

# ANÁLISE PREDITIVA DE CASOS CONFIRMADOS DE COVID-19 NO BRASIL E EM OITO PAÍSES BASEADA NO MODELO NÃO LINEAR DE GOMPERTZ

M. Sc. Kaio Diego das Neves Barros  
Laboratório de Genética Aplicada  
Universidade Federal Rural da Amazônia  
<https://orcid.org/0000-0002-3894-2189>  
[kaio.diegobarros@gmail.com](mailto:kaio.diegobarros@gmail.com)

## RESUMO

Este estudo objetivou avaliar o avanço casos confirmados de Covid-19 no Brasil e em oito países (Áustria, China, Alemanha, Itália, Nova Zelândia Espanha, Reino Unido e Estados Unidos) através do modelo não linear de Gompertz. Os dados foram obtidos em relatórios oficiais da Organização Mundial da Saúde (OMS) e foram submetidos à análise iterativa pelo método dos quadrados mínimos para estimação dos parâmetros  $a$ ,  $b$  e  $k$  através de procedimento NLIN (SAS versão 9.4). A aceleração absoluta foi obtida pelo log de base  $e$  dos dados observados e a aceleração por dia pela derivada de terceira ordem do modelo preditivo. O coeficiente de correlação ( $R^2$ ) foi calculado por meio do procedimento CORR (SAS versão 9.4), assim como a correlação das assíntotas com a extensão da quarentena (dias) e com a densidade populacional de cada país. No momento, o modelo preditivo sugere que o Brasil está em curva ascendente de casos com tendência a alcançar 2.226.429 pessoas no total ( $R^2=0,9984$ ). A aceleração absoluta evidenciou aumento e a aceleração por dia demonstrou que apenas o Brasil está em movimento acelerado de casos e a tendência é que passe a diminuir somente a partir de 04/julho. As correlações sugerem que a eficácia da quarentena não está relacionada à sua extensão (dias), já que países com maior densidade populacional apresentaram diminuição de casos em menor tempo de restrição.

**Palavras-chave:** Pandemia, Covid-19, Brasil, Isolamento social, Modelo não linear.

# PREDICTIVE ANALYSIS OF COVID-19 CONFIRMED CASES IN BRAZIL AND EIGHT COUNTRIES BASED ON THE GOMPERTZ NONLINEAR MODEL

## ABSTRACT

This study aimed to evaluate the progress of Covid-19 confirmed cases in Brazil and in eight countries (Austria, China, Germany, Italy, New Zealand Spain, the United Kingdom and the United States) using the nonlinear Gompertz model. The data were obtained in official reports of the World Health Organization (WHO) and were submitted to iterative analysis by least squares method to estimate parameters  $a$ ,  $b$  e  $k$  through NLIN procedure (SAS version 9.4). The absolute acceleration obtained by the  $\log_e^n$ . The acceleration per day obtained by the third order derivative of the predictive model. The asymptotes correlation with quarantine and with the population density of each country was also verified, in addition to the estimation of the correlation coefficient ( $R^2$ ) using CORR procedure (SAS version 9.4). The predictive model showed that Brazil is on upward curve with tendency to reach 2.226.429 people in total ( $R^2=0.9984$ ). The absolute acceleration showed an increase and the acceleration per day demonstrated that only Brazil is in accelerated movement of cases and the tendency is that it will start to decrease after July 4th. The correlations suggest that the quarantine effectiveness isn't related to its extension (days), since countries with higher population density showed decrease in cases in a shorter restriction time.

**Keywords:** Pandemy, Covid-19, Brazil, Social isolation, Nonlinear model.

## INTRODUÇÃO

O Coronavírus da Síndrome Respiratória Aguda Grave 2 (SARS-Cov-2) é um agente viral contagioso que surgiu na cidade de Wuhan (província de Hubei) na China, foi catalogado oficialmente em 31 de dezembro de 2019 e é responsável pela pandemia denominada Covid-19 (Coronavirus disease 2019) que, atualmente, apresenta 3.267.184 casos clínicos confirmados no mundo <sup>1</sup>. Os sintomas mais comuns são tosse seca, dispneia, febre, presença de infiltrados pulmonares bilaterais, ageusia e anosmia <sup>2,3</sup>.

No intuito de combater o avanço da pandemia, governos têm adotado medidas distintas, tais como: higienização, uso de máscara cirúrgica, aumento no número de quadro de agentes da saúde, aquisição de insumos, medidas de isolamento social, entre outras, como preconizado pela Organização Mundial da Saúde (OMS) <sup>4</sup>. Alemanha e Nova Zelândia tem se tornado modelo neste combate com medidas consideradas austeras. Da mesma forma, países como a Itália e a Espanha que anteriormente apresentaram aumento significativo de casos confirmados em março/2020, já anunciaram afrouxamento de algumas medidas após 52 dias de restrições, em média <sup>5</sup>.

Na América do Sul há atualmente 179.312 casos catalogados de Covid-19, correspondendo mundialmente a 5,48%. O Brasil detém 85.380 casos (2,61 % do mundo e 47,61% da América do sul) e tem demonstrado aumento mesmo após cerca de 90 dias de restrição social. Estados e municípios já denunciaram situação de colapso, o que nos conduz a avaliar a eficácia (resultados) das medidas tomadas até o momento, principalmente com relação ao isolamento social que tem sido amplamente discutido <sup>6,7</sup>.

Nesse sentido, a avaliação preditiva com base em modelos não lineares pode servir como ferramenta para verificar se as medidas impostas até o momento estão surtindo efeito sobre o avanço de casos confirmados de Covid-19, já que este tipo de análise é comumente aplicado em estudos populacionais e a expressão matemática apresenta parâmetros interpretativos segundo o objeto de avaliação, também podendo-se deduzir a velocidade e aceleração do que se observa <sup>8,9</sup>.

Portanto, este estudo teve como objetivo avaliar a evolução do número de casos confirmados de Covid-19 no Brasil e em oito países (Áustria, China, Alemanha, Itália, Nova Zelândia Espanha, Reino Unido e Estados Unidos) por meio do modelo não linear de Gompertz com dados da Organização Mundial da Saúde (OMS) observados até a data de 02 de maio de 2020.

## MÉTODOS

As informações sobre o número de casos confirmados de Covid-19 (observados) foram obtidos por meio de relatórios oficiais da Organização Mundial da Saúde (OMS) até a data de 02 de maio de 2020. Os países objeto de estudo foram: Áustria (AUS), Brasil (BRA), China (CHI), Alemanha (ALE), Itália (ITA), Nova Zelândia (NOZ), Espanha (ESP), Reino Unido (REU) e Estados Unidos (EUA) <sup>7</sup>.

Inicialmente as informações foram compiladas em planilha Excel que em seguida foi convertida para arquivo “.txt” e, posteriormente, realizou-se a análise matemática iterativa para a construção da curva preditiva baseada no modelo não linear de Gompertz [1] descrita por Fialho <sup>8</sup>.

$$P = a \cdot \exp^{-\exp^{-b \cdot (t-k)}} \quad [1]$$

Em que:  $P$  é o valor predito e define a quantidade de casos confirmados de Covid-19 a um dado tempo  $t$  (dias);  $a$  é o tamanho assintótico ou quantidade máxima de casos confirmados;  $b$  é o ponto de inflexão e representa o momento em que a curva inicia sua tendência à estabilidade;  $k$  é o tempo  $t$  (dias) que ocorre o ponto de inflexão  $b$ ;  $t$  é o tempo em dias;  $\exp^x$  é a função exponencial natural cuja base é o valor de Euler ( $\sim 2,718281828$ ).

O ajuste dos parâmetros  $a$ ,  $b$  e  $k$  se deu segundo o método dos quadrados mínimos por meio do procedimento PROC NLIN via software Statistical Analysis System (SAS) versão 9.4, com intervalos de confiança a 95,0% de probabilidade. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foi obtido pelo quadrado da correlação entre os casos confirmados observados e predito, através do procedimento PROC CORR (SAS versão 9.4).

Após obtenção dos parâmetros também foi definida a equação para “aceleração por dia” ( $AC_{dia}$ ) [2] <sup>8</sup> que, obtida pela derivada de terceira ordem do modelo preditivo, traduz a variação do potencial de surgimento de casos observados em função tempo (dias<sup>2</sup>).

$$AC_{dia} = \frac{d^2P}{d^2t} = a \cdot b^2 \cdot \exp^{-b \cdot (t-k) - \exp^{-b \cdot (t-k)}} \cdot (\exp^{-b \cdot (t-k)} - 1) \quad [2]$$

A “aceleração absoluta” foi obtida através da transformação dos valores observados pelo log natural (log de base  $e$  ou  $\exp$ ) e revela o potencial acumulado de casos observados em função do tempo (dias<sup>2</sup>).

As correlações entre tamanho assintótico vs quarentena (dias) e tamanho assintótico vs densidade populacional (hab./km<sup>2</sup>) foram calculadas por meio do procedimento PROC CORR (SAS versão 9.4).

## RESULTADOS

O período de observações (dias) em cada país foi diferente até 02/maio, dependendo da data de subnotificação do 1º caso: Áustria: 67; Brasil: 66; China: 124; Alemanha: 96; Itália: 93; Nova Zelândia: 65; Espanha: 92; Reino Unido: 92; e Estados Unidos: 101.

As estimativas dos parâmetros  $a$ ,  $b$  e  $k$  apresentaram qualidade de ajuste satisfatória ( $R^2 > 0,90$ ). Segundo as assíntotas ( $a$ ), a tendência é que o alcance de Covid-19 no Brasil e nos Estados Unidos sejam maiores que nos outros países, como corroborado pela sobreposição dos intervalos de confiança (IC). Os valores máximos e mínimos (IC) estimados ao parâmetro  $a$  podem ser compreendidos como pior e melhor cenário, respectivamente (Tabela 1).

O parâmetro  $k$  demonstrou que o Brasil é o país que pode levar mais tempo para iniciar a estabilidade de casos, isto é, somente após 128,5504 dias a partir da notificação do 1º caso, em 04/julho. Por outro lado, todos os outros aparentaram estar em fase de estabilização (Tabela 1).

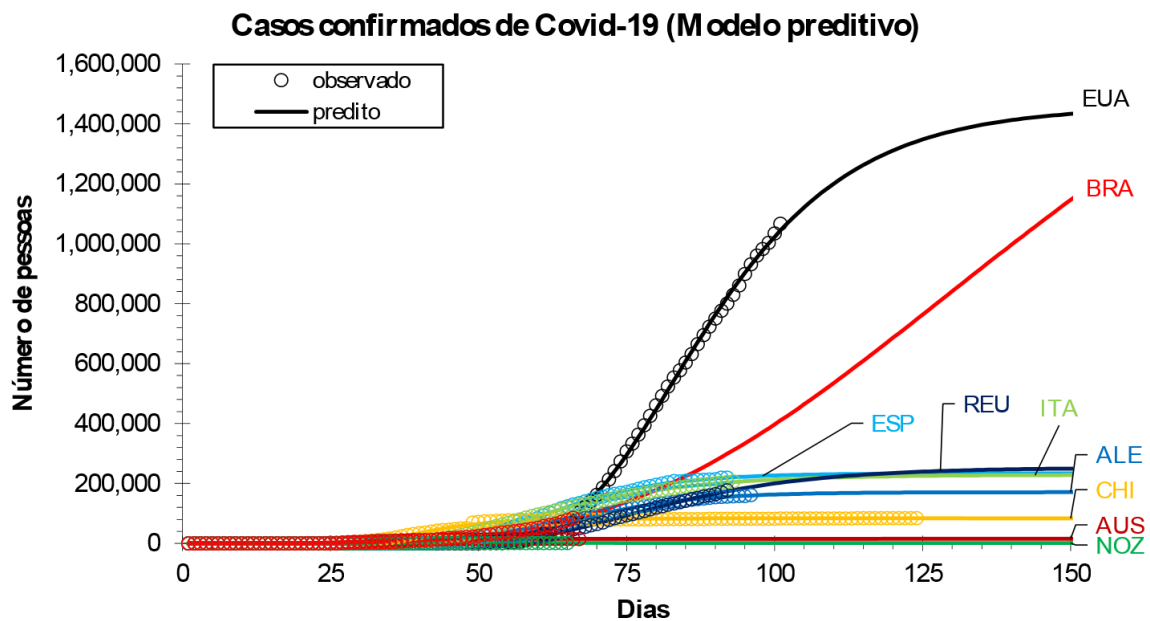
**Tabela 1.** Estimativas de parâmetros ( $a$ ,  $b$  e  $k$ ) e respectivos intervalos de confiança (IC) do modelo preditivo para número de casos confirmados de Covid-19 no Brasil e em oito países até a data de 02 de maio de 2020.

Países	Parâmetros						R <sup>2</sup>
	$a$	IC	$b$	IC	$k$	IC	
AUS	15.425,5303 a*	15.321,2<15.529,8	0,1244 a*	0,1211<0,1277	29,4149 a*	29,2417<29,5584	0,9280
BRA	2.226.429,7838 b	590.038<3.862.821	0,0191 b	0,0157<0,0225	128,5504 b	105,8<151,3	0,9984
CHI	83.413,7224 c	82.979,5<83.842,8	0,1261 ac	0,1215<0,1310	38,9164 c	38,6877<39,1548	0,9959
ALE	170.820,6562 d	169.712<171.930	0,0853 d	0,0840<0,0866	63,9116 d	63,7910<64,0322	0,9998
ITA	228.690,5781 e	226.029<231.353	0,0629 e	0,0614<0,0643	58,2108 e	57,9507<58,4709	0,9996
NOZ	1.129,9586 f	1125,2<1134,7	0,1720 f	0,1685<0,1755	30,2303 f	30,1464<30,3142	0,9997
ESP	233.895,9647 g	231.909<235.883	0,0863 dg	0,0846<0,0881	60,1050 g	59,9484<60,2616	0,9996
REU	252.867,9823 h	248.404<257.332	0,0581 h	0,0570<0,0592	75,0485 h	74,6951<75,4018	0,9998
EUA	1.458.566,0877 bi	1.422.332<1.494.800	0,0602 eh	0,0584<0,0619	82,7822 i	82,2936<83,2709	0,9996

\*Estimativas seguidas de letras diferentes em uma mesma coluna diferem pela sobreposição de intervalos de confiança ( $\alpha = 0,05$ ).

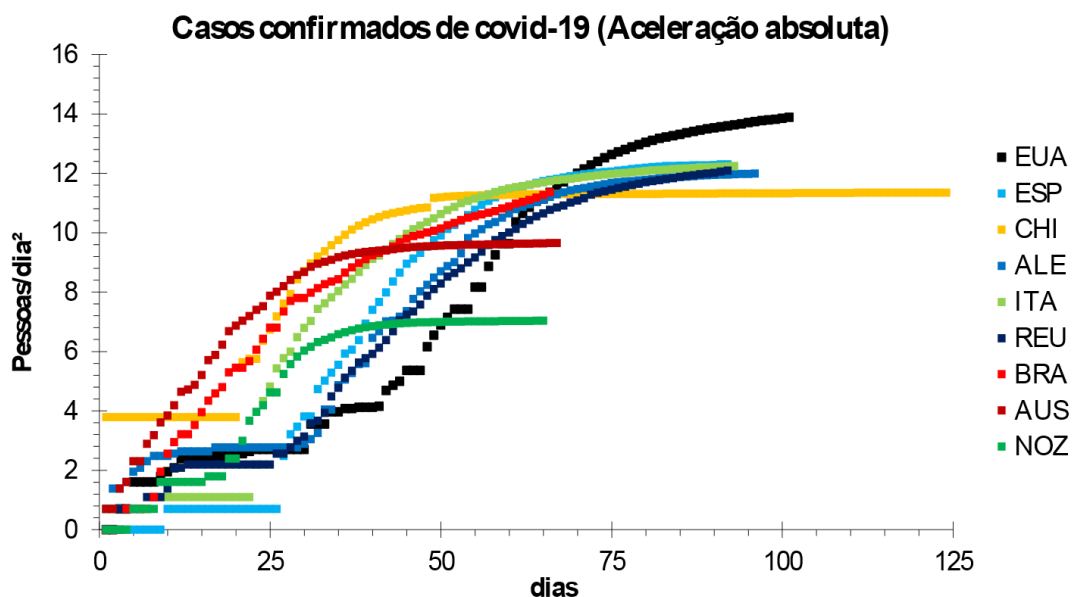
O comportamento gráfico da predição a partir de 03/maio evidenciou o que foi observado nas tabelas 1. Além disso, Estados Unidos foi o país que apresentou número de casos observados mais acentuado e o Brasil apresentou tendência a ultrapassá-lo após um período maior que 150 dias (Gráfico 1).

**Gráfico 1.** Casos confirmados acumulados e curva preditiva de Covid-19 no Brasil e em oito países à data de 02 de maio de 2020.



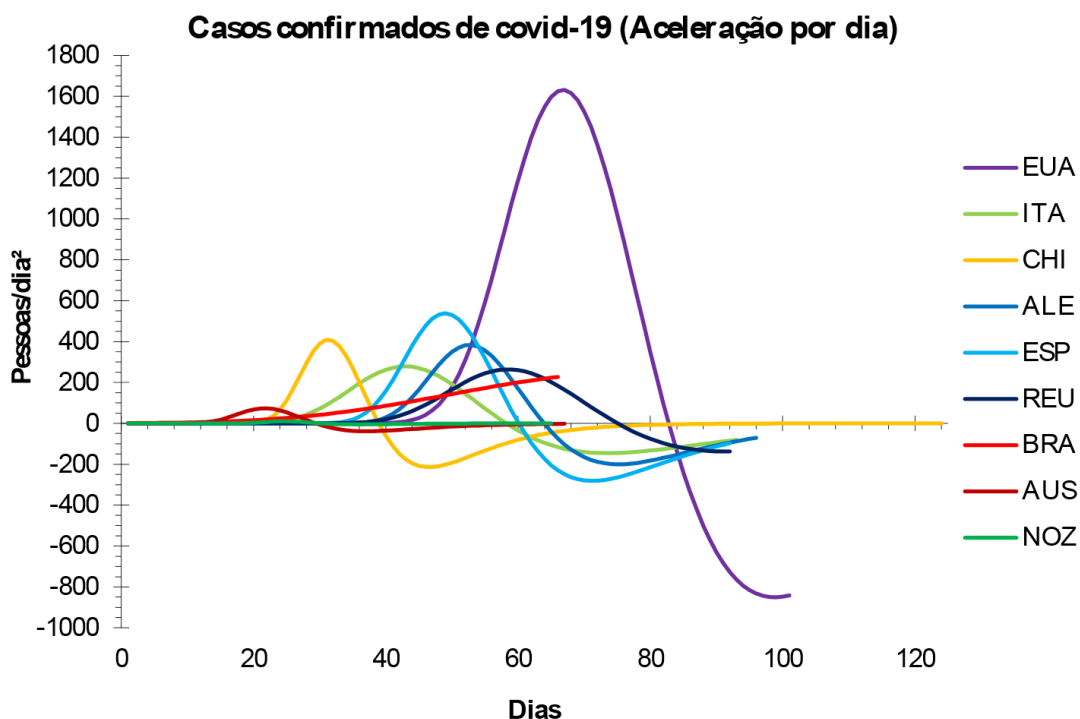
A aceleração absoluta da Áustria aos 25 dias foi maior ( $7,88 \text{ pessoas/dia}^2$ ), seguida de Brasil ( $6,80 \text{ pessoas/dia}^2$ ) e China ( $6,74 \text{ pessoas/dia}^2$ ). Porém, aos 43 dias o Brasil ultrapassou a Áustria ( $9,53$  e  $9,44 \text{ pessoas/dia}^2$ ), e aos 66 dias ultrapassou a China ( $11,35$  e  $11,29 \text{ pessoas/dia}^2$ , respectivamente); e aos 70 dias, Estados Unidos apresentou maior valor aceleração absoluta,  $12,0 \text{ pessoas/dia}^2$ . Houveram diferentes tempos de respostas aos dados iniciais (Gráfico 2).

**Gráfico 2.** Aceleração absoluta para número de casos confirmados de Covid-19 no Brasil e em oito países à data de 02 de maio de 2020.



Os resultados obtidos para aceleração por dia ( $AC_{dia}$ ) apresentados no Gráfico 3 revelaram que, com exceção do Brasil, todos os países estão em movimento retardado de casos confirmados de Covid-19, evidenciando que já passaram pelo ponto de inflexão da curva, isto é, tendem à estabilidade (Gráfico 3).

**Gráfico 3.** Aceleração por dia de casos confirmados de Covid-19 no Brasil e em oito países à data de 02 de maio de 2020.



A correlação da assíntota ( $a$ ) com a quarentena (dias) revelou-se positiva, evidenciando que sua extensão não tem influência efetiva para a desaceleração do número de casos. Além disso, a correlação negativa entre a assíntota e a densidade populacional sugeriu que o número de casos não está relacionado ao número de pessoas no espaço de  $1,0 \text{ km}^2$ .

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os métodos de proteção social aplicados em casos pandêmicos como a Covid-19, obedecem a níveis estabelecidos pelos órgãos de saúde e que devem ser aplicados segundo as peculiaridades de cada região. A predição baseada nos dados coletados até 02/mayo, demonstrou que o Brasil apresenta resultado distinto aos demais países analisados, sugerindo que o número de casos tem comportamento ascendente e pode alcançar entre 590.038 e 3.862.821 pessoas.

Estes valores estão relacionados à aceleração que, para este estudo, é uma medida de potencial em número de pessoas a um dado tempo compreendido como área (dias<sup>2</sup>) e ela exerce influência direta sobre a taxa específica (pessoas/dia), que nada mais é que uma medida de velocidade. Nesse sentido, determinar a qualidade e a amplitude da aceleração é importante para compreender o comportamento preditivo como um todo.

Segundo Fialho <sup>8</sup> a aceleração máxima e a velocidade máxima tem como referência o ponto de inflexão  $b$ , em que a partir deste ponto a aceleração passa a apresentar movimento retardado e a velocidade diminui, conseqüentemente o modelo preditivo passa a iniciar flexão da curva em direção à assíntota (estabilidade). Por isso, ao terem passado pelo ponto de inflexão  $b$ , todos os países objeto de estudo avançam em direção à estabilidade de casos, com exceção do Brasil.

E este aumento pode ocorrer ainda que a lei de medidas para enfrentamento da pandemia tenha durado 87 dias até 02/maio <sup>6</sup>. Ao contrário, Alemanha e Áustria que, com densidade populacional maior, aplicaram restrição social com menor tempo (30 e 36 dias, respectivamente) e já exibem retomada parcial das atividades. De acordo com Meyers <sup>10</sup> e Chen <sup>11</sup> as medidas de restrição social podem apresentar resultado significativo no avanço de contágios se bem aplicadas.

Foi observado que os países apresentaram tempo de resposta distintos aos dados inicialmente observados, condição que pode prejudicar a precisão das estimativas, como observado pelo intervalo de confiança (IC) da assíntota para o Brasil. O processo iterativo apresenta maior sensibilidade aos dados iniciais e ao número de observações, comprometendo a estimação do parâmetro  $\alpha$  em alguns modelos <sup>12,13,14</sup>. É importante reforçar também que as ilações retiradas dos resultados estatísticos estão de acordo com a profundidade da análise matemática aplicada.

## REFERÊNCIAS

1. WHO. World Health Organization. Coronavirus disease (COVID-19): Situation report – 103. 2020 [acesso em 2 mai 2020]. Disponível em [https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/situation-reports/20200502-covid-19-sitrep-103.pdf?sfvrsn=d95e76d8\\_6](https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/situation-reports/20200502-covid-19-sitrep-103.pdf?sfvrsn=d95e76d8_6)
2. DOLCE FILHO, R; NECHAR, RC; RIBEIRO FILHO, A. Comitê Especial de Pesquisa COVID-19 da AMHB. 2020 [acesso em 08 mai. 2020]. Disponível em



<https://amhb.org.br/wp-content/uploads/2020/04/Estudo-Preliminar-do-Ge%CC%82nio-Epide%CC%82mico-capa-e-timbre-AMHB.pdf>

3. LU, H; STRATTON, CW; TANG, YW. Outbreak of Pneumonia of Unknown Etiology in Wuhan China: the Mystery and the Miracle. *Journal of Medical Virology*. Abr;92(4): 401–402.
4. SOHRABI, C; ALSAFI, Z; O'NEILL, N; KHAN, M; KERWAN, A; AL-JABIR, A; IOSIFIDIS, C; AGHA, R. World Health Organization declares global emergency: A review of the 2019 novel coronavirus (COVID-19). *International Journal of Surgery*. Jan;76(1): 71-76.
5. ORGAZ, CJ. Coronavírus: as lições dos países que estão saindo do isolamento. BBC. , 4 mai. 2020. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-52528284>. Acesso em: 08 mai. 2020.
6. BRASIL. Lei nº 13.979, de 6 de fevereiro de 2020. Dispõe sobre as medidas para enfrentamento da emergência de saúde pública de importância internacional decorrente do coronavírus responsável pelo surto de 2019, Diário Oficial da União. 06 fev 2020.
7. WHO. Coronavirus disease (COVID-19): Situation Reports. 2020b [acesso em 02 mai 2020]. Disponível em <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/situation-reports>
8. FIALHO, FB. Interpretação da curva de crescimento de Gompertz. *Embrapa Suínos e Aves*. Set;237(1): 1-4.
9. REED, MC. *Abstract non linear wave equations*. Berlim: Springer; 2006. 132p.
10. MEYERS, LA. et al. Network theory and SARS: predicting outbreak diversity. *Journal of theoretical biology*. Jan;232(1): 71-81.
11. CHEN, SC; CHANG, CF; LIAO CM. Predictive models of control strategies involved in containing indoor airborne infections. *Indoor Air*. Mar;16(6): 469-481.
12. TORAL, FLB. Número e intervalo de pesagens para estimação de parâmetros de curvas de crescimento em bovinos. *Revista Brasileira de Zootecnia*. Dez;37(12): 2120-2128.
13. CRUZ, GRD; COSTA, RG; RIBEIRO, MN. Curva de crescimento de caprinos mestiços no estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*. Jan;4(2): 204-210.

14. CABRAL, RBG. et al. 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. Abr;3(2): 2914-2931.