Governo do Estado do Espírito Santo
Secretaria de Economia e Planejamento (SEP)
Instituto Jones dos Santos Neves (IJSN)

Núcleo Interinstitucional de Estudos Epidemiológicos (NIEE)

Nota Técnica (NT) nº 02/2020
Aplicação de modelos matemáticos no estudo de padrões e tendências da COVID-19 no Estado do Espírito Santo e em conurbação da Grande Vitória

Dra. Ethel Maciel (Ufes)
Dr. Etereldes Gonçalves Júnior (Ufes)
Dr. Fabiano Petronetto do Carmo (Ufes)
Ms. Hélio Gomes Filho (Ufes)
Ms. Antônio Ricardo (IJSN)
Ms. Gustavo Ribeiro (IJSN)
Dr. Pablo Lira (IJSN)

1. Introdução

Com o avanço da pandemia no Brasil e, em particular, em alguns estados brasileiros com franco colapso dos sistemas de saúde, o acompanhamento da curva de casos, de internados e de óbitos torna-se de fundamental importância para o planejamento e a tomada de decisão em resposta à disseminação do novo coronavírus (COVID-19).

No dia 27 de abril de 2020, de acordo com a Nota Técnica nº 1, o Brasil registrou 63 mil casos confirmados da doença e mais de 4.200 óbitos, tornando-se o epicentro da pandemia na América Latina (MACIEL et al., 2020). Dados mais recentes, de 17 de maio de 2020, indicam que o país contabilizou mais de 233 mil casos, o que o caracteriza como a quarta nação com maior

impacto da COVID-19. O número de mortes superou os 15 mil óbitos (OMS, 2020).

Essas informações revelam ainda que o Brasil, dentre os países avaliados, embora possua um sistema de saúde universal, o Sistema Único de Saúde (SUS), apresenta condições de desigualdades regionais que podem estar impactando a assistência à saúde dos brasileiros.

O crescente desfinanciamento do SUS pode ser um dos indicativos desse colapso. Importante salientar que o financiamento da saúde pública brasileira é tripartite, ou seja, o custeio do SUS tem como fonte os recursos da União, dos estados e dos municípios. Cada ente federativo deve contribuir com uma determinada quantia (percentual) das suas receitas.

Após a grave crise financeira de 2014-2015, as transferências da União para os estados se reduziram em virtude da precarização das condições econômicas (arrecadação declinante). Naquele período, a queda real foi da ordem de R$ 55 milhões (já descontada a inflação) para o Espírito Santo e de R$ 1,7 bilhões de reais para o país como um todo.

No caso do Espírito Santo, houve redução de R$ 65 milhões no período compreendido entre 2014 e 2018, como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1- Transferências correntes da União para os estados referentes ao SUS (valores corrigidos pelo IPCA de 2018)

Estado	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Redução 2018/2014
AC	254.732.514	250.372.435	239.011.817	226.162.482	219.618.889	229.016.010	-21.356.425
AL	281.270.375	288.326.757	262.469.806	256.223.470	252.081.739	264.648.924	-23.677.833
AM	572.179.929	598.898.915	584.204.173	587.877.866	534.846.177	466.389.168	-132.509.747
AP	170.352.918	152.437.489	159.337.690	149.525.794	136.455.383	154.468.685	2.031.196
BA	1.912.660.747	1.877.071.427	1.717.054.938	1.455.021.726	1.532.931.526	1.554.218.042	-322.853.385
CE	514.844.980	522.660.772	533.037.317	629.098.339	653.063.495	682.796.673	160.135.901
DF	829.564.692	791.761.108	724.782.648	779.215.406	727.570.815	697.903.457	-93.857.651
ES	**660.318.114**	**682.420.013**	**627.478.222**	**618.746.837**	**634.123.962**	**617.472.288**	**-64.947.726**

GO	248.922	101.703.058	158.068.643	149.510.308	184.715.225	156.960.559	55.257.502
MA	471.713.282	522.084.695	511.628.697	596.341.003	441.177.852	416.054.250	-106.030.446
MG	1.387.306.780	1.509.580.126	1.265.837.405	1.255.567.092	1.161.811.989	879.679.365	-629.900.761
MS	166.982.399	141.873.431	128.200.582	174.679.935	138.965.909	154.398.680	12.525.249
MT	314.329.322	293.446.393	276.676.042	257.376.100	230.645.498	321.168.596	27.722.203
PA	444.470.536	416.444.596	374.460.158	365.721.731	407.306.680	394.136.036	-22.308.560
PB	141.503.875	147.017.032	158.978.698	157.459.453	122.251.824	180.883.457	33.866.425
PE	1.767.170.110	1.770.947.732	1.682.882.740	1.549.935.903	1.574.447.780	1.577.955.382	-192.992.350
PI	292.143.405	262.787.946	271.389.946	375.128.909	378.835.855	374.478.186	111.690.240
PR	1.305.399.849	1.324.411.104	1.283.842.853	1.300.095.691	0[1]	1.547.251.722	222.840.618
RJ	792.911.302	765.302.270	686.146.654	760.516.915	838.505.507	745.181.671	-20.120.599
RN	224.702.450	262.358.689	229.169.179	241.742.844	560.710.078	400.334.948	137.976.260
RO	184.577.667	229.721.416	224.376.399	238.903.392	245.565.717	251.649.889	21.928.473
RR	85.967.810	85.109.929	82.114.361	83.507.508	132.433.863	100.920.489	15.810.560
RS	1.136.088.268	1.142.954.147	967.135.763	869.314.801	815.447.143	826.795.329	-316.158.818
SC	661.783.524	764.359.366	643.440.848	578.546.472	534.854.725	479.189.703	-285.169.663
SE	307.436.567	261.385.703	240.637.626	249.256.935	260.363.909	355.344.831	93.959.128
SP	5.485.845.781	6.096.406.971	5.513.912.031	5.044.265.778	5.026.393.155	5.015.090.636	-1.081.316.335
TO	350.176.636	318.652.621	299.496.929	311.499.182	357.452.925	308.030.263	-10.622.357
Total Geral	**20.716.682.753**	**21.580.496.139**	**19.845.772.162**	**19.261.241.875**	**18.102.577.618**	**19.152.417.240**	**-2.428.078.899**

Fonte: Secretaria do Tesouro Nacional (STN).

Essa crise de financiamento do SUS, em um momento em que ele está sendo tão necessário, pode auxiliar no entendimento das dificuldades em termos respostas mais efetivas frente à enorme demanda gerada pela pandemia.

Essa Nota Técnica visa apresentar a evolução da pandemia no Estado do Espírito Santo com projeções matemáticas e fornecer ferramentas para a tomada de decisão governamental.

2. Projeções para o Estado do Espírito Santo

2.1. Modelos matemáticos de estimativas: método de extrapolação da curva de contaminação

1 Ausência de dados para o Estado do Paraná nesse ano.

Nesse método simples de extrapolação, supomos que a curva de casos reportados da COVID-19 é exponencial por partes. Isso porque as diferentes estratégias de distanciamento social modificam a taxa de variação da curva. Considerando as semanas epidemiológicas como períodos, calculamos a taxa média de crescimento em dois cenários: taxa de crescimento médio na última semana e nos últimos 14 dias.

De forma mais técnica, considere a função C(d) que, a cada dia, representa o número de casos reportados da COVID-19. Supondo essa função exponencial por partes, aplicamos o logaritmo natural em C(d) e obtemos a taxa de crescimento semanal (s) ou quinzenal (q). Com isso, extrapolamos a curva de casos reportados usando as funções $C_s(d)=C(d_0)*Exp(s*(d-d_0))$ e $C_q(d)=C(d_0)*Exp(q*(d-d_0))$, em que d_0 é o dia inicial da extrapolação.

Partimos das seguintes premissas para calcular as projeções por meio do modelo matemático de estimativas:

- A curva de contaminados é exponencial por partes;
- O tempo médio para uma pessoa transmitir o vírus é de cerca de 14 dias; e
- Medidas de diminuição de aglomeração e circulação de pessoas não impactam de imediato na redução do número de contagiados.

Com base nessas premissas, foram considerados os seguintes parâmetros no mencionado modelo:

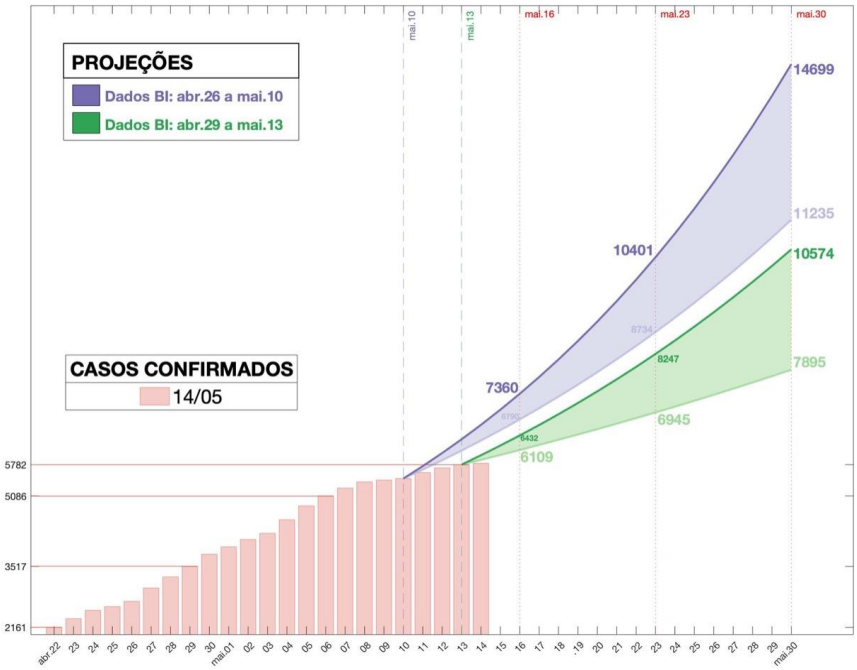
- Data base mais atualizada em 13/05;
- Data limite das projeções em 30/05 (maior segurança estatística);
- Taxa de letalidade em 13/05 no ES: 4,3%;
- A taxa da exponencial foi calculada simulando dois cenários:
    - Cenário 1: a taxa média da semana de 26/04 a 10/05; e
    - Cenário 2: a taxa média da semana de 29/04 a 13/05.

- Para esses dois cenários, as projeções também consideraram a taxa média dos últimos 14 dias das respectivas datas finais, ou seja, 10/05 no primeiro cenário e 13/05 no segundo cenário.

O referido modelo matemático de estimativas permitiu projetar o número de casos confirmados e de óbitos pelo novo coronavírus nos dois cenários mencionados.

A Figura 1 projeta que, no Cenário 1, o Estado do Espírito Santo tende a computar entre 11.235 e 14.699 casos confirmados da COVID-19 no dia 30 de maio de 2020. Esse cenário seria caracterizado por um crescimento intenso de casos. No Cenário 2, o Estado do Espírito Santo tende a registrar entre 7.895 e 10.574 casos. Esse seria um cenário mais ameno de disseminação da doença.

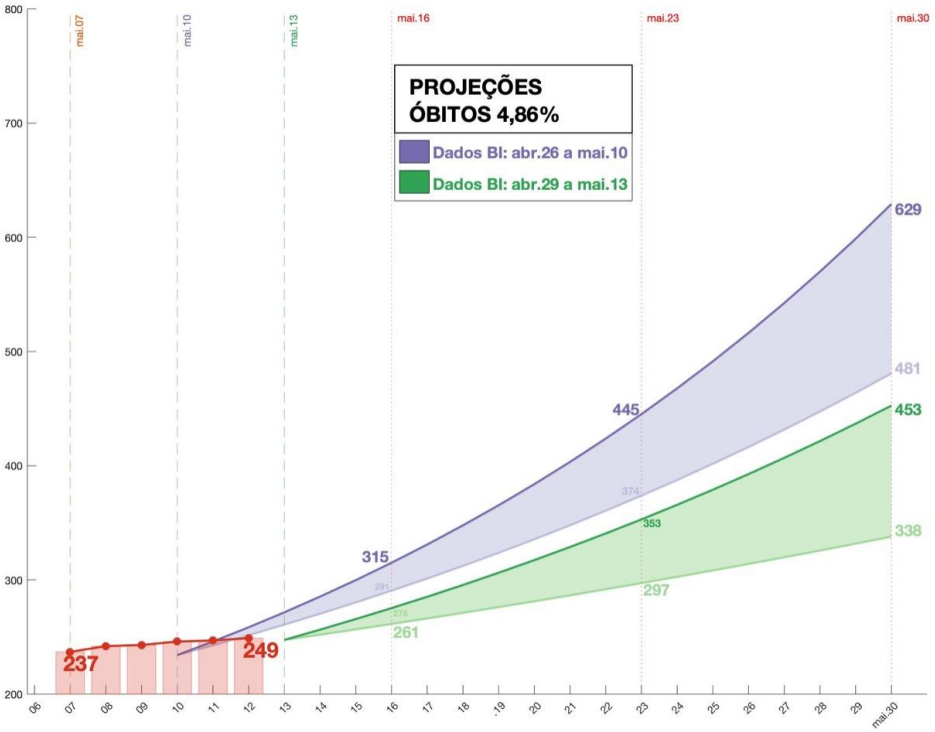
Figura 1- Projeção dos casos confirmados de COVID-19 no Espírito Santo, no período de 14/05/2020 a 30/05/2020



Fonte: Sesa/ES.

Na Figura 2, constata-se que, na perspectiva do Cenário 1, o Estado do Espírito Santo tende a registrar entre 481 e 629 óbitos pela COVID-19 no dia 30 de maio. No Cenário 2, o Espírito Santo provavelmente computará entre 338 e 453 mortes pelo novo coronavírus.

Figura 2 - Projeção dos óbitos por COVID-19 no Espírito Santo, no período de 14/05/2020 a 30/05/2020



Fonte: Sesa/ES.

2.2. Modelos matemáticos baseados no SIR: método de classes compartimentadas de indivíduos

Um dos métodos mais conhecidos é o denominado SIR, nome definido a partir das iniciais das palavras *Susceptible, Infected* e *Rehabilitated*, em português, Suscetível, Infectado e Reabilitado. O método SIR considera uma população fixa dividida em três classes: suscetível, infectada e recuperada. A classe suscetível é definida por indivíduos não infectados e suscetíveis à infecção. A

classe infectada é dada por indivíduos infectados e que transmitem a doença. Por último, a classe recuperada é dada por indivíduos que já foram infectados, estão curados, não transmitem a doença e são imunes à infecção.

O método SIR modela a dinâmica da doença a partir da evolução do número de indivíduos em cada uma das três classes ao longo do tempo, em que esses valores são alterados de acordo com equações que, de forma sucinta, descrevem a taxa de inclusão de indivíduos suscetíveis na classe infectada e de indivíduos infectados na classe recuperada.

Outros métodos surgiram a partir da extensão do método SIR. Por exemplo, o método *Susceptible Exposed Infected Rehabilitated* (SEIR), em português, Suscetíveis, Expostos, Infectados, Reabilitados. O modelo SEIR inclui uma classe de indivíduos expostos, em inglês, *exposed*, que pode modelar a fase latente da doença na qual um indivíduo infectado ainda não se tornou infeccioso. Métodos ainda mais complexos incluem outras classes de indivíduos, tais como assintomáticos e hospitalizados, as quais podem fornecer mais elementos para a análise de epidemias.

No estudo da epidemia da Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV), utilizamos o método *Susceptible Exposed Infected Asymptomatic Hospitalized Rehabilitated* (SEIAHR), em português, Suscetíveis, Expostos, Infectados, Assintomáticos, Hospitalizados, Reabilitados, o qual modela a dinâmica entre as classes de indivíduos suscetíveis, expostos, infectados, hospitalizados e recuperados (KERMACK; MCKENDRICK, 1927).

Para o modelo de equações diferenciadas SEIHR utilizado para as projeções da RMGV, os parâmetros foram definidos da seguinte forma:

- Número de dias da recuperação dos hospitalizados em geral (7 dias);
- Proporção de casos críticos (19,534% - Brasil);
- Taxa de fatalidade da doença (2,81% - ES);

- Probabilidade de hospitalização por faixa etária (dados do Estado de São Paulo);
- Tempo médio desde o início da doença até a hospitalização (entre 2,7 e 4 dias); e
- Tempo médio desde o início da doença até o óbito (entre 12,8 e 17,5 dias).

As variáveis consideradas no mencionado modelo foram as seguintes:

- Matriz de interação social (países europeus) por faixa etária;
- Proporção de assintomáticos no dia zero da simulação;
- Proporção de recuperados no dia zero da simulação; e
- Proporção de expostos no dia zero da simulação.

Ressalta-se que alguns parâmetros e variáveis utilizadas em nossos resultados foram obtidos com base nas referências da Secretaria de Estado da Saúde do Espírito Santo (Sesa/ES).

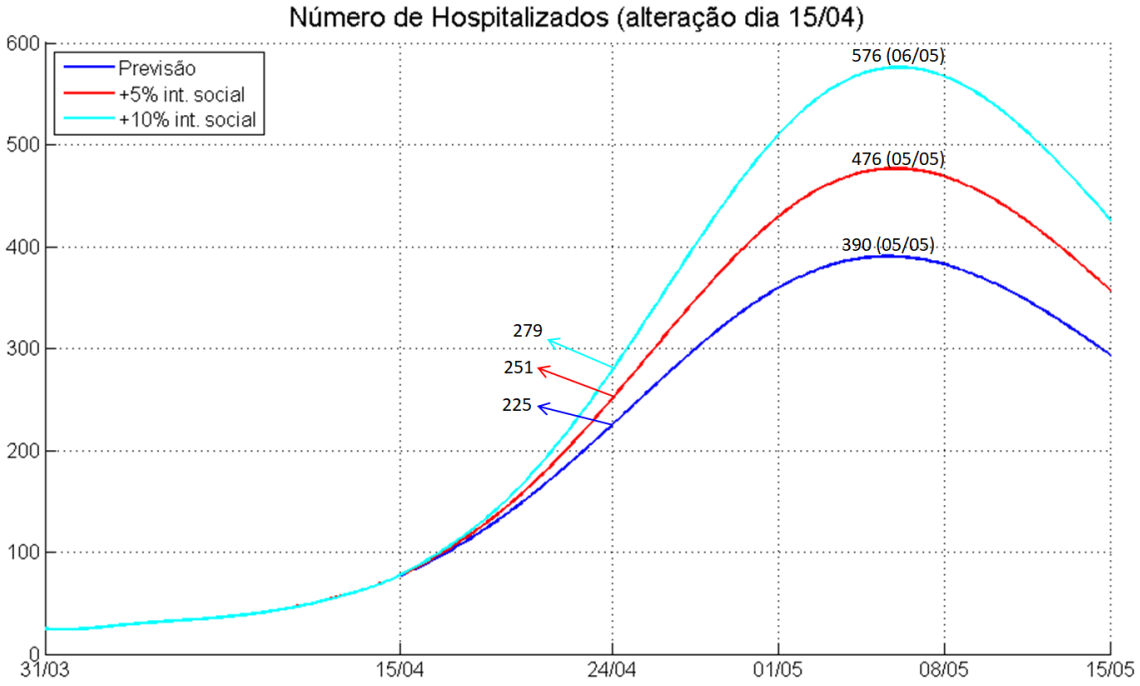
Do conjunto de variáveis apresentadas, no dia 21/04/2020 foram simulados 2.880 cenários para se observar aquele que mais se assemelha aos dados de hospitalizados da RMGV entre os dias 31/03/2020 e 13/04/2020. Esse intervalo de datas foi escolhido pelo fato de que datas muito próximas do dia atual desconsideram os pacientes cujos exames ainda não deram resultado.

A Figura 3 apresenta, em azul, o cenário mais adequado e sua previsão até o dia 15/05/2020, em que é possível se observar um número máximo de hospitalizados de 390 no dia mais crítico.

Vale ressaltar que a interação social altera fortemente as proporções da pandemia e que as medidas adotadas pelo governo refletem diretamente nessas interações. Além disso, só é possível perceber mudanças no comportamento da pandemia após, em média, 14 dias de mudanças na interação social. Sendo assim, para tentar prever mudanças de comportamentos ocorridas semanas antes da simulação, foram geradas duas

curvas, com aumento na interação social de 5% e 10%, as quais são exibidas na Figura 3. É possível observar que, com apenas 5% de aumento de interação entre as pessoas, tem-se um aumento de, aproximadamente, 22% no número de hospitalizados no dia crítico. Já um aumento de 10% na interação social leva a um aumento de, aproximadamente, 48% no número de hospitalizados.

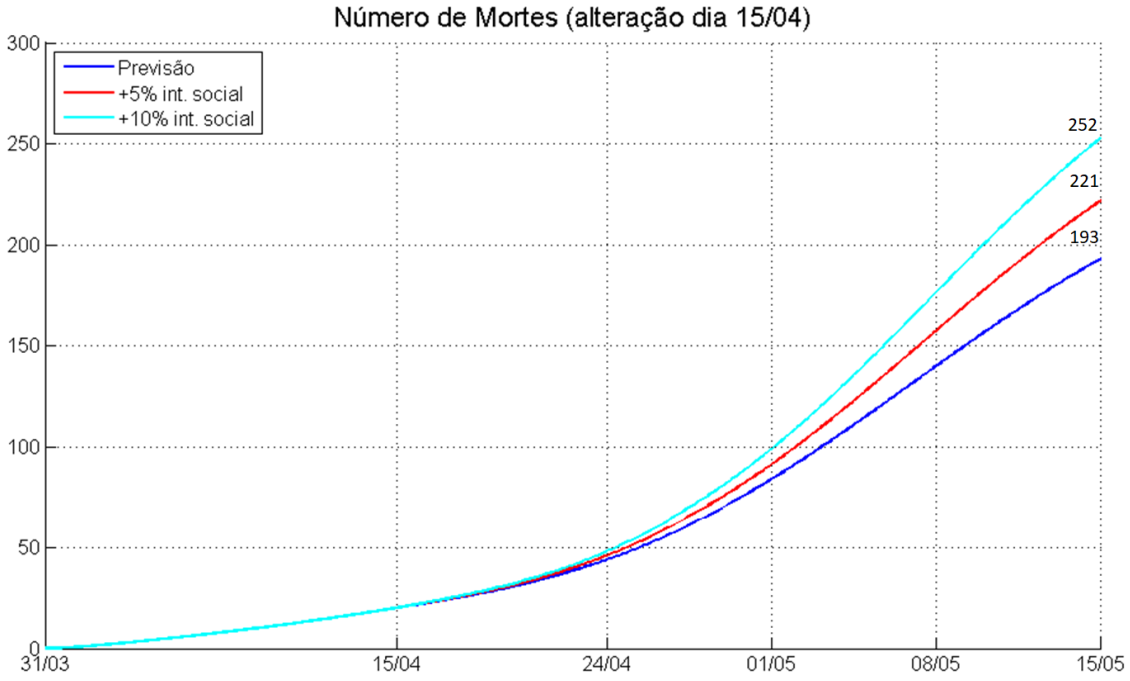
Figura 3 - Comparação da previsão do número de hospitalizados com variação da interação social



Fonte: Sesa/ES.

A Figura 4 apresenta a previsão do número de mortes para os mesmos cenários descritos anteriormente. Nela, pode-se perceber que um aumento de 5% de interação social provoca um aumento de 14,5% no número de mortes, enquanto que um aumento de 10% na interação social provoca um aumento de 30,6% nos óbitos.

Figura 4 - Comparação da previsão do número de mortes com variação da interação social



Fonte: Sesa/ES.

A Tabela 2 apresenta uma comparação de previsões do número de mortos considerando com e sem um aumento de interação social de 10% e variando a taxa de letalidade entre 2,81%, que foi a taxa registrada no dia 21/04/2020 no Estado do Espírito Santo, e 4,2%, que foi a taxa registrada no Brasil no dia 04/04/2020, data em que as primeiras simulações foram geradas. Pode-se observar que, no final de maio, a variação do número de mortes é de 31,9%, considerando a taxa de letalidade de 2,81%, e de 32,16%, considerando a taxa de letalidade de 4,2%. A comparação entre o melhor e o pior cenário da tabela gera uma diferença de 97,2% no número de mortos. Importante ressaltar que, no dia 12/05/2020, foram registrados 169 óbitos na região conurbada da Grande Vitória (Cariacica, Serra, Vila Velha e Vitória) e foram previstos 171 óbitos para esse mesmo dia.

Tabela 2 - Comparação de números de mortes com variação de interação social e taxa de letalidade

Data	Letalidade 2,81%		Letalidade 4,2%	
	Previsão de óbitos	Previsão de óbitos (+10% int. social)	Previsão de óbitos	Previsão de óbitos (+10% int. social)
18/04/2020	26	27	39	39
25/04/2020	48	54	72	80
02/05/2020	91	109	136	162
09/05/2020	148	188	221	281
16/05/2020	199	261	297	381
23/05/2020	232	307	346	458
30/05/2020	248	327	370	489

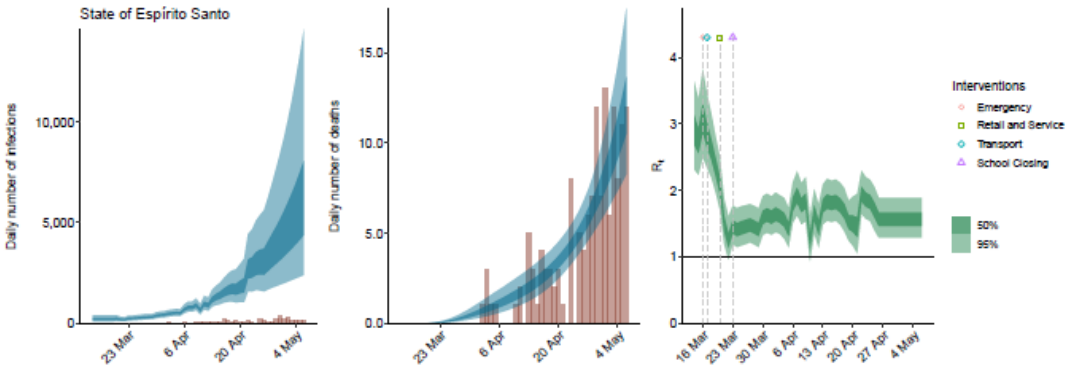
Fonte: Sesa/ES.

2.3- Número de reprodução ou taxa de transmissão

O número básico de reprodução de um patógeno R0 determina a velocidade de transmissão em condições naturais numa população, ou seja, sem medidas de mitigação. Com medidas de mitigação, o potencial de propagação da doença é alterado no tempo, nesse caso, usamos a notação Rt. Basicamente, Rt determina a velocidade de propagação da doença no instante t. Segundo Mellan e outros (2020), o Rt no Espírito Santo estava próximo de 3 na semana do dia 16/03/2020. Na semana do dia 04/05/2020, o Rt registrado no estado foi de 1,57. Usando o modelo SEIHR, calculamos o Rt semanal da região conurbada da Grande Vitória. Na semana do dia 22/03/2020, registramos o Rt de 2,19 e, na semana do dia 05/05/2020, registramos 1,64. Esses números são maiores que os registrados no Espírito Santo provavelmente por dois motivos:

a região conurbada da Grande Vitória é mais populosa e é o epicentro da epidemia no estado, no período analisado.

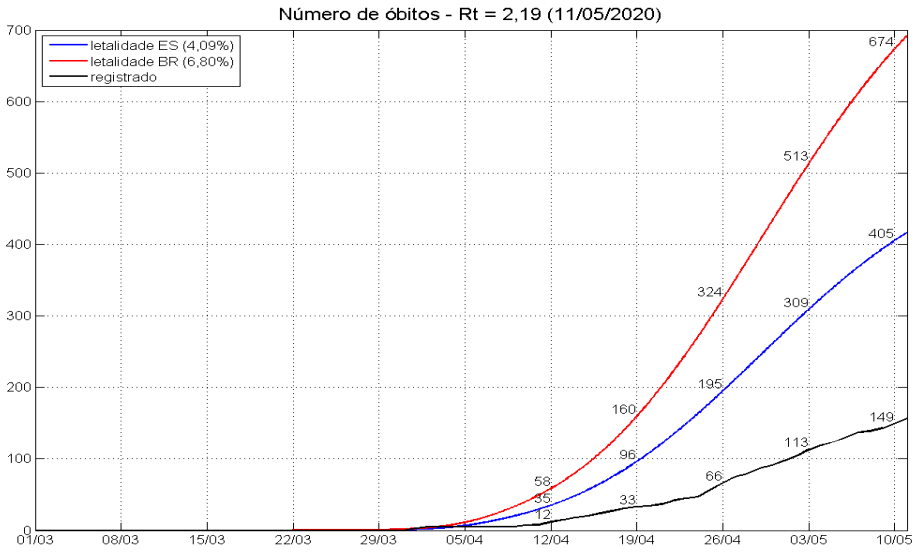
Figura 5 - Gráficos que mostram dados do ES, em que o Rt é apresentado mais à direita



Fonte: Mellan e outros (2020).

Uma pergunta importante a ser respondida é: qual seria o número aproximado de óbitos se a taxa de transmissão Rt se mantivesse no patamar de 2,19 por todo o período de 22/03/2020 a 10/05/2020? Na Figura 6, simulamos duas situações: em azul, Rt=2,19 em todo o período e a taxa de letalidade igual a 4,09%, que é a taxa atual (10/05/2020) no Espírito Santo. Em vermelho, Rt=2,19 em todo o período e a taxa de letalidade é igual a 6,8%, que é a taxa atual (10/05/2020) no Brasil. Em preto, o observado, em que Rt variou até 1,64 na última semana devido, provavelmente, às intervenções não farmacológicas implementadas, como distanciamento social e uso de máscaras. Percebemos uma alteração considerável no número de óbitos caso a taxa Rt não fosse diminuída. Teríamos, no pior cenário, aproximadamente 674 óbitos ao invés dos 149 registrados apenas na região conurbada da Grande Vitória.

Figura 6 - Simulação do número de óbitos em relação ao Rt



Fonte: Sesa/ES.

3. Considerações finais

As previsões até o momento continuam apontando para uma aceleração da curva epidêmica em maio, com aumento de internações e óbitos. Importante ressaltar que as modelagens matemáticas utilizam parâmetros que podem se modificar no tempo e de acordo com mudanças nas estratégias adotadas, tanto na definição de casos, como em mudanças não previstas nas interações sociais e no isolamento social.

Com medidas de mitigação, o potencial de propagação da doença é alterado no tempo. O Rt que determina a velocidade de propagação da doença no instante t no Espírito Santo estava próximo de 3 na semana do dia 16/03/2020. Na semana do dia 04/05/2020, usando o modelo SEIHR, calculamos o Rt semanal da região conurbada da Grande Vitória. Na semana do dia 22/03/2020, registramos o Rt de 2,19 e, na semana do dia 05/05/2020, registramos 1,64. Essa mudança mostra-se importante, pois, devido ao

crescimento exponencial, essa diminuição da propagação da doença desacelera o número de internados e de pessoas que poderiam ir à óbito. Destaca-se que, quanto mais próximo do valor 1 o Rt estiver, mais próximo do controle a doença estará.

É possível afirmar também que a taxa de letalidade no Espírito Santo vem aumentando ao longo da pandemia, variou de 2,81% no dia 21/04/2020 para 4,28% no dia 12/05/2020, e que um aumento de apenas 10% na interação social poderia ocasionar um aumento significativo de mortes, o que representa um impacto significativo na vida de muitas famílias. O cenário para as próximas semanas, portanto, exige cautela e vigilância para que possamos manter ou diminuir a interação social a fim de reduzir a pressão no sistema de saúde e o número de óbitos decorrentes da COVID-19.

Ainda que consideremos que projeções são indicativos e que os números não devem ser tomados como absolutos, as tendências sinalizam para um cenário de ascendência na curva epidêmica, e qualquer decisão deve continuar considerando esse pressuposto. Por fim, nossas análises evidenciam que, no momento, a velocidade de propagação da epidemia no estado está aumentando ligeiramente de 1,64 para 1,84. A epidemia ainda não está controlada e decisões que alterem padrões de interação podem impactar a estratégia de proteção de vidas adotadas pelo governo.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, João Flávio et al. **Previsão de disponibilidade de leitos nos estados brasileiro e Distrito Federal em função da pandemia de COVID-19**. Belo Horizonte: LABDEC/UFMG. Disponível em: <www.labdec.nescon.medicina.ufmg.br/>. Acessado em: 27/04/2020.

ARRAY ADVISORS. Disponível em: <www. info.array-architects.com/en-us/covid-19>. Acessado em: 27/04/2020.

HSU, S. B.; HSIEH, Y. H. (2008). **On the role of asymptomatic infection in transmission dynamics of infectious diseases.** Bulletin of Mathematical Biology, 70(1), 134-155.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estimativas da População**. Disponível em: <www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?=&t=resultados>. Acessado em: 27/04/2020.

KERMACK, W. O.; MCKENDRICK, A. G. (1927). **A contribution to the mathematical theory of epidemics.** Proceedings of the royal society of london. Series A, Containing papers of a mathematical and physical character, 115(772), 700-721.

LANT, T. et al (2008, December). **Simulating pandemic influenza preparedness plans for a public university: a hierarchical system dynamics approach.** In 2008 Winter Simulation Conference (pp. 1305-1313). IEEE.

LI, M. Y.; MULDOWNEY, J. S. (1995). **Global stability for the SEIR model in epidemiology. Mathematical biosciences**, 125(2), 155-164.
OMS, Organização Mundial da Saúde. **Coronavirus disease (COVID-2019) situation reports**. Disponível em: <www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/situation-reports>. Acessado em: 27/04/2020.

MACIEL, Ethel et al. **Análise da propoagação da pandemia de COVID-19 no estado do Espírito Santo e naconurbação da Grande Vitória a partir de modelos matemáticos**. Disponível em: <www.ijsn.es.gov.br>. Acessado em: 17/05/2020.

MELLAN, Thomas A. et al. **Estimating COVID-19 cases and reproduction number in Brazil**. Imperial College London (08-05-2020), doi: https://doi.org/10.25561/78872.

SESA/ES, Secretaria de Saúde do Estado do Espírito Santo. **Painel COVID-19 do Estado do Espírito Santo**. Disponível em: <www.coronavirus.es.gov.br/painel-covid-19-es>. Acessado em: 27/04/2020.

YANG, K. H., & HSU, J. Y. (2012). **A new SIR-based model for influenza epidemic.** World Academy of Science, Engineering and Technology, 67(4), 374-379.