COVID-19 e aspectos de infraestrutura crítica de saúde no cone leste do estado de São Paulo: uma exploração com modelagem SEIR e teoria de filas

Dafne de Brito Cruz
Gabriel Luis Aníbal de Oliveira
Gabriel Mendes Cabral Gondim
Demerval Aparecido Gonçalves
Wilson Cabral de Sousa Júnior

Núcleo de Estudos em Infraestrutura, Ambiente e Sustentabilidade – NINFA

Instituto Tecnológico de Aeronáutica

Como citar este artigo:

Cruz✠, D. B.; Oliveira, G. L. A.; Gondim, G. M. C.; Gonçalves, D. A.; Sousa Júnior, W. C. COVID-19 e aspectos de infraestrutura crítica de saúde no cone leste do estado de São Paulo: uma exploração com modelagem SEIR e teoria de filas. Informe Técnico, COVID-19, n. 02. São José dos Campos: CTA/ITA, 2020. Disponível em http://redevale.ita.br/.

✠ E-mail: dafne@ita.br

1. Introdução

O rápido avanço do COVID-19 sobre diversos países desde dezembro de 2019 caracteriza essa pandemia como um grande risco para o sistema de saúde global. No Brasil, em 13 de abril de 2020, havia 23.430 casos confirmados, 1.328 mortes, resultando em uma letalidade de 5,7% (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2020). Frente a este cenário, é necessária a compreensão desse avanço para que se possam tomar medidas rápidas e consistentes para o enfrentamento da doença.

Vale ressaltar que não existem previsões acuradas do que irá acontecer em função da dinâmica da pandemia, em diversos contextos. Contudo, o esforço para compreender os possíveis cenários é fundamental para balizar a tomada de decisões. Nesse sentido, este

Informe Técnico visa contribuir com a divulgação de informações a respeito da pandemia COVID-19 na Macrometrópole Paulista (MMP), em especial no recorte territorial da Região Metropolitana do Vale do Paraíba e Litoral Norte Paulista (RMVPLN).

O trabalho em escala regional apresenta-se como uma estratégia para a melhor reprodução da realidade e presta-se como elemento balizador para tomada de decisões em relação ao avanço da pandemia. Essa estratégia consiste em agregar os dados de localidades com características semelhantes, com vista a entender o comportamento da curva de infectados para diferentes cenários. A literatura reporta que a análise de cenários muito gerais, agregando localidades com características diferentes, acaba tornando as previsões menos confiáveis (CUI; ZHANG; FENG, 2019).

A partir dos dados analisados, o principal objetivo deste Informe Técnico é apresentar informações e suscitar uma discussão em nível regional acerca de possíveis colapsos nos sistemas de saúde, considerando a mobilidade intermunicipal dos infectados.

2. Metodologia

Para este estudo, foi utilizada a modelagem SEIR Bayesiana para a projeção dos infectados e simulação com base na teoria de filas para a estimativa do colapso de sistemas de saúdes, em nível sub-regional, tendo como referência modelo desenvolvido pelo grupo Covid-19-BR (2020).

2.1 Apresentação do modelo

Uma das variáveis para o modelo utilizado neste trabalho é o número de reprodução básico R_0. Fraser (2007) distingue tipos de situações para as quais essa variável pode ser aplicada: quando há variação das condições iniciais de contágio e quando essas condições permanecem constantes. Para o caso deste estudo, será utilizado o número de reprodução instantâneo definido por Fraser (2007), em que as condições iniciais não variam, pois pretende-se avaliar cenários a partir dos dados iniciais da pandemia.

O número de reprodução representa a média de número de casos secundários gerados a partir de um caso de infecção primário. O R_0 foi calculado com base na metodologia definida por Thompson et al. (2019), a partir dos dados de população, número de infectados diário e número de mortes diários, utilizando a inferência estatística Bayesiana.

O R_0 é então aplicado no modelo SEIR para previsão da evolução do número de infectados no tempo. O modelo SEIR é um tipo de modelo compartimental epidemiológico, isto é, que divide a população em compartimentos – suscetível, exposto, infectado e recuperado – e através de modelagem matemática, trabalha a transmissão do vírus entre esses compartimentos, sendo um dos modelos mais tradicionais empregado no estudo de epidemias, em nível populacional. No presente caso da pandemia COVID-19, tem sido utilizado em trabalhos recentes, objetivando estimar o número de infecções pela COVID-19 em diferentes cenários (ROCKLÖV, SJÖDIN, WILDER-SMITH, 2020; RADULESCU, CAVANAGH, 2020; THOMPSON, 2019).

O esquema de transição entre esses compartimentos pode ser visualizado na Figura 1, com as respectivas variáveis: β representa a taxa de contato entre pessoas por unidade de tempo, α é o parâmetro da distribuição de probabilidade do tempo de incubação, assumida como exponencial, e γ é a taxa de recuperação.

Dessas variáveis, resultam o tempo de incubação $(\frac{1}{\alpha})$, período entre a infecção de um indivíduo e a sua capacidade de infectar novos indivíduos; e o tempo infeccioso $(\frac{1}{\gamma})$, período em que a pessoa infectada transmite a doença para indivíduos suscetíveis, até a sua recuperação. Os limites do tempo de incubação foram de 4,1 a 7,0 dias (WHO, 2020; LI et al., 2020) e do tempo infeccioso, de 7,0 a 14,0 dias (CHEN et al., 2020).

Com relação às condições iniciais, o grupo de **suscetíveis** é representado pela população total da sub-região, o grupo de **infectados** é representado pelo número oficial de casos registrados na localidade, o grupo de **expostos** é estabelecido a partir do R_0 médio

estimado para a sub-região (no presente caso, 2, ou seja, 2 vezes o número de infectados) e o grupo de **recuperados** igual a zero.

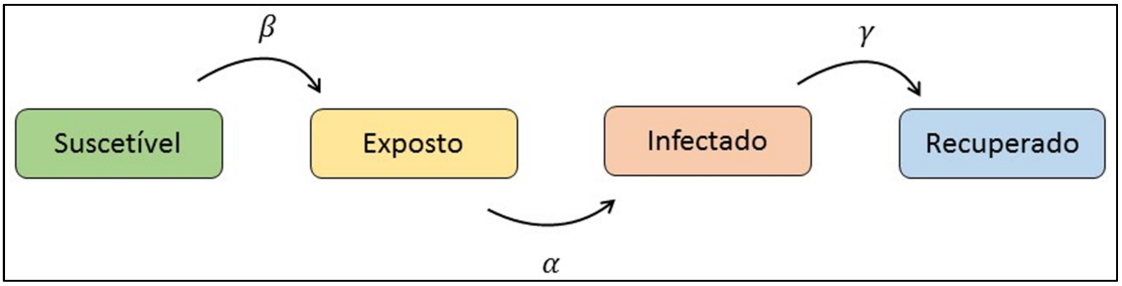

Figura 1 – Modelo SEIR: esquema da transição de indivíduos entre compartimentos.

Vale ressaltar que um dos grandes desafios dessa pandemia, principalmente no Brasil, é o acompanhamento real do número de casos com base da execução de testes, como apontado por Lana et al. (2020). Esse fato requer que os modelos de projeção incorporem de alguma foram a subnotificação dos casos para a obtenção de resultados mais próximos a realidade. Seguindo a metodologia de Covid-19-BR (2020), uma taxa de reportagem de casos foi incorporada ao modelo SEIR, de acordo com Russel et al. (2020).

Com a curva de infectados gerada pela projeção do modelo SEIR, é possível estimar a demanda por leitos. O modelo proposto por Covid-19-BR (2020) utiliza simulação com base na teoria de filas a fim de estimar a data de colapso dos sistemas de saúde, levando em consideração a existência de leitos normais e de UTIs. A data de colapso apresentada é a primeira a ocorrer dentre os tipos de leitos.

Na simulação de teoria de filas, parte dos infectados segue para um modelo de triagem hospitalar (Figura 2). Esse modelo foi estabelecido com base em consulta a diversos profissionais da saúde e com taxas obtidas em literaturas coerentes à pandemia do COVID-19 (COVID-19-BR, 2020).

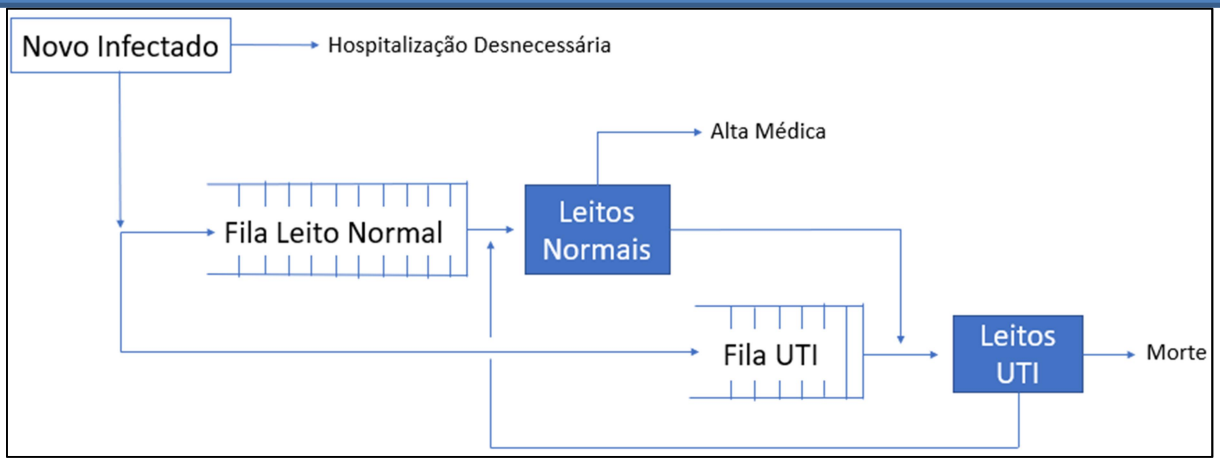

Figura 2 – Esquema do modelo de triagem hospitalar.

A Figura 3 apresenta um fluxograma simplificado das entradas e saídas dos modelos utilizados neste trabalho.

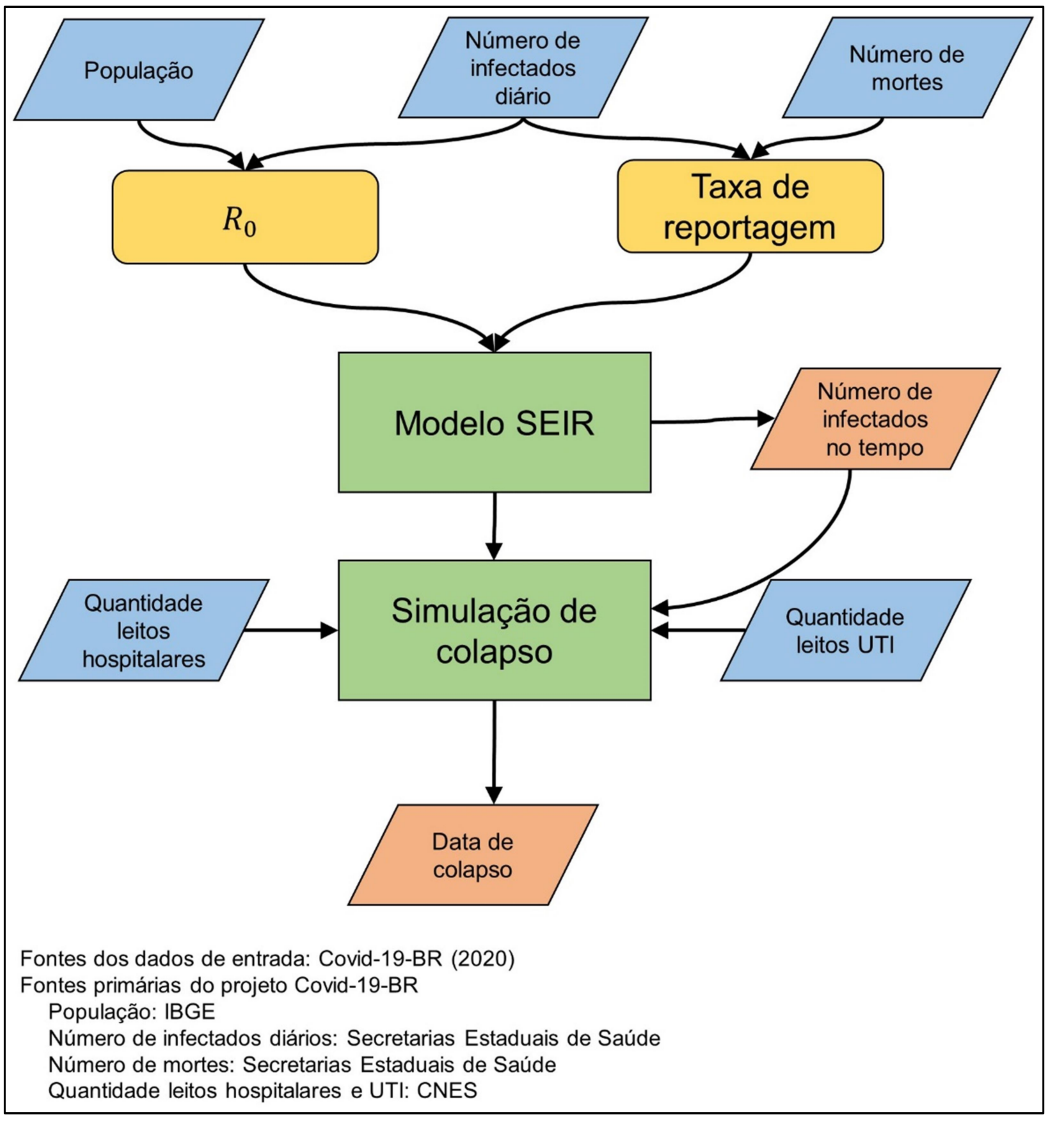

Figura 3 – Síntese dos componentes dos modelos.

2.2 Elaboração de cenários

Os modelos de previsão e simulação permitem avaliar o avanço da pandemia através da elaboração de alguns cenários. Conforme já mencionado, neste trabalho será apresentada uma abordagem regional para a Macrometrópole Paulista, em especial para o recorte territorial da Região Metropolitana do Vale do Paraíba e Litoral Norte Paulista.

A MMP engloba oito regiões: Aglomeração Urbana de Jundiaí (AUJ), Aglomeração Urbana de Piracicaba (AUP), Região Metropolitana da Baixada Santista (RMBS), Região Metropolitana de Campinas (RMC), Região Metropolitana de Sorocaba (RMS), Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), Região Metropolitana do Vale do Paraíba e Litoral Norte Paulista (RMVPLN) e Unidade Regional Bragantina (URB). A região é de expressiva importância econômica para o Brasil, sendo responsável por 28% do PIB brasileiro. Além disso, concentra 74% da população estadual, com aproximadamente 30 milhões de habitantes (SOUSA JUNIOR et al., 2020).

A RMVPLN está situada entre as cidades de São Paulo e Rio de janeiro, compreendendo 39 municípios com população total superior a 2,5 milhões de habitantes. A região é caracterizada por intensa atividade econômica, englobando os setores industrial, portuário, petroleiro e de turismo, sendo responsável por 4,8% do Produto Interno Bruto (PIB) paulista em 2016 (SOUSA JUNIOR et al, 2020). Ela é dividida em cinco sub-regiões, conforme apresentado na Figura 4.

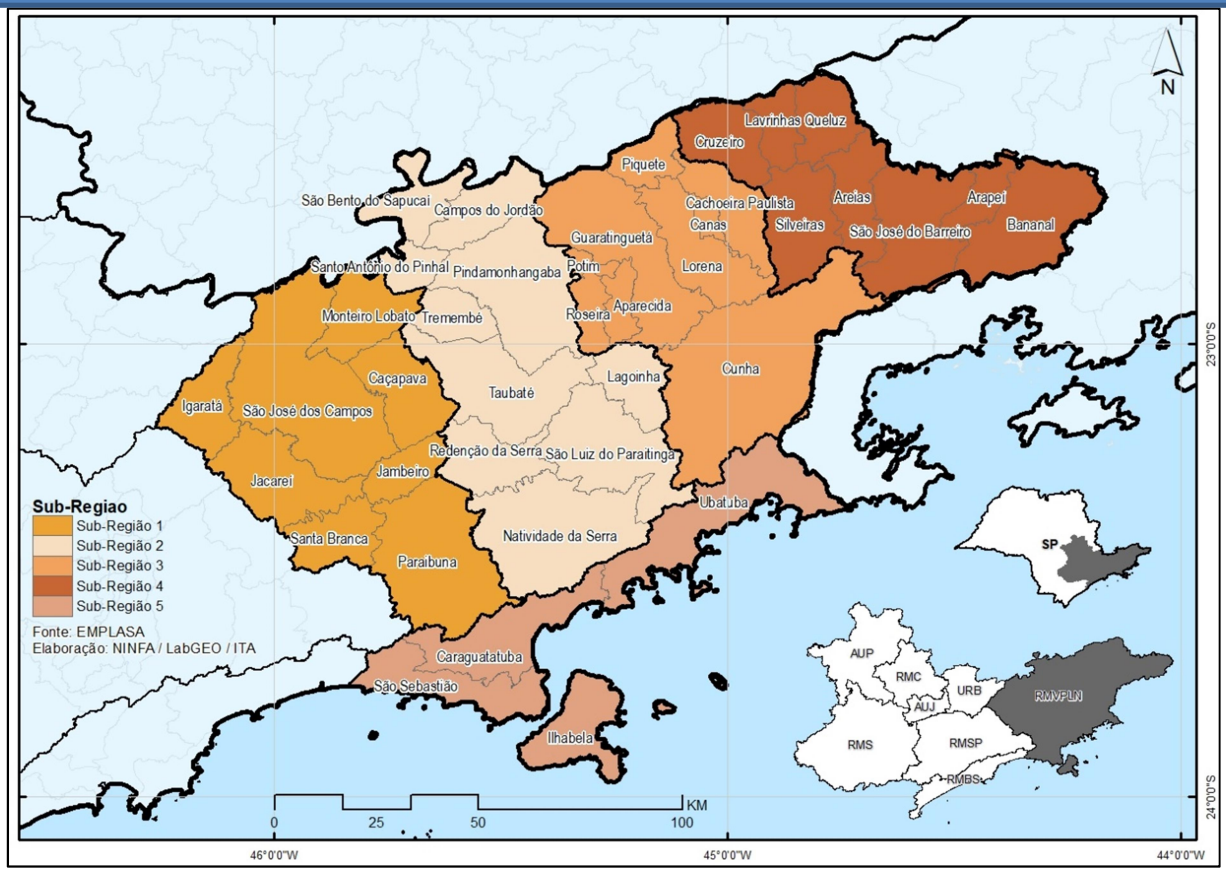

Figura 4 – Região Metropolitana do Vale do Paraíba e Litoral Norte.

A maioria dos municípios da RVPMLN se encontra em condições críticas de leitos (SOUSA JUNIOR et al., 2020). Portanto, é razoável supor que haverá uma mobilidade de pacientes entre municípios à medida que os sistemas de saúde municipais entrem em esgotamento. Considerando essa mobilidade, foram analisadas situações para as 5 sub-regiões da RMVPLN, com foco na estimativa de eventuais colapsos da infraestrutura crítica de saúde e no número de infectados ao longo do tempo.

As análises consideraram ainda hipótese em que: i) nenhuma medida de contenção da pandemia teria sido adotada; e ii) tais medidas seriam adotadas em escopo suficiente para evitar o colapso da infraestrutura crítica de saúde das sub-regiões. Para tais análises, o R_0 inicial considerado e a taxa de reportagem (e, consequentemente, de subnotificação) foram aqueles informados para o estado de São Paulo nas datas pesquisadas.

Todos os códigos e bases de dados utilizados neste trabalho foram disponibilizados por Covid-19-BR (2020), com eventuais alterações para a geração de resultados para um conjunto de municípios.

3. Resultados e Discussões

As projeções do modelo SEIR e da simulação de filas foram realizadas com séries de dados coletados até o dia 13/04/2020 e 19/04/2020 para as sub-regiões da RMVPLN, para permitir a projeção e comparação das hipóteses de adoção e não adoção de medidas de contenção. O período simulado compreende 180 dias a partir dessas datas. A taxa de reportagem do estado de São Paulo utilizada foi de 7,55% para a primeira simulação e 10,4% para a segunda, e o número de reprodução (R_0) inicial adotado para a região variou de 1,95 a 2,16 para a primeira avaliação (coleta de dados até 13/04/2020) e entre 1,13 e 1,19, para a segunda avaliação (coleta de dados até 19/04/2020).

3.1 Hipótese: dados até 13/04/2020 e cenário SEM adoção de medidas de contenção

Os resultados da simulação podem ser visualizados na Figura 5, com a evolução da curva de infectados, assim como as datas de colapso do sistema de saúde para as sub-regiões 1, 2, 3 e 5. A sub-região 4 não foi apresentada, pois não havia notificado nenhum caso de COVID-19 até a data da simulação. O resultado apresentado na Figura 5 é uma estimativa, visto que não considera **nenhuma** ação para contenção da pandemia.

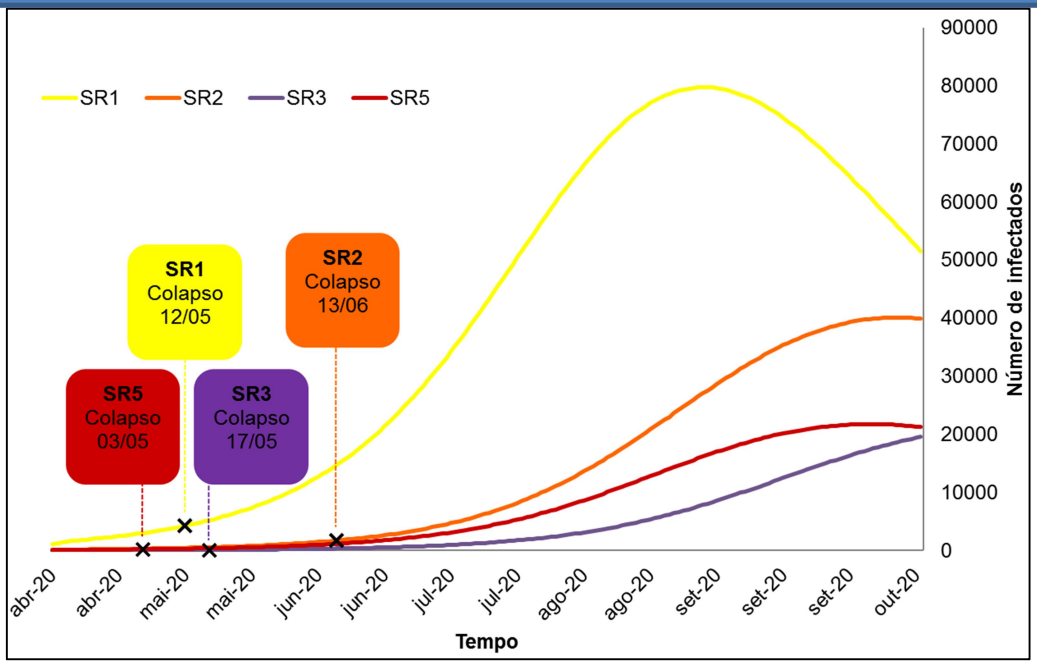

Figura 5 - Casos de COVID19 - Sub-regiões da RMVPLN (sem medida de contenção: R_0 = 1,95-2,16)

Observa-se que nesta situação, o colapso dos sistemas de saúde teria sido iminente no nível sub-regional, atingindo o limite da capacidade de leitos em aproximadamente um mês nas sub-regiões 5, 1 e 3. É possível inferir que o colapso na sub-região 5 teria sido produto da sua infraestrutura de saúde limitada, como exposto na Figura 6, assim como de sua relação como um dos principais destinos turísticos da população de São Paulo, um dos epicentros da pandemia no Brasil.

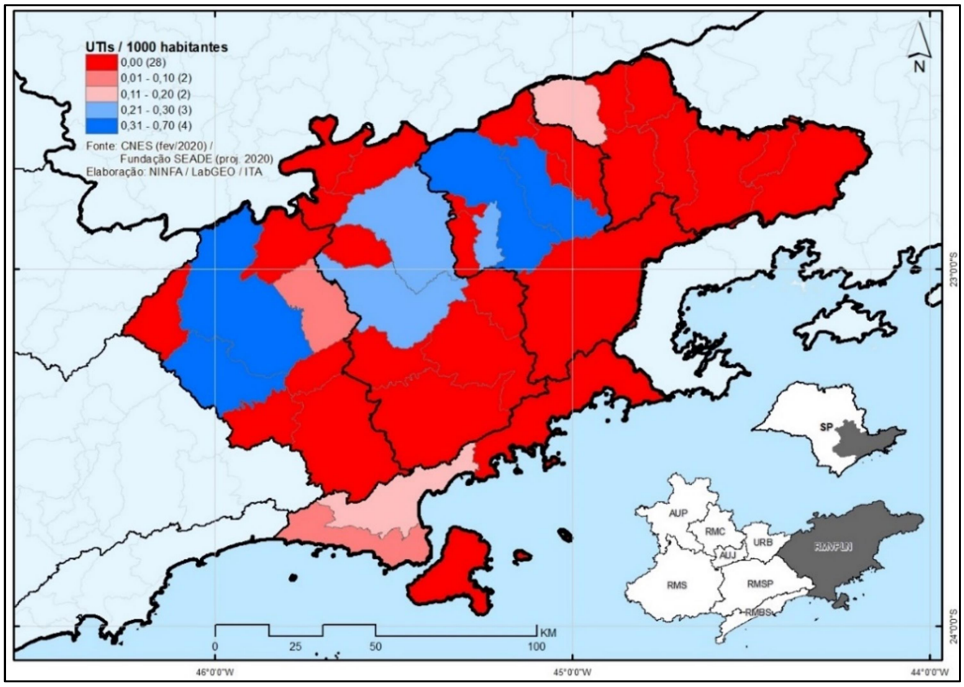

Figura 6 – Leitos de UTI/1000 habitantes na RMVPLN.

Similarmente, a sub-região 1 entraria em colapso no dia 12/05/2020, após quatro semanas do início da simulação, apesar de possuir um município polo (São José dos Campos) com uma boa infraestrutura de saúde no nível regional. Entretanto, essa é a sub-região mais populosa e apresentou uma evolução de casos mais acelerada no início da pandemia. Nota-se também, neste caso, que o colapso ocorreria muito antes de se ter atingido o pico de infectados (previsto, na simulação, para ocorrer entre o meses de agosto e setembro/2020). Isso implicaria em um quadro ampliado de agravamento da crise, com o sistema de saúde estrangulado por mais de 3 meses.

A sub-região 2, apesar de ter notificado o primeiro caso oficial de COVID-19 da RMVPLN, apresentaria uma evolução mais lenta da pandemia. Esse quadro resultaria no colapso mais tardio, mesmo que a sub-região tenha uma infraestrutura de saúde intermediária em nível regional. Portanto, em um cenário hipotético, SEM MEDIDAS DE CONTENÇÃO, e assumindo que as condições permaneceriam constantes, pode-se concluir que o sistema de saúde da RMVPLN não seria capaz de atender a demanda de pacientes.

A Figura 7 é um detalhe da Figura 5, enfatizando o crescimento dos casos no início da simulação através de uma mudança de escala do eixo de número de infectados. Nota-se que os colapsos ocorrem antes de se atingir a máxima taxa de crescimento de casos por dia, isto é, antes do estresse sobre a infraestrutura de saúde tornar-se ainda mais crítico. Dentro do horizonte de seis meses, o declínio no número de infectados só é nítido na sub-região 1, em função dessa ter apresentado inicialmente um avanço mais rápido do COVID-19.

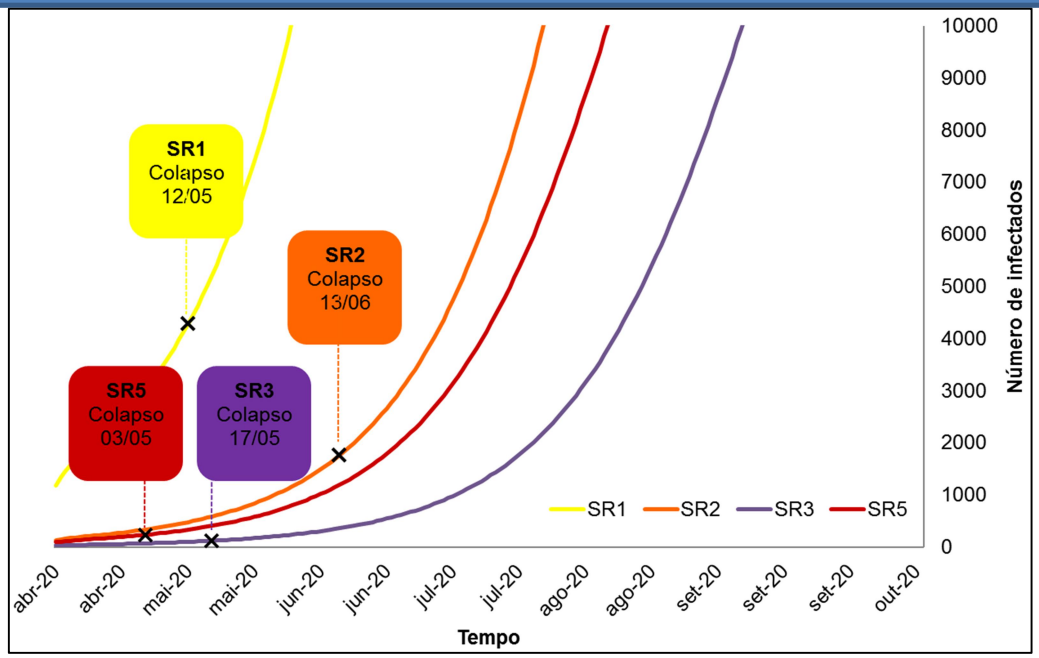

Figura 7 – Casos de COVID19 - Sub-regiões da RMVPLN (sem medida de contenção: R_0 = 1,95-2,16) escala alterada.

Tais resultados indicam um quadro muito grave para a saúde regional, caso não tivessem sido adotadas medidas de contenção para a COVID-19 na região.

3.2 Hipótese: dados até 19/04/2020 e cenário COM adoção de medidas de contenção

A simulação considerando a implementação de medidas de contenção de forma que o número de reprodução instantâneo pudesse ser reduzido de modo que não houvesse colapso resultou em R_0 na faixa de 0,9 a 1,0 na RMVPLN. Esse cenário é apresentado na Figura 8. O número máximo de infectados é significativamente reduzido para 3341 (sub-região 1), 183 (sub-região 2), 123 (sub-região 3), 66 (sub-região 4) e 487 (sub-região 5).

O declínio no número de infectados passaria a ocorrer já nos dias 06 de maio de 2020 (sub-regiões 1 e 5) e 11 de maio de 2020 (sub-regiões 2 e 3), conforme previsto pela simulação. A sub-região 4 apresenta número de casos praticamente constante nessa simulação, com média de 63,46 casos e desvio padrão de 2,5 durante o período simulado.

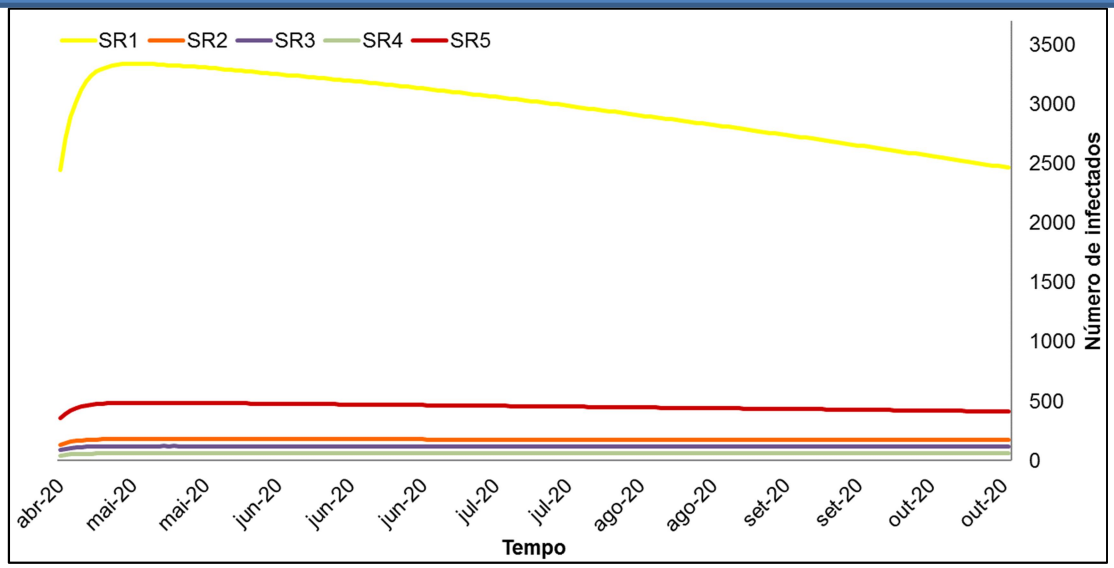

Figura 8 - Casos de COVID19 - Sub-regiões da RMVPLN (com medida de contenção: R_0 = 0,9-1,0)

Cabe ressaltar que, neste cenário, a disseminação da doença se mantém de maneira regular ao longo do horizonte temporal de análise (6 meses), e possivelmente além deste, tendo a doença atingido um pico com um número relativamente pequeno de infectados (pouco menos que 3.500). Isso implica que as medidas de contenção, para a situação de "não colapso" deveriam ser mantidas ao longo de todo o período, de alguma maneira ou de outra.

Esta simulação, cujos dados iniciais consideraram o período até o dia 19/04/2020, e, consequentemente, o resultado das medidas de contenção adotadas na RMVPLN, notadamente o regramento adotado pelo estado de SP, reflete uma redução na taxa de reprodução da COVID-19 na região. O R_0 médio estimado naquela ocasião, e utilizado para inicialização da simulação, foi de 1,16. Ao final da simulação, cujo objetivo foi o de identificar a taxa de reprodução da doença para identificar o limiar do "não colapso" da infraestrutura crítica de saúde, o R_0 médio resultante foi de 0,95.

Assumindo que a taxa de adesão às medidas de contenção adotadas pelo estado de SP se situaram na faixa de 48% a 59%, no período utilizado para balizar a simulação, como reportado pela Agência Brasil (2020) e Portal SP (2020), e considerando uma relação linear entre a taxa de adesão ao isolamento e a taxa de reprodução da doença, na faixa

adotada, é lícito supor que uma taxa de adesão de 60% seria o patamar mínimo necessário para evitar o colapso da infraestrutura crítica de saúde na RMVPLN.

4. Considerações Finais

A pandemia do COVID-19 é a uma ameaça real para os sistemas de saúde devido ao seu rápido espalhamento e grau de severidade em uma parcela dos casos. Concomitante à precariedade de infraestrutura de saúde em muitos municípios brasileiros, além da distribuição regional desigual, conforme já discutido em Informe Técnico anterior, essas circunstâncias resultam em um quadro que requer atenção.

Este Informe Técnico traz informações, com base em um modelo epidemiológico preditivo, para subsidiar a tomada de decisões em nível regional e sub-regional. O escopo do estudo restringiu-se à Macrometrópole Paulista (MMP), especificamente ao recorte territorial da Região Metropolitana do Vale do Paraíba e Litoral Norte Paulista (RMVPLN). O foco foi obter o panorama de um possível colapso nos sistemas de saúdes dessas regiões, considerando a mobilidade entre municípios.

Em um cenário sem medidas de contenção, as simulações para a RMVPLN (sub-regiões) consideram a evolução da pandemia com base nas condições observadas até o dia 13 de abril de 2020 mantendo-as constantes até o fim da simulação. Na RMVPLN a situação teria sido mais crítica na sub-região 1, cujo colapso teria ocorreido ainda no mês de maio, e nas sub-regiões 4 e 5, em que o colapso nem foi previsto, devido à incerteza trazida pela quantidade de leitos limitada.

Com base nas simulações, os sistemas de saúde da RMVPLN dificilmente seriam capazes de atender a demanda de pacientes em um cenário SEM medidas de contenção. Cabe salientar que este cenário já foi superado, de certa forma, pela relativa eficácia do isolamento horizontal e outras medidas adotadas no estado, o qual tem garantido que a taxa de reprodução (R_0) se mantenha em patamar próximo à 1,16 (neste caso, considerando a subnotificação existente).

Com dados até 19 de abril de 2020, conclui-se que, **para não haver colapso dos sistemas de saúde**, as medidas de contenção deveriam ser capazes de reduzir o número de reprodução instantâneo (R_0) para a faixa de 0,9 a 1,0 na RMVPLN. Para sua consecução, é imprescindível o reforço, ou aprimoramento, das medidas de contenção e o controle dos casos remanescentes.

Esse controle deve ser realizado através do emprego em larga escala de testes para o COVID-19, bem como o acompanhamento e isolamento dos indivíduos infectados. Para garantir efetividade desse acompanhamento de modo que não haja esgotamento do sistema de saúde, medidas de distanciamento social devem ser mantidas e ou aprimoradas, além de avaliadas periodicamente em função do número de casos reais testados. Ainda, é recomendável a manutenção das práticas de higiene para biossegurança, adquiridas durante o período de isolamento, até a contenção completa da pandemia.

Importante ressaltar que o gestor do maior polo regional de infraestrutura de saúde, o município de São José dos Campos, tem sinalizado, desde o dia 20/04/2019 (exatamente a data inicial desta simulação), flexibilização das medidas de contenção à COVID-19. Embora tal flexibilização tenha sido formalmente refutada pelo poder judiciário, por contrariar norma do estado, tal aceno do gestor público pode refletir em uma redução da adesão ao isolamento pela população, o que pode vir a recrudescer o cenário de disseminação da pandemia na região, com eventual comprometimento da capacidade da infraestrutura crítica de saúde.

Caso o colapso dos sistemas de saúde seja inevitável, mesmo após a adoção das medidas supracitadas, uma possibilidade para mitigá-lo é o aumento de capacidade de infraestrutura e pessoal. Além dos acordos com gestores privados de unidades de saúde, para ampliação da infraestrutura pública, como já mencionado em Informe Técnico anterior, o modelo de hospitais de campanha é uma solução viável, visto que é de rápida implantação e garante a realocação da estrutura nos focos de demanda. Além

da infraestrutura, deve-se garantir número suficiente de profissionais e resguardar a sua integridade, por meio de equipamentos de proteção individual.

Agradecimentos

Em momentos críticos para a sociedade, as redes de pesquisa e grupos científicos são importantes fontes de dados e informações relevantes para análise. Este Informe Técnico contou com dados e métodos desenvolvidos pelo Coletivo COVID-19-BR (http://covid19br.site/), o qual agradecemos.

Referências

Agência Brasil, EBC. Taxa de isolamento em SP no domingo chega a 59%. Disponível em: https://agenciabrasil.ebc.com.br/saude/noticia/2020-04/taxa-de-isolamento-em-sp-no-domingo-chega-59-indice-ideal-e-70. Acesso em 22 ABR 2020.

Chen, J. et al. Clinical progression of patients with COVID-19 in Shanghai, China. *Journal of Infection*, 2020. https://doi.org/10.1016/j.jinf.2020.03.004

Covid-19-BR, 2020. Disponível em http://covid19br.site/. Acesso em 15 de abril de 2020.

Cui, J., Zhang, Y., Feng, Z. Influence of non-homogeneous mixing on final epidemic size in a meta-population model. Journal of biological dynamics, v. 13, n. sup1, p. 31-46, 2019. https://doi.org/10.1080/17513758.2018.1484186

Flaxman, S. et al. Report 13: Estimating the number of infections and the impact of non-pharmaceutical interventions on COVID-19 in 11 European countries. Imperial College London, 2020.

Faculdade de Ciências e Tecnologia, Campus de Presidente Prudente da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", FCT-UNESP. Radar COVID-19. Disponível em http://covid19.fct.unesp.br/. Acesso em 16 ABR 2020.

Fraser, C. Estimating individual and household reproduction numbers in an emerging epidemic. *PloS one*, v. 2, n. 8, 2007. 10.1371/journal.pone.0000758

Lana, R.M. et al. Emergência do novo coronavírus (SARS-CoV-2) e o papel de uma vigilância nacional em saúde oportuna e efetiva. *Cadernos de Saúde Pública*, v. 36, 2020. https://doi.org/10.1590/0102-311X00019620

Li, Qun, et al. Early transmission dynamics in Wuhan, China, of novel coronavirus–infected pneumonia. *New England Journal of Medicine*, 2020. 10.1056/NEJMoa2001316

Ministério da Saúde, MS. COVID19 Painel Coronavírus. 2020. Disponível em https://covid.saude.gov.br/. Acesso em 14 ABR 2020.

Portal do Governo de São Paulo. *Isolamento social em São Paulo é de 50%, aponta Sistema de Monitoramento Inteligente*. Disponível em https://www.saopaulo.sp.gov.br/spnoticias. Acesso em 15 ABR 2020.

Radulescu, Anca; Cavanagh, Kieran. Management strategies in a SEIR model of COVID 19 community spread. *arXiv preprint arXiv:2003.11150*, 2020. Disponível em https://arxiv.org/pdf/2003.11150.pdf. Acesso em 20 de abril de 2020.

Rocklöv, J., Sjödin, H., Wilder-Smith, A. (2020) COVID-19 outbreak on the Diamond Princess cruise ship: estimating the epidemic potential and effectiveness of public health countermeasures. *Journal of Travel Medicine*, 2020. https://doi.org/10.1093/jtm/taaa030

Russell, T.W. et al. Using a delay-adjusted case fatality ratio to estimate under-reporting. *Centre for Mathematical Modeling of Infectious Diseases Repository*, 2020. Disponível em https://fondazionecerm.it/wp-content/uploads/2020/03/Using-a-delay-adjusted-case-fatality-ratio-to-estimate-under-reporting-_-CMMID-Repository.pdf. Acesso em 13 de abril de 2020.

Sousa Júnior, W. C.; Gonçalves, D. A.; Ribeiro, T. C. L.; Pavani, B. F.; Arraut, E. M. COVID-19 e aspectos locais/regionais de infraestrutura crítica de saúde. *Informe Técnico*, COVID-19, n. 01. São José dos Campos: CTA/ITA, 2020. Disponível em http://redevale.ita.br/. Acesso em 20 ABR 2020.

Thompson, R.N. et al. Improved inference of time-varying reproduction numbers during infectious disease outbreaks. *Epidemics*, v. 29, p. 100356, 2019. https://doi.org/10.1016/j.epidem.2019.100356

World Health Organization, WHO. *Report of the WHO-China Joint Mission on Coronavirus Disease 2019 (COVID-19)*. 2020. Disponível em https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/who-china-joint-mission-on-covid-19-final-report.pdf Acesso em 20 de abril de 2020.

* * *