

# A dinâmica da Covid-19 no Brasil: demografia, número básico de reprodução e taxas de atenuação e de distanciamento social para extinção

Renato H.L. Pedrosa

08/05/2020

Departamento de Política Científica e Tecnológica  
Instituto de Geociências  
Universidade Estadual de Campinas  
[pedrosa@unicamp.br](mailto:pedrosa@unicamp.br)

Esta nota apresenta estimativas relacionadas à dinâmica de crescimento da Covid-19 nas capitais brasileiras e nas principais cidades do estado de São Paulo, seguindo modelos desenvolvidos em (1). Os modelos permitem estimar quanto seria a taxa inicial de crescimento de casos da Covid-19, que denominamos taxa de crescimento livre da doença, na ausência de medidas, formais ou informais, de distanciamento social e de práticas individuais, como de higiene, uso de máscaras e outras. O estudo levou em conta variáveis climáticas, temperatura e umidade absoluta, a linha do tempo da instalação da doença (data em que país/região atingiu o 100º caso) e densidade populacional<sup>1</sup>. Foram analisados os dados dos 50 estados dos EUA e de 110 países, incluindo o Brasil, com dados suficientes para o cálculo da taxa inicial de expansão da doença, até 10 de abril de 2020. Os resultados apresentados permitem estimar faixas de isolamento social necessárias para controlar a doença, em função da densidade populacional das cidades.

Para ajudar na compreensão das discussões e dos dados apresentados no texto, incluímos as definições relevantes.

*Taxa exponencial diária de crescimento:* uma doença infecciosa contagiosa, em livre curso, apresenta uma curva de evolução de casos que segue a função exponencial, na forma

$$N = N_0 * e^{k*t}, \quad (\text{Eq. 1})$$

onde  $N_0$  é o número de casos no primeiro dia considerado,  $k$  é a taxa exponencial diária de crescimento e  $t$  é o tempo, no caso, o dia em que se calcula  $N$ . O dia inicial corresponde a  $t = 0$ , em seguida os dias são enumerados: 1, 2, 3, ... .<sup>2</sup>

*Número básico de reprodução –  $R_0$ :* é o número médio de pessoas para quem uma pessoa infectada e contagiosa transmite a doença, no período em que está em estado contagioso e não está hospitalizada. Depende de forma quadrática de  $k$  (ref. 2) com coeficientes dados pelas características da doença, determinados empiricamente (ref. 3).

*Atenuação da reprodução para extinção da doença:* de quanto é necessário reduzir o número básico de reprodução para que se obtenha  $R_0$  abaixo de 1,0, quando o número de casos irá se reduzir ao longo do tempo e se extinguir (dado por  $[1-1/R_0] * 100$ , em %).

---

<sup>1</sup> Nos modelos desenvolvidos, utiliza-se o valor do logaritmo natural da densidade populacional, como é prática usual no emprego dessa variável em estudos em outras áreas das ciências da saúde, nas ciências econômicas e demais ciências sociais.

<sup>2</sup> Para a estimativa de crescimento inicial, tanto para países (incluindo o Brasil), como para os estados dos EUA, o valor de  $k$  no estudo (ref. 1) foi estimado pela melhor curva exponencial ajustada (via regressão log-linear) à curva real de casos, para os 10 dias iniciados quando se atingiu o 100º caso.

Sobre esse último conceito, é importante observar que ele não coincide com a taxa de distanciamento social requerida para extinguir a doença, pois há fatores que atenuam o contágio e que não são relacionados com distanciamento social, como práticas de higiene pessoal, não colocar as mãos nos olhos, na boca ou no nariz, usar máscaras e outras. O fator mais importante para se atingir o nível de atenuação expresso nas tabelas abaixo é o do distanciamento social, mas trataremos do efeito do uso de máscaras na discussão sobre os dados e nas estimativas da taxa de isolamento necessária para extinção da doença.

Antes de apresentar os resultados do estudo e como o modelo se aplica ao caso das cidades brasileiras, é importante observar que o mesmo pode sofrer de limitações na sua aplicabilidade ao caso brasileiro, pois há diferenças entre os modelos urbanos dos dois países, principalmente nas cidades médias e pequenas, assim como nas práticas de convívio social. No entanto, os valores das taxas iniciais de crescimento da Covid-19 do Brasil e dos Estados Unidos, medidas empiricamente (valor de  $k$ , ver definição acima), são muito próximas: 0,291 para os Estados Unidos e 0,307 para o Brasil. As taxas para as maiores cidades dos EUA e do Brasil também são semelhantes. Portanto, mesmo que possa haver diferenças, e a pesquisa em curso para o caso dos estados brasileiros verificará se são necessários ajustes, cremos que as estimativas a serem apresentadas estão próximas dos valores que se seguirão a uma análise completa do caso brasileiro. Dada a urgência do tema, já que está em pauta o relaxamento das políticas de distanciamento social no país, assim como em todos os países, decidimos colocar os números resultantes da aplicação dos modelos já desenvolvidos ao caso das cidades brasileiras para conhecimento público.

Os principais resultados do estudo (ref. 1) são:

1. Nos modelos em que são incluídas as variáveis de densidade populacional e/ou da linha do tempo, as que correspondem ao clima, temperatura e umidade absoluta, perdem relevância estatística para determinar a taxa inicial de crescimento da doença.
2. Os únicos modelos multivariados com todas as variáveis estatisticamente significativas são os que envolveram apenas as variáveis de densidade populacional e da linha do tempo (data em que região atingiu o 100º caso).
3. Mesmo considerando as variáveis climáticas isoladamente, os resultados são conflitantes: no caso dos modelos para o grupo dos 110 países, quanto maiores os valores de temperatura ou de umidade relativa, menores as taxas diárias de crescimento no número de casos; no caso do grupo dos estados dos EUA, deu-se o inverso: quanto mais altos os valores das variáveis climáticas, maiores também as taxas diárias de crescimento dos casos de Covid-19.

Esses resultados já mostram que não se pode assumir que o clima teria influência significativa no desenvolvimento da doença, mas os modelos envolvendo as demais variáveis, discutidos a seguir, mostram que, de fato, as variáveis climáticas são irrelevantes para os níveis de contágio da pandemia.

4. Quanto mais cedo ocorreu o 100º caso da doença, maior a taxa inicial de crescimento da doença, calculada para os 10 dias iniciados quando o 100º caso foi atingido. Esse efeito foi descontado para a estimativa da taxa livre, que é apresentada nas tabelas. O ponto é que essa variável pode ser vista como aquela que carrega o efeito das medidas crescentes de isolamento social e outras que reduzem a taxa de reprodução da Covid-19.

5. Quanto maior a densidade demográfica dos condados mais relevantes para a expansão nos estados dos EUA, maior a taxa diária inicial de crescimento do número de casos.
6. Após o desconto do efeito da linha do tempo, ajustando-se o valor da taxa de crescimento diário, que passa a ser livre do efeito das medidas crescentes de isolamento social e outras, ainda permanece o efeito da densidade populacional. Esse efeito foi utilizado para se estimarem as taxas de crescimento diário nas tabelas a seguir, a partir da densidade populacional, para as cidades brasileiras.

Tendo em vista o apresentado acima, os argumentos que são levantados para tratar o caso brasileiro como diferente daqueles de países da Europa ou de outros do hemisfério norte, em função de diferenças climáticas, não são válidos. Os números a serem apresentados indicam que as diversas regiões e estados do Brasil, incluindo São Paulo, não estão nem perto de atingirem os níveis necessários de distanciamento social para que a doença passe a regredir, ou mesmo para manter níveis razoáveis de crescimento que evitem o colapso dos sistemas de saúde.

A Tabela 1 apresenta os dados e estimativas para as capitais das unidades federadas. Observa-se que as taxas de atenuação da infecção requeridas estão sempre acima de 75%, e atingem 84% para as cidades de maior densidade populacional. A última coluna mostra como números de reprodução relativamente próximos afetam de forma significativa o número de casos após 30 dias. Se para Porto Velho estima-se que haveria 3,1 mil casos, para Fortaleza e São Paulo esse número chegaria a 180 mil casos. Nesta estimativa, não foi levado em conta o número de habitantes das cidades, assumindo-se que não há queda na taxa de reprodução em função de falta de pessoas que possam ser infectadas.

Um ponto importante do estudo é que os valores para o número básico de reprodução da Covid-19 que foram estimados e estão nas tabelas abaixo estão em acordo com os valores encontrados pelos estudos sobre o início da doença na China que utilizaram os períodos de maior expansão, entre 12 e 23 de janeiro, antes das medidas de *lockdown* estabelecidas em Wuhan (ref. 4). Ali foi estimado um valor central de 5,7, com intervalo entre 4,7 e 6,6. Apenas para as capitais com baixa densidade populacional, certamente muito abaixo do que ocorre em Wuhan, o valor de  $R_0$  está abaixo do limite inferior de 4,7, como estimado naquele trabalho. Nós não utilizamos nenhuma das estimativas de parâmetros para a doença, para calcular o valor de  $R_0$  a partir de  $k$ , desenvolvidas por aquele estudo, mas as desenvolvidas por estudo publicado anteriormente (ref. 3). Portanto, a concordância não se deve à utilização dos mesmos parâmetros fundamentais.

Do estudo (ref. 1), o valor de  $k$  para o Brasil, calculado diretamente da curva de crescimento (Eq. 1) nos primeiros 10 dias a partir da data quando o Brasil atingiu 100 casos (15/03<sup>3</sup>), foi de 0,307. Ajustando-se esse valor pela estimativa do efeito da data inicial, seguindo o modelo da Tabela 2 da ref. 1, o valor passa a 0,419, que está muito próximo dos valores para as principais cidades na Tabela 1 acima, São Paulo, Rio de Janeiro, Fortaleza, Recife e Belo Horizonte, cujos estados responderam por cerca de 70% dos casos iniciais para o Brasil. Observe-se que a estimativa para o Brasil se origina dos dados empíricos ajustados pela data do 100º caso. Os dados para as cidades, do modelo que prevê o valor de  $k$  em função da densidade populacional, construído a partir da análise dos estados dos EUA. Portanto, de fontes independentes de dados, através de diferentes modelos, o que ajuda na validação das estimativas.

---

<sup>3</sup> Os dados coletados do European Centre for Disease Control (ECDC), utilizados no estudo (ref. 1), são defasados de um dia após o informe do Ministério da Saúde, que registrou o 100º caso no Brasil no dia 14/3.

Tabela 1 – Densidade populacional, taxa exponencial diária de crescimento livre da Covid-19, número básico de reprodução, atenuação necessária para extinção da doença, número de dias para dobrar o número de casos e casos após 30 dias, sem restrição populacional. Capitais das unidades federadas, Brasil. Fontes: Refs. 1, 2, 3 e IBGE (Censo 2010).

Município	Densidade populacional (hab/km <sup>2</sup> )	Taxa exponencial diária livre ( $k$ )	Número básico de reprodução ( $R_0$ )	Atenuação da reprodução para extinção (%)	Dias para dobrar número de casos	Casos após 30 dias (t=0: 1 caso)
Fortaleza	7.786	0,404	5,98	84	1,72	182.623
São Paulo	7.398	0,403	5,96	84	1,72	176.769
Belo Horizonte	7.167	0,402	5,95	84	1,72	173.231
Recife	7.040	0,402	5,94	84	1,73	171.268
Rio de Janeiro	5.267	0,396	5,84	83	1,75	142.354
Natal	4.805	0,394	5,80	83	1,76	134.264
Curitiba	4.027	0,390	5,74	83	1,78	119.969
Salvador	3.859	0,389	5,73	83	1,78	116.755
Guarulhos	3.835	0,389	5,72	83	1,78	116.292
João Pessoa	3.421	0,386	5,68	83	1,79	108.126
Vitória	3.338	0,386	5,67	83	1,80	106.447
Aracaju	3.140	0,385	5,65	83	1,80	102.378
Porto Alegre	2.838	0,382	5,62	83	1,81	95.988
Maceió	1.854	0,373	5,47	82	1,86	73.177
Goiânia	1.777	0,372	5,45	82	1,86	71.225
Belém	1.315	0,366	5,35	82	1,89	58.789
São Luís	1.216	0,364	5,32	82	1,90	55.929
Florianópolis	624	0,350	5,09	81	1,98	36.557
Teresina	585	0,349	5,07	81	1,99	35.084
Brasília	444	0,343	4,98	80	2,02	29.429
Manaus	158	0,321	4,64	79	2,16	15.233
Cuiabá	158	0,321	4,64	79	2,16	15.233
Palmas	103	0,312	4,50	78	2,22	11.598
Campo Grande	97	0,311	4,48	78	2,23	11.162
Macapá	62	0,301	4,34	77	2,30	8.392
Boa Vista	50	0,297	4,28	77	2,34	7.317
Rio Branco	38	0,291	4,19	77	2,38	6.143
Porto Velho	13	0,268	3,87	75	2,59	3.101

A atenuação da infecção para o Brasil como um todo, para extinguir a doença, a partir de  $k=0,419$ , seria de 84%, o mesmo valor que para Fortaleza, São Paulo, Belo Horizonte e Recife, e apenas 1pp acima do valor para o Rio de Janeiro (83%). Para estimar de forma mais realista o quanto de isolamento social é necessário para a extinção da doença, é preciso considerar o efeito de outras medidas, além do isolamento propriamente. A principal medida a ser incluída é a de uso obrigatório de máscaras. A estimativa para o efeito do uso de máscaras varia entre redução de 1/3 a 50% da transmissão da Covid-19 (ref. 5). Portanto, de 84%, caso o uso de máscaras fosse generalizado, passamos a taxas de isolamento entre 68% e 76%, que seriam necessárias para a extinção da doença, para aquelas cidades, por conseguinte para todas as demais capitais, já que seus valores de  $R_0$  são menores. Para Brasília, por exemplo, com taxa original de atenuação de 80%, o intervalo de isolamento social requerido, com uso generalizado de máscaras, seria de 60% a 70%. Como sempre, essas estimativas devem ser confrontadas com os valores verificados em campo, caso sejam utilizadas para fins práticos. De qualquer modo, essas estimativas estão bem acima do que vem sendo praticado no país, até o momento. Alguns locais estão iniciando processos de *lockdown*, como São Luís no Maranhão, o que conduziria rapidamente, caso de fato

colocado em prática, à extinção da doença, como ocorreu em Wuhan, na China, pois significa levar  $R_0$  a praticamente zero.

Para as 20 cidades mais populosas do estado de São Paulo, excetuando-se a capital, os dados da Tabela 2 indicam que algumas poderiam ter crescimento livre do número de casos da Covid-19 mais rápido do que o da capital, como Diadema, Carapicuíba e Osasco, todas na região metropolitana de São Paulo. Os dados também mostram que, após 30 dias, essas três cidades poderiam chegar a mais de 200 mil casos da Covid-19, caso nenhuma medida de redução no número de reprodução fosse empregada. Ainda assim, as estimativas feitas acima de isolamento necessário para a extinção da doença (68%-75%) continuariam válidas, pois o maior valor de atenuação geral continuaria sendo de 84%.

Tabela 2 – Densidade populacional, taxa exponencial diária de crescimento livre da Covid-19, número básico de reprodução, atenuação necessária para extinção da doença, número de dias para dobrar o número de casos e casos após 30 dias, sem restrição populacional. 20 cidades mais populosas de São Paulo. Fontes: Refs. 1, 2, 3 e IBGE (Censo 2010).

Município	Densidade populacional (hab/km <sup>2</sup> )	Taxa exponencial diária livre ( $k$ )	Número básico de reprodução ( $R_0$ )	Atenuação da reprodução para extinção (%)	Dias para dobrar número de casos	Casos após 30 dias (t=0: 1 caso)
Diadema	12.537	0,414	6,15	84	1,67	247.401
Carapicuíba	10.698	0,411	6,10	84	1,69	223.613
Osasco	10.265	0,410	6,08	84	1,69	217.802
Mauá	6.741	0,401	5,93	83	1,73	166.596
Itaquaquecetuba	3.895	0,389	5,73	83	1,78	117.448
Santo André	3.848	0,389	5,73	83	1,78	116.543
Guarulhos	3.835	0,389	5,72	83	1,78	116.292
S. Vicente	2.248	0,377	5,53	82	1,84	82.739
S. Bernardo do Campo	1.869	0,374	5,47	82	1,86	73.554
Campinas	1.359	0,367	5,36	82	1,89	60.036
Sorocaba	1.304	0,366	5,35	82	1,89	58.475
S. José do Rio Preto	945	0,359	5,23	81	1,93	47.626
Ribeirão Preto	929	0,359	5,23	81	1,93	47.111
Jundiaí	858	0,357	5,20	81	1,94	44.783
S. José dos Campos	573	0,348	5,06	81	1,99	34.624
Mogi das Cruzes	544	0,347	5,05	81	2,00	33.496
Franca	526	0,347	5,04	81	2,00	32.786
Franca	526	0,347	5,04	81	2,00	32.786
Bauru	515	0,346	5,03	81	2,00	32.347
Piracicaba	264	0,332	4,81	80	2,09	21.129

Como referência empírica sobre como atingir um valor de  $R_0$  abaixo de 1,0, quando a doença passa a apresentar tendência declinante no número de novos casos e acaba por se extinguir, observamos que, no caso do Reino Unido, que teve uma das taxas mais altas de crescimento nos últimos 45 dias, atingindo mais de 200 mil casos e 30 mil mortes em 07/maio, foi necessário chegar a 82% de taxa de isolamento para atingir e manter  $R_0$  abaixo de 1,0, o que vem ocorrendo em todas as regiões do país (ref. 6). Como observamos acima, além do distanciamento social, há outras medidas, de caráter individual, que contribuem para reduzir a taxa de contágio. Portanto, a atenuação total da taxa de reprodução no Reino Unido está acima dos 82% informados, que seriam consequência apenas da redução de mobilidade das pessoas. Na mesma apresentação onde foi informado o nível de isolamento da população, foram apresentados os critérios que devem ser

satisfeitos para serem implementadas medidas de relaxamento das políticas atuais de distanciamento social no país:

1. *O Sistema Nacional de Saúde do Reino Unido ter capacidade para prover cuidado intensivo e tratamento especializado em todo o território do país.*
2. *Uma queda sustentada e consistente no número diário de mortes por Covid-19.*
3. *Dados confiáveis que mostrem que a taxa de infecções está caindo a níveis administráveis em todo o país.*
4. *Níveis de testes e de equipamentos de proteção individual suficientes para o presente e demanda futura.*
5. *Confiança de que qualquer ajuste nas medidas correntes não apresenta o risco de causar uma segunda onda de infecções que possa superar a capacidade do Sistema Nacional de Saúde.*

O Ministro das Relações Exteriores, representando o Primeiro Ministro Boris Johnson, foi categórico: *o Reino Unido não adotará nenhuma medida que contrarie as recomendações que a ciência propõe para a luta contra a pandemia de Covid-19.* E insistiu em explicar o que significa o número de reprodução e porque ele deve ficar abaixo de 1,0.

Os dados apresentados nessa nota podem ajudar o Brasil, São Paulo e demais estados a repensarem as atuais políticas de distanciamento social, que não estão sendo suficientes para conter o desenvolvimento da pandemia. O Brasil pode estar se tornando o país que será o epicentro da doença no mundo, destoando da maioria dos países, da Europa e da Ásia, que já estão na fase de redução do número de casos e mortes diárias, ou seja, com valores de  $R_0$  abaixo de 1,0. O mesmo está ocorrendo nos Estados Unidos, que também vêm adotando medidas de relaxamento nas medidas de contenção, mesmo com os casos aumentando em vários dos estados daquele país. Apenas Nova Iorque, uma exceção, vem conseguindo diminuir o número de casos diariamente. No Brasil, São Paulo vinha sendo uma exceção, com medidas bastante duras de isolamento. Mesmo assim, nunca se conseguiu uma taxa de isolamento de 70% que, pelo que vimos acima, está próximo do limite inferior dos valores estimados para conter a doença (68%-76%), em São Paulo e nas cidades mais densamente povoadas do estado.

Uma observação final: os valores das estimativas apresentados nas tabelas acima correspondem aos valores centrais estimados no artigo original (ref. 1). Ali são apresentadas as margens de erro para as estimativas. Consideramos que qualquer uso dos dados para fins de políticas relacionadas ao controle da Covid-19 deve colecionar dados confiáveis, como propõe o governo britânico, que informem como as medidas estão impactando a evolução da infecção, e comparar com as previsões de modelos, como o nosso, que sempre envolvem incertezas estatísticas. No entanto, a estimativa de isolamento social aqui apresentadas para a extinção da Covid-19 indicam que os principais cidades brasileiras e precisariam tomar medidas bastante mais restritivas das que as atuais para controlar a disseminação da doença.

## Referências

1. Pedrosa, RHL (2020). The dynamics of Covid-19: weather, demographics and infection timeline. medXiv, doi: <https://doi.org/10.1101/2020.04.21.20074450>
2. Lipsitch, M, T Cohen, B Cooper, JM Robins, S Ma, L James, et al. Transmission Dynamics and Control of Severe Acute Respiratory Syndrome, Science (20 Jun 2003): Vol. 300, Issue 5627, pp. 1966-1970, DOI: 10.1126/science.1086616  
<https://science.sciencemag.org/content/300/5627/1966>

3. Li, Q, M Med, X Guan, P Wu, X Wang, L Zhou et al. Early transmission dynamics in Wuhan, China, of novel coronavirus-infected pneumonia. *N Engl J Med* 2020, 382:1199-1207, DOI: 10.1056/NEJMoa2001316
4. Sanche, S, YT Lin, C Xu, E Romero-Severson, N Hengartner, R Ke (2020). High contagiousness and rapid spread of severe acute respiratory syndrome coronavirus 2. *Emerg Infect Dis*, 2020/July. <https://doi.org/10.3201/eid2607.200282>
5. Eikenberry SE, M Mancuso, E Iboi, T Phan, K Eikenberry, Y Kuang, E Kostelich, AB Gumel. To mask or not to mask: Modeling the potential for face mask use by the general public to curtail the COVID-19 pandemic. <https://arxiv.org/pdf/2004.03251.pdf>
6. [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/883988/2020-05-07\\_COVID-19\\_Press\\_Conference\\_Slides.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/883988/2020-05-07_COVID-19_Press_Conference_Slides.pdf)