

Estudo N°2 sobre a evolução do novo Coronavírus (SARS-CoV-2) no estado do Pará (Brasil), Março – Junho, 2020/**Study N°2 on the evolution of new Coronavirus (SARS-CoV-2) in the state of Pará (Brazil), March – June 2020**

DOI:10.34119/bjhrv3n3-114

Recebimento dos originais:01/04/2020

Aceitação para publicação: 29/05/2020

Ruan Benedito Gaia Cabral

Bacharel em Engenharia Ambiental & Energias Renováveis pela Universidade Federal Rural da Amazônia (EAER/UFRA)

Licenciado em Geografia pelo Centro Universitário Leonardo da Vinci (UNIASSELVI)
Instituição: Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)Endereço: Avenida Presidente Tancredo Neves, 2501 – Terra Firme, Belém – PA, Brasil
E-mail: ruan100_cabral@hotmail.com**Esther da Silva Alencar**

Acadêmica de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura pela Universidade Federal Rural da Amazônia (ECA/UFRA)

Técnica em Edificações pelo Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA)
Instituição: Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)Endereço: Avenida Presidente Tancredo Neves, 2501 – Terra Firme, Belém – PA, Brasil
E-mail: estherteceng@gmail.com**Ana Lúcia da Silva Ferreira**

Mestre em Epidemiologia pela Universidade do Estado do Pará (UEPA)

Departamento de Epidemiologia/Diretoria de Vigilância em Saúde

Instituição: Secretaria estadual de saúde do estado do Pará (SESPA)

Endereço: Travessa Padre Eutiquio, 1300 – Batista Campos, Belém – PA, Brasil
E-mail: analuciaferreira@sespa.pa.gov.br**Daniele Monteiro Nunes**

Mestre em Epidemiologia pelo Instituto Evandro Chagas (IEC)

Departamento de Epidemiologia/Informações Estratégicas de Vigilância em Saúde

Instituição: Secretaria estadual de saúde do estado do Pará (SESPA)

Endereço: Travessa Padre Eutiquio, 1300 – Batista Campos, Belém – PA, Brasil
E-mail: daniele.nunes@sespa.pa.gov.br**Saulo Augusto Nooblath Chase**

Pós-Graduando em Farmácia Clínica pela DALMASS/GAP-Faculdade de Tecnologia Especialista em Análises Clínicas e Bacharel em Farmácia pelo Centro Universitário do Estado do Pará (CESUPA)

E-mail: saulo.chase@gmail.com

Rhuan Carlos Martins Ribeiro

Acadêmico de Engenharia Ambiental & Energias Renováveis pela Universidade Federal Rural da Amazônia (EAER/UFRA)

Instituição: Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Endereço: Avenida Presidente Tancredo Neves, 2501 – Terra Firme, Belém – PA, Brasil

E-mail: rhuanribeiro97@gmail.com

Emerson Cordeiro Morais

Doutor em Engenharia de Sistemas e Computação pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Instituição: Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Endereço: Avenida Presidente Tancredo Neves, 2501 – Terra Firme, Belém – PA, Brasil

E-mail: emerson.morais@ufra.edu.br

Alex de Jesus Zissou

Doutorando em Agronomia pela Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Instituição: Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Endereço: Avenida Presidente Tancredo Neves, 2501 – Terra Firme, Belém – PA, Brasil

E-mail: alex.zissou@ufra.edu.br

Paulo Cerqueira dos Santos Júnior

Doutor em Estatística pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

Instituição: Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Endereço: Avenida Presidente Tancredo Neves, 2501 – Terra Firme, Belém – PA, Brasil

E-mail: paulo.cerqueira@ufra.edu.br

Pedro Silvestre da Silva Campos

Doutor em Ciências Agrárias pela Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Instituição: Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Endereço: Avenida Presidente Tancredo Neves, 2501 – Terra Firme, Belém – PA, Brasil

E-mail: pedro.campos@ufra.edu.br

José Felipe Souza de Almeida

Doutor em Engenharia Elétrica e Sistemas de Energia pela Universidade Federal do Pará (UFPA)

Instituição: Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Endereço: Avenida Presidente Tancredo Neves, 2501 – Terra Firme, Belém – PA, Brasil

E-mail: felipe.almeida@ufra.edu.br

Otávio Andre Chase

Doutor em Engenharia Elétrica e Sistemas de Energia pela Universidade Federal do Pará (UFPA), Membro Sênior do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE)

Instituição: Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Endereço: Avenida Presidente Tancredo Neves, 2501 – Terra Firme, Belém – PA, Brasil

E-mail: otavio.chase@ufra.edu.br

Glauber Tadaiesky Marques

Doutor em Física Teórica pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)

Instituição: Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Endereço: Avenida Presidente Tancredo Neves, 2501 – Terra Firme, Belém – PA, Brasil
E-mail: glauber.marques@ufra.edu.br

RESUMO

O presente artigo apresenta o segundo estudo sobre a evolução do novo coronavírus (SARS-CoV-2) no estado do Pará, desde a confirmação do primeiro infectado no dia 18/03/2020 até o dia 28/05/2020, através de mapas. O estudo apresenta também um modelo matemático para estimar o número de infectados até o dia 28/05/2020 e a projeção de pico da epidemia no estado do Pará como um todo, com análises mais detalhadas em dez municípios incluindo a capital Belém. Os resultados mostram que o modelo possui confiabilidade acima de 90% para predições de curto prazo, cuja evolução pode ser de 1 infectado em 18/03/2020 a 33.304 infectados em 28/05/2020.

Palavras-chave: Coronavírus; SARS-CoV-2; Mapas; Predição Epidemiológica.

ABSTRACT

This article presents the second study on the evolution of the new coronavirus (SARS-CoV-2) in the state of Pará (Brazil), from the confirmation of the first infected on March 18, 2020 until May 28, 2020, through maps. The study also presents a mathematical model for estimating the number of infected until day 28/05/2020 and the projection of the epidemic peak in the state of Pará as a whole, with more detailed analysis in ten counties including the capital Belém. The results show that the model has a reliability above 90% for short-term predictions, whose evolution can be from 1 infected on 03/18/2020 to 33.304 infected on 28/05/2020.

Keywords: Coronavirus; SARS-CoV-2; Maps; Epidemiological Prediction.

1 INTRODUÇÃO

O avanço do novo coronavírus pelo mundo segue em ascensão e já afeta mais de 188 países em todos os continentes. Os números em 21 de maio de 2020 apontam mais de 5 milhões pessoas infectadas com saldo de mais de 330.000 mortos pela doença Covid-19[1]. As taxas de mortalidade têm variado em todo o mundo, com porcentagens entre 4,5% e 16,4% segundo dados compilados pela universidade John Hopkins [2]. Os países mais afetados em número de casos pela doença são EUA, Espanha, Rússia, Grã-Bretanha e Brasil, sendo que o Brasil, até o presente tempo de estudo deste trabalho, está em 6º com mais mortes registradas pela doença [1].

Tendo os sintomas da COVID-19 tratados com medicações indicadas (*off-label*), com os antivirais Cloroquina, Hidroxicloroquina e Remdesivir [3][20][21], os principais medicamentos *off-label* para a doença até a data desta publicação. A Organização Mundial de Saúde (OMS), *World Health Organization* (WHO), afirma que ainda não há vacina

específica para a COVID-19 causada pelo novo coronavírus, mas que há empenho de governos e laboratórios privados no desenvolvimento de uma vacina dentro do período de 8 meses a 2 anos [4][5]. A COVID-19 é uma doença nova e a cada momento novas descobertas estão sendo feitas [6], isto implica que as medidas de prevenção e tratamento podem sofrer alterações, portanto outra medida de prevenção importante é manter-se informado.

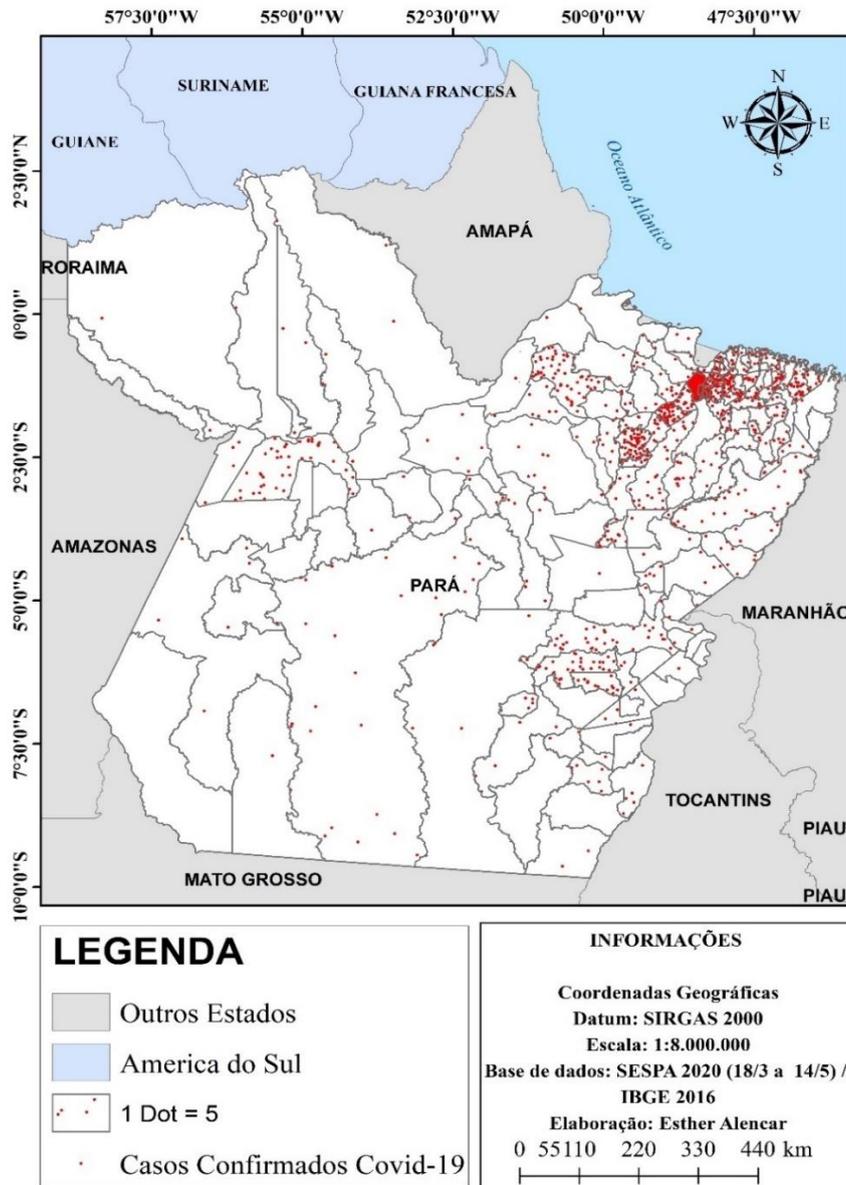
A imersão do novo coronavírus no reservatório humano tem mostrado o quão contagioso esse vírus pode ser. Estimativas iniciais de R_0 (Número básico de reprodução¹), que cobriram pouco mais de 1 mês do surto estimavam valores entre 1,4 e 6,49 com média em 3,28 [7][8] com valores atuais variando entre 3,8 e 8,9 [9] o que dá a dimensão do nível de contágio desse novo coronavírus.

Desde a chegada do Sars-Cov-2 no Brasil em 26 de fevereiro, o vírus tem se disseminado em larga escala por todas as grandes regiões brasileiras em um ritmo assustador levando os sistemas de saúde brasileiro ao colapso em algumas regiões do país. De fato, quando este trabalho estava sendo escrito (17/05/2020) o país já contava com mais de 233.000 casos confirmados com saldo de mais de 15.700 mortos. A região sudeste tem sido uma das mais castigadas pela doença com Amazonas e Pará liderando na região norte do país [10].

No estado do Pará, região em que se concentra esse estudo, 138 dos seus 144 municípios já são afetados pelo novo coronavírus, sendo Belém o epicentro da doença no estado. Na capital, já são mais de 6000 casos com 650 mortos registrados. A maioria dos municípios está experimentando agora o avanço no número de casos embora os que apresentam taxas de crescimento mais rápidas estejam sob alguma intervenção mais dura na circulação de pessoas. O rápido avanço inicial da doença já tem pressionado sistemas de saúde por todo o interior do estado. Os mapas das Figura 1 e 1.1 mostram a situação do estado no período de 18/03/2020 a 14/05/2020.

¹ O número básico de reprodução mede o número de infecções secundárias que um indivíduo contaminado pode ocasionar. Para efeitos de comparação, gripe e ebola apresentam números para R_0 variando em [1,4-2,8] e [1,5-1,9] respectivamente.

FIGURA 1 – Mapa de distribuição de casos de covid-19 por todo o estado do Pará.



Fonte: Autores.

FIGURA 1.1 – Mapa de distribuição de óbitos por covid-19 nos municípios do estado do Pará.

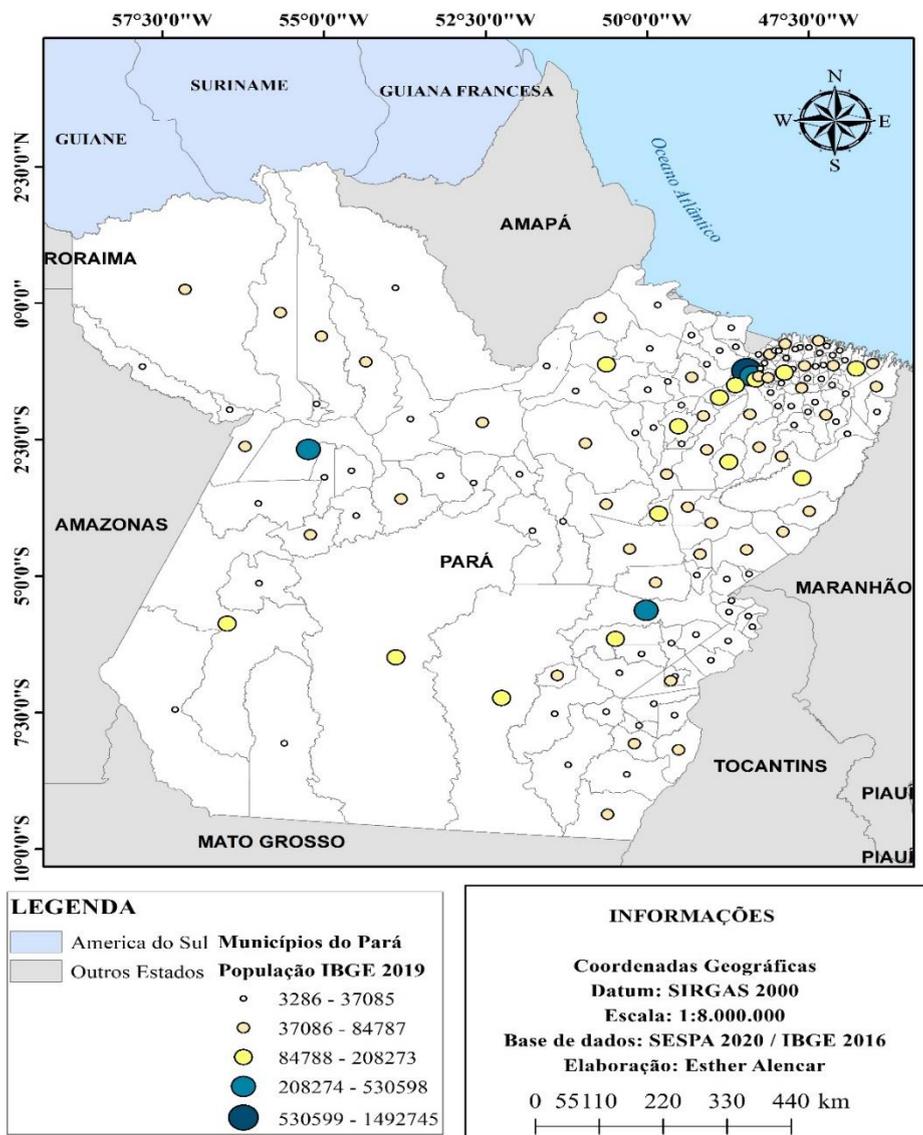


Fonte: Autores.

A grande parte da população paraense reside na área urbana e menos de 40% em área rural do estado. No Pará temos quatro cidades seguidas da capital Belém (1.492.745 hab.) com densidade demográfica acima das demais do estado, são elas: Ananindeua (530.598 hab.), Santarém (304.589 hab.), Marabá (292.349 hab.) e Parauapebas (208.273 hab.), conforme apresenta a Figura 2. Vale apenas levar em consideração a densidade populacional, e verificar esse peso por área habitada. Em vista disto, com maior circulação

de pessoas o risco de contaminação em escala maior é eminente, havendo mais contato humano, há um espalhamento mais rápido do vírus. O Pará ficou na 7^o posição no índice de isolamento dentre as capitais com taxa de 50,96%, sendo que o ideal para o cenário atual seria de 70%. Foi necessário decretar *Lockdown* na capital paraense e mais 9 municípios, até o momento, para o contorno da situação houve a diminuição da mobilidade para reduzir a transmissão, assim, políticas públicas foram incrementadas para fortalecer o distanciamento social, que tem sido o mais viável e efetivo no controle de disseminação.

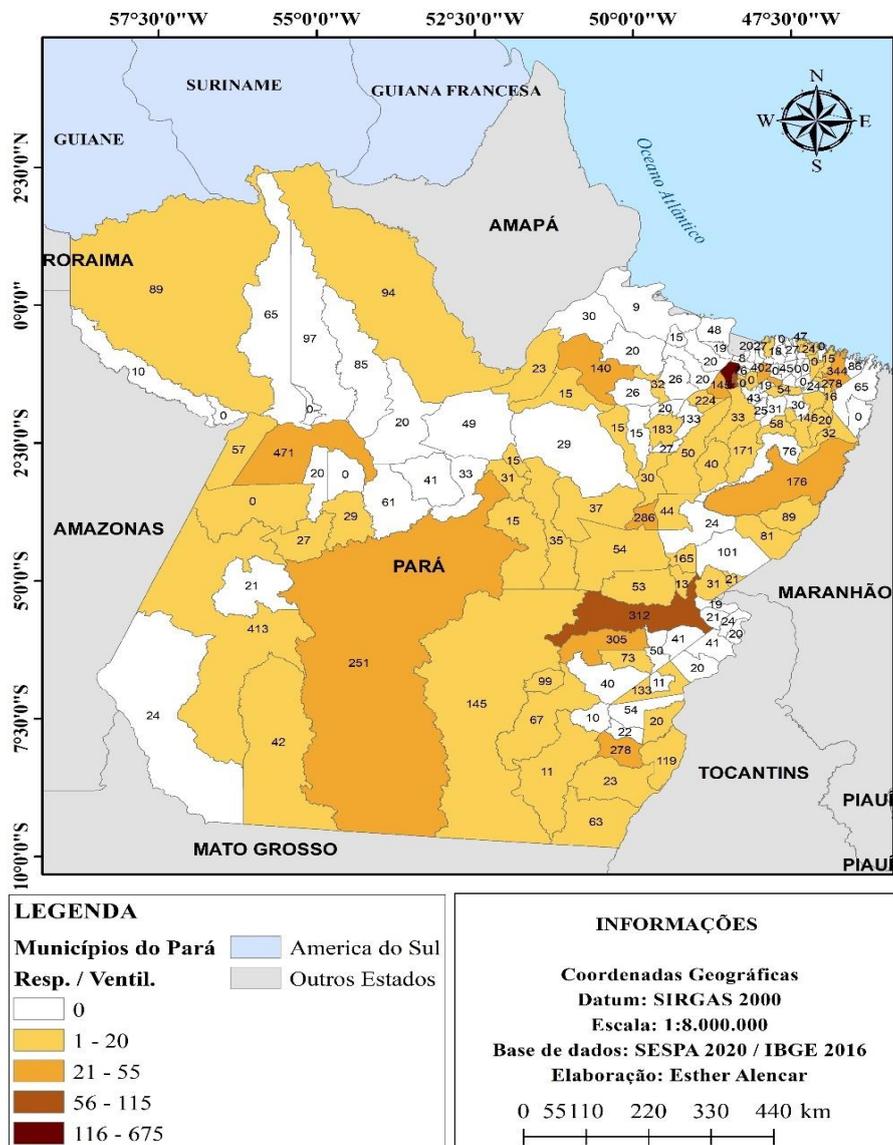
FIGURA 2 – Mapa de densidade demográfica do estado do Pará por municípios.



Fonte: Autores.

Embora uma pequena parte do número de infectados venha a necessitar de cuidados intensivos e/ou acesso a um leito de internação hospitalar, se o avanço da doença não for administrado a maioria dos municípios não poderão oferecer cuidados básicos de saúde para enfrentamento da doença em suas populações. De fato, uma ampla maioria desses municípios estão longe de oferecer estruturas hospitalares para cuidados intensivos adequados a uma doença aguda do sistema respiratório. A situação fica melhor evidenciada quando se considera a quantidade de respiradores e/ou ventiladores disponíveis nesses sistemas de saúde. Compilando dados de [11], pudemos colocar esse cenário representado pelo mapa da Figura 3.

FIGURA 3 – Mapa da distribuição de recursos hospitalares de importância vital para o tratamento da covid-19 no estado do Pará.



Fonte: Autores.

Como podemos facilmente notar, a grande maioria dos municípios paraenses não contam com mais de 55 respiradores/ventiladores em seus sistemas de saúde. Com base nesse quadro, procuramos analisar a evolução da doença no estado bem como nos 10 municípios mais afetados, usando dados consolidados até o dia 13/05/2020. Procuramos modelar o fenômeno para que pudéssemos estimar curvas de infecção e assim sugerir melhores caminhos para o combate a essa nova doença respiratória.

Em 7 de abril de 2020, Cabral et al. [12] apresentaram a primeira investigação acadêmica sobre a evolução da COVID-19 no estado do Pará. Seus esforços concentraram-se sobretudo no uso de um modelo matemático proposto por Azooz [13]. Neste período, o estado tinha cerca de 123 pessoas infectadas e nenhum relato de recuperados. As projeções preliminares indicavam um horizonte de 20 dias mostrando o avanço da doença atingindo cerca de 2800 infectados. O acompanhamento do modelo, porém, mostrou um cenário diferente quanto mais longe do horizonte de previsão os dados ficavam. As taxas de infecção começaram a aumentar e o modelo foi perdendo validade sendo necessária a calibração de seus parâmetros dado o novo cenário de disseminação no estado.

2 OBJETIVO

Apresentar duas abordagens distintas para o modelo matemático de Azooz. Primeiro, apresentamos a calibração em dois pontos distintos do tempo para mostrar como as incertezas afetam a forma da curva de infecção. Segundo, ampliamos as análises numéricas para os 10 municípios mais atingidos no estado até a data de 13/05/2020 para traçar suas curvas epidemiológicas preliminares.

3 METODOLOGIA

3.1 MODELO DE AZOOZ

O modelo de Azooz [13] é uma função matemática bem interessante porque contempla uma ampla gama de propriedades matemáticas que estão diretamente ligadas ao problema da disseminação de uma doença infecciosa. A combinação de funções exponenciais e hiperbólicas cobrem os principais aspectos de evolução de um processo de disseminação infeccioso como no caso da pandemia de Sars-CoV-2. Se por um lado a estrutura exponencial descreve muito bem o avanço rápido da epidemia, funções hiperbólicas tem a propriedade de extrema relevância epidemiológica na medida que limita o crescimento indefinido do fenômeno. De fato, uma análise mais aguçada poderia sugerir

o uso de uma função logística, porém, esta deve levar em conta parâmetros populacionais como por exemplo a capacidade de suporte, a saber, a população total do estado. Assim, embora a função logística deva se ajustar bem aos dados iniciais, o rápido crescimento exponencial pode levar a rápida saturação e assim impedir o uso do modelo para analisar criticamente o problema real. Como o modelo de Azooz é puramente empírico, sua estimação depende apenas do método de estimação paramétrico aplicado.

O modelo se define matematicamente pela equação,

$$I_t = \exp \left[a_1 \tanh \left(\frac{t - a_2}{a_3} \right) \right] + a_4 + \exp \left[a_5 \tanh \left(\frac{t - a_6}{a_7} \right) \right] \quad (1)$$

Sendo I_t o número de infecções totais acumuladas no tempo t e $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ e a_7 são os parâmetros a serem estimados para o ajuste da curva. Para construir a curva do tipo pico, podemos proceder de duas maneiras: (I) encontrando a derivada da função de Azooz (dI_t/dt), e estimando os parâmetros ajustados aos dados de infecções diárias. Este procedimento tem valor analítico embora não seja atraente do ponto de vista da estimação e custo computacional sendo facilmente contornado pelo método II. (II) uma vez que a função em (1) tem seus parâmetros estimados, procedemos para a construção da curva do tipo pico simplesmente tomando o valor líquido das infecções entre o tempo $t + 1$ e t . Assim, para derivarmos o valor de dI_3/dt , calculamos simplesmente o saldo entre $I_4 - I_3$. Procedendo dessa forma, a curva de dI_t/dt é construída sem mais complicações analíticas.

3.2 MÉTODO DE ESTIMAÇÃO

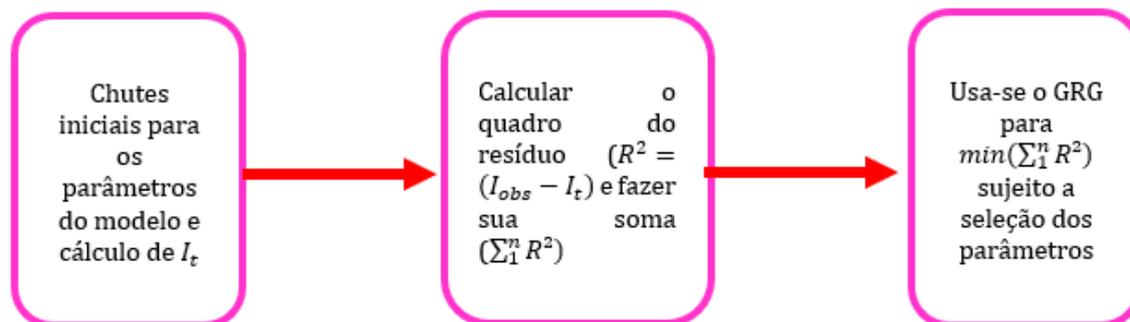
Uma vez determinado o modelo matemático para analisar o problema, procedemos para a escolha do método de estimação dos parâmetros do modelo. Em termos mais práticos e do ponto de vista da epidemiologia e da saúde pública, a estimação dos parâmetros do modelo preditor é de suma importância por dois motivos: (i) dada a capacidade limitada de testagem da população, a notificação da doença sempre estará subnotificada levando o gestor público a usar os recursos médicos escassos de maneira mais eficaz, ou seja, nos que realmente ficam doentes e procuram assistência médica. Isso leva a dar ao modelo preditor um importante papel pois serve como ferramenta para projetar cenários futuros de curto e médio prazo que sejam úteis para adequar as estruturas de resposta da saúde pública. (ii) o segundo motivo é de caráter empírico. No processo de modelagem epidemiológica,

geralmente estamos interessados na estimação dos parâmetros porque a aplicação imediata do modelo pode revelar informações críticas do avanço de uma doença. Por exemplo, embora os modelos comportamentais (SIR, SIS, SEIR, SEIS etc.) sejam definidos por sistemas de EDOs cujas soluções (quando disponível)

recaem sobre intrincadas equações transcendentais, o efeito prático de se obter a solução em termos explícitos ainda não resolve a questão paramétrica e é por isso que na prática todos esses modelos são discretizados para relaxar a matemática e favorecer a estimação dos parâmetros.

Uma vez definida essa questão, podemos então escolher o método de estimação mais adequado a cada problema. Embora alguns métodos explícitos estejam disponíveis para alguns modelos bem comportados, a maioria dos modelos modernos e de bom desempenho necessita de estimação paramétrica não linear. Há uma ampla gama de pacotes computacionais disponíveis em muitas plataformas de cálculo numérico. Para o presente trabalho, procuramos usar o Método dos Gradientes Reduzidos Generalizados (GRG) [14] que está amplamente disponível em ambiente computacional numérico. Todos os parâmetros foram estimados seguindo o seguinte o fluxo descrito na Figura 4.

FIGURA 4 – Fluxograma representativo para a estimação paramétrica do modelo de Azooz.



Fonte: Autores.

Usamos esse procedimento para todas as estimativas que foram produzidas por esse trabalho. Testar a eficiência de ajuste geralmente deve levar em conta o grau de correlação entre os dados observados e o que o modelo estimou, sendo esta uma medida que pode ser bem representada pelo coeficiente de correlação R^2 .

Uma vez que os parâmetros são calibrados com os “melhores” valores, pode-se estimar as curvas epidemiológicas completas, sempre observando para a possível divergência do modelo para valores grandes de t . Usando poucos algoritmos, podemos

retirar dessas curvas informações como número máximo de infectados de 0 a t , bem como o pico de infecção, número máximo de pessoas infectadas em um único dia durante a evolução da doença. Em nossos cenários avaliados, sugerimos previsões dentro de um intervalo de no máximo 15 dias, dado a experiência anterior do modelo [12].

3.3 CENÁRIOS AVALIADOS

Nesse trabalho nos propomos a avaliar dois cenários baseados no modelo de Azooz. No primeiro cenário procuramos estimar a curva epidemiológica para a COVID-19 tomando como base o estado do Pará inteiro. Dentro deste cenário, mostramos dois ajustes. O primeiro, calibrado no dia 28/04 com intervalo de previsão até 13/05 foi proposto para medir a precisão do modelo frente a nova quantidade de dados disponíveis naquele momento. No segundo ajuste dentro do cenário 1, recalibramos o modelo no dia 13/05 para as previsões a partir desse momento (validade até 28/05). Traçamos as curvas para ambas as situações.

No cenário 2, procuramos estimar curvas epidemiológicas para os 10 municípios mais atingidos pela doença até a data do dia da última calibração (13/05). Procuramos trabalhar esse cenário dado a imensa quantidade de dados que estão sendo disponibilizados desde então pelas secretarias de estado e municípios. Essas informações foram tratadas e, portanto, muita informação foi absorvida para criar um plano de fundo mais amplo da avaliação do estado frente o avanço do novo coronavírus.

3.4 ESTIMAÇÃO DO COLAPSO DO SISTEMA DE SAÚDE

Para estimar a taxa de ocupação de leitos nos municípios estudados nesse estudo, absorvemos dados hospitalares como a quantidade de leitos clínicos por município na base de dados do Sistema Único de Saúde (SUS) [15] e incorporamos algumas hipóteses de cálculo que serão mais bem detalhadas a seguir.

Definimos duas grandezas η_{rec} e η_{int} como sendo os coeficientes de recuperação e internação, respectivamente. Ambos são definidos da seguinte maneira,

$$\eta_{rec} = \frac{N_{rec}}{N_{inf}} \quad (2)$$

$$\eta_{int} = \frac{N_{int}}{N_{inf} - N_{rec}} \quad (3)$$

Sendo N_{inf} e N_{rec} os números de pessoas infectadas e recuperadas na última consulta dos boletins epidemiológicos, respectivamente. A segunda equação é dívida pela

diferença entre o número total de infectados relatados na última avaliação pelas secretarias de saúde, menos o número de recuperados. O valor fornece então, a taxa de internação (número de internados/número de doentes remanescentes no período). Uma vez definidos, podemos estimar o número de internações no dia da previsão de 15 dias do modelo (28/05/2020) assumindo que a taxa de internação e recuperação permaneçam constante², podemos definir o número de pessoas que precisaram de internação como

$$N_{int_{15}} = \eta_{int} N_{doe_{15}} = \eta_{int} \left(N_{inf_{15}} - \frac{\eta_{rec}}{N_{inf}} \right) \quad (4)$$

Sendo que o subscrito 15 indica que os valores são os avaliados no dia da previsão do modelo de Azooz. A taxa de ocupação, por fim, é definida como sendo

$$O_{ocp_{15}} = \frac{N_{int_{15}}}{N_{leitos}} \quad (5)$$

Ou seja, a taxa de ocupação é dada pelo cociente do número de pessoas que precisam de internação pelo número de leitos.

3.5 DADOS

Desde o surgimento dessa nova doença, tem existido um fluxo gigantesco de informações que estão servindo de base tanto para a tomada de decisão em políticas públicas, quanto para o esforço científico de enfrentamento da pandemia. Ter acesso a uma ampla base de dados pode conferir muito mais eficácia no tratamento do fenômeno e dotar o modelo de capacidade muito mais ampla de previsão. No presente trabalho, adotamos dados primários de quatro grandes canais: SESP/PA [16], Observatório de dados [17], Brasil.io [18] e boletins epidemiológicos dos municípios estudados. Uma parte importante desses dados que diz respeito ao número de recuperados e de internações só pode ser feito a nível municipal pois os dados estão completos. Em dois dos dez municípios não conseguimos

² Essa não é uma suposição razoável haja dado que a quantidade de pessoas recuperadas tende a subir dramaticamente ao longo do tempo, com a taxa de internação permanecendo com crescimento monótono ao longo do tempo. Embora não possamos confirmar essas hipóteses, elas servem como um bom ponto de partida para a estimação, dado a falta de dados agrupados em séries temporais.

dados para o número de internações de modo que se usou dados de mortalidade para inferir a taxa de internação, dados para o número de leitos foram compilados de [11] cujas características podem ser encontradas em [19].

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CENÁRIO 1 - CALIBRAÇÃO EM 28/04/2020 E EM 13/05/2020

A Tabela 1 detalha os resultados da estimação paramétrica para as duas calibrações feitas no modelo de Azooz a saber, no dia 28/04 e 13/05. Embora se possa notar o idêntico valor de R^2 para medir o grau de ajuste dos dois modelos, as Figuras 5 e 6 mostram que o modelo calibrado no dia 13/05 deu conta dos novos dados (a partir do dia 28/04) com mais precisão. De fato, na estimação do dia 28, o modelo previra um cenário de avanço maior no número de casos, o que começou a não se confirmar com o passar do tempo, embora o crescimento exponencial tivesse se mantido em patamares semelhantes, como sugere a Figura 7. Com base nas duas calibrações, podemos calcular as previsões de 15 dias para ambos (no caso do dia 28, a previsão é lançada para 30 dias). Como mostra a Figura 5, o modelo calibrado no dia 28 fornece uma estimativa de infectados acumulados em pouco mais de 33 mil pessoas enquanto a Figura 6 mostra que o modelo calibrado no dia 13 mostra acumulado de um pouco mais de 24 mil pessoas (diferença de 8 mil casos entre os dois), o que sugere que a curva de infecção do estado possa estar num ritmo de crescimento menor desde o dia 28/04, mas não há como se ter uma exatidão sobre isto devido a subnotificações e variações no isolamento social. De fato, no dia 7 de maio começou a vigorar o decreto estadual determinando o bloqueio total de atividades não essenciais e até a escrita desse trabalho as consequências da medida ainda não são conhecidas.

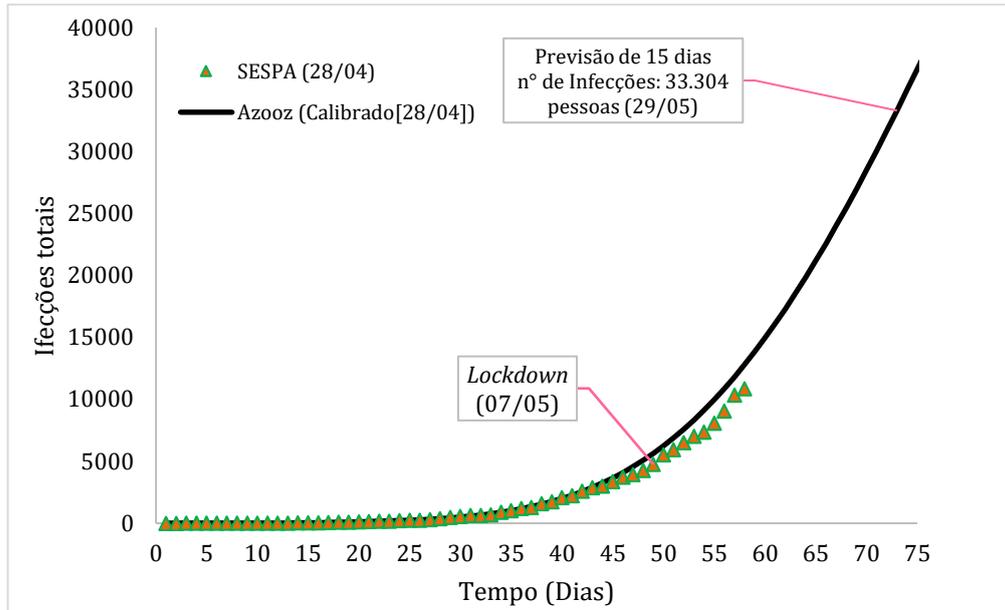
TABELA 1 – Estimação de parâmetros para as calibrações do modelo de Azooz no dia 28/04 e 13/05.

Dia 28/04		13/05/2020	
PARÂMETROS		PARÂMETROS	
a_1	4,1421	a_1	5,838
a_2	12,0537	a_2	20,894
a_3	5,0956	a_3	8,721
a_4	3,1575	a_4	3,154
a_5	11,7949	a_5	11,301
a_6	0,0000	a_6	0,000
a_7	52,5973	a_7	50,881
R^2	0,998	R^2	0,998

I_{\max}	132586	I_{\max}	81236
dI_{\max}/dt	1777	dI_{\max}/dt	1119
Pico em	09/06/2020	Pico em	05/06/2020

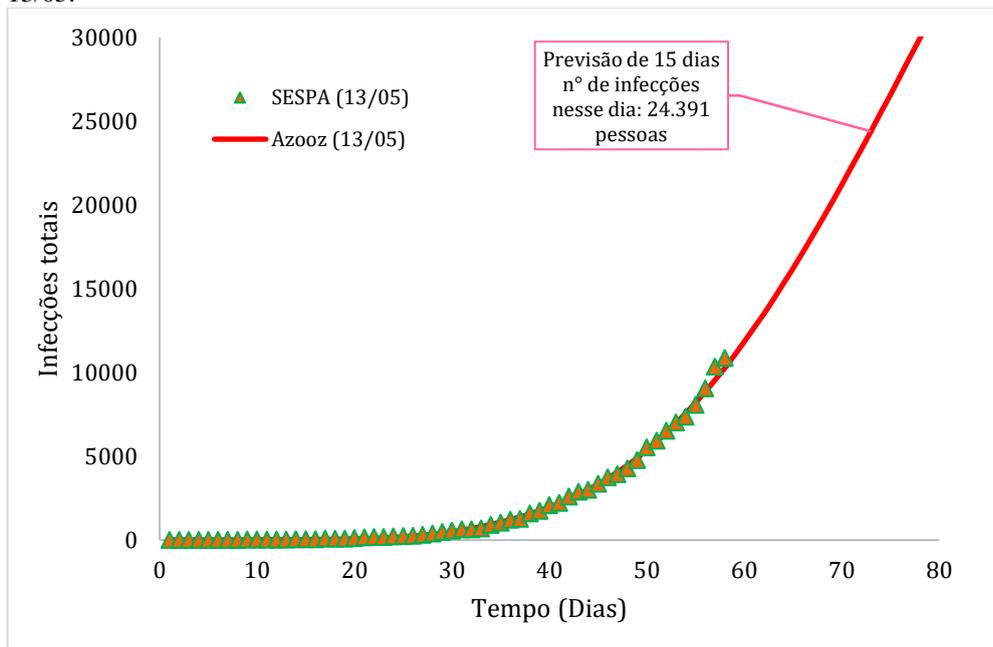
Fonte: Autores.

FIGURA 5 – Curva de Azooz para os dados acumulados de casos no estado com base na calibração do dia 28/04.



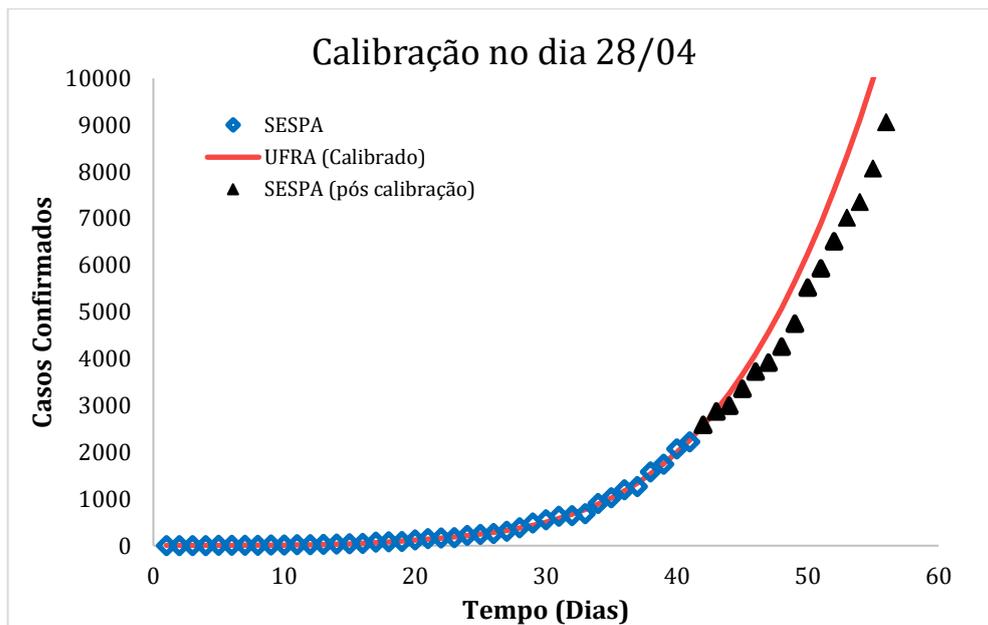
Fonte: Autores.

FIGURA 6 – Curva de Azooz para os dados acumulados de casos no estado com base na calibração do dia 13/05.



Fonte: Autores.

FIGURA 7 – Previsão do modelo calibrado em 28/04. Notar a superestimação com o passar do tempo.

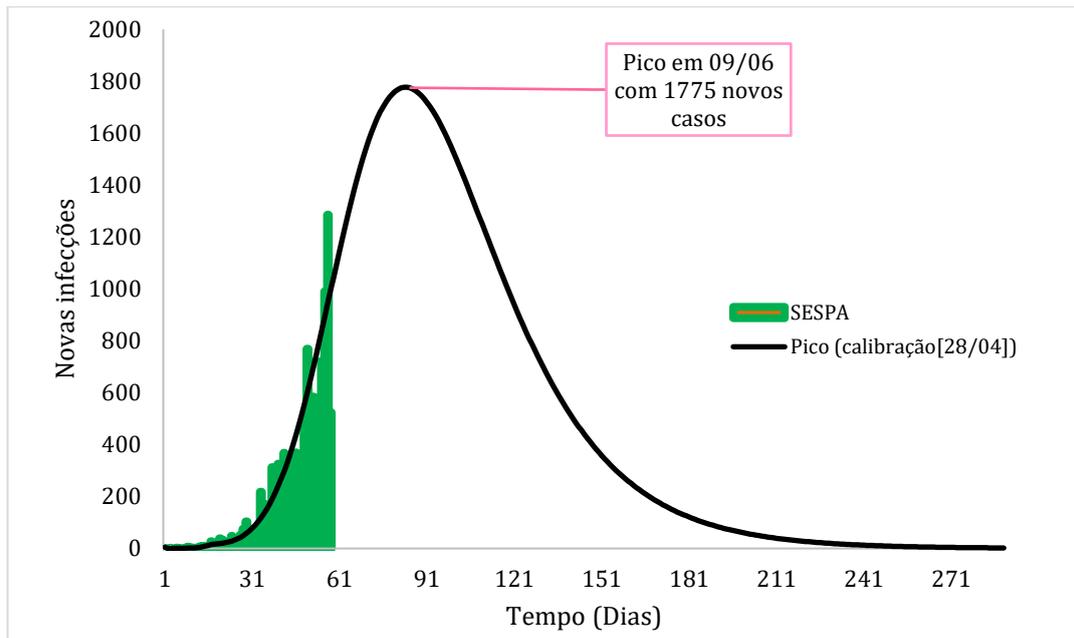


Fonte: Autores.

Numa avaliação de longo prazo, podemos aumentar a incerteza e projetar as curvas cobrindo todo a gama de tempo disponível para obter alguns insights sobre um possível “pico” da epidemia baseado nas duas calibrações. As Figuras 8 e 9 e a Tabela 1, mostram que embora o número total de infecções no estado possa variar de um pouco mais de 132.000 infecções no modelo calibrado do dia 28/04 e um pouco mais de 81.000 para a calibração do dia 13/05. Portanto, mais de 50.000 casos de diferença, as curvas mostram um pico acontecendo dentro das duas primeiras semanas de junho com a curva do dia 13/05 medindo um número diário de casos bem menor do que comparado a curva do dia 28/04.

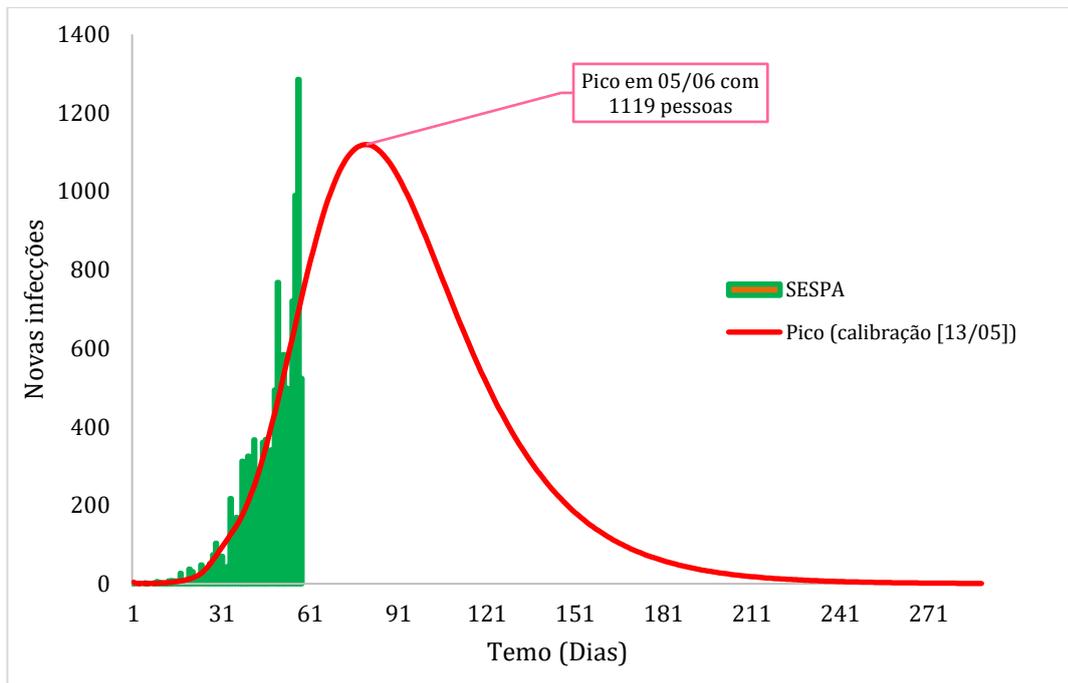
Como já afirmamos, fazer esse tipo de previsão é extremamente delicado porque pode fornecer evidências falsas de que a doença pode chegar ao seu ponto máximo data e induzir a um “desconfinamento” precoce, o que favoreceria o surgimento de um segundo surto muito mais forte da doença. Além do mais, como já comentado, para o estado do Pará já está programado para enfrentar aproximadamente 20 dias de *Lockdown* e só após esse período poderemos avaliar melhor o impacto de médio e longo prazo dessa medida, embora certamente tenha um efeito importante sobre o sistema de saúde.

FIGURA 8 – Curva de Azooz para os dados diários de casos no estado com base na calibração do dia 28/04.



Fonte: Autores.

FIGURA 9 – Curva de Azooz para os dados diários de casos no estado com base na calibração do dia 13/05.



Fonte: Autores.

4.2 CENÁRIO 2 – AVALIAÇÃO DOS 10 MUNICÍPIOS

Nesta parte do artigo apresentamos os resultados mais importantes do ponto de vista da saúde pública. Procuramos estudar a situação dos 10 municípios mais atingidos pela COVID-19 no estado do Pará até a data de 13/05/2020. Dado o rápido avanço da doença nesses locais, produzir relatórios adequados sobre a situação pública dos seus sistemas de saúde podem levar a um direcionamento mais eficaz de recursos humanos e materiais por parte do governo do estado. Um monitoramento constante dessas características pode significar diminuição de risco e ao mesmo tempo promover a organização administrativa mais eficaz da epidemia no estado.

Os municípios selecionados para nosso estudo são: Belém, Ananindeua, Cametá, Breves, Abaetetuba, Castanhal, Santarém, Bragança, Marabá e Parauapebas. Na Tabela 2, mostramos as principais métricas hospitalares e epidemiológicas já definidas para avaliar a questão dos sistemas de saúde pública locais. Desta forma, pode-se notar, a maior taxa de recuperação observou-se em Castanhal, e a menor em Abaetetuba (42 e 5%, respectivamente). As taxas de internação em Cametá, Breves, Marabá e Parauapebas estão acima dos 40%. No entanto, as situações de Cametá e Breves são mais graves pois suas taxas de recuperação são muito baixas (8 e 9%, respectivamente) o que leva a crer, *ceteris paribus*, que um colapso nos seus sistemas de saúde é eminente.

TABELA 2 – Número de recuperações, taxas de recuperação e internação no último período avaliado (13/05) e número de internações prováveis para a previsão do dia 29/05.

	Recup	η_{rec}	η_{int}	Internações
Belém	1418	27%	27%	381
Ananindeua	110	12%	25%	104
Cametá	75	8%	40%	105
Breves	132	9%	48%	57
Abaetetuba	81	5%	19%	33
Castanhal	68	42%	25%	40
Santarém	69	12%	30%	10
Bragança	47	10%	20%	13
Marabá	104	18%	65%	125
Parauapebas	192	21%	44%	47

Fonte: Autores.

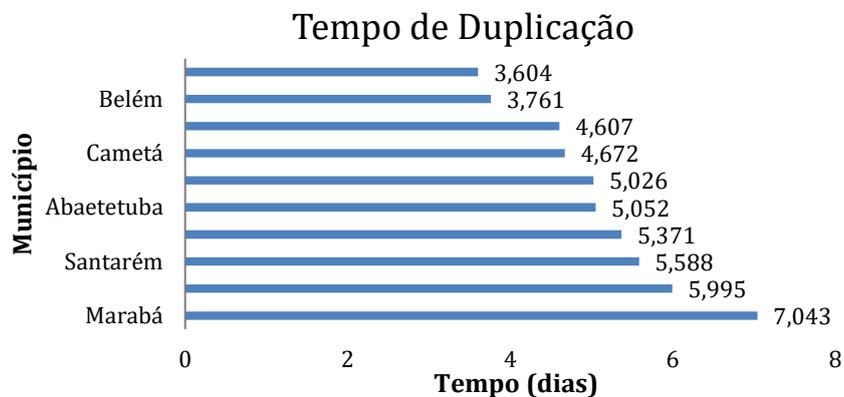
Com os dados da Tabela 2 bem como os parâmetros de estimação do modelo de Azooz para cada um dos 10 municípios, pudemos construir a tabela 3, que apresenta dados muito mais amplos, o que permitem fazer inferências e ajustes conforme novos dados sejam adicionados. Em relação a estimação e ajuste do modelo, conforme sugere o R^2 , todas as simulações indicam um alto valor do coeficiente de correlação ($> 0,95$) para todos os conjuntos de dados. Assim como fizemos para a abordagem do cenário 1, produzimos estimativas de 15 dias para todos os 10 municípios e combinamos essas informações com os dados da tabela 2 para derivar a informação mais importante dessa parte da pesquisa: a taxa de ocupação hospitalar.

Antes de comentar esses resultados, procuramos construir informações para o tempo de duplicação $t_{duplicação}$ de casos em todos esses locais. Baseamos esse cálculo em uma função exponencial clássica de ajuste; este não é uma boa função para modelar esses dados, mas fez-se uso dela por se ajustar bem aos dados iniciais e, assim, a derivação de $t_{duplicação}$ é matematicamente mais fácil³. Computar esses dados pode dar informações relevantes da dinâmica da infecção que, associados com os outros parâmetros estimados e derivados, pode-se ajudar a entender um quadro complexo e em rápida evolução em uma epidemia em larga escala e altamente contagiosa.

Conforme sugere o gráfico da Figura 10, Breves é o município que vem apresentando as mais rápidas taxas de duplicação de infecções, ao lado apenas da capital Belém. De fato, em Breves, os casos têm dobrado a cada 3,6 dias. No outro espectro, Marabá é o que mais lentamente tem dobrado casos da doença, embora tenha uma das maiores taxas de internação do estado, o que sugere um indicativo de que mais pessoas estão ficando mais tempo nos leitos de internação neste município.

³ Define-se $t_{duplicação} = \ln 2 / \beta$, sendo β é a taxa de crescimento exponencial (geralmente dada por uma função do tipo $y = y_0 \exp(\beta t)$). Evidentemente, esses valores devem ser corrigidos sempre que possível pois também estão sob efeito da aleatoriedade dos dados.

FIGURA 10 – Gráfico de barras mostrando a distribuição dos tempos de duplicação nos municípios.



Fonte: Autores.

Voltando a análise dos dados da Tabela 2, com todo o arcabouço, teórico, numérico e epidemiológico já definido, calculamos as taxas de ocupação, $O_{ocp_{15}}$, no dia da previsão do modelo de Azooz nos dez municípios que estudamos, apresentada na Tabelas 4.

TABELA 3 – Estimativas dos parâmetros para o cenário epidemiológico de 15 dias para os 10 municípios mais afetados pela COVID-19 no estado do Pará.

Parâmetros	Municípios				
	Belém	Ananindeua	Cametá	Breves	Abaetetuba
a_1	4,063	9,230	8,859	4,775	10,652
a_2	16,785	2,868	20,157	3,222	25,781
a_3	6,620	55,226	27,237	11,336	37,964
a_4	3,064	1,317	0,003	4,232	6,995
a_5	10,356	9,230	8,860	8,810	10,652
a_6	-0,035	2,868	20,156	0,000	25,781
a_7	48,376	55,226	27,237	34,962	37,964
Parâmetros	Castanhal	Santarém	Bragança	Marabá	Parauapebas
a_1	152,129	6,104	3,789	14,953	5,202
a_2	221,869	0,192	7,765	15,268	17,125
a_3	328,834	35,930	9,637	102,637	11,783
a_4	0,001	4,974	1,067	-0,689	0,002
a_5	6,159	0,000	20,251	1,315	14,625
a_6	13,180	0,000	-0,044	0,005	0,000
a_7	25,061	85,567	121,293	130,564	124,988

Fonte: Autores.

TABELA 4 – Previsão de cenário epidemiológico de 15 dias para os 10 municípios mais afetados pela COVID-19 no estado do Pará.

Parâmetros	Municípios				
	Belém	Ananindeua	Cametá	Breves	Abaetetuba
$I_{15 \text{ dias}}$	5310	3511	3277	1334	3615
$d I_{15 \text{ dias}}/dt$	349	199	316	105	485
R^2	0,998	0,996	0,992	0,998	0,977
N_{leitos}	1723	291	51	35	126
$O_{ocp_{15}}$	60%	108%	312%	176%	108%
$t_{\text{duplicação}}$	3,761	5,026	4,672	3,604	5,052
	Castanhal	Santarém	Bragança	Marabá	Parauapebas
$I_{15 \text{ dias}}$	383	286	665	1052	496
$d I_{15 \text{ dias}}/dt$	7	7	58	114	32
R^2	0,999	0,993	0,995	0,997	0,991
N_{leitos}	149	199	158	205	67
$O_{ocp_{15}}$	82%	12%	33%	32%	88%
$t_{\text{duplicação}}$	5,995	5,588	4,607	7,043	5,371

Fonte: Autores.

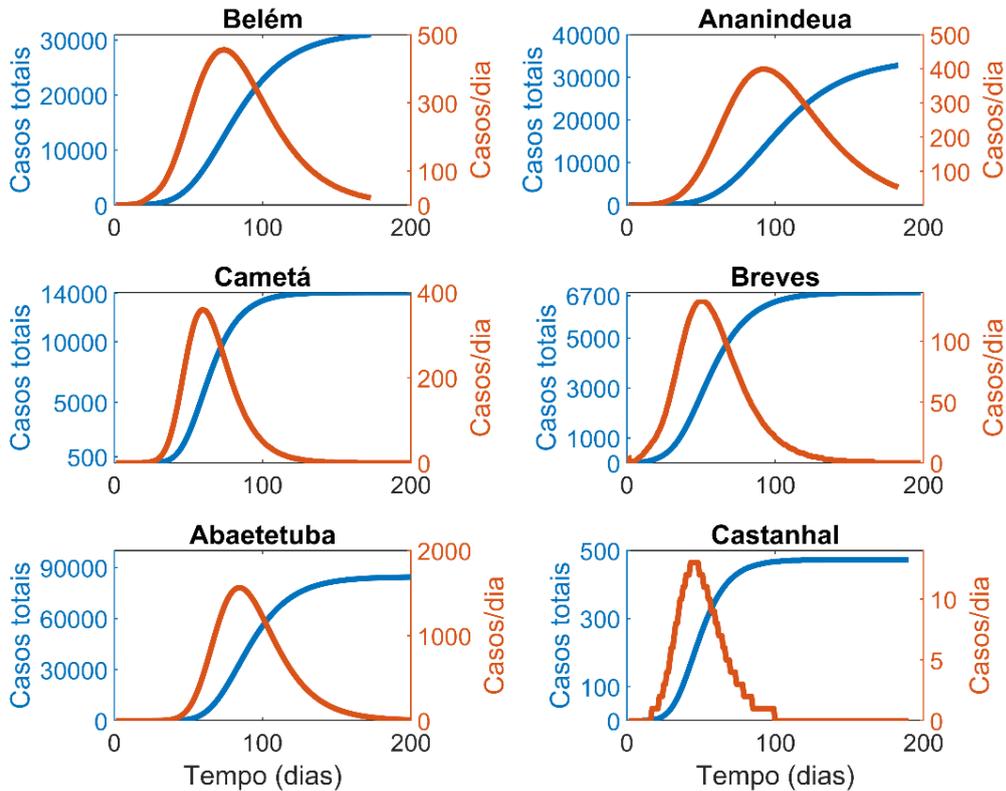
Como sugerem os dados, em 28/05/2020, temos que em Ananindeua, Cametá, Breves e Abaetetuba estarão com seus sistemas de saúde pública colapsados. Notemos que Cametá e Breves, dado a magnitude de seus $O_{ocp_{15}}$, mereçam uma atenção maior do governo estadual. Sendo que Santarém, Bragança e Marabá são os que melhores estarão em relação a capacidade operacional na data do dia 28/05 com taxas de ocupação bem abaixo de 50%. Os dados para Belém sugerem que nessa data 60% dos leitos deverão estar ocupados e Parauapebas com 88% entrará em alerta.

A Figura 11 mostra as curvas traçadas para os 6 primeiros municípios considerados, na tentativa de absorver informações de cunho empírico que guiarão novas pesquisas⁴. Para Belém e Ananindeua, as curvas de Azooz projetam casos acumulados de 30.000 a 40.000

⁴ Não podemos projetar as 4 outras curvas como causa da divergência do modelo para quando $\lim_{t \rightarrow \infty} I_t \rightarrow \infty$. Ou seja, embora pudemos obter estimadores eficientes para o ajuste dessas curvas aos dados observados, o algoritmo falhou em convergir a curva para valores maiores de t .

casos respectivamente, com Abaetetuba projetando mais de 60.000 casos da doença com pico no final do mês de junho.

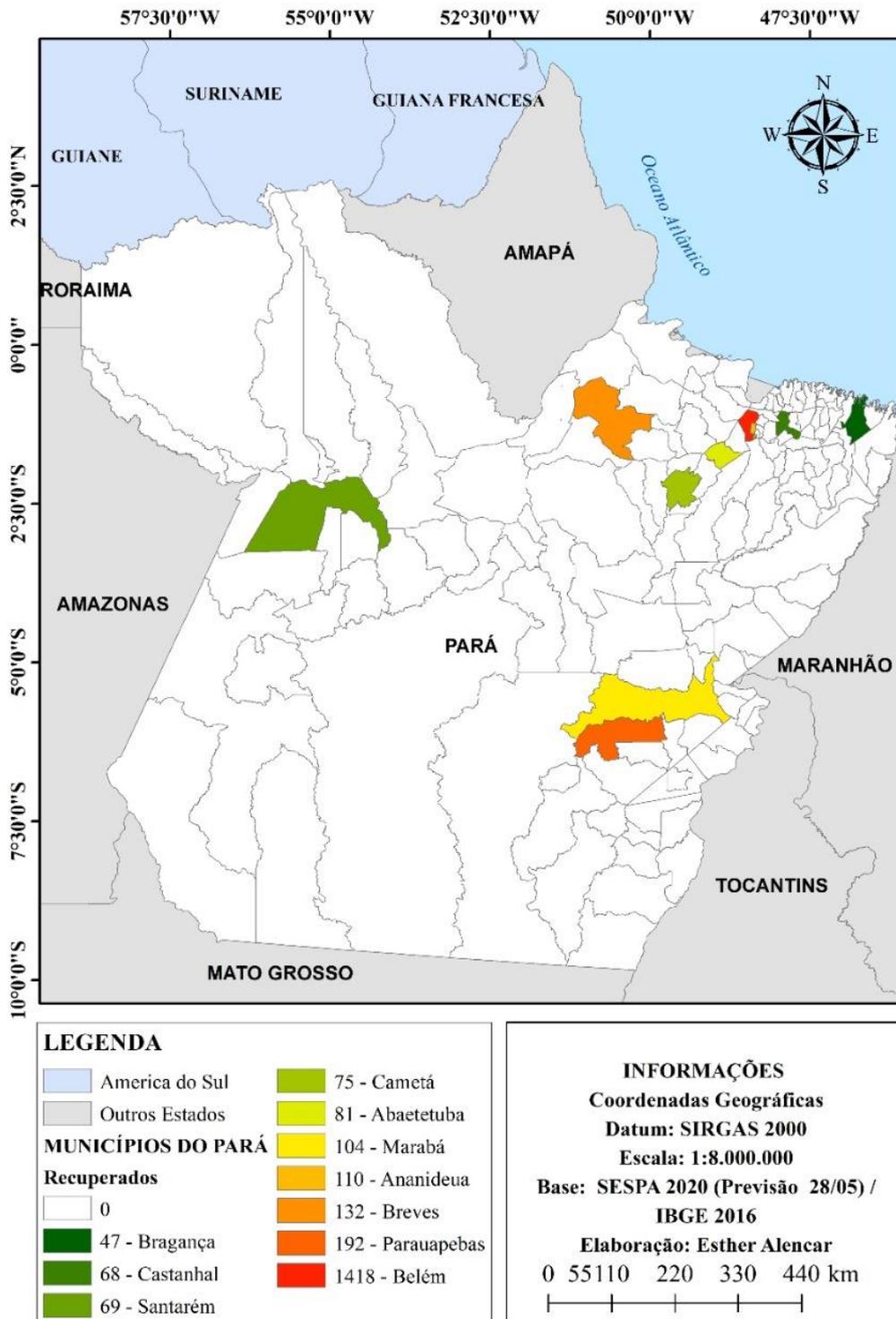
FIGURA 11 – Curvas epidemiológicas baseadas no modelo de Azooz para seis dos 10 municípios mais atingidos pela COVID-19 em 13/05/2020 no estado do Pará.



Fonte: Autores.

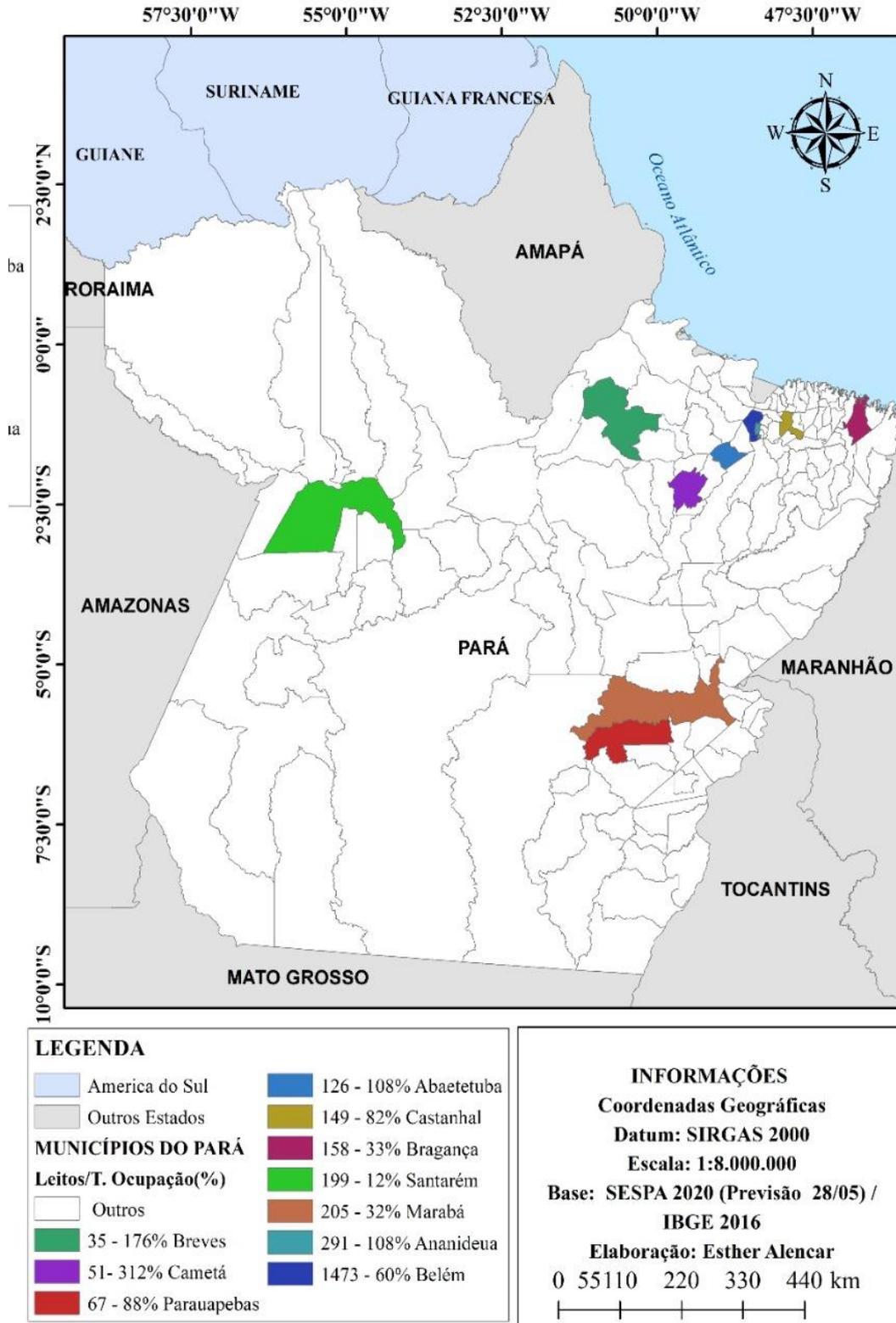
A partir das estimativas foi elaborado a representação física com os mapas de previsão disposto nas Figuras 12 e 12.1, que mostram os 10 municípios com suas taxas de Recuperação/Internação, e números de Leitos/Taxa de Ocupação, respectivamente, estimadas através do modelo matemático de Azooz.

FIGURA 12 – Mapa de taxas de Recuperação/Internação nos municípios expostos no modelo.



Fonte: Autores.

FIGURA 12.1 – Mapa de previsão de números de Leitos/Taxa de Ocupação para dia 28/05/2020, nos municípios expostos no modelo.



Fonte: Autores.

Dado que Cametá e Breves já devem estar em estado crítico, conforme indicam seus tempos de duplicação e taxas de ocupação, sugere-se aos tomadores de decisão analisar criteriosamente essa situação para atenuar possíveis cenários caóticos nesses sistemas. Embora Abaetetuba deva chegar a 108% de capacidade instalada, deve haver uma atenção maior para minimizar possíveis danos maiores ao sistema de saúde, isto porque a taxa de recuperação no município é a menor de todo o grupo estudado, o que indica que uma demanda por leitos nesse local pode aumentar ainda mais se η_{rec} não começar a aumentar acima da taxa de internação o que poderá levar Abaetetuba a ser um dos epicentros da doença no estado.

A curva do tipo pico projeta casos máximo diários para início e final do mês de junho em Belém e Ananindeua respectivamente. Em Cametá e Breves, os casos totais podem somar 14.000 e 7.000 com picos entre 1 e 10 de junho. O caso de Castanhal é uma curiosidade numérica interessante, pois mostra que o modelo convergiu rapidamente para próximo de 500 casos (de fato, supondo as taxas de duplicação de Castanhal, o município deve passar desse número em duas semanas) e não parece ter oscilado caoticamente sugerindo que mais dados devem ser incorporados ou que novos valores iniciais da simulação talvez devam ser adequados para obter maior robustez numérica.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou o segundo estudo sobre a evolução do SARS-CoV-2 no estado do Pará. O quadro geral da disseminação, através de cartas cartográficas e modelos de predição foram apresentados, com objetivo de enfatizar a análise regional (local).

Em modelos epidemiológicos, quanto maior o horizonte de predição, maior será o erro, portanto é importante não traçar longos horizontes de tempo em estudos epidemiológicos. O modelo de *Azooz* representado na Eq. (1) apresenta um cenário bastante realista devido a velocidade de infecção. Porém, é altamente dependente dos dados iniciais, portanto é importante realizar inferências em curtos horizontes de tempo, com objetivo de diminuir erros e evitar disparates. A disseminação do novo coronavírus é um problema de natureza multifatorial e sistêmico, portanto, mais modelos devem ser testados e calibrados com base na realidade ambiental, social e econômica de cada região.

A COVID-19 tem sido um dos problemas emergentes mais urgentes e desafiadores da nossa geração e tem revelado muitas facetas da nossa própria humanidade. Enquanto o coronavírus segue se expandido pelo mundo, as características das nossas sociedades e do

nosso estilo de vida tem interagido de forma simbiótica com o vírus para criar a receita certa de pressão total sobre a maioria dos sistemas de saúde mundial.

O papel da ciência tem sido de fundamental importância para combater essa doença emergente e todo seu arsenal deve estar disponível para ajudar na tomada de decisão. Nesse trabalho exploramos um contexto muito mais amplo da influência da epidemia sobre os sistemas de saúde paraenses e mostramos indicativos dos locais mais susceptíveis a colapsar seus sistemas de saúde e entrarem em crise generalizada de atendimento.

É importante ressaltar que a qualidade de ajuste de um modelo é sempre um tema de discussão importante, seja pela limitação que o modelo em questão apresenta (num caso paramétrico, a limitação paramétrica, por exemplo) ou simplesmente pela falta de informação contida nos dados em estudo (muitas vezes relacionadas a dados perdidos). Desde o início da pandemia, principalmente no Brasil, muitas pessoas acometidas pelo novo vírus realizaram testes para a notificação da doença. No entanto, vimos que o resultado destes demandava muito tempo de resposta. Ou seja, as análises realizadas consideram os dados disponíveis até o momento da realização das mesmas. Além do mais, ocorrem muitos casos de pessoas que foram infectadas pelo vírus e não entram para a estatística. Em ambos os casos, a modelagem pode acarretar uma superestimação ou subestimação dos parâmetros relacionados aos modelos em ajuste, como também nas estimativas do atual cenário da doença.

Dessa forma, é importante pensar que o modelo de Azooz, ajustado aos dados poderá apresentar flutuações nas estimativas apresentadas o que é bem natural dado ao problema de subnotificação e acúmulo de dados lançados com atrasos de uma só vez. Problemas estes que afetam qualquer modelo estatístico. Porém, tais modelos dão bons resultados que ajudam o governo a tomar suas decisões.

Portanto, projetamos cenários que esperamos que sejam considerados pelos tomadores de decisão de modo a orientar ações mais eficazes no combate ao novo coronavírus e assim diminuir seu efeito sobre a população paraense. Sempre levando em conta o grande número de subnotificações, problema este em todo o território brasileiro, devido a sua dimensão territorial e populacional e com o grande número de assintomáticos, sendo estes o vetor majoritário de transmissão viral, aonde os valores estimados para bater com os dados do sistemas de saúde estarão sempre subestimados, com valores reais de infecção estando no mínimo oito vezes acima do valor teórico. É com esse contexto que nos

propomos a conduzir, enquanto for possível, pesquisas de alto valor agregado para contribuir com esses esforços conjuntos

Aferindo que os resultados apresentados neste segundo trabalho serão enriquecidos com as próximas atualizações do quadro do novo coronavírus no estado do Pará, onde poderá ser levado em consideração os efeitos do *Lockdown*, que poderão achatar a curva do número de infectados. O NSCF/UFRA continuará com os testes de novos modelos numéricos aplicados a epidemiologia para geração de novos resultados de predição. Enquanto estas atividades, os autores torcem por uma solução global para contenção do SARS-CoV-2 e tratamento da COVID-19.

AGRADECIMENTOS

A equipe do Brazilian Journal of Health Review - BJHR pela oportunidade, atenção e idealização de uma seção especial sobre o novo coronavírus. Ao Governo do Pará e a SESPAs pelas efetivas medidas de prevenção ao novo coronavírus e pelas informações disponibilizadas nos canais oficiais. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pela bolsa de iniciação científica ao autor Rhuan Carlos Martins Ribeiro. A todos os profissionais de saúde, pesquisa, educação, alimentação, transportes e segurança do estado do Pará, do Brasil e do Mundo – Heróis desta pandemia.

REFERÊNCIAS

- [1] Worldometers. *Coronavirus Update*. Disponível em: <https://www.worldometers.info/coronavirus/>. Acessado em: 16/05/2020.
- [2] Coronavirus Research Center. Johns Hopkins University. *Mortality Analyses*. Disponível em: <https://coronavirus.jhu.edu/data/mortality>. Acessado em: 16/05/2020.
- [3] Wang, M.; Cao, R.; Zhang, L.; Yang, X.; Liu, J.; Xu, M.; Shi, Z.; Hu, Z.; Zhong, W.; Xiao, G. **Remdesivir and chloroquine effectively inhibit the recently emerged novel coronavirus (2019-nCoV) in vitro**. *Nature, Cell Research*, 30, p. 269–271, 2020. DOI: 10.1016/S0140-6736(20)30183-5. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41422-020-0282-0>.

[4] World Health Organization (WHO). **Frequently asked questions on Middle East respiratory syndrome coronavirus (MERS-CoV)**. Acesso em: 12/05/2020. Disponível em: https://www.who.int/csr/disease/coronavirus_infections/faq/en/.

[5] World Health Organization (WHO). **Basic protective measures against the new coronavirus**. Acesso em: 28/03/2020. Disponível em: <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/advice-for-public>.

[6] FIOCRUZ. **Talk show – Novo Coronavírus SARS-CoV-2 COVID**. Disponível em: <https://portal.fiocruz.br/video/talk-show-novo-coronavirus-sars-cov-2-covid-19>. Acesso em: 01/04/2020.

[7] LIU, Y. et. al. *The reproductive number of COVID-19 is higher compared to SARS coronavirus*. Journal of Travel Medicine, p. 1–4, 2020.

[8] Kucharski, A. J. et. al. *Early dynamics of transmission and control of COVID-19: a mathematical modelling study*. The Lancet Infection, Vol 20 May 2020.

[9] SANCHE, S, LIN, Y. T; Xu, C; SEVERSON E. R; HENGARTNER, N; KE, R. *High Contagiousness and Rapid Spread of Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2*. Emerging Infectious Diseases. Volume 26, Number 7—July 2020.

[10] Portal de notícias da Globo, G1. Disponível em: <https://especiais.g1.globo.com/bemestar/coronavirus/mapa-coronavirus/#/>. Acessado em: 17/05/2020.

[11] DataSUS. Disponível em: <http://tabnet.datasus.gov.br/cgi/tabcgi.exe?cnes/cnv/equipopa.def>. Acessado em: 10/05/2020.

[12] Cabral, R. B. G.; Chase, S.A.N.; Ribeiro, R.C.M.; Marques, G.T.; Moraes, E.C.; Zissou, A. J.; Andrade, E.S.S.; Couto, W.O.; Santos Júnior, P.C.; Campos, P.S.S.; Almeida, J.F.S.;

Chase, O.C. **Estudo inicial sobre a evolução do novo CORONAVÍRUS (SARS-COV-2) no estado do Pará (Brasil), no período entre 17/03/2020 e 06/04/2020.** Brazilian Journal of Health Review, Vol 3, No 2, 2020. DOI: 10.34119/bjhrv3n2-133. Disponível em: <http://www.brazilianjournals.com/index.php/BJHR/article/view/8561> .

[13] AZOOZ, A. *Software for coronavirus modelling*. MATLAB Central File Exchange. MATLAB Central File Exchange. Acessado em: 17/03/2020. Disponível em: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/74538-software-for-coronavirus-modelling>. Acessado em: 10/03/2020.

[14] LUENBERGER, D. *Linear and nonlinear programming*, 2nd editon, Addison-Wesley, USA, 1984.

[15] DataSUS. Disponível em: <http://tabnet.datasus.gov.br/cgi/tabcgi.exe?cnes/cnv/leiintPA.def>. Acessado em: 10/05/2020.

[16] Secretaria de Saúde Pública do Pará (SESPA). Disponível em: <https://www.covid-19.pa.gov.br/#/>. Acessado em: 16/05/2020.

[17] Observatório de Dados. Covid-19 no Brasil. Disponível em: <http://ccsl.ufpa.br/covid-19/>. Acessado em: 16/05/2020.

[18] Brasil.io. Disponível em: <https://brasil.io/covid19/>. Acessado em: 16/05/2020.

[19] Empresa Brasileira de Serviços Hospitalares. *Manual de Conceitos e Nomenclaturas de Leitos Hospitalares*. 1ª. Edição, agosto de 2016. Disponível em: http://www2.ebserh.gov.br/documents/695105/1744025/Manual+Leitos+19_10_16+-VF.pdf/a1cef2e4-a6ed-4881-96cd-a2a99ec15b5c. Acessado em: 28/04/2020.

[20] Souza, J. B.; Medeiros, S. M. F. R. S.; Cavalcanti, I. D. L.; Coriolano, D. L.; Soares, J. C. S.; Oliveira, F. H. P. C. **Hidroxicloroquina como alternativa para o tratamento da infecção causada pelo SARS-CoV-2: O que se sabe até agora?** Brazilian Journal of

Health Review, Vol 3, No 3, 2020. DOI: 10.34119/bjhrv3n3-029. Disponível em: <http://www.brazilianjournals.com/index.php/BJHR/article/view/9705>.

[21] Netto, A. R. Z.; Vivan, J. B.; Costa, K. C.; Pegoretti. M. L.; Piccolo, F.; Maeyama, M. A. **Uma análise das recomendações governamentais brasileiras no enfrentamento da pandemia da Covid-19 a partir das evidências disponíveis** Brazilian Journal of Health Review, Vol 3, No 3, 2020. DOI: 10.34119/bjhrv3n3-064. Disponível em: <http://www.brazilianjournals.com/index.php/BJHR/article/view/10284>.