

# Análise da evolução de epidemia COVID-19 em Santo Antônio de Pádua e municípios próximos

**\*\* Versão 1.0 \*\***

**Prof. Dr. Tibério Borges Vale<sup>1</sup>**

21 de Maio de 2020

<sup>1</sup>Professor Adjunto do Departamento de Ciências Exatas, Biológicas e da Terra, Instituto do Noroeste Fluminense de Educação Superior, Universidade Federal Fluminense, campus de Santo Antônio de Pádua/RJ.

tiberio\_vale@id.uff.br

## **Resumo**

Neste trabalho faremos uma discussão sobre os dados disponíveis da epidemia de COVID-19 nos municípios de Campos dos Goytacazes/RJ, Itaocara/RJ, Itaperuna/RJ, Miracema/RJ, Pirapetinga/MG, São Fidélis/RJ e Santo Antônio de Pádua/RJ, com o intuito de subsidiar estratégias de controle da epidemia pelas autoridades dos poderes públicos locais. Para tanto, foram analisados os dados publicados nos boletins epidemiológicos, divulgados pelas prefeituras na análise preliminar da evolução dos casos confirmados. Os dados foram utilizados no desenvolvimento de projeções da disseminação da epidemia através de ajustes de curvas exponenciais, com análise do tempo de duplicação dos casos e sua tendência recente, bem como na incidência da doença sobre as populações locais. Além disso, foi realizada uma comparação entre as curvas de crescimento de casos confirmados de COVID-19 entre os municípios analisados. Por fim, é apresentada uma simulação numérica de modelo SEIRD para a distribuição populacional equivalente a cada um dos municípios analisados, afim de se demonstrar a eficácia da adoção de um confinamento obrigatório (*lockdown*) na redução do número de infectados, número de recuperados, número de mortos e outras grandezas relevantes.

Serão desenvolvidas novas versões deste documento, contendo análises de sub-notificação, letalidade e taxa de mortalidade nos dados destes municípios e outros da região do Noroeste Fluminense, com a aplicação de modelos compartimentalizados para análise de evolução epidemiológicas que levem em consideração a distribuição etária da populações. As prefeituras que desejarem que seus municípios sejam incluídos nestas análises, deverão entrar em contato através do e-mail abaixo. Salientamos a necessidade de cautela por parte dos gestores públicos na análise deste documento.

# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Dados dos boletins epidemiológicos dos municípios e ajustes exponenciais</b>	<b>3</b>
2.1	Campos dos Goytacazes . . . . .	5
2.2	Itaocara . . . . .	7
2.3	Itaperuna . . . . .	9
2.4	Miracema . . . . .	11
2.5	Pirapetinga . . . . .	13
2.6	Santo Antônio de Pádua . . . . .	15
2.7	São Fidélis . . . . .	17
2.8	Comentário geral sobre os ajustes exponenciais . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Análise de crescimento de casos confirmados</b>	<b>19</b>
3.1	Tempo de duplicação . . . . .	19
3.2	Tendência de variação no Tempo de duplicação . . . . .	20
<b>4</b>	<b>Análise comparativa entre os municípios</b>	<b>27</b>
4.1	Comparação das curvas exponenciais ajustadas . . . . .	27
4.2	Incidência da COVID-19 na população . . . . .	30
<b>5</b>	<b>Modelo compartimentalizado SEIRD</b>	<b>33</b>
5.1	Apresentação do Modelo SEIRD . . . . .	33
5.2	Teste inicial do modelo SEIRD: o caso de Wuhan (China) . . . . .	35
5.3	Projeção da epidemia sem <i>lockdown</i> . . . . .	38
5.4	Projeção da epidemia com <i>lockdown</i> . . . . .	46
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>54</b>
<b>7</b>	<b>Agradecimentos</b>	<b>55</b>

## 1 Introdução

A COVID-19 tem se mostrado uma doença desafiadora, devido a sintomatologia variada entre os indivíduos acometidos, bem como à preocupação generalizada causada pela pandemia na população. Os gestores públicos muitas vezes enfrentam dificuldade para analisar, tratar e comparar os diferentes dados sobre a disseminação do novo corona vírus SARS-CoV-2 e da COVID-19. Desta forma, elaboramos o presente documento a fim de contribuir para o esclarecimento tanto da população quanto dos gestores do poder público nos municípios do Noroeste Fluminense e municípios circunvizinhos.

Os dados utilizados foram extraídos dos boletins epidemiológicos divulgados pelas prefeituras em suas páginas oficiais na rede social Facebook. Salientamos que os dados oficiais divulgados pelo Painel Coronavírus COVID-19 da Secretaria de Saúde do Estado do Rio de Janeiro, disponíveis em [1], não permitem a comparação direta entre municípios e, via de regra, os dados neste Painel não são tão atualizados como os dados das prefeituras, pois estas os disponibilizam mais rapidamente e em alguns casos também incluem exames realizados na rede particular de atendimento à saúde. Além dos números de casos confirmados e de óbitos, os boletins epidemiológicos de muitas prefeituras trazem dados adicionais (por exemplo: número total de testes realizados, casos suspeitos, casos descartados, internações, entre outros), os quais não estão disponíveis no site do Painel Coronavírus COVID-19 da Secretaria da Saúde do Estado do Rio de Janeiro.

Todos os programas desenvolvidos ou adotados neste trabalho foram escritos na linguagem de programação Python. Disponibilizaremos os respectivos códigos e as novas versões de atualização do presente documento através do site do Instituto do Noroeste Fluminense de Educação Superior - INFES, disponível em [2].

## 2 Dados dos boletins epidemiológicos dos municípios e ajustes exponenciais

A seguir apresentamos na forma de gráficos todos os dados dos municípios analisados, extraídos diretamente dos boletins epidemiológicos divulgados pelas prefeituras de cada município. Nestes boletins, a maioria dos dados são apresentados de forma cumulativa, mas em alguns casos foram apresentados quantitativos diários não cumulativos. Apenas o número de casos confirmados é apresentado cumulativamente em todos os boletins epidemiológicos divulgados pelas prefeituras. A discussão sobre os boletins epidemiológicos será feita ao final desta seção.

Alguns dos dados apresentados nos gráficos não foram divulgados por todas as prefeituras em seus boletins epidemiológicos. A padronização entre os boletins epidemiológicos seria muito útil para facilitar análises e acompanhamento dos dados, sendo esta uma sugestão aos gestores públicos locais, aos moldes dos boletins de Miracema, Itaperuna e Santo Antônio de Pádua. Será de grande utilidade se as prefeituras também disponibilizem os dados progressos dos tipos de dados listados nas imagens nas Figuras 1 a 14, para que possamos incluí-los em nossas análises. **A disponibilização destes dados pode ser acertada com o autor deste trabalho e a melhor forma seria através da disponibilização dos dados dos Sistemas SIVEP GRIPE e e-SUS VE ou de planilhas próprias das secretarias municipais de saúde, sem informar os dados pessoais dos pacientes.** Estes dados são facilmente obtidos se o município analisado tiver uma unidade sentinela de vigilância de síndrome gripal. O acesso a estes dados melhoraria muito a qualidade das análises pois passaríamos a fazer uso

das datas de primeiros sintomas e de efetiva coleta do material de teste sorológico ou SWAP, ao invés de usarmos as datas de divulgação dos resultados. O uso de datas de divulgação de resultados gera imprecisão nos ajustes de curvas exponenciais, nas estimativas de tempo de duplicação e também na análise de modelos computacionais compartimentalizados de evolução epidemiológica, tal como o modelo SEIRD adotado.

Os modelos matemáticos visam antecipar a evolução da doença em diversas localidades e com a pandemia do novo coronavírus, a capacidade de antecipação pode ser crucial para embasar as tomadas de decisão do poder público local. Desta forma, as previsões de um determinado fenômeno, neste caso o avanço da COVID-19 nos municípios do Noroeste Fluminense, podem ser calculadas com o uso de funções matemáticas, para verificar a dinâmica da propagação da doença, através de uma curva exponencial.

As curvas exponenciais são dadas pela expressão funcional  $f(x) = Ae^{Bx}$ , como uma linha tracejada. Na fase inicial da epidemia, podemos ajustar curvas exponenciais à medida que aumentam os números de casos confirmados e demais dados epidemiológicos. Os coeficientes destes ajustes são apresentados na Tabela 1 e foram calculados através do Método de Mínimos Quadrados. Cabe ressaltar que tais ajustes foram realizados a análise da tendência de crescimento e, para tal, foi feita a transformação da variável período em variável período-centralizada (centralizada na data correspondente ao primeiro caso). No entanto, salientamos que não foi aplicado o cálculo de estimativa de modelo de regressão correspondente e assumimos *a priori* que a curva exponencial seria o modelo de regressão adequado. Em trabalhos futuros analisaremos a estimativa de modelo de regressão para avaliar o caso polinomial.

Município	A	B
Campos dos Goytacazes	5.5053	0.079043
Itaocara	6.49008	0.079625
Itaperuna	2.39883	0.070229
Miracema	1.65235	0.070143
Pirapetinga	0.172508	0.096568
Santo Antônio de Pádua	1.96118	0.095635
São Fidélis	8.27996	0.070293

Tabela 1: Coeficientes de ajuste de exponenciais aos quantitativos de casos confirmados dos municípios analisados.

## 2.1 Campos dos Goytacazes

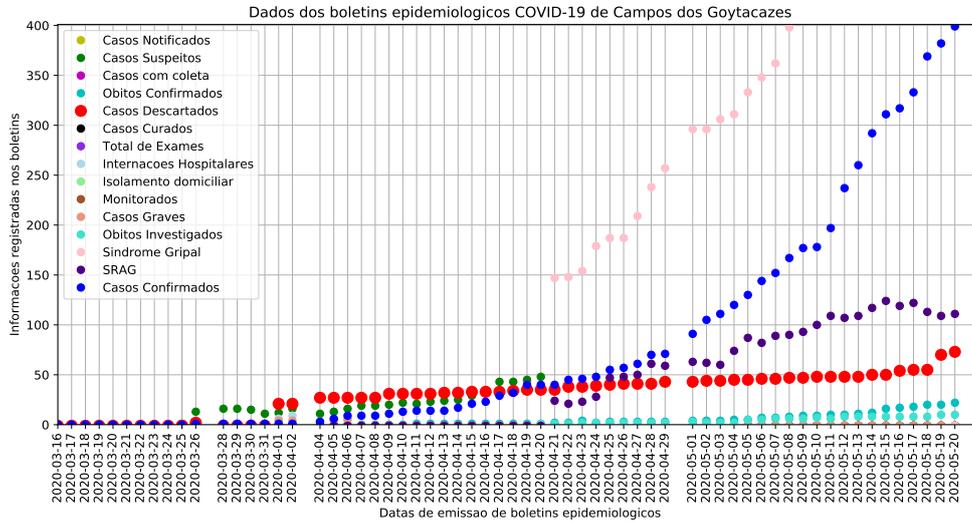


Figura 1: Dados extraídos de boletins epidemiológicos do município de Campos dos Goytacazes.

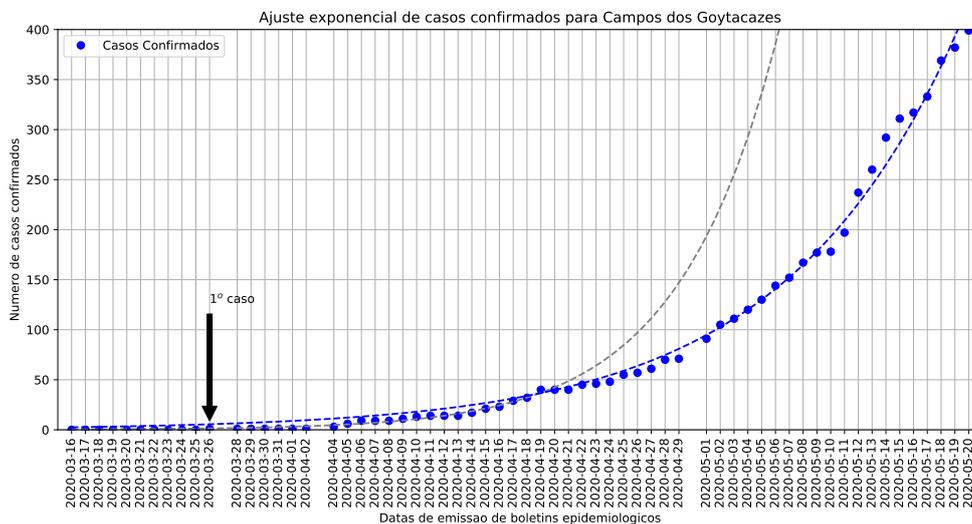


Figura 2: Ajuste de curva exponencial aos casos confirmados de Campos dos Goytacazes.

Podemos ver claramente que até o dia 20/04/2020 o município apresentava uma curva de crescimento exponencial mais acentuada (representada com linha tracejada em cinza). No dia 11/04/2020 ocorreu a primeira morte na cidade. A partir do dia 20/04/2020 o município começa

a apresentar uma nova curva de crescimento exponencial (representada com linha tracejada em azul), a qual consideraremos como representativa do estado atual de evolução epidêmica neste município. Cabe ressaltar que outro evento que coincidentemente ocorreu no mesmo dia 20/04/2020 e que potencialmente pode ter contribuído (não instantaneamente) para a mudança na curva epidêmica foi o fato de neste dia ter sido decretado pelo prefeito o Estado de Calamidade Pública, o que possibilita o reforço no combate à disseminação da COVID-19, tanto para uma mudança de comportamento coletivo quanto para reforçar a atuação do poder público. Portanto, os coeficientes do ajuste exponencial apresentados para este município consideram apenas os dados disponibilizados nos dez primeiros dias de epidemia e os dados após 20/04/2020.

O crescimento gradativo no total de exames realizados indica razoável capacidade de testagem local. O crescimento quase que perfeitamente linear no número de casos descartados desde o início de abril sugere que a testagem pode estar se concentrando desde 18/04/2020 apenas em casos suspeitos e mais graves (momento em que número de casos confirmados ultrapassa os casos descartados). O distanciamento gradual entre o quantitativo de exames realizados e casos descartados sugere queda na sub-notificação, sugerindo que o município realiza bom acompanhamento de pacientes com sintomas leves e graves. No entanto, o crescimento de total de exames realizados é quase linear e não é suficiente para acompanhar a necessidade de testagem. Além disso, o número de casos confirmados é muito superior ao total de casos descartados, indicando princípio de descontrole. Por último o número de óbitos confirmados está em 22. Se assumirmos uma taxa de letalidade em 2% conforme dados recentes podemos supor que o município tenha atualmente cerca de 1100 casos na realidade (apesar de só registrar 399 casos confirmados). Isso indicaria uma sub-notificação de 63%. Se assumirmos uma letalidade de 0,01% então o número de casos reais ficaria em 550, resultando numa taxa de sub-notificação de 20%. Acertadamente o prefeito decretou recentemente o confinamento obrigatório (ou *lockdown*) e por isso devemos observar nas próximas semanas nova alteração na curva de crescimento de casos confirmados com redução dos números observados em relação às projeções iniciais.

## 2.2 Itaocara

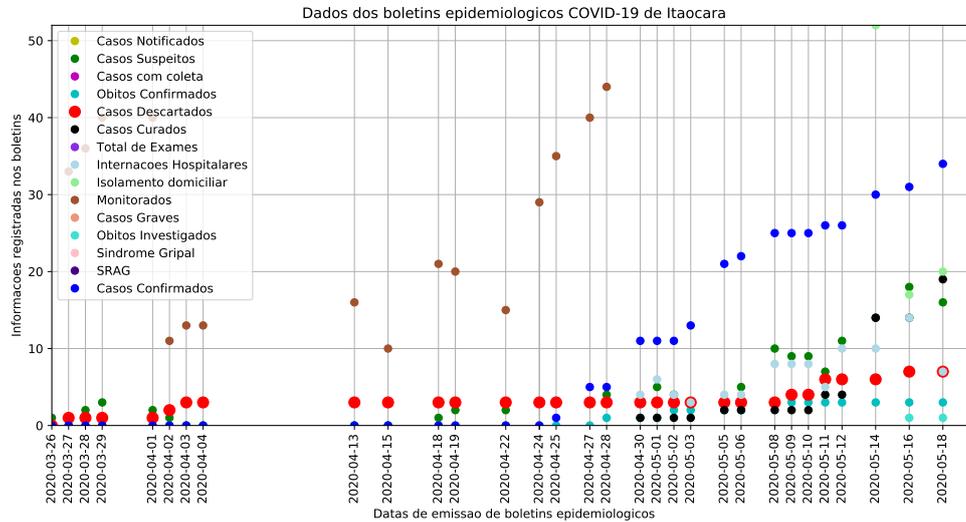


Figura 3: Dados extraídos de boletins epidemiológicos do município de Itaocara.

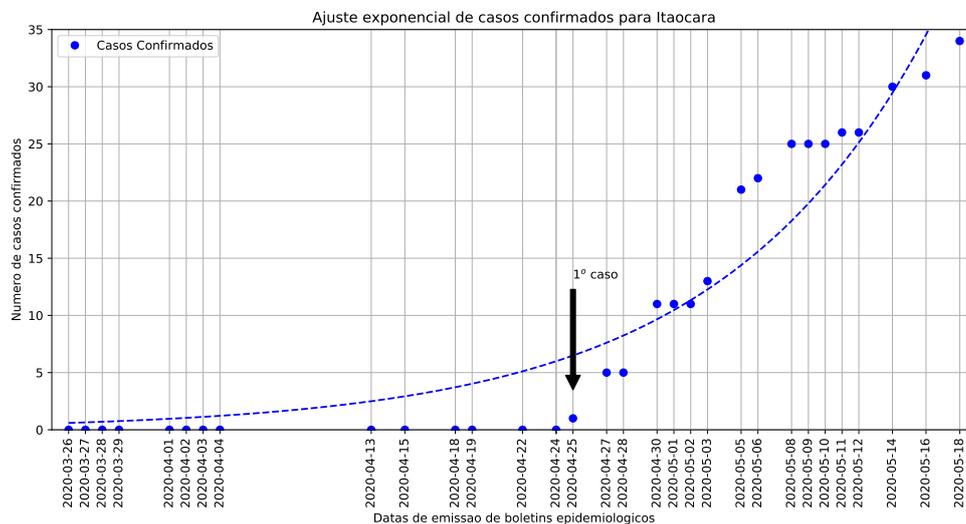


Figura 4: Ajuste de curva exponencial aos casos confirmados de Itaocara.

A prefeitura de Itaocara apresenta dados não cumulativos que não permitem saber ao certo a sua evolução temporal como, por exemplo, o número de casos suspeitos e o número de casos descartados. Se o número de casos suspeitos fosse cumulativo então este número

diminuiria simultaneamente enquanto o número de casos descartados aumentaria. Além disso, se o número de casos descartados fosse cumulativo, haveria um crescimento gradual à medida que se obtém novos resultados de exames. É importante que as prefeituras usem apenas números cumulativos, os quais auxiliam na análise temporal da evolução da epidemia. No entanto, o número de casos confirmados foi a única grandeza registrada cumulativamente pela Prefeitura Municipal de Itaocara.

É possível notar um aumento número de casos suspeitos e de internações hospitalares, mas como são valores muito próximos entre si podemos supor que a sub-notificação encontra-se elevada, sendo registrado apenas os paciente em situação sintomática ou mais grave.

### 2.3 Itaperuna

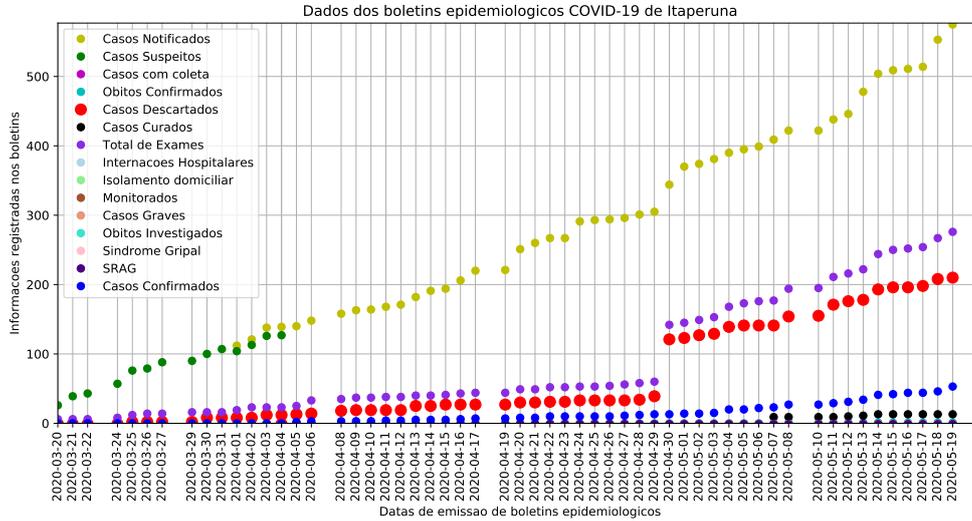


Figura 5: Dados extraídos de boletins epidemiológicos do município de Itaperuna.

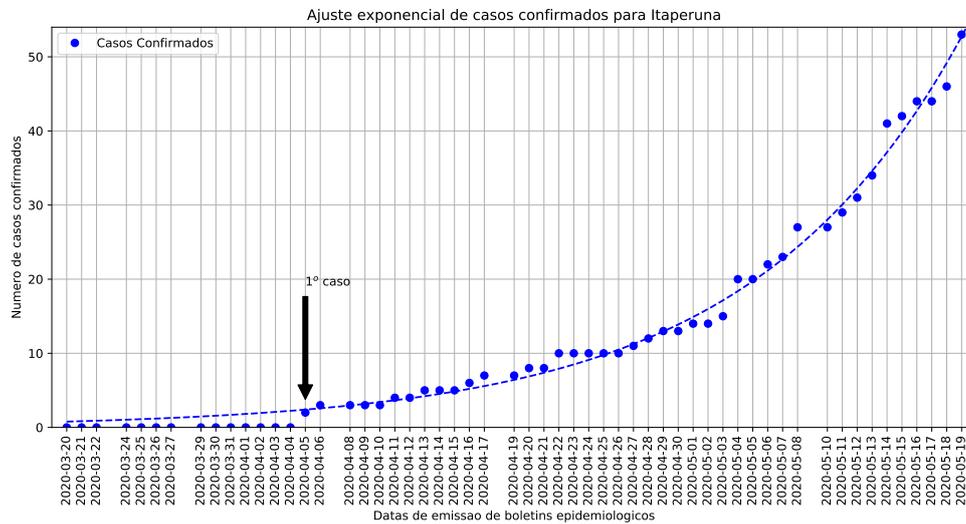


Figura 6: Ajuste de curva exponencial aos casos confirmados de Itaperuna.

A Prefeitura Municipal de Itaperuna segue muito satisfatoriamente o uso de grandezas cumulativas. No início no mês de abril/2020 a prefeitura trocou a nomenclatura inicialmente adotada de casos suspeitos, passando a adotar a designação de casos notificados. Vemos nitidamente que a partir de 30/05/2020 há um salto no número de casos descartados e de casos

notificados, provavelmente relacionados ao aumento de capacidade do Laboratório Central de Saúde Pública Noel Nutels (LACEN-RJ) ocorrido próximo àquela data. Não há meios de se precisar que este salto esteja apenas relacionado à aumento de capacidade do LACEN-RJ, podendo também estar relacionada ao fato de usarmos datas de divulgação de casos e não usarmos a data de primeiros sintomas e coleta de material para teste sorológico ou SWAP.

Destaca-se a elevada capacidade de testagem do município, com número de casos descartados muito mais elevado que o número de casos confirmados. Já na análise dos boletins epidemiológicos há indícios de que a epidemia está sendo controlada, devido ao baixo quantitativo de casos confirmados, tanto em números absolutos quanto comparativamente ao total de exames e casos descartados, especialmente quando se considera o tamanho populacional do município. Aparentemente o município acompanha muito bem os casos notificados e aparenta ter os números ideais para controle da disseminação da epidemia, com total de teste e casos descartados bem superiores ao total de casos confirmados. O município ainda registra baixo número de curados, mas tende a crescer uma vez que já há várias semanas desde o primeiro caso e apenas a partir do dia 07/05/2020 o município começou a divulgar este quantitativo.

## 2.4 Miracema

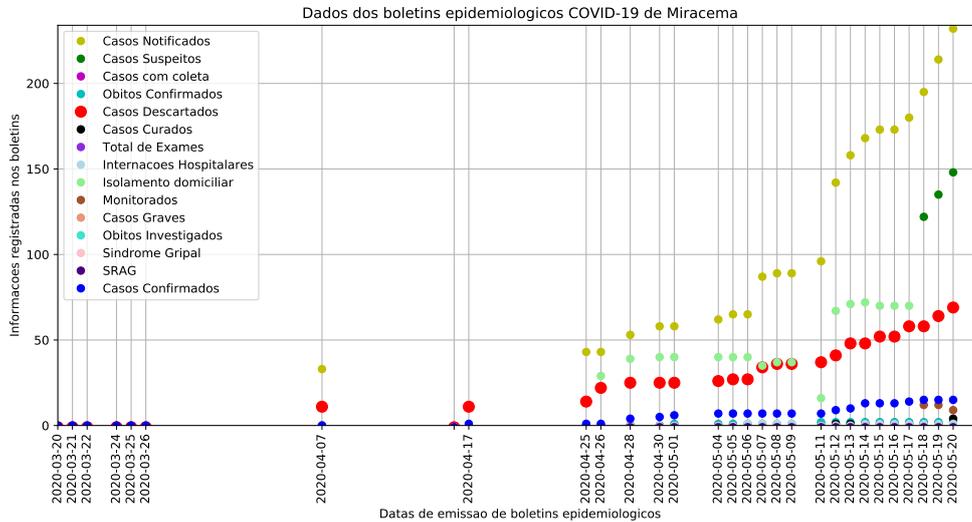


Figura 7: Dados extraídos de boletins epidemiológicos do município de Miracema.

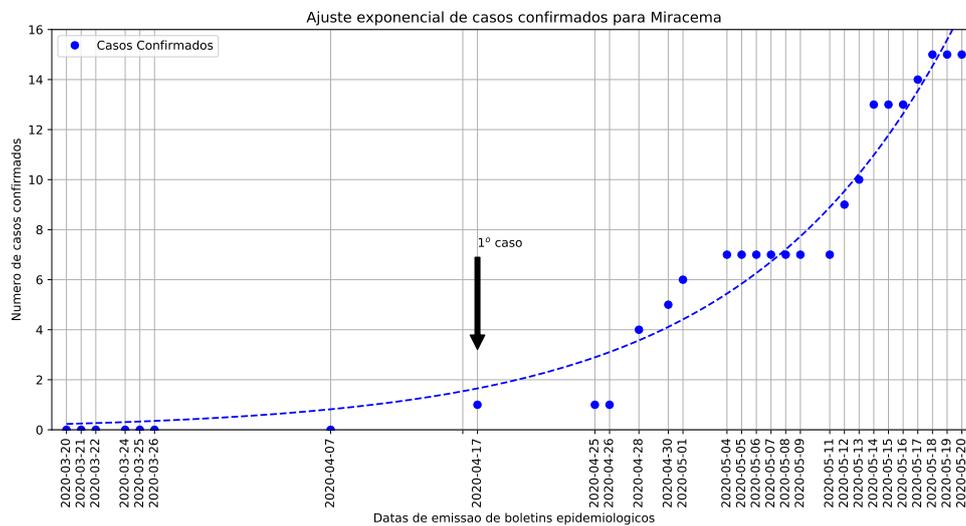


Figura 8: Ajuste de curva exponencial aos casos confirmados de Miracema.

A Prefeitura Municipal de Miracema intensificou a divulgação de boletins epidemiológicos à partir de 25/04/2020, muito próximo do período de aumento da capacidade do LACEN-RJ. Portanto não sabemos se o aumento no número de casos notificados e, principalmente, de

casos descartados se deve exclusivamente a aceleração da capacidade de testagem de amostras pelo LACEN-RJ ou a um aumento nas ações locais de acompanhamento dos casos de COVID-19. Provavelmente se deve a uma combinação dos dois fatores. Há ainda a possibilidade de ser também que o aumento observado no número de casos confirmados em torno daquela data se deva ao fato de estarmos adotando datas de divulgação de boletins epidemiológicos ao invés da data de primeiros sintomas ou data de realização de testes (sorológicos ou SWAP). Todos os números apresentados pela prefeitura são cumulativos.

O quantitativo de casos descartados se mostra sempre superior ao total de casos confirmados. Apesar do município não divulgar o total de exames realizados, supõe-se que sejam mais elevados e que não estejam se concentrando apenas em pacientes com sintomatologia mais grave. Aparentemente o município realiza bom acompanhamento de casos com sintomatologia leve.

## 2.5 Pirapetinga

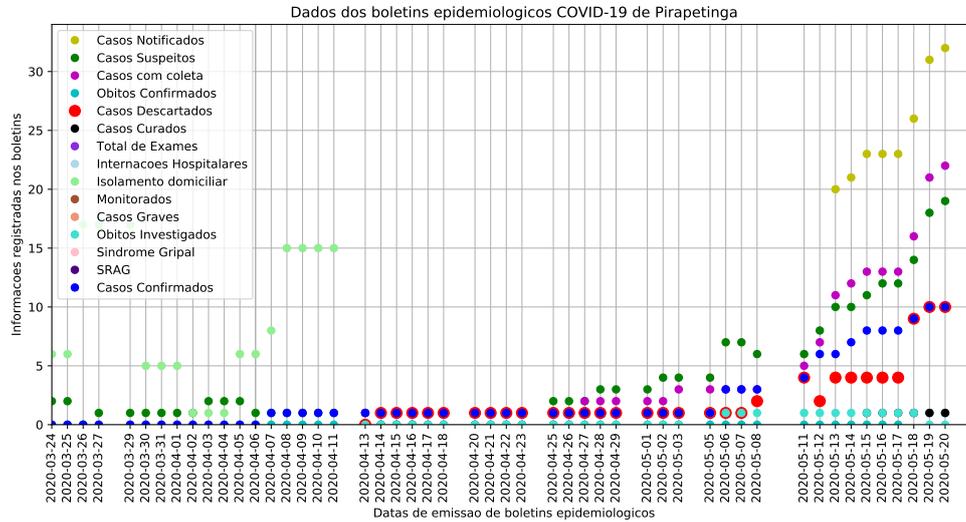


Figura 9: Dados extraídos de boletins epidemiológicos do município de Pirapetinga.

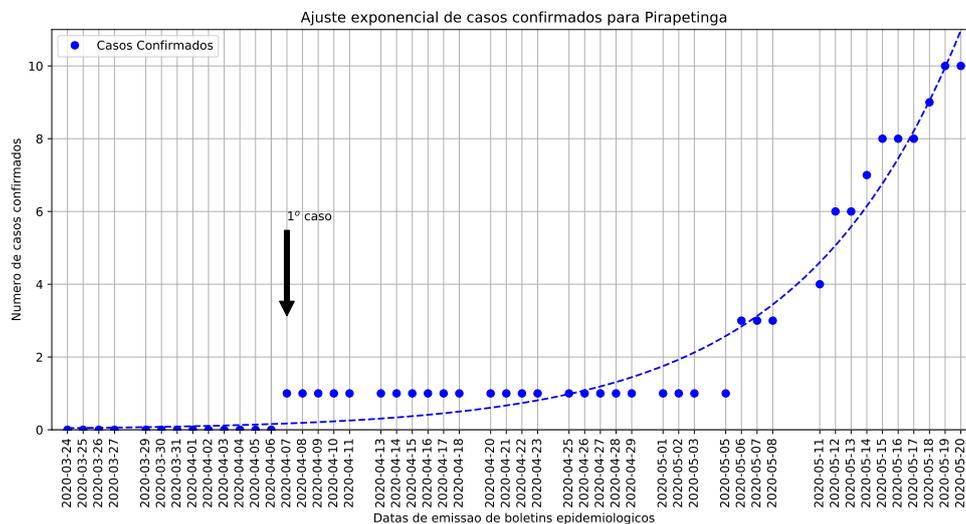


Figura 10: Ajuste de curva exponencial aos casos confirmados de Pirapetinga.

A Prefeitura Municipal de Pirapetinga apresentou muita regularidade na publicação de boletins epidemiológicos. Até o dia 16/05/2020, Pirapetinga era o município com melhor curva de evolução dos casos confirmados de COVID-19 entre os municípios analisados, principalmente

por ter conseguido durante 29 dias registrar apenas 1 caso entre 06/04/2020 e 05/05/2020. No entanto, após esta data apresentou aumento rápido de casos confirmados. E deixou de apresentar os menores valores dos coeficientes A e B no ajuste de função exponencial. É possível que tenha havido sub-notificação, o que ocasionou o aumento súbito, que provocou um forte aumento no coeficiente B da curva exponencial, o qual dita a velocidade de crescimento de casos. Seria interessante a prefeitura continuar divulgando o número de casos com coleta de material para possibilitar outras análises.

A quantidade de casos confirmados é superior ao quantitativo de casos descartados, o que nos faz concluir que o município não deve estar fazendo quantidade de testes adequados ou se concentre em casos com sintomas graves. Os quantitativos de coletas ainda são pouco superiores aos casos suspeitos, o que reforça a idéia de concentração da atenção em casos graves.

## 2.6 Santo Antônio de Pádua

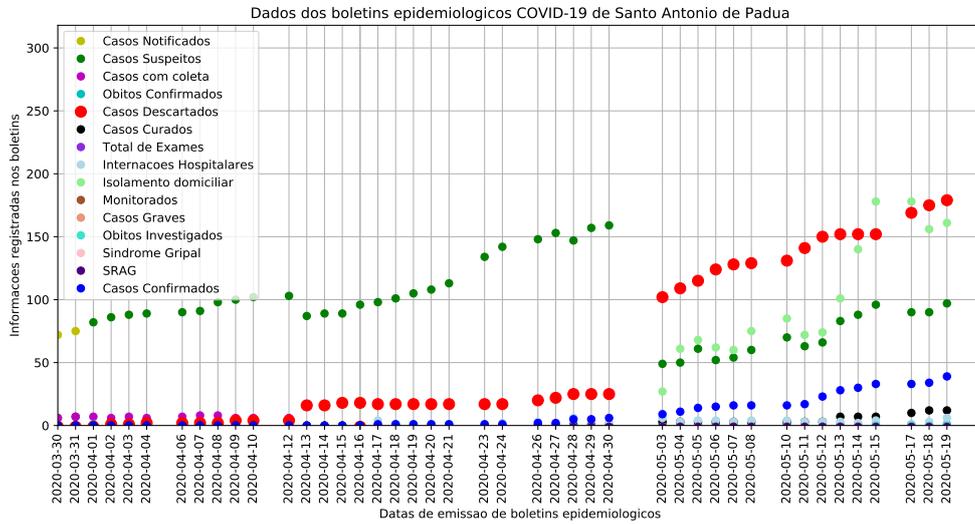


Figura 11: Dados extraídos de boletins epidemiológicos do município de Santo Antônio de Pádua.

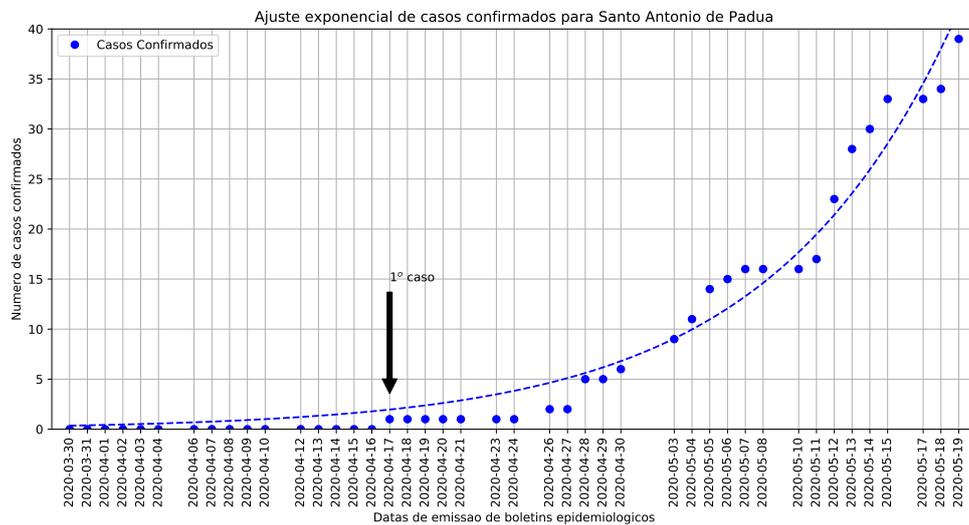


Figura 12: Ajuste de curva exponencial aos casos confirmados de Santo Antônio de Pádua.

A Prefeitura Municipal de Santo Antônio de Pádua apresenta razoável regularidade em seus boletins epidemiológicos, com especificação do número total de exames realizados desde

o início da epidemia (um diferencial em relação aos boletins epidemiológicos divulgados pelas demais prefeituras analisadas). Este tipo de dado permite inferir sobre percentual de casos de infectados na população. É importante destacar a grande distância entre número de total de exames e de casos descartados até o dia 30/04/2020 que deve ser provavelmente causado novamente pela questão da baixa capacidade de análise do LACEN-RJ até aquela data. Após 01/04/2020 vemos que a diminuição da diferença entre número de casos suspeitos e casos descartados. Ainda assim essa diferença é visualmente grande quando comparado ao número de casos confirmados, o que indica que ainda há problemas na capacidade do LACEN-RJ ou que há um conjunto de outras infecções simultâneas com sintomatologia comum com a COVID-19. Este segundo caso é mais provável pois com o início do outono registra-se o aumento da incidência de várias doenças respiratórias relacionadas ao frio na população. Podemos notar que a partir do dia 03/05/2020 ocorre uma inversão no comportamento entre casos suspeitos e casos descartados.

O município não divulga o total de exames realizados, mas como os quantitativos de casos descartados estão sempre superiores aos casos confirmados acreditamos que o total de testes seja elevado, similarmente aos boletins de Itaperuna. A inversão entre casos suspeitos e casos descartados citada acima reforça a conclusão de boa quantidade de testes.

## 2.7 São Fidélis

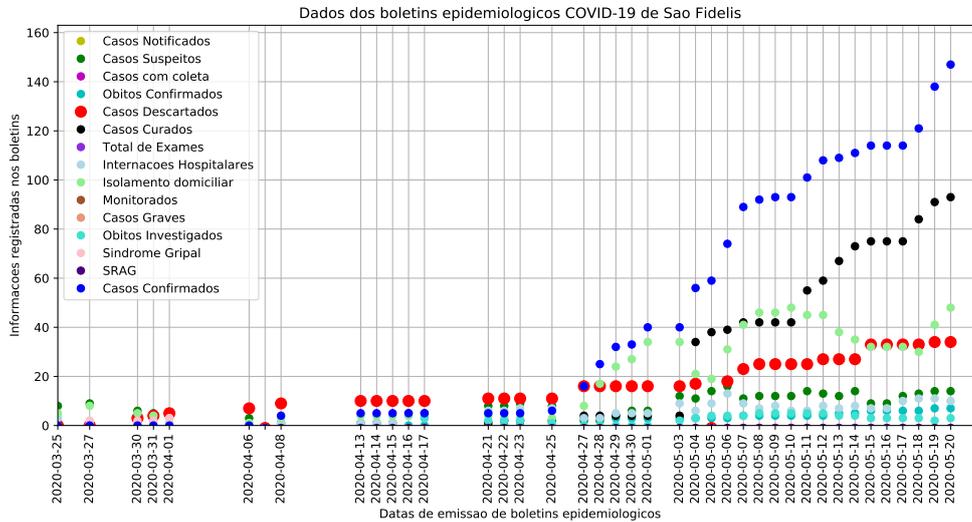


Figura 13: Dados extraídos de boletins epidemiológicos do município de São Fidélis.

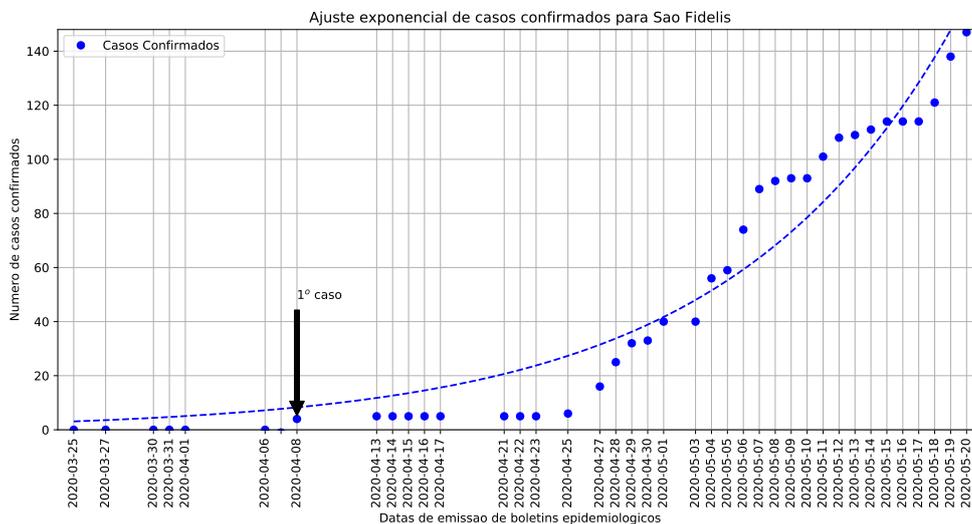


Figura 14: Ajuste de curva exponencial aos casos confirmados de São Fidélis.

O município de São Fidélis apresentou número relativamente baixo de casos durante quase um mês em abril e apresentou um crescimento rápido a partir do final de abril, na mesma época de aumento de capacidade de análise laboratorial do LACEN-RJ. É possível que a COVID-19

já estivesse começando a se espalhar neste momento mas só foi registrado o aumento após a elevação de capacidade de análise. Interessantemente podemos observar que o número de casos descartados se mantém quase estável no mês de maio enquanto o número de casos confirmados aumenta em mais de 5 vezes. Isso reforça fortemente a possibilidade de baixa notificação desde o final do mês de abril e sugere disseminação não detectada da doença, com grande probabilidade de haver elevada sub-notificação atualmente.

O número de casos confirmados é muito superior ao de casos descartados, o que indica baixíssima testagem e concentrada apenas nos casos sintomáticos. O número de casos suspeitos é muito baixo, sendo claramente uma contagem diária não cumulativa. Se este número é tão baixo, isso reforça a ideia de concentração de testagem em pacientes com sintomas graves. O elevado número de casos curados reforça a ideia de disseminação não detectada na fase inicial.

## **2.8 Comentário geral sobre os ajustes exponenciais**

Podemos notar que para todos os municípios analisados, excetuando-se Pirapetinga, que ainda apresenta número reduzido de casos confirmados, é possível se observar um comportamento de excesso de casos confirmados em torno de 20 dias após o primeiro caso confirmado. No caso de São Fidélis é possível observar um segundo excesso de casos acima da curva exponencial. Isso pode estar relacionado com o tempo de resposta do LACEN-RJ na liberação de resultados em lotes, pelos motivos explicados anteriormente de limitação de capacidade de análise de material coletado até final de abril. Outra forte explicação é a questão de adotarmos as datas de divulgação dos boletins e não as datas de primeiros sintomas dos pacientes ou a data de coleta de material de teste sorológico ou de SWAP.

Recomendamos a todos os gestores dos municípios que continuem divulgando o total de testes realizados, o qual permite complementar a análise de percentual de incidência da COVID-19. Se for de interesse dos gestores, nos colocamos à disposição para dialogarmos e para recebermos os dados do Sistema SIVEP GRIPE, e-SUS VE ou planilhas de dados das secretarias municipais de saúde com estes números (sem os dados de identificação dos pacientes), para melhorarmos os resultados das análises.

### 3 Análise de crescimento de casos confirmados

#### 3.1 Tempo de duplicação

O tempo de duplicação é uma medida da quantidade de tempo necessário para se dobrar o número de casos confirmados a partir de uma data. Na fase inicial de epidemias, o crescimento do número de casos pode ser ajustado a uma curva exponencial e com os coeficientes desta exponencial podemos encontrar o tempo de duplicação  $d$  de uma forma muito simples.

Suponha que no primeiro dia tenhamos 3 casos confirmados, passados uma quantidade de dias  $d$  existirão 6 casos, depois com o dobro de dias  $d$  serão 12 casos, passados o triplo de dias  $d$  serão 24 casos e assim sucessivamente o número de casos dobra a cada intervalo de  $d$  dias. Podemos representar a sucessão de casos pela Tabela 2.

Tempo ( $t$ )	Nº de casos	
0 dia	3	$= 3 \times 2^0$
$d$ dias	6	$= 3 \times 2^1$
$2d$ dias	12	$= 3 \times 2^2$
$3d$ dias	24	$= 3 \times 2^3$
$4d$ dias	48	$= 3 \times 2^4$
$5d$ dias	96	$= 3 \times 2^5$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$

Tabela 2: Exemplo de crescimento exponencial associado a uma progressão geométrica.

Desta forma, o número de casos registrados em um dado momento  $t$  será sempre dado por:

$$\text{Nº de casos } (t) = \text{Nº}_i \times 2^{(t/d)} \quad (1)$$

onde  $d$  é o tempo de duplicação,  $t$  é o tempo transcorrido desde o primeiro caso e  $\text{Nº}_i$  é o número inicial de casos. Se tomarmos o logaritmo natural dessa expressão em ambos os lados da igualdade e isolarmos a fração  $t/d$ , obteremos a seguinte expressão matemática para o tempo de duplicação  $d$ :

$$d = \frac{(\ln 2) \times t}{\ln(\text{Nº de casos } (t)) - \ln(\text{Nº}_i)} \quad (2)$$

Desta forma, podemos calcular o tempo de duplicação diretamente a partir dos dados obtidos dos boletins epidemiológicos. É possível também obter o tempo de duplicação  $d$  a partir do expoente de ajuste das curvas exponenciais se lembrarmos que o ajuste serve justamente para prevermos o número de casos que teremos em um dado dia (seguindo o padrão de crescimento no momento de execução do ajuste). Ou seja:

$$\text{Nº de casos } (t) = A \times e^{Bt} = \text{Nº}_i \times e^{Bt} \quad (3)$$

Substituindo a Equação 3 em 2, chegaremos a seguinte expressão matemática que relaciona o tempo de duplicação  $d$  com o coeficiente  $B$  do ajuste de curva exponencial

$$d = \frac{\ln 2}{B}. \quad (4)$$

A partir do cálculo dado pela Equação 4 e usando o coeficiente  $B$  dos ajustes exponenciais da Tabela 1, obtemos os tempos de duplicação para os municípios analisados, conforme apresentado na Tabela 3:

Município	Data do 1º caso	Tempo de duplicação em 16/05/2020	Tempo de duplicação em 21/05/2020
Campos dos Goytacazes	26/03/2020	8,0 dias	8,8 dias
Itaocara	25/04/2020	7,9 dias	8,7 dias
Itaperuna	05/04/2020	9,5 dias	9,9 dias
Miracema	17/04/2020	8,9 dias	9,9 dias
Pirapetinga	07/04/2020	6,1 dias	7,2 dias
Santo Antônio de Pádua	17/04/2020	5,9 dias	7,2 dias
São Fidélis	08/04/2020	8,3 dias	9,9 dias

Tabela 3: Tempo de duplicação de casos confirmados, calculado a partir do ajuste exponencial aos dados de casos confirmados, registrados nos boletins epidemiológicos dos municípios analisados. Os tempos de duplicação foram calculados em duas datas: utilizando dados dos boletins epidemiológicos até 16/05/2020 e utilizando dados de boletins divulgados até 20/05/2020.

Em princípio, quanto maior o tempo de duplicação de casos confirmados, melhor será o cenário, permitindo que uma prefeitura tenha mais tempo para tomar medidas de mitigação da epidemia ou para preparar a estrutura hospitalar para o atendimento de parcela da população que necessitará de internação.

Valores de tempo médio de duplicação acima de 10 dias são desejáveis. Valores próximos a 5 dias ou menores são extremamente preocupantes. Nenhum dos municípios se encontra neste último caso.

Podemos observar que todos os municípios apresentam tempo de duplicação menor que 10 dias, sendo que os municípios de Itaperuna, Miracema, São Fidélis, Campos dos Goytacazes e Itaocara se encontram com valores mais elevados, nesta ordem. O município de Itaperuna se destaca com o maior tempo de duplicação. Os municípios de Pirapetinga e Santo Antônio de Pádua apresentam os menores valores de tempo de duplicação e inspiram preocupação. Todos estes municípios tiveram elevação do tempo de duplicação entre as medições obtidas com dados até o dia 16/05/2020 e até o dia 20/05/2020, de modo a conferir a situação de crescimento recente.

### 3.2 Tendência de variação no Tempo de duplicação

A partir dos dados dos boletins epidemiológicos, podemos fazer sucessivas medidas de intervalos temporais nos quais o número de casos confirmados duplicam. Estes intervalos não são o tempo de duplicação como definido na subseção anterior. No entanto, a análise destes intervalos temporais entre duplicações de casos podem contribuir para observarmos se há tendência progressiva de mais longo prazo que indique aumento ou redução do tempo de duplicação da seção anterior. A partir dos valores destes intervalos, podemos extrair uma média e observar a tendência de variação do tempo de duplicação com a aplicação de um ajuste linear à distribuição de valores dos intervalos temporais.

Nas Figuras 15 a 21 mostramos os gráficos que demonstram a variação dos intervalos temporais entre duplicações de casos confirmados em cada município analisado. Os pontos marcados em vermelho representam os valores obtidos das observações de intervalos temporais entre duplicações de casos confirmados e foram obtidos pela análise entre número de casos confirmados em duas datas, de forma que a segunda medida seja aproximadamente o dobro da primeira

e inferimos quantos dias se passaram entre as duas datas. Após sucessivas anotações destes intervalos temporais, calculamos a média destes intervalos e aplicamos uma regressão de ajuste linear (via Método de Mínimos Quadrados).

Os valores das médias de intervalos temporais entre duplicações de casos estão representados pela linha tracejada de cor preta nas Figuras de 15 a 21. Estes valores também são apresentadas na Tabela 4.

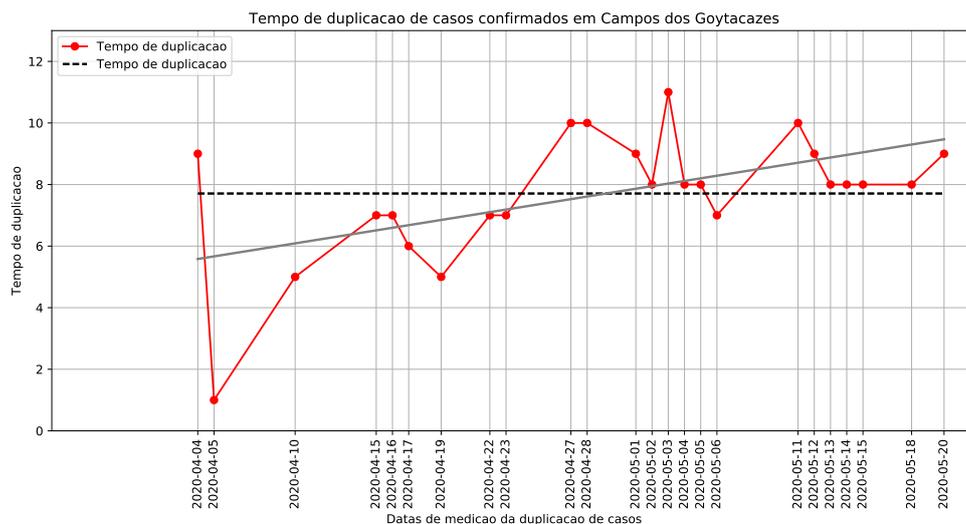


Figura 15: Intervalos temporais entre duplicações de casos confirmados em Campos dos Goytacazes.

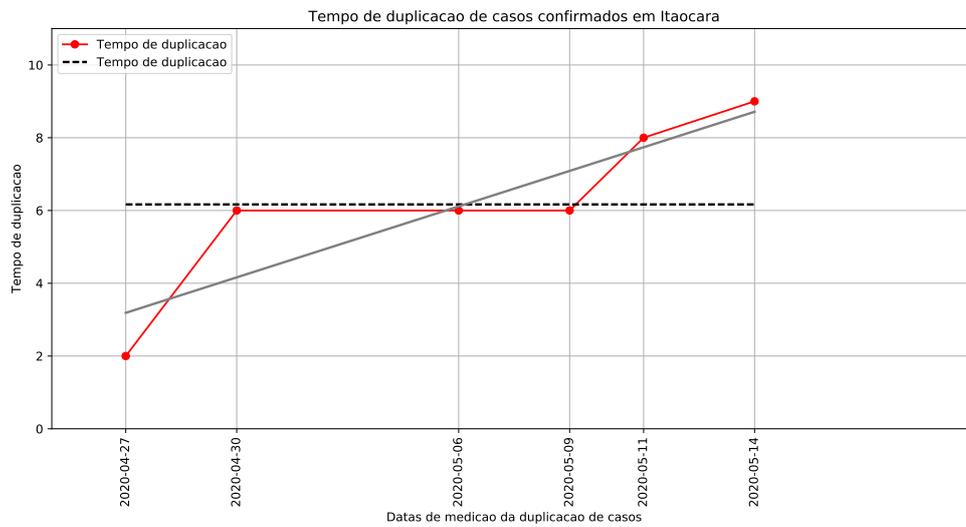


Figura 16: Intervalos temporais entre duplicações de casos confirmados em Itaocara.

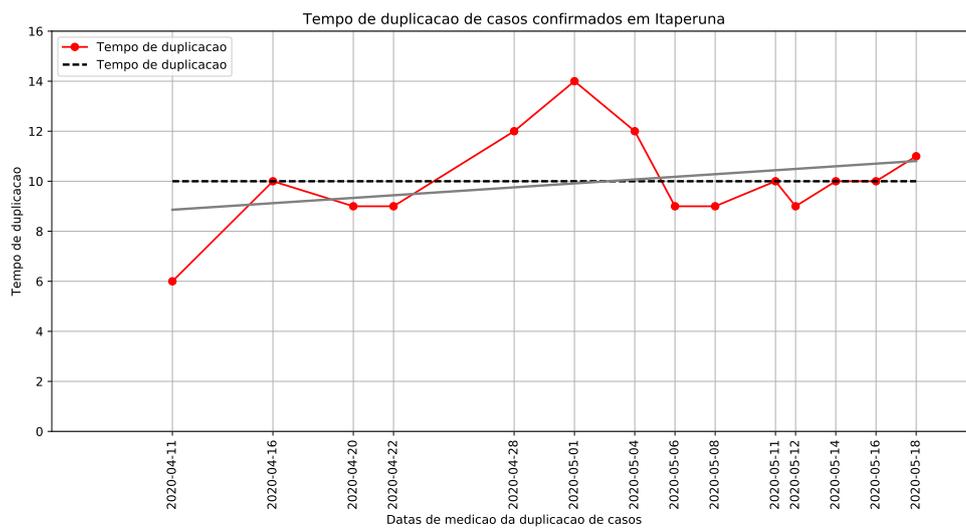


Figura 17: Intervalos temporais entre duplicações de casos confirmados em Itaperuna.

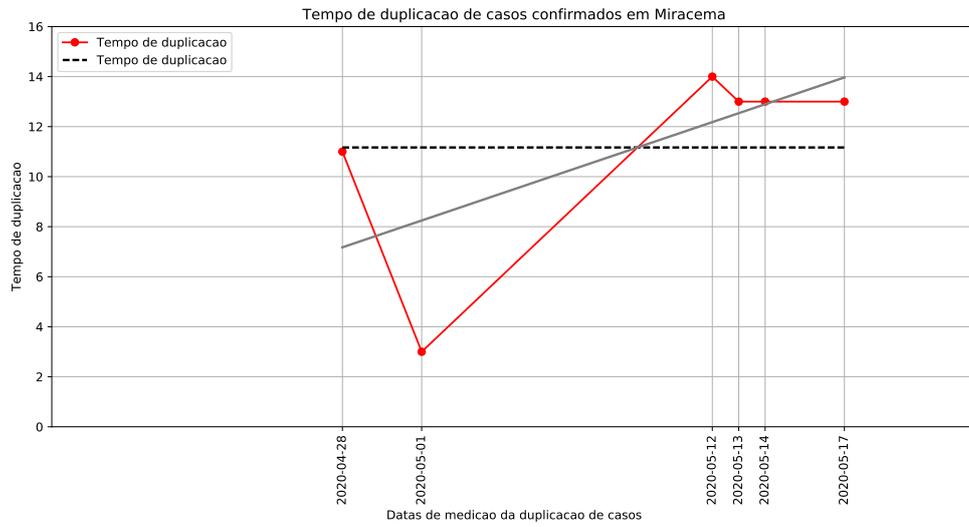


Figura 18: Intervalos temporais entre duplicações de casos confirmados em Miracema.

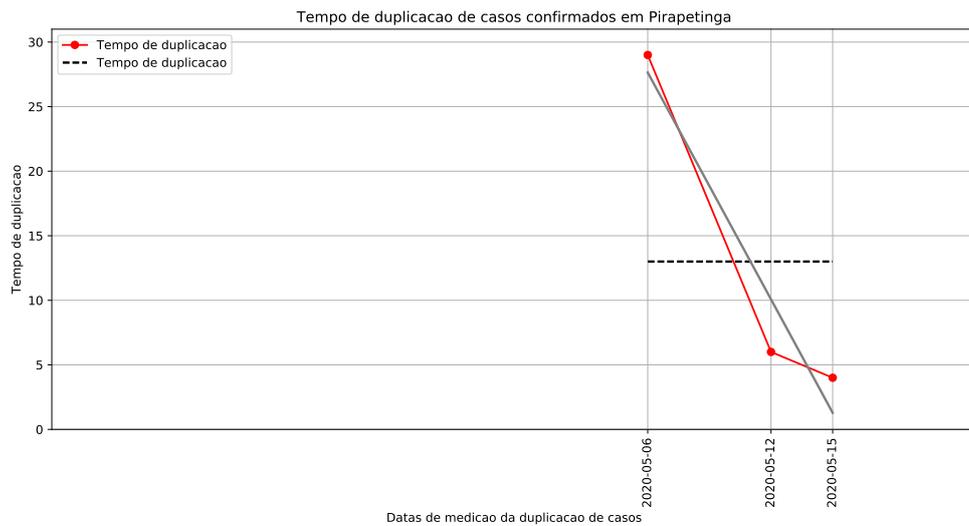


Figura 19: Intervalos temporais entre duplicações de casos confirmados em Pirapetinga.

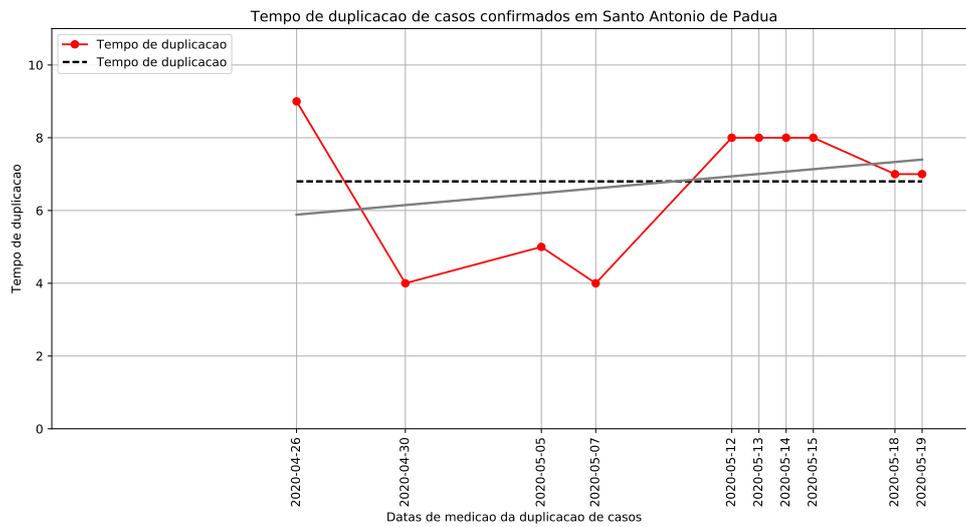


Figura 20: Intervalos temporais entre duplicações de casos confirmados em Santo Antônio de Pádua.

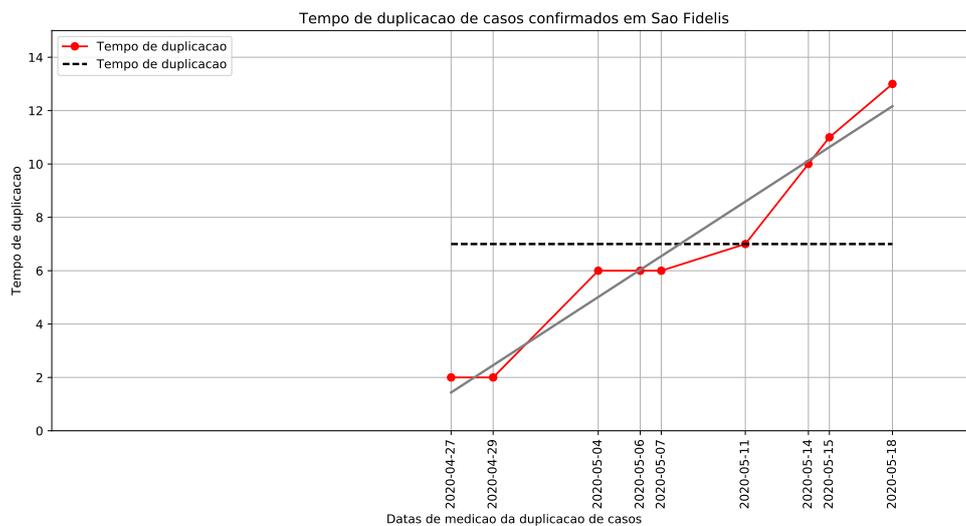


Figura 21: Intervalos temporais entre duplicações de casos confirmados em São Fidelis.

Município	Data do 1º caso	Média dos intervalos temporais de duplicação
Campos dos Goytacazes	26/03/2020	7,7 dias
Itaocara	25/04/2020	6,2 dias
Itaperuna	05/04/2020	10,0 dias
Miracema	17/04/2020	11,2 dias
Pirapetinga	07/04/2020	13 dias
Santo Antônio de Pádua	17/04/2020	6,8 dias
São Fidélis	08/04/2020	7,0 dias

Tabela 4: Médias dos valores de intervalos temporais associados à duplicação de casos confirmados, estimado pela leitura direta de boletins epidemiológicos dos municípios analisados até 20/05/2020.

Nestas mesmas figuras fizemos cálculo de ajuste linear para os valores de intervalos temporais entre duplicações de casos. Os ajustes lineares estão representados pelas linhas contínuas em cinza, a fim de se averiguar a tendência de aumento ou decréscimo no tempo de duplicação. Para isto apresentamos os coeficientes angular (P) e linear (Q) das retas, descritas pela função linear dada por  $y = P * x + Q$ . O ideal é que apresentem coeficientes angulares positivos.

Linhas cinzas ascendentes indicam coeficiente angular (P) positivo e comportamento favorável ao enfrentamento da COVID-19, com tendência de aumento do tempo de duplicação. Linhas cinzas descendentes indicam coeficiente angular (P) negativo e comportamento desfavorável ao enfrentamento da COVID-19, com tendência de diminuição do tempo de duplicação.

Como dito anteriormente, quanto maior o tempo de duplicação, melhor será o cenário. Portanto, na análise dos gráficos, o ideal será que os intervalos temporais entre duplicações apresentem comportamento ascendente e coeficientes angulares positivos, indicando tendência de aumento do tempo de duplicação. Não importará muito nas conclusões se o coeficiente linear (Q) for positivo ou negativo. Na Tabela 5 apresentamos os coeficientes angular (P) e linear (Q) dos ajustes lineares realizados.

Município	Coeficiente angular (P)	Coeficiente linear (Q)
Campos dos Goytacazes	0.0844998	4.82126
Itaocara	0.325058	2.53685
Itaperuna	0.0526547	8.54447
Miracema	0.357501	3.24205
Pirapetinga	-2.92857	112.571
Santo Antônio de Pádua	0.0657969	5.29325
São Fidélis	0.510928	-8.27106

Tabela 5: Coeficientes angular e linear dos ajustes lineares aplicados à distribuição de medidas de intervalos temporais entre duplicações, estimado pela análise de boletins epidemiológicos dos municípios analisados.

Podemos notar que o único município que apresenta tendência de diminuição do tempo de duplicação (ou coeficiente angular P negativo) é o município de Pirapetinga. Vale ressaltar que Pirapetinga ficou cerca de 29 dias com apenas um caso confirmado e depois começou a

apresentar aumento mais rápido no número de casos. Logo, é natural que o tempo médio de duplicação tenha se reduzido em relação ao valor inicial. No entanto, o tempo de duplicação do município de Pirapetinga registrado na Tabela 3 já se encontra baixo (em torno de uma semana), e espera-se que se estabilize, visto que na análise com dados até o dia 16/05 indicava um valor de 6,1 dias e na análise que incluía dados até 20/05 verificamos que este valor subiu para 7,2 dias, felizmente interrompendo a tendência de redução.

Os municípios de Campos dos Goytacazes, Santo Antônio de Pádua e Itaperuna apresentam ajustes lineares menos inclinados (ou seja, apresentam coeficientes angulares  $P$  mais próximos do valor nulo), o que sugere estabilidade no tempo de duplicação. A estabilização do tempo de duplicação é ruim quando estiver associada a um valor numérico baixo, como é o caso de Santo Antônio de Pádua e também deixa este município numa situação preocupante. Os municípios de Itaperuna e Campos dos Goytacazes apresentam estabilização no tempo de duplicação, mas num patamar mais elevado, o que os deixa em uma situação melhor.

Os demais municípios de Itaocara, Miracema e São Fidélis apresentam tendência de aumento no tempo de duplicação de casos confirmados.

O caso de São Fidélis é talvez o mais intrigante pois não seguiu desde o princípio um comportamento exponencial. Apesar de apresentar um tempo de duplicação intermediário e de apresentar intervalos temporais entre duplicações com valores ascendentes (indicando tendência de elevação do tempo de duplicação), ainda resta analisar sua curva exponencial apresentada na Figura 13, como faremos na próxima sessão.

## 4 Análise comparativa entre os municípios

### 4.1 Comparação das curvas exponenciais ajustadas

Apresentamos a seguir os gráficos com valores absolutos do número total de casos confirmados nos municípios analisados. De acordo com a Figura 22 vemos que, na fase inicial de evolução da pandemia de COVID-19, o município de Itaocara se destaca em relação aos demais com um rápido crescimento no número de casos confirmados, alcançando um total de 25 casos em um intervalo de apenas 14 dias, após o registro do primeiro caso. Este quantitativo de casos só foi alcançado em Campos dos Goytacazes aos 22 dias depois do primeiro caso. São Fidélis alcançou oficialmente os 25 casos confirmados apenas no 20º dia de evolução da epidemia, mas é possível que tenha sido anteriormente devido à possibilidade deste município ter registrado tardiamente a disseminação de casos na fase inicial da epidemia. De fato, a reabertura do comércio local em São Fidélis entre 28/04 e 13/05 contribuiu para o aumento de casos, mas o grande problema parece ser que até o dia 28/04 havia elevada sub-notificação, comprometendo naquele momento a análise da real situação epidêmica. Santo Antônio de Pádua registrou o mesmo quantitativo de 25 casos no 26º dia após o início da epidemia no município. Itaperuna só registrou 25 casos confirmados aos 33 dias após o registro do primeiro caso, ou seja, mais que o dobro de tempo de Itaocara. Pirapetinga se destaca positivamente como um município com baixíssimo número de casos no primeiro mês de epidemia, mas atualmente já começa a elevar rapidamente o número de casos. Para fins de comparação, incluímos o município do Rio de Janeiro, com dados obtidos em [3].

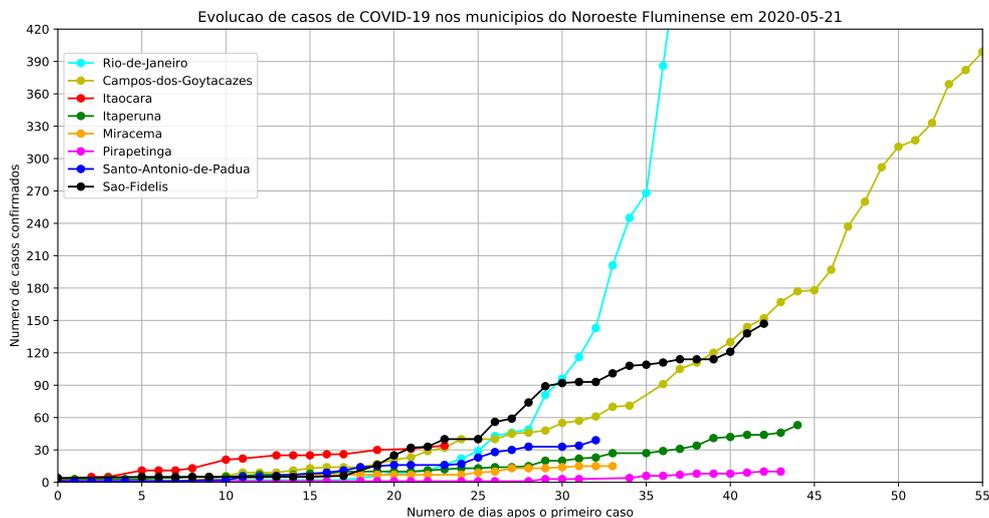


Figura 22: Dados extraídos de boletins epidemiológicos dos municípios analisados.

Na Figura 23 são apresentados os ajustes exponenciais, em linhas tracejadas, para facilitar a visualização da evolução dos casos confirmados de COVID-19 em cada município. Estas são as mesmas curvas exponenciais apresentadas anteriormente nas Figuras 2 a 14, mas aqui são apresentadas em um mesmo gráfico, apenas a partir da data de registro do primeiro caso em

cada município. Desta forma, é possível se ter uma melhor visualização na comparação do comportamento da epidemia nos diferentes municípios na fase inicial e projetar comparativamente os diferentes cenários.

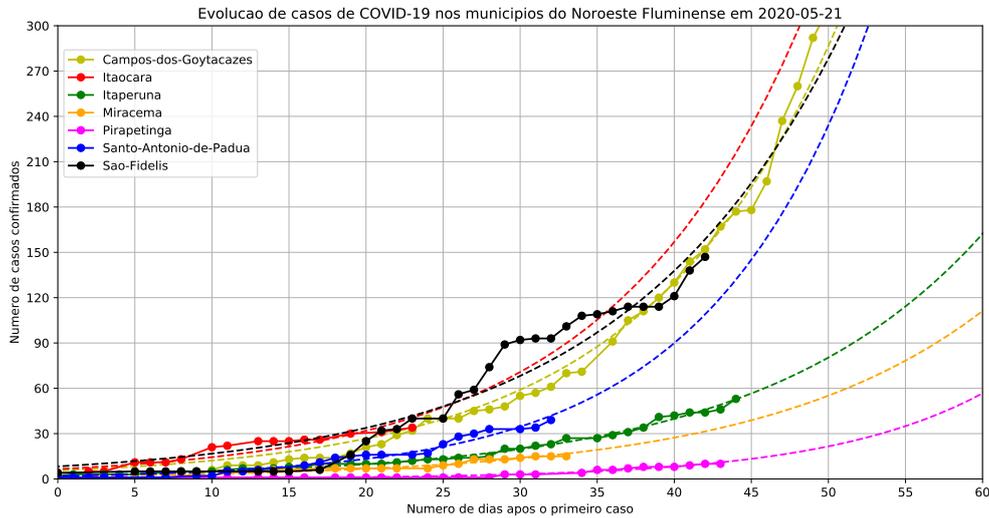


Figura 23: Dados extraídos de boletins epidemiológicos dos municípios analisados com ajustes de exponenciais (linhas tracejadas).

Através da análise de ajustes exponenciais de crescimento de casos confirmados na fase inicial da epidemia nos municípios analisados, podemos observar que há dois grupos principais de evolução da epidemia. O primeiro grupo (com crescimento mais rápido) é composto por Itaocara, São Fidélis, Campos dos Goytacazes e Santo Antônio de Pádua. O segundo grupo (com crescimento mais lento) é composto por Itaperuna, Miracema e Pirapetinga.

Podemos observar no primeiro grupo que o município de Itaocara inicialmente apresentava uma curva de crescimento mais rápida mas que logo se estabiliza, comparativamente a todos os demais municípios, com um aumento rápido de casos confirmados entre o 8º e o 13º dia de epidemia, se apresentando no gráfico com um comportamento em forma de “degrau” entre o 8º e 17º dia. Da mesma forma, o município de São Fidélis apresenta degraus e apresenta rápido crescimento de casos a partir do 16º dia. Ambos os municípios apresentam fases nas quais os casos confirmados aumentam muito em relação às respectivas curvas exponenciais que foram ajustadas (degraus), e isso pode estar relacionado às questões já discutidas anteriormente sobre os atrasos nos resultados de exames encaminhados ao LACEN-RJ ou ainda podem estar relacionado ao fato de adotarmos datas de divulgação de boletins epidemiológicos e não as datas de primeiros sintomas ou de realização dos exames (sorológicos ou SWAP). Os dados dos demais municípios seguem comportamento exponencial mais nítido. Os municípios de Campos dos Goytacazes e Santo Antônio de Pádua além de seguirem melhor o comportamento exponencial, também parecem ter comportamentos parecidos entre si nos casos confirmados nos dias iniciais da epidemia, até o 39º dia da epidemia.

No entanto, Santo Antônio de Pádua possui coeficiente B da curva exponencial numericamente maior que o respectivo coeficiente B da curva exponencial de Campos dos Goytacazes,

indicando que ultrapassará o número de casos confirmados por Campos dos Goytacazes ainda na fase inicial de epidemia (39º dia). Cabe lembrar que Campos dos Goytacazes apresenta evolução bem mais adiantada em relação a Santo Antônio de Pádua, uma vez que Campos dos Goytacazes registrou seu primeiro caso há mais tempo (22 dias antes de Santo Antônio de Pádua). Neste grupo, os municípios de Pirapetinga e Santo Antônio de Pádua apresentam o maior valor de coeficiente B da curva exponencial ajustada (de acordo com a Tabela 1), indicando previsão de crescimento mais intenso do número de casos. No entanto, os outros municípios apresentaram coeficientes A de ajuste exponencial mais elevados que Santo Antônio de Pádua, devido ao fato de terem começado com números maiores de casos confirmados. Se essas tendências de crescimento se mantiverem, a partir do 40º dia de epidemia em Santo Antônio de Pádua (27/05/2020) veremos Pádua ultrapassar o número de casos que Campos dos Goytacazes tinha em seu 40º dia de epidemia (05/06/2020).

Analisando o segundo grupo, podemos notar que o município de Itaperuna apresenta crescimento nitidamente exponencial, sem as variações (ou degraus) observadas nos casos de Itaocara e São Fidélis. O município de Miracema segue um comportamento próximo ao de Itaperuna, mas sem nunca ultrapassá-lo. Isso se deve basicamente ao fato de ambos os municípios apresentarem valores muito próximos para o coeficiente B da função exponencial (em torno de 0,07) com coeficientes A levemente diferentes. O município de Pirapetinga apresenta a evolução lenta na fase inicial da epidemia, mas não se deve a uma menor taxa de crescimento da curva exponencial (se deve ao fato do valor do coeficiente A ajustado na curva exponencial ser o mais baixo ajustado entre os municípios). Isso se deve ao fato de o município de Pirapetinga ter conseguido conter a disseminação após o primeiro caso (tendo ficado com apenas um caso confirmado durante 29 dias), reforçando a importância da rastreabilidade da infecção, e isolamento dos pacientes positivos. É possível que a partir de agora Pirapetinga registre um aumento da mesma forma como Santo Antônio de Pádua, pois apresentam valores parecidos para os coeficientes B das curvas exponenciais ajustadas e possuem tempos de duplicação próximos entre si.

É importante destacar que as previsões observadas com as curvas exponenciais ajustadas à série temporal de casos confirmados nos municípios são apenas tendências da fase inicial. A evolução real do crescimento no número de casos confirmados que veremos nos próximos dias dependerá basicamente das ações que nós tomarmos coletivamente e das ações que os gestores públicos tomarem com relação à prevenção junto à população. Estas tendências devem ser observadas com atenção e preocupação, mas não com fatalismo. Por fim, devemos deixar claro que o pico de casos ocorrerá nas pequenas cidades com grande atraso em relação às capitais ou em relação aos grandes centros urbanos do país.

Se não houver mudanças nas políticas de contenção da disseminação de COVID-19 e a tendência atual for mantida, podemos projetar o número de casos confirmados nas próximas semanas a partir dos ajustes de curvas exponenciais, ainda na fase inicial. Estes números são apresentados na Tabela 6.

Se assumirmos uma proporção fixa de internações hospitalares para os casos graves em 12% dos casos confirmados e se continuarmos a observar a mesma taxa de crescimento de casos confirmados dadas pelas curvas exponenciais da fase inicial da epidemia, podemos projetar o número de internações hospitalares necessárias conforme apresentadas na Tabela 7.

Se assumirmos uma proporção de óbitos dada por uma taxa de letalidade registrada internacionalmente de 2% do total de casos confirmados (conforme observado em Wuhan, China [4]) e se continuarmos a observar a mesma taxa de crescimento de casos confirmados dadas pelas curvas exponenciais da fase inicial da epidemia, podemos projetar o número de óbitos conforme apresentados na Tabela 8.

Município	Projeção de casos para 27/05/2020	Projeção de casos para 03/06/2020
Campos dos Goytacazes	740*	1287*
Itaocara	71	124
Itaperuna	86	141
Miracema	27	45
Pirapetinga	22	42
Santo Antônio de Pádua	82	160
São Fidélis	259	424

Tabela 6: Projeção de casos confirmados para as próximas duas semanas nos municípios analisados, realizada a partir das curvas exponenciais ajustadas com dados epidemiológicos divulgados até dia 20/05/2020. Ressaltamos que o prefeito de Campos dos Goytacazes já decretou *lockdown* no município a partir de 18/05/2020 e, deste modo, os números de casos reais a serem observados neste município serão menores que as projeções apresentadas nesta Tabela.

Município	Projeção de internações hospitalares em 27/05/2020	Projeção de internações hospitalares em 03/06/2020
Campos dos Goytacazes	89*	154*
Itaocara	9	15
Itaperuna	10	17
Miracema	3	5
Pirapetinga	3	5
Santo Antônio de Pádua	10	19
São Fidélis	31	51

Tabela 7: Projeção de internações hospitalares necessárias nas próximas duas semanas nos municípios analisados, realizada a partir das curvas exponenciais ajustadas com dados epidemiológicos de (casos confirmados) divulgados até dia 20/05/2020 e assumindo um percentual fixo de internações de 12%. Ressaltamos que o prefeito de Campos dos Goytacazes já decretou *lockdown* no município a partir de 18/05/2020 e, deste modo, os números de internações a serem observados neste município serão menores que as projeções apresentadas nesta Tabela.

## 4.2 Incidência da COVID-19 na população

Ao realizarmos comparações entre os diferentes municípios, precisamos considerar também as diferenças entre seus tamanhos populacionais. Por isso, extraímos da base de dados DATASUS [5] a informação atualizada de projeção populacional para 2019 de cada município

Município	Projeção de total de óbitos em 27/05/2020	Projeção de total de óbitos em 03/06/2020
Campos dos Goytacazes	15*	26*
Itaocara	1	2
Itaperuna	2	3
Miracema	1	1
Pirapetinga	0	1
Santo Antônio de Pádua	2	3
São Fidélis	5	8

Tabela 8: Projeção de óbitos nas próximas duas semanas nos municípios analisados, realizada a partir das curvas exponenciais ajustadas com dados epidemiológicos de (casos confirmados) divulgados até dia 20/05/2020 e assumindo um percentual fixo de letalidade de 2%. Ressaltamos que o prefeito de Campos dos Goytacazes já decretou *lockdown* no município a partir de 18/05/2020 e, deste modo, os números de óbitos a serem observados neste município nas próximas semanas seriam menores que as projeções apresentadas nesta Tabela. No entanto, o município já apresenta 22 óbitos em 20/05/2020, e portanto revela-se que foi acertada a decisão pelo *lockdown* decretado recentemente.

analisado, apresentada conforme a Tabela 9. Estes são os dados mais atualizados, uma vez que o último Censo Nacional ocorreu apenas em 2010.

Município	Projeção de tamanho populacional
Campos dos Goytacazes	507.548
Itaocara	23.234
Itaperuna	103.224
Miracema	27.174
Pirapetinga	10.752
Santo Antônio de Pádua	42.479
São Fidélis	38.669

Tabela 9: Projeção para 2019 do tamanho populacional de todos os municípios analisados.

Deste modo, podemos reproduzir o gráfico da Figura 23, tomando-se os dados de casos confirmados e dividindo-os pelos respectivos valores de populações estimadas, o que resulta no cálculo da incidência da COVID-19 em cada população dos respectivos municípios analisados. A Figura 24 apresenta graficamente a evolução da incidência de COVID-19 nos municípios analisados e a Tabela 10 apresenta os valores atuais de incidência atualizados na data de divulgação deste documento.

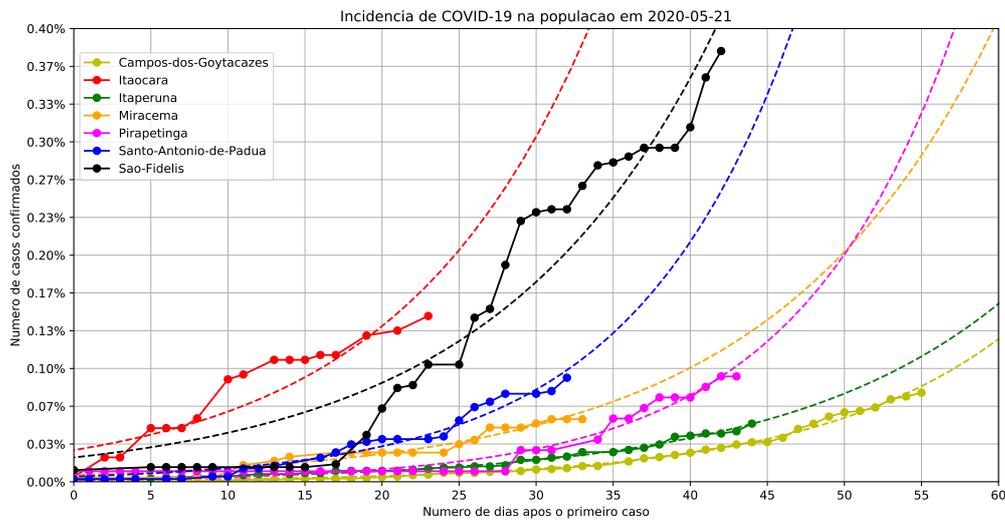


Figura 24: Comparação de incidência de casos confirmados relativos ao total da população de cada município analisado.

É possível notar que os municípios de Itaperuna e Campos dos Goytacazes possuem menor incidência de COVID-19 nas suas populações que outros municípios. Estes municípios possuem populações maiores e, portanto, a fração de infectados representa uma parcela muito pequena de suas populações em comparação com os municípios com menores conjuntos populacionais. Visualmente percebemos neste gráfico que suas curvas de crescimento de incidência se afastam muito das posições originais de suas curvas exponenciais anteriormente ajustadas. A incidência atual da doença nestes dois municípios fica em torno de 0,05% para o caso de Itaperuna e 0,08% para o caso de Campos dos Goytacazes.

Diferentemente, o município de Itaocara já registrava uma incidência um pouco mais elevada na sua população da ordem de 0,11% com apenas 14 dias de evolução da COVID-19, indicando necessidade de atenção especial das autoridades locais. No presente momento o município apresenta incidência da COVID-19 em quase 0,15% aos 23 dias de epidemia.

O município de Santo Antônio de Pádua se encontra em situação relativamente melhor com crescimento de casos acompanhando claramente a curva exponencial e ainda apresenta incidência de 0,09% aos 32 dias de epidemia.

O município de São Fidélis apresenta a incidência muito mais alta, acima de 0,38% tendo passado 42 dias de epidemia, representando uma situação mais preocupante.

O município de Miracema encontra-se em situação mais confortável, ao analisarmos números absolutos de casos confirmados ou até mesmo pela análise de incidência da COVID-19 na população, e em ambos os casos não há acompanhamento claro da curva exponencial ajustada. Miracema apresenta incidência de quase 0,06% aos 33 dias de epidemia.

Por último, Pirapetinga se encontra em situação equivalente a Santo Antônio de Pádua, com incidência de 0,09% aos 43 dias de epidemia.

Município	Incidência de COVID-19 sobre a população
Campos dos Goytacazes	0.078613 %
Itaocara	0.146337 %
Itaperuna	0.051345 %
Miracema	0.055200 %
Pirapetinga	0.093006 %
Santo Antonio de Padua	0.091810 %
Sao Fidelis	0.380149 %

Tabela 10: Incidência de COVID-19 sobre a população dos municípios analisados.

## 5 Modelo compartimentalizado SEIRD

### 5.1 Apresentação do Modelo SEIRD

Até aqui neste trabalho nós lidamos com dados oficiais divulgados por prefeituras e fizemos ajustes simples de funções aos dados divulgados. Também analisamos o tempo médio de duplicação nos diferentes municípios a partir dos dados reais. A partir desse ponto faremos aplicação de modelos matemáticos com fins didáticos, que não necessariamente representam toda a complexidade da evolução epidemiológica de propagação de uma doença, em especial pela adoção não ideal de datas de divulgação dos boletins epidemiológicos, sendo preferível a aplicação de datas de primeiros sintomas, como explicado anteriormente. Pedimos cautela no uso das informações a seguir e não nos responsabilizamos por conclusões que leitores incautos podem tomar a partir desta leitura. Nossa intenção principal é a de demonstrar que a quarentena ou confinamento compulsório (também conhecido como *lockdown*), independentemente do grau de confiabilidade dos resultados de um modelo epidemiológico compartimentalizado, quando aplicada numa cidade ou região, tem o papel de reduzir drasticamente o número de mortos.

Os modelos matemáticos de evolução epidemiológica se baseiam na solução de sistemas de equações diferenciais acopladas. Estes modelos tratam dos grupos de indivíduos relacionados à epidemia, de forma compartimentalizada. Os compartimentos a serem modelados ou simulados podem ser os conjuntos de pessoas suscetíveis (S) à doença analisada, o conjunto de indivíduos expostos (E), os infectados (I), os recuperados (R) e os mortos (D) por uma doença. Para maiores informações recomendamos a leitura de [6]. Nesta análise usaremos o modelo SEIRD que simula todos os grupos listados acima, a partir de um código disponível em [7], com modificações feitas pelo autor do presente trabalho. Apesar de ser um *toy model*, o presente modelo SEIRD é minimamente realista e segue os mesmos princípios matemáticos que regem outros modelos compartimentalizados mais elaborados aplicados à modelagem de dinâmica epidemiológica.

As equações diferenciais do modelo SEIRD adotado estão descritas abaixo e serão detalhadas na próxima versão deste documento.

$$\begin{aligned}
\frac{dS}{dt} &= -\frac{\beta SI}{N} \\
\frac{dE}{dt} &= \frac{\beta SI}{N} - \delta E \\
\frac{dI}{dt} &= \delta E - (1 - \alpha)\gamma I - \alpha \rho I \\
\frac{dR}{dt} &= (1 - \alpha)\gamma I \\
\frac{dD}{dt} &= \alpha \rho I \\
N &= S + E + I + R + D
\end{aligned}$$

Os coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  e  $\rho$  das equações diferenciais e os demais parâmetros de entrada estão descritos na Tabela 11. Seus valores têm sido amplamente noticiados em vários jornais e também podemos conferir na notícia disponível em [8].

Descrição do parâmetro	Valor
Número básico de reprodução inicial ( $R_{0,i}$ )	2,8
Número básico de reprodução final ( $R_{0,f}$ )	0,9
Duração da infecção ( $1/\gamma$ )	7 dias
Período de incubação ( $1/\delta$ )	7 dias
Tempo médio entre infecção e morte ( $1/\rho$ )	9 dias
Letalidade presumida ( $\alpha$ )	2%
Número máximo de pessoas suscetíveis ( $S_i$ )	população local
Número inicial de pessoas expostas ( $E_i$ )	$2 * I_i$
Número inicial de infectados ( $I_i$ )	coeficiente A do ajuste exponencial
Número inicial de recuperados ( $R_i$ )	0 pessoas
Número inicial de mortos ( $D_i$ )	0 pessoas
Percentual de Hospitalização	12%

Tabela 11: Parâmetros de entrada para simulação usando modelo SEIRD.

O número inicial de pessoas suscetíveis  $S$  será igual à população  $N$  prevista para cada município de acordo com a Tabela 9. O número  $N$  se mantém constante durante toda a simulação da evolução epidêmica. Assumimos nestas simulações que uma fração de cerca de 10% a 15% dos infectados precisará ser hospitalizada, conforme notícias veiculadas fartamente. Estipulamos este percentual em 12% em nosso modelo para fins de análise. Os parâmetros de taxa de letalidade, Período de incubação, Duração da infecção e Número básico de reprodução foram extraídos de ??.

O modelo SEIRD foi aplicado para um prazo de 200 dias, superior ao período de propagação da epidemia de COVID-19 em outras partes do mundo, para garantirmos que a aplicação destes parâmetros cobriria todo o período de epidemia. A todos os municípios foi aplicado um número básico de reprodução  $R_0$  que representa o potencial de contágio de uma doença e depende de vários fatores, tendo uma evolução temporal à medida que a epidemia evolui. A grosso modo, o valor de  $R_0$  indica o número de pessoas que uma pessoa infectada tende a transmitir a doença. Nas simulações a seguir foi adotado um  $R_0$  variável, com valor inicial igual a 2,8 (conforme registrado internacionalmente para COVID-19) e valor final igual a 0,8.

Nas simulações de evolução epidemiológica sem *lockdown*,  $R_0$  possui variação suave, como dado na Figura 25.

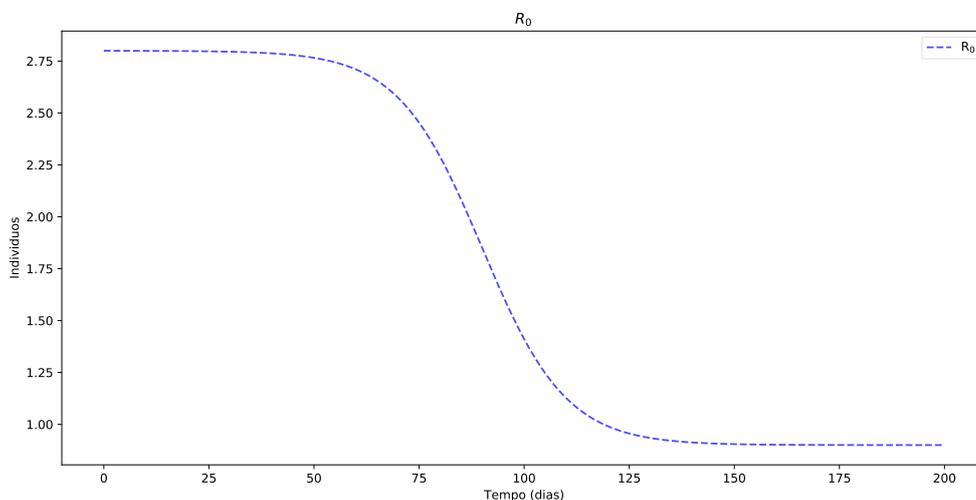


Figura 25:  $R_0$  como função do tempo, aplicado a cada uma das simulações de modelo SEIRD para os municípios analisados sem *lockdown* decretada.

Nas simulações de evolução epidemiológica com *lockdown*, supondo que fosse adotado 7 dias a partir do último boletim epidemiológico divulgado por cada município, o comportamento do  $R_0$  adotado também inicia em 2,8 mas sofre uma queda abrupta devido ao isolamento abrupto causado pelo *lockdown*, que neste caso é descrito pela Figura 26 (este é o caso de Campos dos Goytacazes; para os demais municípios a data de queda abrupta do  $R_0$  ocorrem em dias epidemiológicos diferentes, pois tais municípios estão em fase mais inicial da epidemia).

## 5.2 Teste inicial do modelo SEIRD: o caso de Wuhan (China)

A título de comparação aplicamos inicialmente o modelo SEIRD a uma população de 11 milhões de habitantes, como é o caso de Wuhan (China). Aplicamos também uma quarentena ou confinamento compulsório (*lockdown*) no 30º dia epidemiológico. Lembramos que a epidemia começou em Wuhan no final de dezembro/2019 e o *lockdown* foi decretado em 23/01/2020. Os demais parâmetros seguem o mesmo descrito na Tabela 11. O resultado pode ser visto na Figura 27.

Wuhan possui uma população de 11 milhões de habitantes. Como o *lockdown* foi adotado em estágio muito inicial da epidemia, podemos notar o número de mortos, infectados e suscetíveis fica extremamente baixo, comparado com a população total. Se ampliarmos a Figura 27 obteremos as Figuras 28 e 29.

Podemos notar que o número final de mortos, previsto pelo modelo SEIRD utilizado, foi de 1785 pessoas. Lembramos que o número inicial real de mortos em Wuhan foi de 2579 mortos e posteriormente foi revisto para 3869 mortos, de acordo com a notícia disponível em

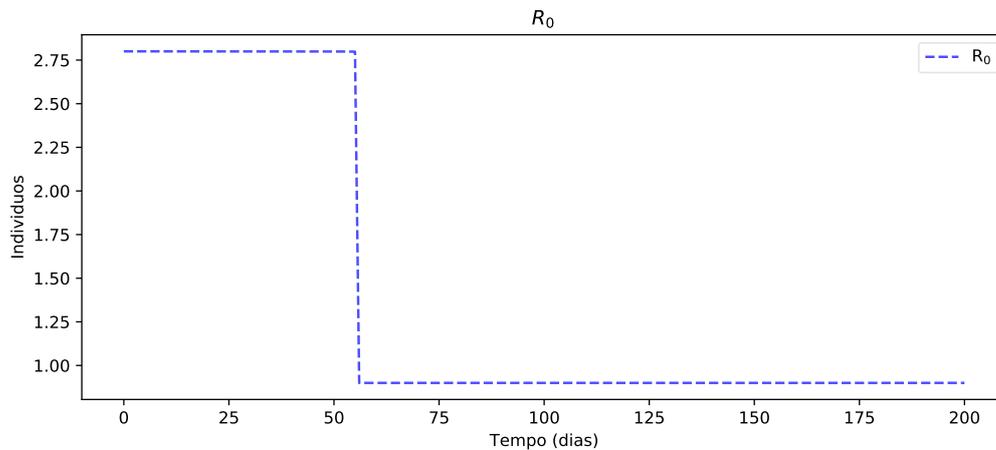


Figura 26:  $R_0$  como função do tempo, aplicado a cada uma das simulações de modelo SEIRD para os municípios analisados, considerando *lockdown* decretado 7 dias a partir da data de divulgação deste documento.

[9], adicionando as pessoas que haviam falecido em casa e não haviam sido registradas na estatística oficial. Segundo a notícia disponível em [10] o número total de casos confirmados em Wuhan foi de 50333 casos.

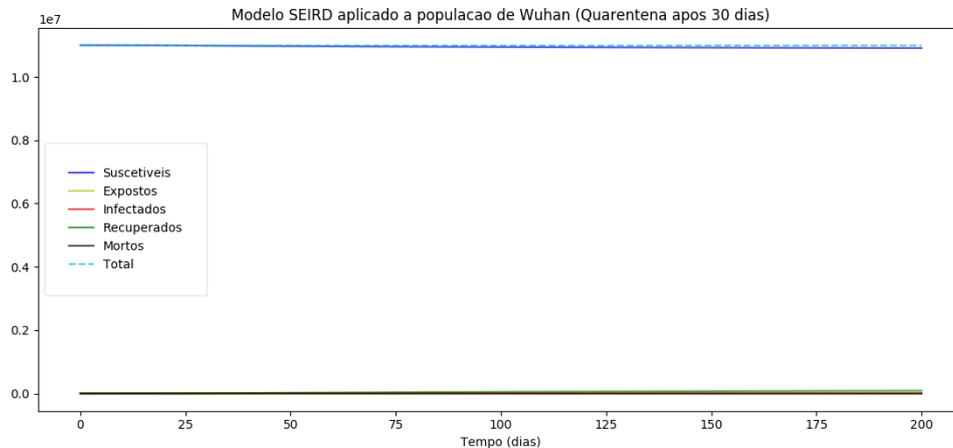


Figura 27: Modelo SEIRD aplicado ao caso de Wuhan.

O modelo SEIRD adotado estima o total de recuperados em aproximadamente 85000 pessoas. Somando-se este número ao número previsto de mortos, obteremos o total de casos

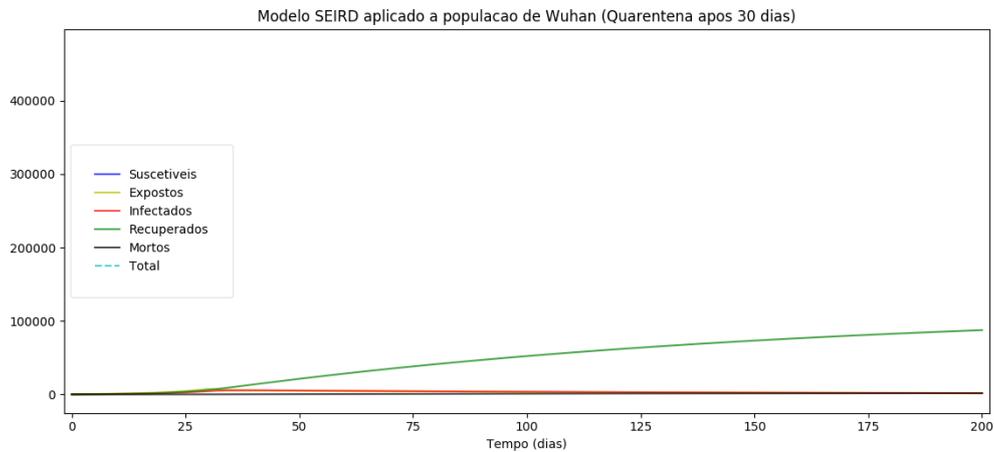


Figura 28: Ampliação da Figura 27.

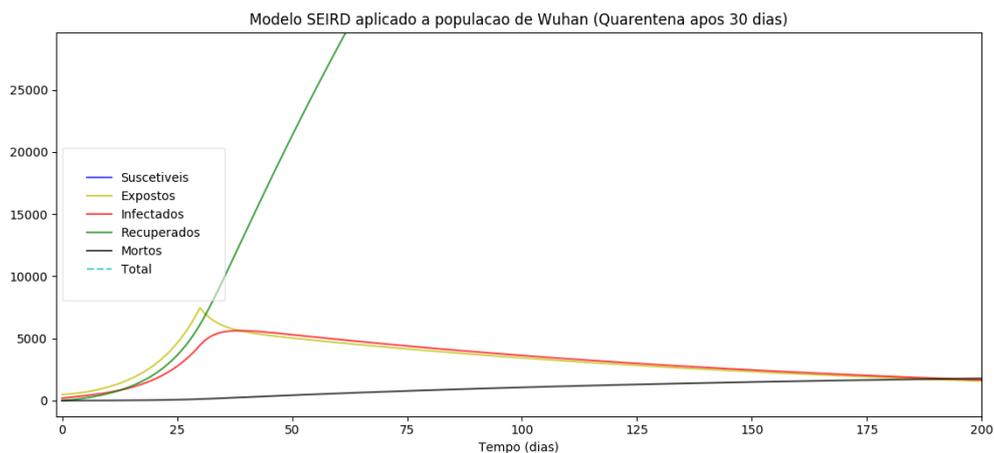


Figura 29: Ampliação da Figura 28.

previstos pelo modelo SEIRD, ou seja, quase 87000 casos confirmados. Deste modo, o número de casos confirmados em Wuhan representa 58% do total de casos previsto pelo modelo SEIRD adotado. É correto afirmar que podemos esperar um quantitativo de casos previstos superior ao total de casos confirmados pois nem todos os infectados apresentam sintomas e justamente por isso nem todos são testados e não recebem confirmação. É interessante salientar que em Wuhan houve ampla testagem de casos, então poderíamos esperar uma sub-notificação mais reduzida. Vemos com isso que qualitativamente o modelo SEIRD adotado corresponde parcialmente à realidade e não foge em várias ordens de grandeza aos valores registrados na epidemia real. Pelo contrário, o modelo SEIRD apresenta poder de previsão qualitativa mas não é o mais preciso. Por este motivo, salientamos mais uma vez a importância de se ter cautela na análise dos re-

sultados apresentados na próxima sessão. Os números previstos no modelo SEIRD apresentam desvios em relação à observação da epidemia real. **O objetivo final é demonstrar que o *lockdown*, quando aplicado precocemente, pode reduzir drasticamente a quantidade de óbitos.**

### 5.3 Projeção da epidemia sem *lockdown*

Apresentamos a seguir um conjunto de gráficos com os resultados do modelo SEIRD aplicado a populações de tamanhos equivalentes aos municípios analisados anteriormente. Analisaremos primeiramente o caso sem aplicação do *lockdown* e, posteriormente, com aplicação de *lockdown* se iniciando 7 dias após a publicação deste presente documento em todos os municípios. A data dos últimos boletins epidemiológicos analisados neste trabalho são de meados de maio/2020 e escolhemos 7 dias de intervalo, pois na hipótese de implantação de *lockdown*, os governantes e gestores públicos geralmente estabelecem um prazo para adequação da comunidade e para ampla divulgação das regras de *lockdown*. Neste período de 7 dias, o número de casos confirmados, óbitos e os demais continuam a subir e, por isso precisamos incluir um período como este nas simulações. As Figuras de 30 até 43 apresentam os resultados, sendo que algumas são apenas ampliações das imagens imediatamente anteriores. Ao final desta seção, apresentamos a Tabela 12 com os resultados da simulação utilizando o modelo SEIRD descrito.

Podemos notar que as figuras que mostram a aplicação do resultado do modelo SEIRD demonstram que os quantitativos de casos confirmados não se diferem demasiadamente no total de infectados previstos (linha vermelha). Isso revela considerável verossimilhança deste modelo SEIRD com a realidade. Não fizemos neste momento análises de otimização de parâmetros para encontrar as melhores soluções das curvas resultantes dos modelos que se ajustem aos dados observados, mas planejamos fazer essa análise de otimização de parâmetros para as próximas versões do presente documento. Isso permitirá sabermos melhor não apenas os parâmetros de contágio, mas também permitirá avaliar o período de término do ciclo epidêmico em cada município analisado.

Destacamos que as distribuições de casos confirmados (pontos vermelhos) que aparecem acima das curvas de infectados (linhas vermelhas) revelam que o valor inicial de  $R_0$  simulado de 2,8 não corresponde aos dados observados. Isso é muito preocupante pois sugere que o corona vírus deve estar se espelhando com maior facilidade. Este é o caso dos municípios de Itaocara, Miracema Santo Antônio de Pádua e São Fidélis. Os municípios de Campos dos Goytacazes, Itaperuna e Pirapetinga se encontram aparentemente bem representados pelos parâmetros adotados para esta simulação.

Não foram realizados cálculos de intervalo de confiança nesta simulação e planejamos incluí-los nas próximas versões.

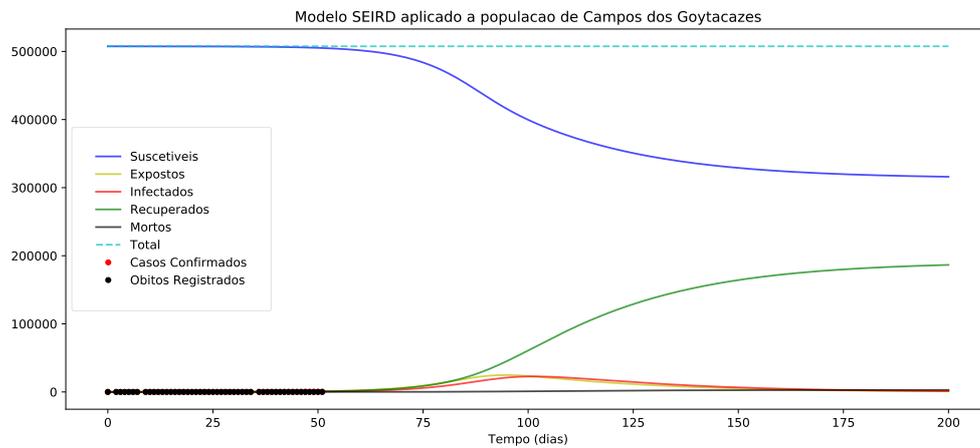


Figura 30: Modelo SEIRD aplicado a uma população equivalente ao município de Campos dos Goytacazes, sem *lockdown*.

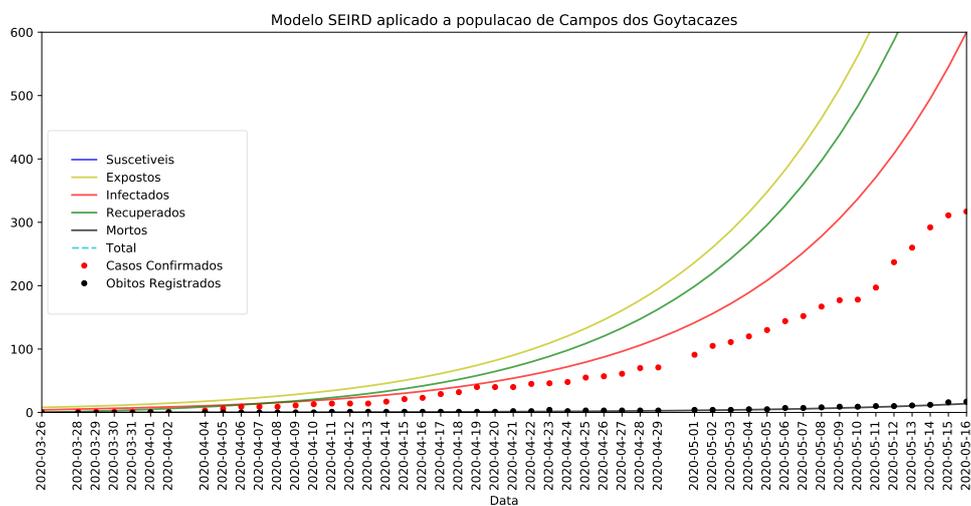


Figura 31: Ampliação da Figura 30.

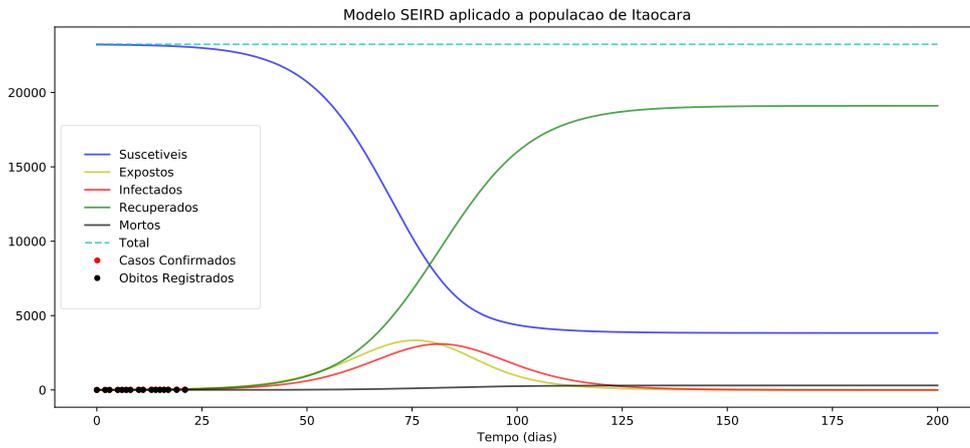


Figura 32: Modelo SEIRD aplicado a uma população equivalente ao município de Itaocara, sem *lockdown*.

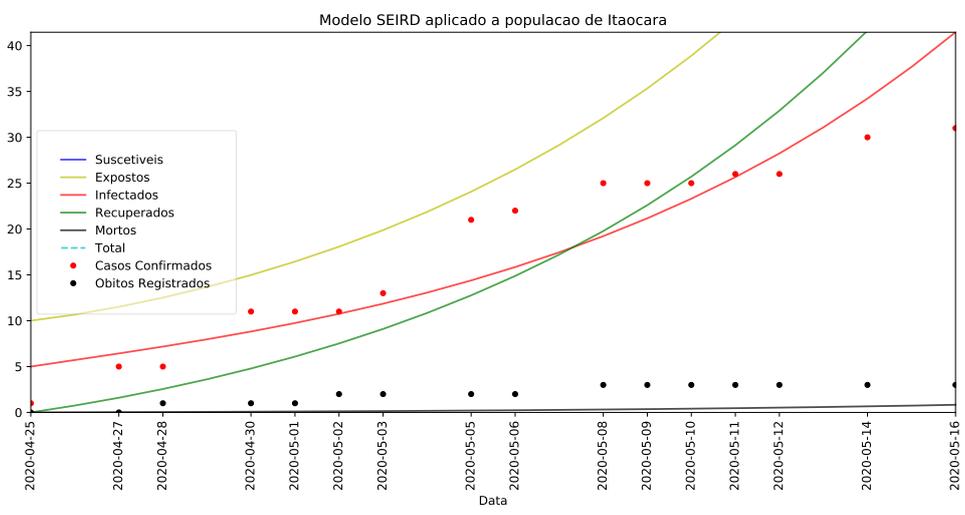


Figura 33: Ampliação da Figura 32.

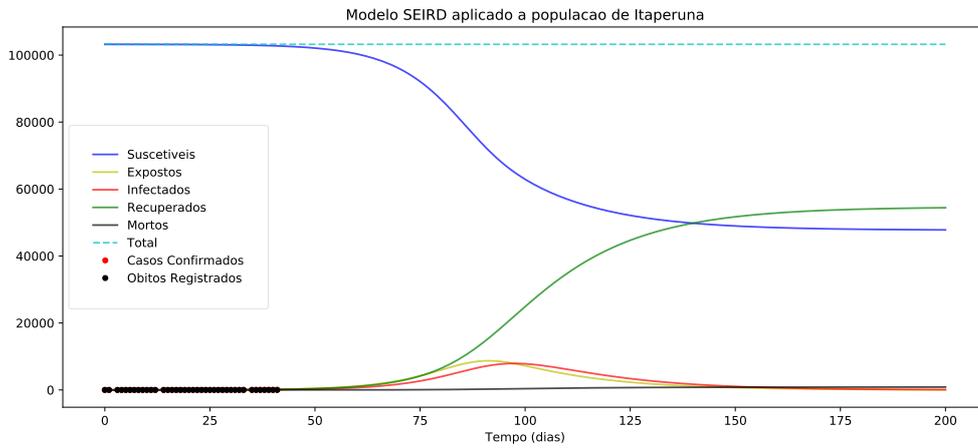


Figura 34: Modelo SEIRD aplicado a uma população equivalente ao município de Itaperuna, sem *lockdown*.

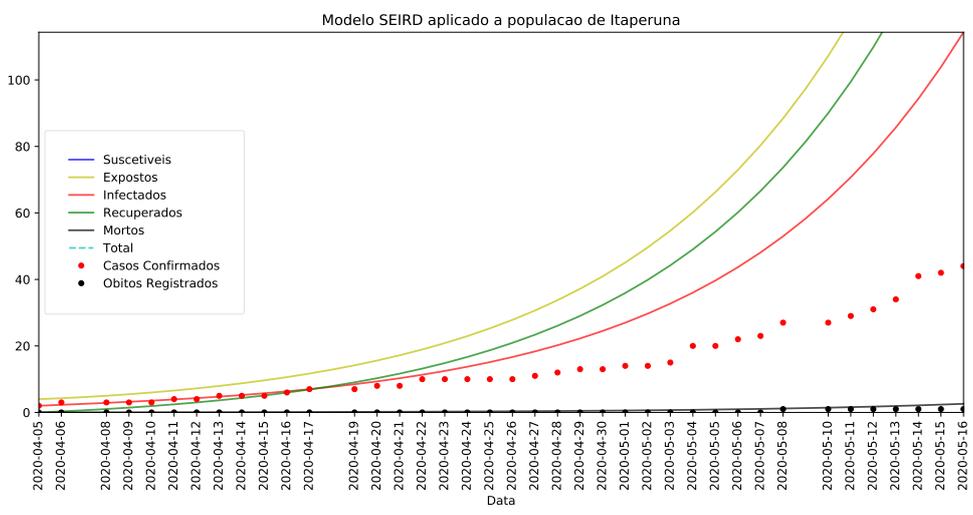


Figura 35: Ampliação da Figura 34.

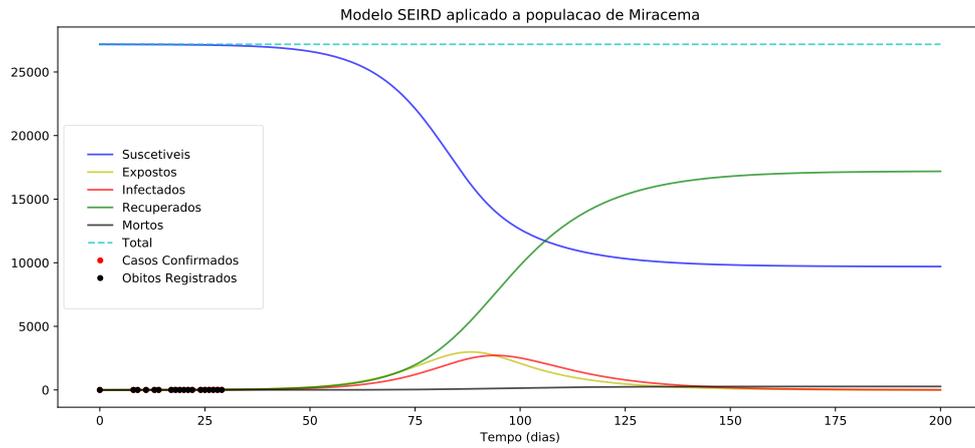


Figura 36: Modelo SEIRD aplicado a uma população equivalente ao município de Miracema, sem *lockdown*.

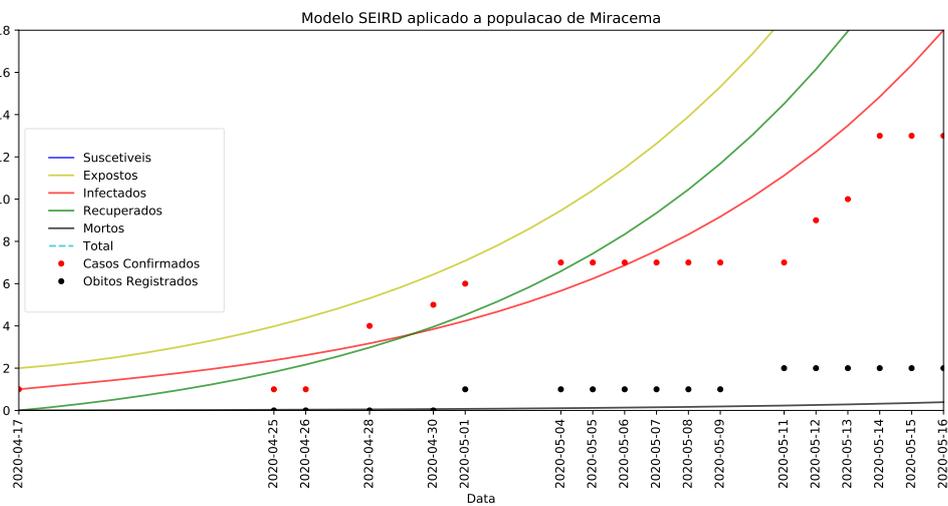


Figura 37: Ampliação da Figura 36.

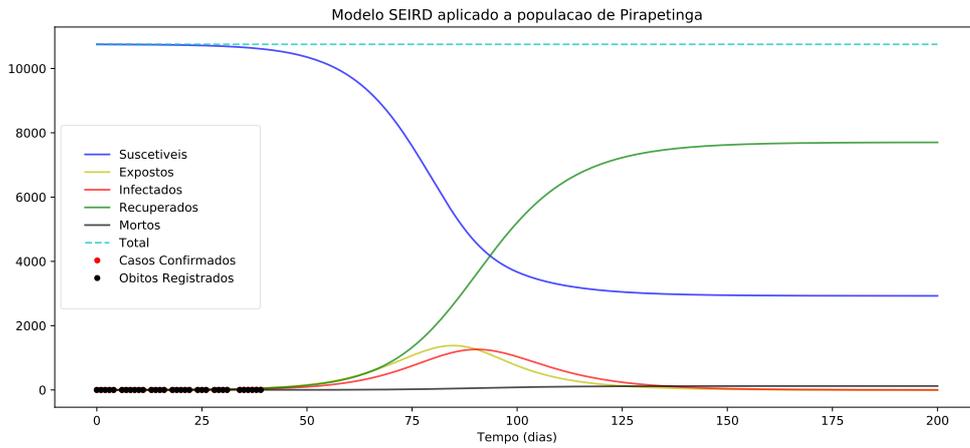


Figura 38: Modelo SEIRD aplicado a uma população equivalente ao município de Pirapetinga, sem *lockdown*.

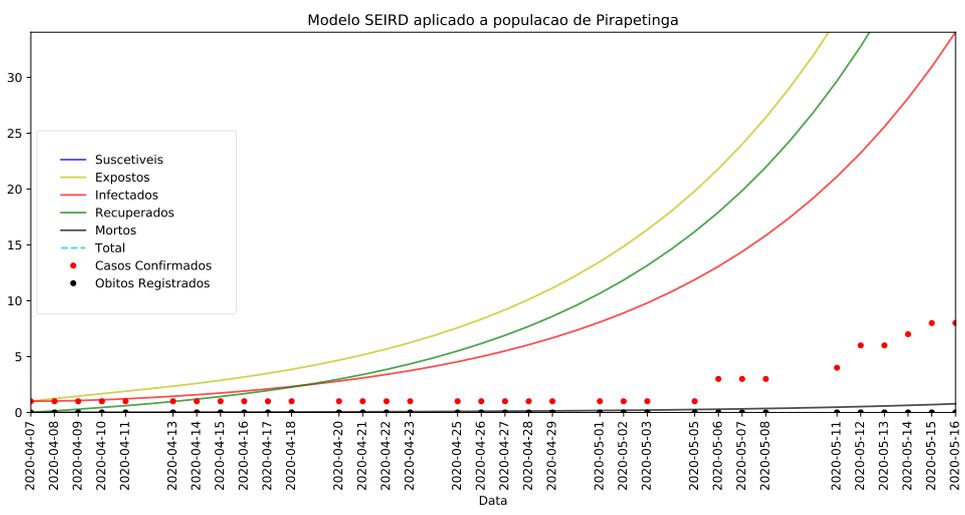


Figura 39: Ampliação da Figura 38.

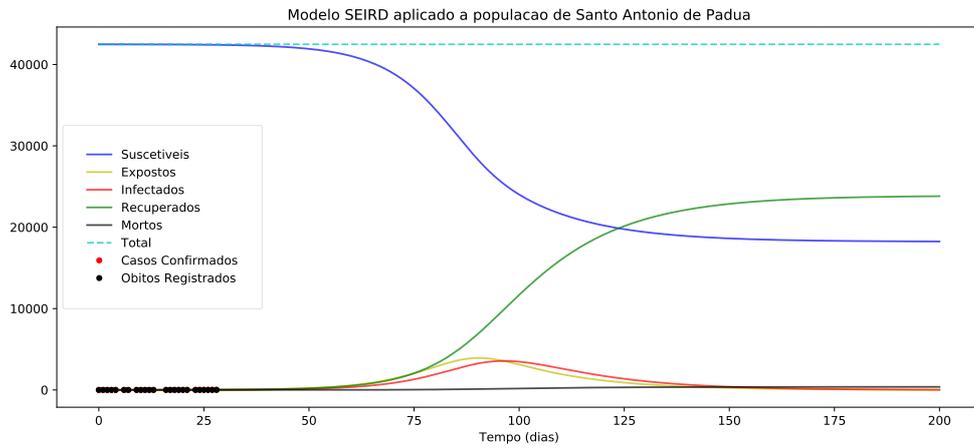


Figura 40: Modelo SEIRD aplicado a uma população equivalente ao município de Santo Antônio de Pádua, sem *lockdown*.

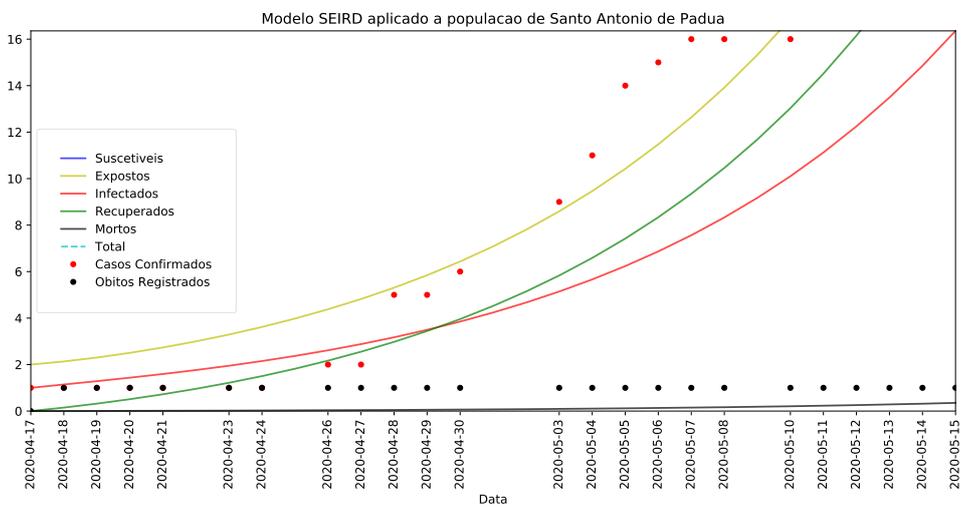


Figura 41: Ampliação da Figura 40.

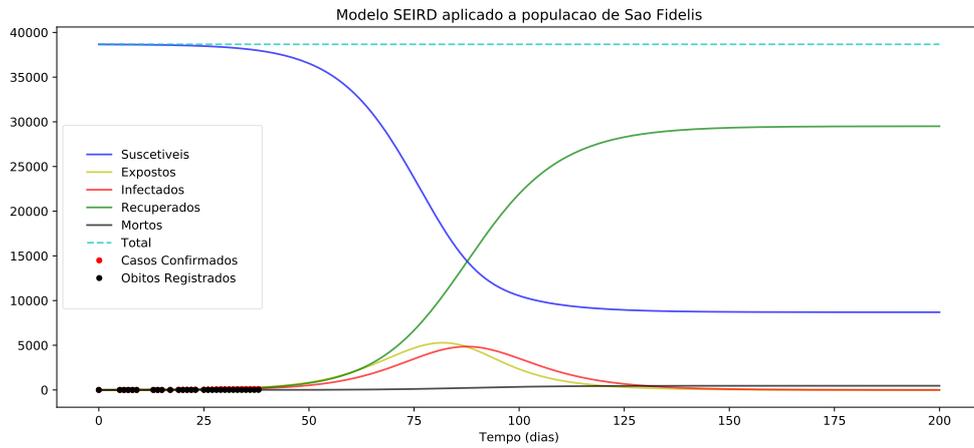


Figura 42: Modelo SEIRD aplicado a uma população equivalente ao município de São Fidélis sem, *lockdown*.

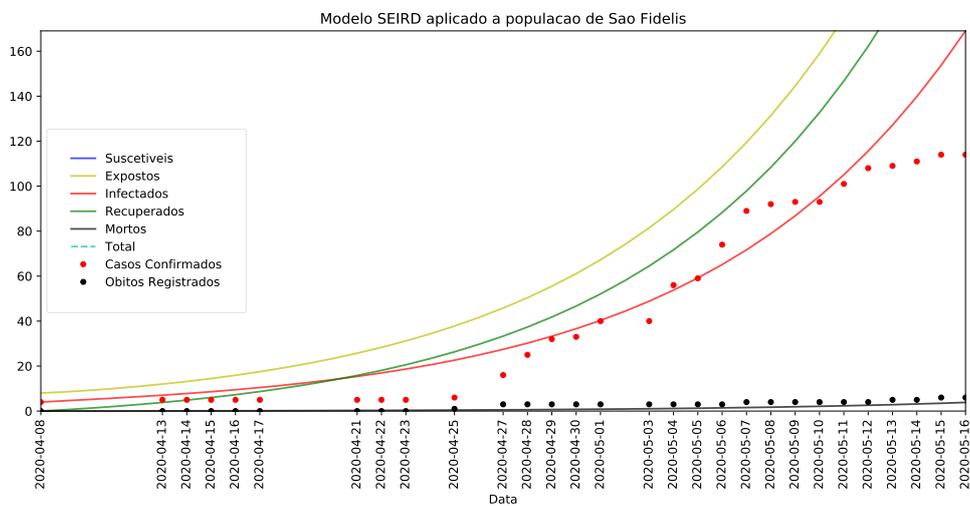


Figura 43: Ampliação da Figura 38.

Município	Pico de infectados	Hospitalizações durante o pico	Nº final de Suscetíveis	Nº final de Recuperados	Nº final de Óbitos
Campos dos Goytacazes	22782	2733	315978	186559	2961
Itaocara	3409	409	2625	20290	322
Itaperuna	3614	433	69771	32445	515
Miracema	2714	325	9701	17187	272
Pirapetinga	111	13	9304	1370	21
Santo Antônio de Pádua	7129	855	4662	37225	590
São Fidélis	4851	582	8696	29505	468

Tabela 12: Projeção de número de infectados durante o pico da epidemia, total de hospitalizações durante o pico da epidemia e números finais de suscetíveis, recuperados e mortos (ao final da epidemia), para o caso sem decretação de *lockdown*.

**É importante enfatizar fortemente que este é um modelo matemático simplista, de caráter meramente pedagógico. Não tem intenção de retratar fielmente todos os compartimentos (grupos de indivíduos) reais durante a epidemia nos municípios previamente analisados neste trabalho. Portanto, pedimos cautela na análise dos números resultantes desse modelo. O objetivo é demonstrar que o *lockdown*, quando aplicado precocemente, reduz drasticamente o número final de infectados e conseqüentemente, reduz o número óbitos.**

#### 5.4 Projeção da epidemia com *lockdown*

Apresentamos a seguir a simulação de evolução epidemiológica utilizando o modelo SEIRD para os municípios analisados, com a aplicação de *lockdown* e iniciando 7 dias a contar da data de publicação do presente documento. Os resultados são apresentados na Tabela 13 e os respectivos gráficos são apresentados nas Figuras 44 até 56.

Município	Pico de infectados	Hospitalizações durante o pico	Nº final de Suscetíveis	Nº final de Recuperados	Nº final de Óbitos
Campos dos Goytacazes	1220	146	489503	17032	270
Itaocara	63	7	22250	946	15
Itaperuna	232	27	99682	3358	53
Miracema	15	1	26914	247	3
Pirapetinga	46	5	10071	651	10
Santo Antônio de Pádua	27	3	42022	434	6
São Fidélis	175	21	36123	2440	38

Tabela 13: Projeção de número de infectados durante o pico da epidemia, total de hospitalizações durante o pico da epidemia e números finais de suscetíveis, recuperados e mortos (ao final da epidemia), para o caso com decretação de *lockdown*.

Destacamos que nesta análise hipotética, com aplicação do modelo SEIRD a conjuntos populacionais equivalentes aos previstos para os municípios analisados anteriormente, é possível notar claramente os efeitos de adoção do *lockdown*, resultando na redução extremamente intensa dos números de infectados e de óbitos. A proporção de redução dos números finais em cada município pode ser vista na Tabela 14.

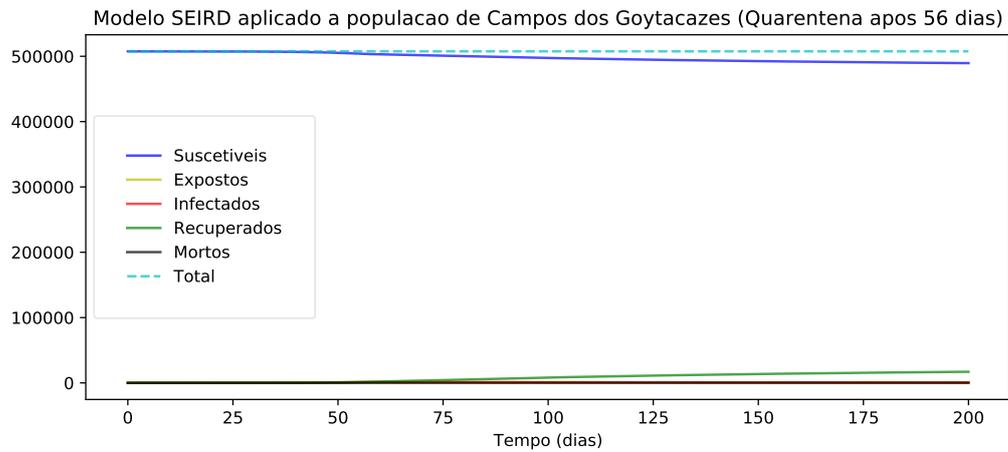


Figura 44: Modelo SEIRD aplicado a uma população equivalente ao município de Campos dos Goytacazes, com *lockdown*.

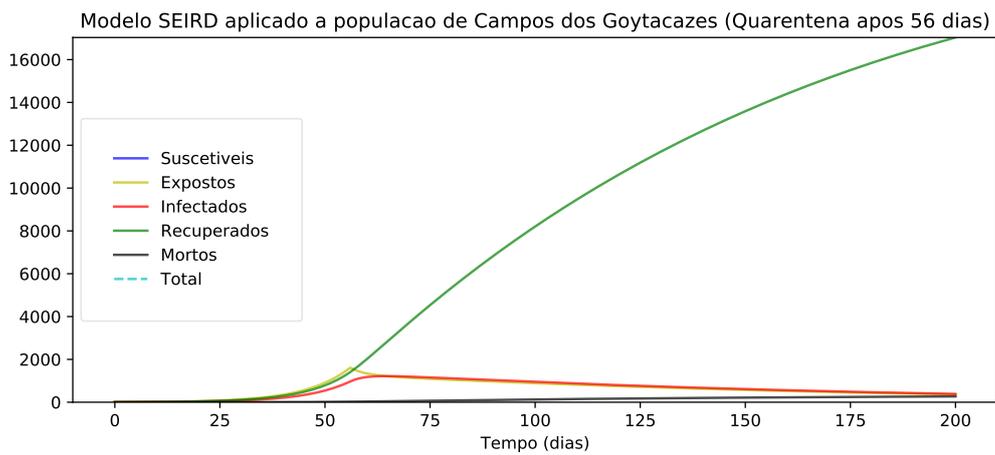


Figura 45: Ampliação da Figura 44.

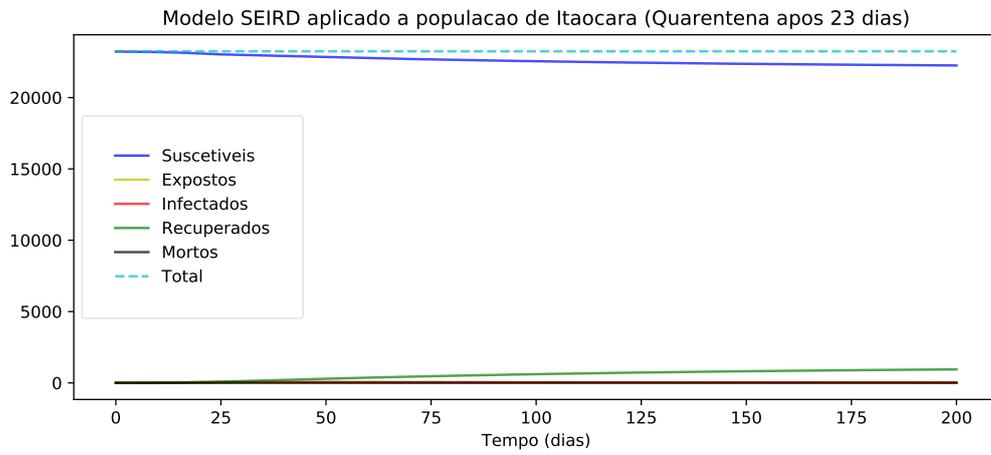


Figura 46: Modelo SEIRD aplicado a uma população equivalente ao município de Itaocara, com *lockdown*.

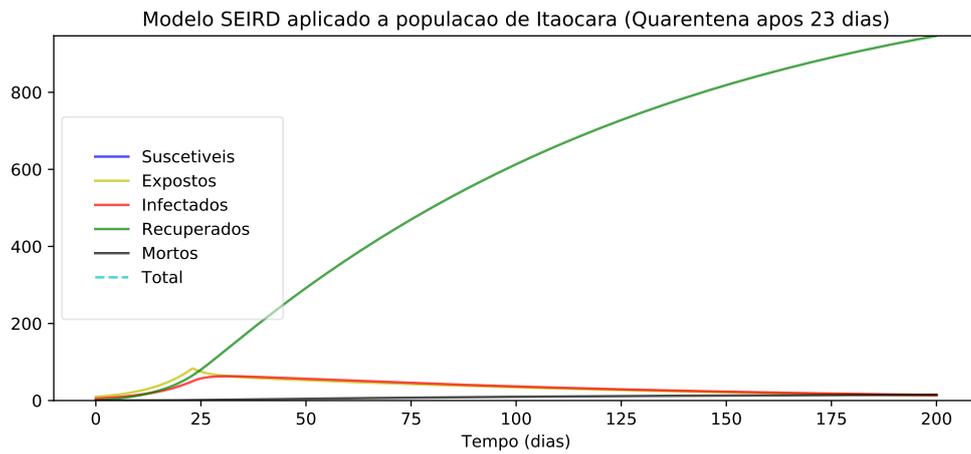


Figura 47: Ampliação da Figura 46.

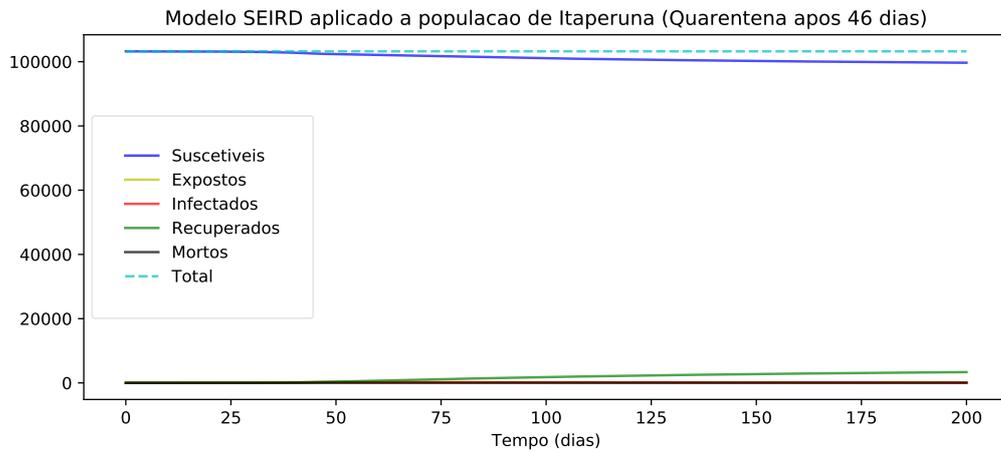


Figura 48: Modelo SEIRD aplicado a uma população equivalente ao município de Itaperuna, com *lockdown*.

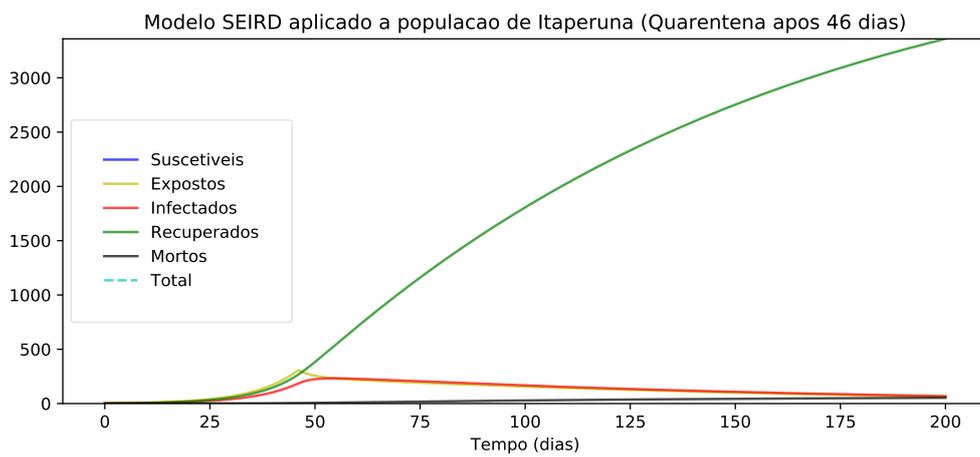


Figura 49: Ampliação da Figura 48.

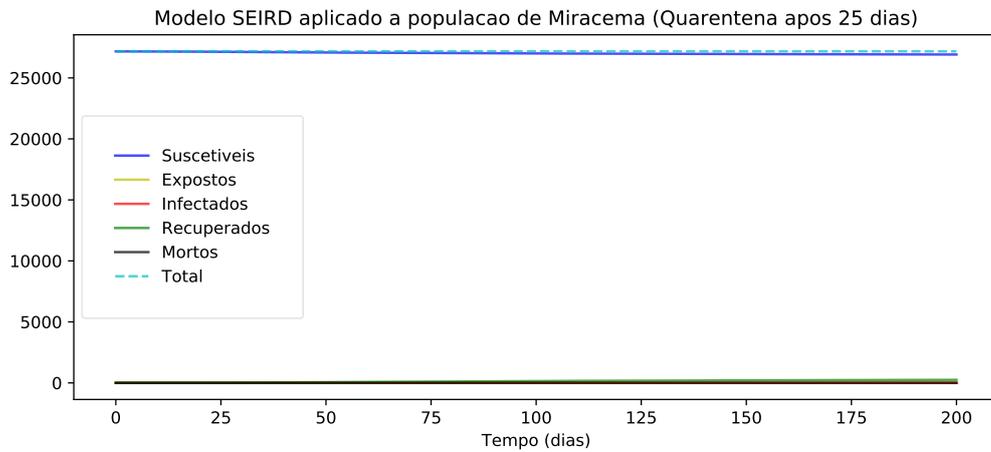


Figura 50: Modelo SEIRD aplicado a uma população equivalente ao município de Miracema, com *lockdown*.

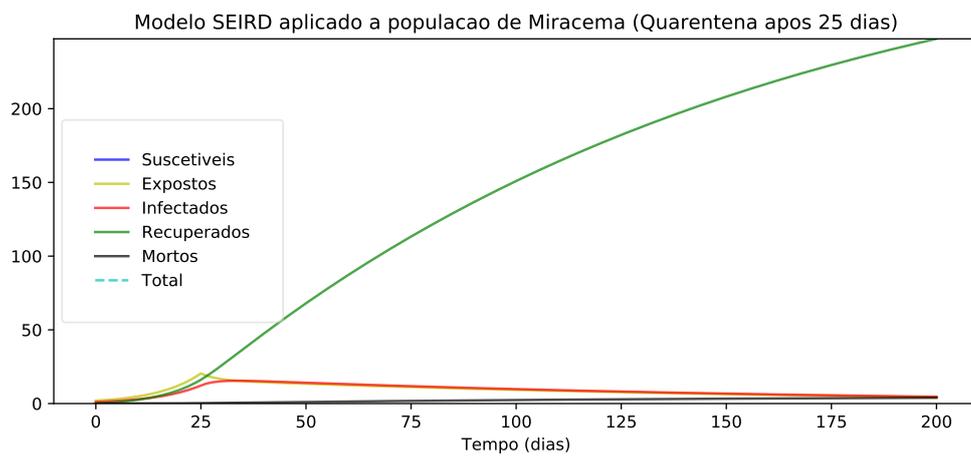


Figura 51: Ampliação da Figura 50.

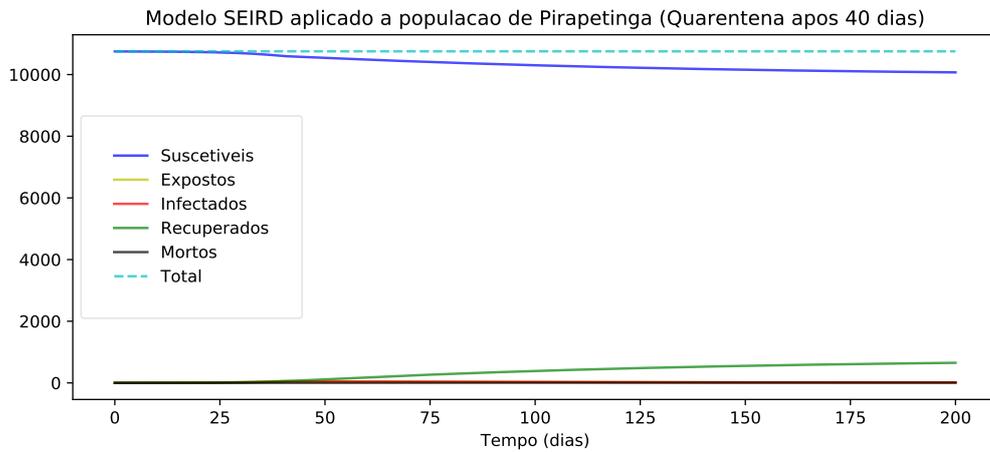


Figura 52: Modelo SEIRD aplicado a uma população equivalente ao município de Pirapetinga, com *lockdown*.

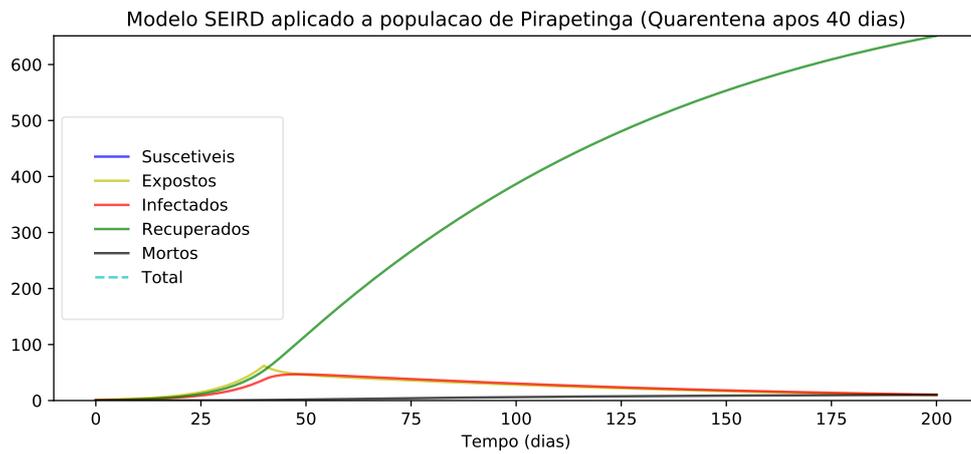


Figura 53: Ampliação da Figura 52.

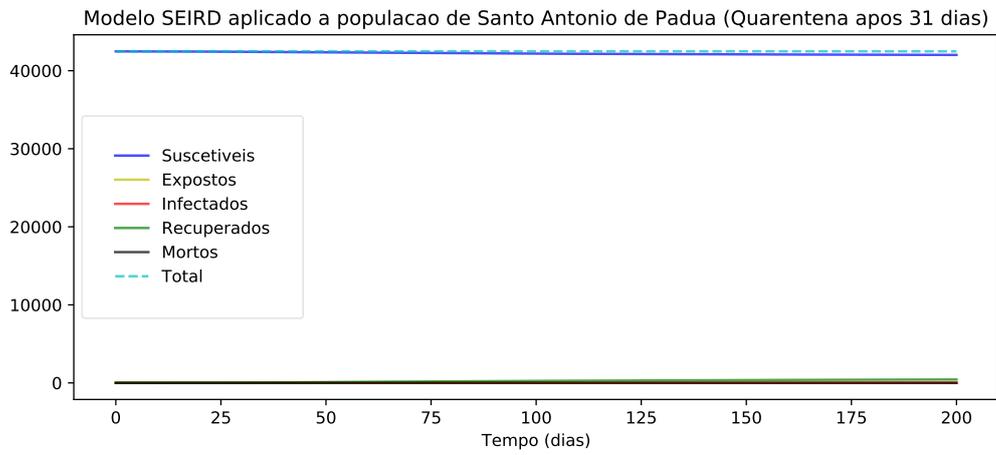


Figura 54: Modelo SEIRD aplicado a uma população equivalente ao município de Santo Antônio de Pádua, com *lockdown*.

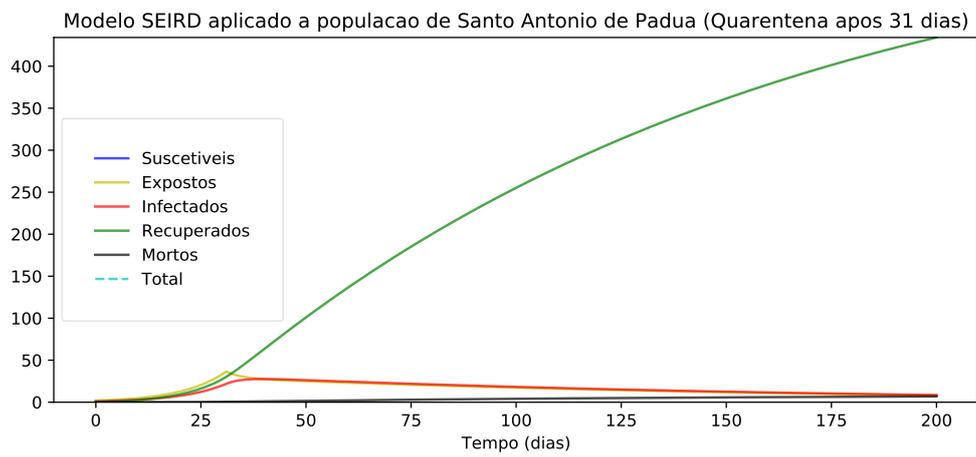


Figura 55: Ampliação da Figura 54.

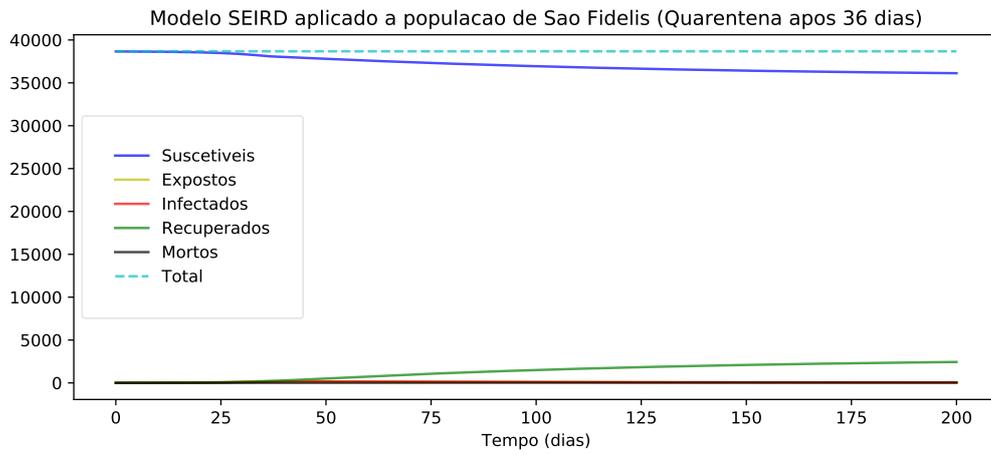


Figura 56: Modelo SEIRD aplicado a uma população equivalente ao município de São Fidélis sem, *lockdown*.

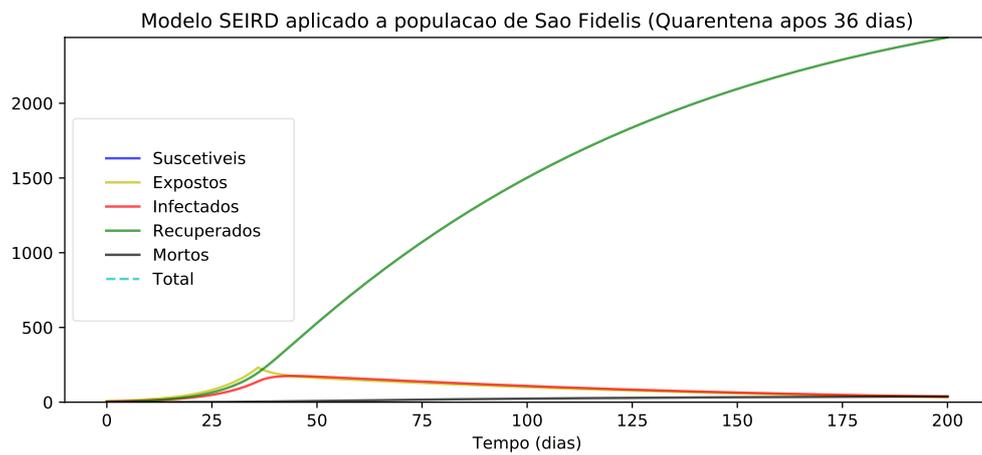


Figura 57: Ampliação da Figura 52.

Município	Redução do Pico de infectados	Redução do Hospitalizações durante o pico	Redução do N° final de Recuperados	Redução do N° final de Óbitos
Campos dos Goytacazes	94,6%	94,7%	90,9%	90,9%
Itaocara	98,2%	98,3%	95,3%	95,3%
Itaperuna	93,6%	93,8%	89,7%	89,7%
Miracema	99,4%	99,7%	98,6%	98,9%
Pirapetinga	58,6%	61,5%	52,5%	52,4%
Santo Antônio de Pádua	99,6%	99,6%	98,8%	99,0%
São Fidélis	96,4%	96,4%	91,7%	91,9%

Tabela 14: Projeção dos percentuais de redução de número de infectados durante o pico da epidemia, total de hospitalizações durante o pico da epidemia e números finais de recuperados e mortos (ao final da epidemia), comparando o caso no qual há decretação de *lockdown* com o caso no qual não há decretação de *lockdown*.

## 6 Conclusões

Neste trabalho, analisamos a evolução epidemiológica de COVID-19 até a presente data (21 de Maio de 2020) nos municípios de Campos dos Goytacazes, Itaocara, Itaperuna, Miracema, Pirapetinga, Santo Antônio de Pádua e São Fidélis. A análise foi realizada de duas formas: (i) através da análise de curvas exponenciais ajustadas aos números cumulativos de casos confirmados da doença em sua fase inicial nestes municípios e, (ii) através da medida do tempo de duplicação de casos em diferentes momentos para cada um dos municípios analisados, onde também analisamos a tendência de variação no tempo de duplicação. Posteriormente fizemos a análise comparativa das curvas exponenciais ajustadas para cada município analisado. Por último, apresentamos o modelo compartimentalizado SEIRD de evolução epidemiológica aplicado a conjuntos populacionais com tamanhos similares aos dos municípios analisados, no intuito de demonstrar que o *lockdown*, quando aplicada precocemente, contribui para reduzir drasticamente os números finais de infectados e óbitos em relação ao cenário sem adoção de *lockdown*. **Não temos expectativa de prever com acurácia o número final de infectados, recuperados e mortos, pois o modelo compartimentalizado SEIRD adotado além de não ser o modelo mais especializado possível para esta finalidade, também depende de parâmetros de entrada mais confiáveis.** Teria sido preferível termos adotado neste trabalho as datas de primeiros sintomas ou de realização dos testes (sorológico ou SWAP), mas infelizmente ainda não temos acesso a estes dados.

Nos ajustes de curvas exponenciais realizados sobre os números de casos confirmados registramos que Santo Antônio de Pádua e Pirapetinga apresentam os maiores coeficientes (B) nos expoentes das funções exponenciais. Isso indica crescimento mais rápido no número de casos em relação aos demais municípios e não indica que os dois municípios neste momento tenham o maior número de casos confirmados. Demonstramos que em ordem decrescente os municípios de Itaperuna, Miracema e São Fidélis apresentam tempo de duplicação próximo a 10 dias, o que sugere melhor perspectiva de aumento mais lento nos próximos dias. Os municípios de Campos dos Goytacazes e Itaocara apresentam na presente data valores intermediários de tempo de duplicação, em torno de 8,8 dias. Já os municípios de Pirapetinga e Santo Antônio de Pádua apresentam tempos de duplicação de casos confirmados em torno de 7,2 dias. É desejável que todos os municípios busquem estratégias de prevenção à disseminação de COVID-19

que ajudem a alcançar patamares superiores a 10 dias para o tempo de duplicação de casos confirmados.

Os municípios de Campos dos Goytacazes, Santo Antônio de Pádua e Itaperuna apresentam estabilidade nas medidas de tempo de duplicação. O município de Pirapetinga apresenta forte tendência de queda no tempo de duplicação de casos confirmados. Os demais municípios apresentam tendência de elevação nos seus respectivos tempo de duplicação. Analisamos também a incidência da COVID-19 sobre as populações dos municípios analisados e destacamos os municípios de Itaocara e São Fidélis pelos números mais elevados comparativamente aos demais municípios.

Ao aplicarmos o modelo compartimentalizado SEIRD em distribuições populacionais similares àquelas projetadas para os municípios analisados no ano de 2019, vemos que há correlação entre os números projetados pelo modelo e os números observados, tanto no caso de teste comparando com os parâmetros de Wuhan (China) quanto com as quantidades de casos confirmados observados nos municípios analisados. No entanto, não temos meios de avaliar o grau de precisão ou de erro nos números resultantes do modelo. A finalidade da aplicação, como dito repetidas vezes no trabalho, é demonstrar a eficácia de um *lockdown* adotada precocemente na redução dos números finais da epidemia frente às projeções sem aplicação de *lockdown*. Um fator que limita as conclusões do modelo SEIRD é o fato de adotarmos datas de divulgação de boletins epidemiológicos ao invés de datas de primeiros sintomas ou datas de coletas de material para exames (sorológicos ou SWAP). Apesar de não termos como precisar a acurácia dos resultados do modelo SEIRD, vemos que o erro não se dá por muitas ordens de grandeza. Pelo contrário, o modelo SEIRD adotado ajuda a entender a evolução da epidemia, se não quantitativamente, mas com certeza, qualitativamente. De qualquer forma, independentemente da acurácia do modelo de dinâmica epidemiológica adotado, precisamos destacar que o pico de infectados e toda a dinâmica será retardada em relação às capitais e aos grandes centros urbanos do país. O pico nas cidades do interior do país ainda está distante de ser alcançado.

Por todas as discussões aqui apresentadas, registramos um alerta final para os municípios de São Fidélis, Pirapetinga e Santo Antônio de Pádua, para que seus gestores avaliem os números aqui apresentados. Esperamos ter contribuído com este documento e planejamos novas análises em breve. Nos colocamos à disposição para sanar eventuais dúvidas ou para trocar experiências e análises.

## 7 Agradecimentos

Gostaria de agradecer aos colegas que contribuíram com coleta de dados, discussões e sugestões, a Profa. Dra. Nicole Brand Ederli, o Prof. Dr. Cleber de Almeida Correa Junior, ambos do Instituto do Noroeste Fluminense de Educação Superior da UFF e ao Prof. Dr. Marcelo Ferreira da Costa Gomes, do Instituto Oswaldo Cruz (IOC/FIOCRUZ).

## Referências

- [1] Painel COVID da Secretaria Estadual da Saúde/RJ. Disponível em <http://painel.saude.rj.gov.br/>. Acesso em 10/05/2020.
- [2] Instituto do Noroeste Fluminense de Educação Superior (INFES/UFF). Disponível em <http://infes.uff.br>. Acesso em 17/05/2020.
- [3] DATA.RIO. Disponível em <http://www.data.rio/app/painel-rio-covid-19>. Acesso em 15/05/2020
- [4] Worldometers. Disponível em <https://www.worldometers.info/coronavirus/>. Acesso em 19/05/2020.
- [5] DATASUS. Disponível em <https://datasus.saude.gov.br/populacao-residente/>. Acesso em 13/05/2020.
- [6] Brauer, Fred; van den Driessche, Pauline; Wu, J. **Mathematical Epidemiology**. Berlin: Springer-Verlag, 2008.
- [7] Froese, Henri. **Infectious Disease Modelling: Beyond the Basic SIR Model**. Disponível em <https://towardsdatascience.com/infectious-disease-modelling-beyond-the-basic-sir-model-216369c584c4>. Acesso em 02/05/2020.
- [8] McFall-Johnsen, Morgan; Mahbubani, Rhea; Bendix, Aria. 32 questions about the coronavirus, answered — from how long patients are contagious to the potential for immunity after recovery. **Business Insider**, 22/04/2020, 2:58 PM. Disponível em <https://www.businessinsider.com/coronavirus-cases-maps-us-world-spread-symptoms-death-rate-2020-1>. Acesso em 14/05/2020.
- [9] Pickrell; Ryan. Wuhan abruptly increased its coronavirus death toll to 50% higher than previously reported. **Business Insider**, 17/04/2020, 1:53 PM. Disponível em <https://www.businessinsider.com/coronavirus-wuhan-china-abruptly-increases-death-toll-by-50-2020-4>. Acesso em 14/05/2020.
- [10] Wuhan faz revisão e informa 50% de mortes a mais por coronavírus. **Univeros On-Line, UOL**, 17/04/2020 06h28, Disponível em <https://noticias.uol.com.br/internacional/ultimas-noticias/2020/04/17/apos-revisao-wuhan-informa-50-mortes-a-mais-por-covid-19-china-tem-4632.htm>. Acesso em 14/05/2020.