

# Modelagem do Covid-19 no Estado de Nova York

Pedro Castilho Dall

Setembro 2020

## 1 Introdução

### 1.1 Covid em Nova York

O primeiro caso de COVID-19 no estado de Nova York foi confirmado em primeiro de Março de 2020, logo em seguida o estado se tornou epicentro da pandemia global. Pouco mais de 1 mês depois do primeiro caso, Nova York possuía mais casos confirmados que qualquer outro país no mundo, com exceção dos Estados Unidos. Ao final de setembro o estado reportou um total de 10 milhões de testes com 450,473 casos positivos e 25,428 mortes. [3]

Mesmo tendo sido o estado americano mais atingido no começo da pandemia, em 17 de Junho o governador Andrew Cuomo anunciou que a taxa de infecção deles era a menor dentro do país. [3]

### 1.2 Linha do Tempo

Apos o primeiro caso confirmado, o Prefeito da cidade de NY tentou ignorar o vírus, encorajando os cidadãos a manterem suas rotinas usuais. Na semana seguinte, 7 de Março, o Governador anunciou estado de alerta para todo o estado. Mesmo assim, três dias depois, 10 de Março, o prefeito manteve um tom de despreocupação com o vírus afirmando que era basicamente uma gripe comum.

As divergências entre o Governador e o Prefeito, somadas à falta de preparo e à complexidade da rede de pessoas, principalmente da cidade de Nova York, fez com que o vírus se espalhasse com uma velocidade altíssima.

15 de março com 942 casos confirmados, 45% superior ao dia anterior, o Estado anuncia o fechamento das escolas. Ao final do mês o numero de casos confirmados pulou para 83,000. Neste momento o sistema de saúde começou a entrar em colapso, um dos médicos no hospital Elmhurst Hospital Center em Queens relatou a situação como "apocalíptica". [2]

Ao final de Abril o numero de casos confirmados era superior ao de 300,000 com pouco menos de 25,000 mortes. Porém neste momento a pandemia já começava a ser controlada com cerca de 1% de aumento diário de casos. [8]

Nos meses seguintes planos de reabertura foram introduzidos e tem gerado um controle bom epidemia, diferente de muitos outros estados e países, NY não foi vitima de uma segunda onda ate o momento. [4]

## 2 Artigos Relevantes

### 2.1 Dinâmica de hospitalização em Nova York

Nesse artigo, pesquisadores mostraram a eficácia do modelo SIR para estimar o número de camas ocupadas em várias cidades incluindo Nova York. A modelagem das camas ocupadas também é bem simples e é dada pela seguinte equação [6] :

$$\frac{dP(t)}{dt} = \alpha\gamma(t - \tau) - P(t)/t_H$$

Onde  $\gamma$  é dado por  $\frac{1}{t_R} - \beta$ , o primeiro termo sendo o inverso do período de recuperação e o segundo a taxa de transmissão, e  $t_H$  é o tempo médio de ocupação dos leitos.

Mesmo com um modelo muito simples os pesquisadores conseguiram encaixar parâmetros com uma alta correlação com os dados reais. um resultado interessante é que o tempo de hospitalização na cidade de NY era notavelmente menor que a maioria das cidades testadas.

### 2.2 Utilizando a mobilidade urbana em Nova York em modelos

O segundo artigo que exploramos critica a simplicidade dos modelos usuais de compartimentos por considerar a população homogênea e por não incluir os efeitos da mobilidade urbana. [7]

Os autores afirmam que a deficiência desses modelos poderiam ser resolvidas usando um modelo epidemiológico em grafos. Contudo outro problema surge com isso, a reconstrução de uma rede do tamanho de uma cidade é inviável, muito mais sua rede temporal. Além de outros problemas como a dificuldade de escalar essa classe de modelo.

O artigo propõe uma versão estendida do SEIR para incluir mobilidade urbana, neste modelo consideramos várias subpopulações dentro da população original. Cada uma dessas subpopulações é residente de uma zona da cidade e visitante de outra zona, cada uma das subpopulações podem ser encontradas de 4 formas, em suas próprias zonas, em atividades em outras zonas, em trânsito ou em trânsito de volta para suas zonas.

Com essas definições os compartimentos de suscetíveis, expostos, infectados e recuperados ganham muito mais estrutura. O artigo explorou esse novo modelo na cidade de NY com dados sobre a mobilidade urbana e apontou que o contágio total durante a viagem pode ser responsável por 28,8% do total de casos em NYC em 26 de março de 2020.

### 2.3 Levando em conta diferentes faixas etárias

O terceiro artigo apresenta outra variação do modelo SEIR, em particular o K-SEIR, onde o modelo tradicional é subdividido em K grupos. Os autores do artigo queriam investigar o efeito de quarentenas parciais dependendo da faixa etária. Eles também incluíram número de camas disponíveis em hospitais e CTIs. [5]

A ideia básica por trás é utilizar as mesmas equações do modelo SEIR porém em K grupos distintos e depois utilizar uma matriz de mistura para modelar a quantidade e taxa de interações entre diferentes faixas etárias.

Os autores afirmam que em país com um sistema de saúde desenvolvido quarentenas por faixa etária possuem uma eficácia 3 vezes maior no quesito salvar vidas e poupar recursos se comparado à quarentena total adotada em muitos países.

## 3 Metodologia

### 3.1 Modelagem

Para modelar a epidemia da COVID-19 no Estado de Nova York utilizaremos um modelo compartimentado da forma SEIR com modificações. Para tentar aproxima-lo o máximo da realidade incluiremos nele testagem, quarentenados e infectados assintomáticos. [1]

Compartimento	Descrição
S	Suscetíveis
E	Expostos
I	Infectados
A	Assintomáticos
Q	Quarentenados
R	Recuperados
D	Falecidos

Também incluiremos o distanciamento social no modelo, desta forma para cada um dos compartimentos acima, com exceção de R, Q e D, teremos um compartimento dual, o qual sera denotado com o subscrito "i" e seguira as mesmas regras que os compartimentos anteriores mas com um fator que diminui a intensidade do espalhamento da doença. uma porcentagem P da população ficara em isolamento social enquanto o restante estará sujeita à taxa de transmissão normal.[1]

Temos duas classes de parâmetros no modelo, constantes e parâmetros variáveis no tempo. As constantes costumam depender principalmente das características do patógeno e podemos assumir que, pelo menos no curto prazo, elas se mantêm constantes. A segunda classe de parâmetros são as que variam com o tempo, elas costumam de depender de medidas publicas e conhecimentos dos médicos. Por exemplo a a atual taxa de mortalidade do vírus é muito menor hoje comparada com o começo da pandemia. [1]

Parâmetros	Descrição
$\tau$	inverso do período de latência
$\sigma$	inverso do período da infecção ate os sintomas
$\alpha$	proporção de assintomáticos
$\gamma_1$	taxa de recuperação dos assintomáticos
$\gamma_2$	taxa de recuperação dos que contrariam uma forma mais grave
$\mu(x)$	taxa de mortalidade
$\varrho(x)$	probabilidade do teste dar positivo para indivíduos expostos
$\beta(x)$	taxa de transmissão
$r(x)$	fator de redução da taxa de transmissão
$\rho(x)$	taxa de testes
$p(x)$	proporção da população em isolamento social

O modelo segue o seguinte comportamento[1]:

$$\begin{aligned}\frac{dE}{dx} &= \beta(x)S(I + A + r(x)(I_i + A_i)) - \rho(x)\varrho E - \tau E \\ \frac{dE_i}{dx} &= \beta(x)S(I + A + r(x)(I_i + A_i)) - \rho(x)\varrho E_i - \tau E_i \\ \frac{dI}{dx} &= \tau E - \sigma I - \rho(x)I\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{dI_i}{dx} &= \tau E_i - \sigma I_i - \rho(x) I_i \\
\frac{dA_i}{dx} &= \alpha \sigma I_i - \rho(x) A_i - \gamma_1 A_i \\
\frac{dA}{dx} &= \alpha \sigma I - \rho(x) A - \gamma_1 A \\
\frac{dQ}{dx} &= \sigma(1 - \alpha)(I + I_i) + \rho(x)(\varrho(E + E_i) + I + I_i + A + A_i) - \gamma_2 Q - \mu Q \\
\frac{dS}{dx} &= -\beta(x)S(I + A + r(x)(I_i + A_i)) \\
\frac{dS_i}{dx} &= -r(x)\beta(x)S_i(I + A + r(x)(I_i + A_i)) \\
\frac{dR}{dx} &= \gamma_i(A + A_i) + \gamma_2 Q \\
\frac{dD}{dx} &= \mu(x)Q
\end{aligned}$$

### 3.2 número básico de reprodução

Para cada modelo existe uma equação que descreve seu  $R_0$ , o número básico de reprodução, um indicio de o qual infecciosa uma doença é. Existem muitas interpretações para esse parâmetro, uma forma de entender ele é como o número infecções secundárias dado que toda a população começa suscetível.[1]

Abaixo temos a formula do  $R_0$  para o modelo apresentado:

$$\begin{aligned}
R_0 &= \frac{1}{2}(\phi + \sqrt{\phi^2 + \frac{4\sigma\alpha}{\rho + \gamma_1}\phi}) \\
\phi &= \frac{\beta\tau(1 - (1 - r^2)p)}{(p\varrho + \tau)(\sigma + \rho)}
\end{aligned}$$

### 3.3 Analise dimensional

Utilizaremos analise dimensional para confirmar que as interpretações de cada um dos parâmetros descritos acima. Sabemos que todas os compartimentos representam populações, com isso dados a seguinte unidade para cada compartimento:

$$[S] = [E] = [I] = [R] = [Q] = [A] = [D] = \text{Pessoas}$$

Em analise dimensional podemos tratar derivadas como razões, com isso a dimensão dos diferenciais é:

$$[\frac{dS}{dx}] = [S]/[x] = \text{Pessoas} \cdot T^{-1}$$

Utilizando as equações diferenciais da modelagem descobrimos que  $\beta$  tem dimensão  $1/(\text{Pessoas} \cdot T)$ , o que faz sentido pois é uma taxa que depende de da quantidade de pessoas e do tempo que o vírus esta se espalhando.

$$\text{Pessoas} \cdot T^{-1} = [\beta][S][(I + A + r(x)(I_i + A_i))] \Rightarrow \text{Pessoas} \cdot T^{-1} = [\beta](\text{Pessoas})^2 \Rightarrow [\beta] = T^{-1} \cdot (\text{Pessoas})^{-1}$$

Utilizando as equações diferenciais dos infectados descobrimos que:

$$[\tau][E] = [\sigma][I] = [\rho][I] = Pessoas \cdot T^{-1} \Rightarrow [\tau] = [\sigma] = [\rho] = T^{-1}$$

O que também esta de acordo com nossas intuições, o inverso de períodos e taxas que dependem somente do tempo devem possuir essa dimensão de fato. Os outros parâmetros são derivados de maneira análoga.

## References

- [1] M. Soledad Aronna, Roberto Guglielmi, and Lucas M. Moschen. *A model for COVID-19 with isolation, quarantine and testing as control measures*. 2020. arXiv: 2005.07661 [q-bio.PE].
- [2] *COVID-19 Testing*. URL: <https://coronavirus.health.ny.gov/covid-19-testing>.
- [3] Yelena Dzhanova. *New York state now has more coronavirus cases than any country outside the US*. Apr. 2020. URL: <https://www.cnbc.com/2020/04/10/new-york-state-now-has-more-coronavirus-cases-than-any-country-outside-the-us.html>.
- [4] Joseph Goldstein and Jesse Mckinley. *Second Case of Coronavirus in N.Y. Sets Off Search for Others Exposed*. Mar. 2020. URL: <https://www.nytimes.com/2020/03/03/nyregion/coronavirus-new-york-state.html>.
- [5] Semu Kassa, John Boscoh Njagarah, and Yibeltal Terefe. *Analysis of the mitigation strategies for COVID-19: from mathematical modelling perspective*. Apr. 2020. DOI: 10.1101/2020.04.15.20066308.
- [6] Gregory Kozyreff. *Hospitalization dynamics during the first COVID-19 pandemic wave: SIR modelling compared to Belgium, France, Italy, Switzerland and New York City data*. 2020. arXiv: 2007.01411 [q-bio.PE].
- [7] Xinwu Qian and Satish V. Ukkusuri. *Modeling the spread of infectious disease in urban areas with travel contagion*. 2020. arXiv: 2005.04583 [physics.soc-ph].
- [8] Briana Supardi. *Albany County says there are 2 confirmed cases of coronavirus*. Mar. 2020. URL: <https://cbs6albany.com/news/coronavirus/albany-county-says-there-are-2-cases-of-coronavirus>.