultados dessa análise. É possível observar que para IFR maiores, o número de mortos é maior e, por consequência, a população de infectados, suscetíveis e recuperados é menor. Além disso, quanto maior a IFR, mais grave é a recessão econômica. Para IFR menores o efeito é oposto, a curva da recessão achata, a

população de suscetíveis, infectados e recuperados aumenta e o percentual de mortos diminui.

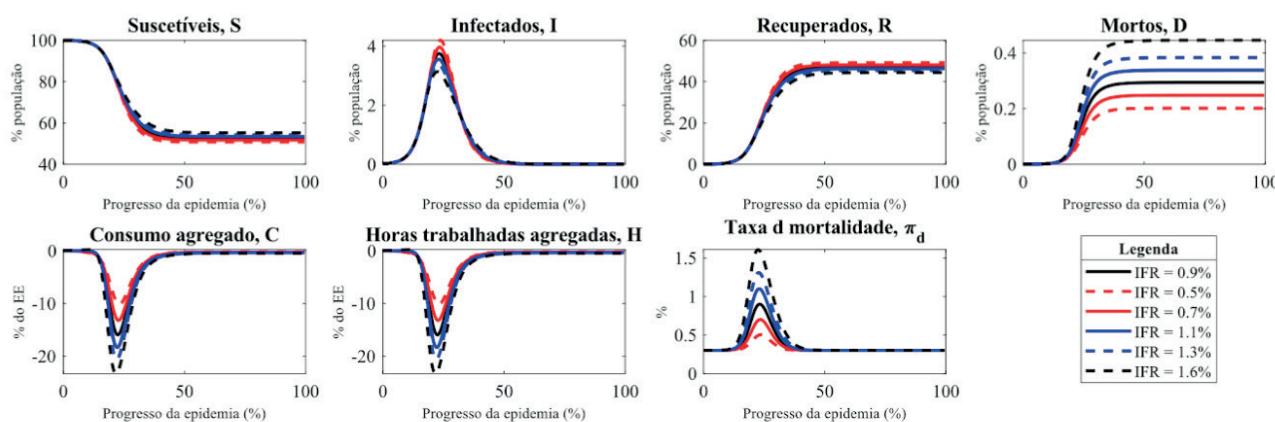
6. Conclusão

Este trabalho realizou a análise da relação entre a epidemia da Covid-19 e a economia do estado de Roraima. Para isso, utilizou o modelo SIR-Macro proposto por Eichenbaum et al. (2020) e apresentou os resultados simulados comparados dos cenários de equilíbrio competitivo e da política ótima de contenção para o estado de Roraima e realizou a análise de sensibilidade do parâmetro IFR.

O principal objetivo foi analisar o percurso da epidemia de Covid-19 no estado de Roraima, um estado pequeno e afastado dos grandes centros urbanos do Brasil. O trabalho mostrou os efeitos da epidemia na economia e as consequências das decisões políticas na economia e no percurso da epidemia.

É importante salientar que o modelo SIR-Macro de Eichenbaum et al. (2020), utilizado no trabalho, foi desenvolvido no

Figura 7. Modelo SIR-Macro: Análise de robustez da taxa de mortalidade pela infecção (IFR)



ínicio da pandemia, quando não existia vacina ou remédios, por conta disso, esse trabalho não tem a intenção de prever o percurso da pandemia ou comparar os dados obtidos com a realidade, e sim realizar uma análise do modelo SIR-Macro calibrado com os dados de Roraima.

Os resultados mostram que no equilíbrio competitivo, 47,41% da população é infectada, isso representa o total de 299.247 infectados, e o percentual de mortos é de 0,29%, que representa o total de 1854 mortos. A recessão no equilíbrio competitivo é de 15,98% no consumo e no trabalho agregado.

No cenário com políticas de contenção, o percentual da população infectada é de 35,52%, isso representa o total de 224.171 infectados, e o percentual de mortos é de 0,13% da população, que representa o total de 796 mortos. Com as políticas de

contenção, a recessão se agrava, com queda de 26,44% no consumo e trabalho agregado.

Comparando os dois cenários, com as políticas de contenção, o percentual de infectados diminui em 11,89%, é uma diferença de 55.076 infectados, o percentual de mortos diminui em 0,16%, isso representa o total de 1.058 vidas preservadas. A recessão econômica se agrava no cenário de política de contenção, a queda no consumo e no trabalho agregado é 10,46% maior nesse cenário.

Esse trabalho busca contribuir para literatura ao utilizar o modelo SIR-Macro para estudar a relação entre economia e epidemia no estado de Roraima, o que ainda não havia sido feito, abrindo uma importante agenda de pesquisa para que outros estados sejam calibrados e tenham seus resultados divulgados.



Referências Bibliográficas

BORELLI, L.; GÓES, G. S. (2020). *A Macroeconomia das epidemias: Heterogeneidade Interestadual no Brasil*. Brasília: IPEA.

CDC. (2020). *History of 1918 Flu Pandemic*. Centers for Disease Control and Prevention. Disponível em: https://archive.cdc.gov/www_cdc_gov/flu/pandemic-resources/1918-commemoration/1918-pandemic-history.htm. Acesso em: 7 dez. 2024.

CRISTOVÃO, R. B. (2015). *Modelo SIR: Uma Aplicação à Hepatite A*. São Paulo, SP. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Matemática Aplicada e Computacional). Universidade de São Paulo, Instituto de Matemá-

tica e Estatística, 34 f. Disponível em: <https://www.ime.usp.br/~map/tcc/2015/Rafael%20Belmiro.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2024.

EICHENBAUM, M. S.; REBELO, S.; TRABANDT, M. (2020). *The Macroeconomics of Epidemics*. Cambridge: National Bureau of Economic Research. Disponível em: <http://www.nber.org/papers/w26882>. Acesso em: 14 nov. 2024.

FERGUSON, N.; CUMMINGS, D.; FRASER, C.; CAJKA, J. C.; COOLEY, F. C.; BURKE, D. S. (2006). Strategies for mitigating an influenza pandemic. *Nature*, v. 442, p. 448–452. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature04795>. Acesso em: 12 dez. 2024.

- FRANCO, O. (1969). *História da Febre-Amarela no Brasil*. Rio de Janeiro: Ministério da Saúde Departamento Nacional de Endemias Rurais.
- GAMA NETO, R. B. (2020). Impactos da Covid-19 sobre a economia mundial. *Boletim de Conjuntura (BOCA)*, v. 2(5), p. 113–127. Disponível em: <https://revista.ioles.com.br/boca/index.php/revista/article/view/134>. Acesso em: 7 dez. 2024.
- GOMES, E. C. S. (2015). *Conceitos e ferramentas da epidemiologia*. Recife: Ed. Universitária da UFPE83.
- KERMACK, W. O.; MCKENDRICK, A. G. A. (1927). Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*. v. 115, n. 772, p. 700-721. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.1927.0118>. Acesso em: 14 nov. 2024.
- LEE, B. Y.; BROWN, S. T.; COOLEY, P. C.; ZIMMERMAN, R. K.; WHEATON, W. D.; IMMER, S. M.; GREFENSTETTE, J. J.; ASSI, T.-M.; FURPHY, T. J.; WAGENER, D. K. (2010). A computer simulation of employee vaccination to mitigate an influenza epidemic. *American Journal of Preventive Medicine*, v. 38(3), p. 247-257.
- MARSON, M. D.; SIVIERO, P. C. L. (2024). Os efeitos econômicos da pandemia de gripe espanhola de 1918: Uma análise empírica da mortalidade sobre a economia de São Paulo. *Revista Brasileira de Estudos de População*, v. 41, p. 1–14. Disponível em: <https://rebep.org.br/revista/article/view/2410>. Acesso em: 07 dez. 2024.
- MECCA, M. S.; GEDOZ, M. G. A. (2020). Covid-19: Reflexos no Turismo. *Rosa dos Ventos*, Universidade de Caxias do Sul, v. 12, núm. Esp. 3. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=473564229006>. Acesso em: 14 nov. 2024.
- MELLAN, Thomas A.; HOELTGEBAUM, Henrique H.; MISHRA, Swapnil et al. (2020). *Estimating COVID-19 cases and reproduction number in Brazil*. Imperial College London, 8 maio 2020. Disponível em: <https://spiral.imperial.ac.uk/bitstream/10044/1/78872/11/2020-05-08%20COVID19%20Report%202021.pdf>. Acesso em: 7 dez. 2024.
- OMS. (2022). *Number of deaths due to HIV/AIDS Estimates by WHO region*. World Health Organization. Disponível em: <https://apps.who.int/gho/data/node.main.623?lang=en>. Acesso em: 11 jul. 2022.
- OMS. (2022). *WHO Coronavirus (Covid-19) Dashboard*. World Health Organization. Disponível em <https://covid19.who.int/>. Acesso em: 10 jul. 2022.
- OPAS. (2020). *WHO declares public health emergency for novel coronavirus*. Organização Pan-Americana da Saúde. Disponível em: <https://www.paho.org/pt/news/30-1-2020-who-declares-public-health-emergency-novel-coronavirus>. Acesso em: 7 dez. 2024.
- PORSSE, A. A.; SOUZA, K. B. de; CARVALHO, T. S.; VALE, V. A. (2020). *Impactos Econômicos do Covid-19 no Brasil*. Nota Técnica NEDUR-UFPR No 01-2020. Curitiba: Núcleo de Estudos em Desenvolvimento Urbano e Regional (NEDUR) da Universidade Federal do Paraná. Disponível em: (PDF) Nota Técnica NEDUR-UFPR 01-2020 Impactos Econômicos da COVID-19 no Brasil (researchgate.net). Acesso em: 14 nov. 2024.
- RABELO, M.; SOARES, J. (2020). *The macroeconomics of epidemics: results for Brazil*. 2020. Working paper. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Matheus-Rabelo-3/publication/340984435_The_Macroeconomics_of_Epidemics_results_for_Brazil/links/5ea8b001299bf18b9584404d/The-Macroeconomics-of-Epidemics-results-for-Brazil.pdf. Acesso em: 7 dez. 2024.
- SAMPAIO, M. G. V. (2021). Economia e crise sanitária na Província da Bahia: os casos da febre amarela e cólera-morbo (1849 – 1856). *Revista Crítica Histórica*, v. 12(24), p. 242-268. Disponível em: <https://www.seer.ufal.br/index.php/criticahistorica/article/view/12121>. Acesso em: 14 nov. 2024.