

# **Relatório Mensal do Grupo de Modelos Matemáticos para COVID-19, N°1.**

**Sergio Floquet e Telio Leite** | Colegiado Acadêmico de Engenharia Civil - UNIVASF

**Rômulo Câmara** | Colegiado Acadêmico de Engenharia da Computação - UNIVASF

**Denisson Leal** | Programa de Pós Graduação de Ciências da Saúde e Biológicas - UNIVASF

**Aristóteles Cardona** | Colegiado Acadêmico de Medicina/Petrolina - UNIVASF

**Alison Melo** | Colegiado Acadêmico de Administração - UNIVASF

**Paulo de Carvalho** | Colegiado Acadêmico de Engenharia Agrícola e Ambiental - UNIVASF

**Paulo Pereira** | Colegiado Acadêmico de Engenharia de Produção - UNIVASF

## **Sobre o GMC-VASF:**

O Grupo de Modelos Matemáticos para COVID-19 do Vale do São Francisco (GMC-VASF) é um grupo multidisciplinar de pesquisadores da Univasf reunidos para analisar, por meio de modelos epidemiológicos e técnicas estatísticas, a evolução da pandemia de COVID-19 nas cidades de Petrolina-PE e Juazeiro-BA.

## **Do que trata este relatório:**

O relatório mensal do GMC-VASF sobre COVID-19 é um documento de caráter informativo. Ele busca concatenar os boletins semanais publicados no mês anterior com estimativas ainda não publicadas pelo grupo. Trataremos do número de casos confirmados, mortes, ponto de inflexão e índices de transmissividade da COVID-19 de acordo com diferentes modelos epidemiológicos.

Neste relatório não apresentamos análises de longo prazo para a evolução da pandemia de COVID-19 em Petrolina e Juazeiro pois os modelos ainda não estão mostrando um bom ajuste para este tipo de previsão. Porém, acrescentamos a este relatório uma análise estatística da disseminação da doença nos bairros das duas cidades.

Começamos com um rápido panorama da evolução da pandemia no país. Por fim, como apêndice apresentamos um breve comentário sobre modelos matemáticos e algumas técnicas matemáticas e estatísticas aplicadas pelo GMC-VASF.

## **1. Introdução**

A atual pandemia de COVID-19 teve início em Wuhan na China em dezembro de 2019 segundo a OMS (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2020) e se espalhou por diversos países em todos os continentes. Esta doença é causada pelo vírus SARS-CoV-2. Neste final de junho de 2020 a COVID-19 já acometeu mais de dez milhões de pessoas no mundo e causou mais de quinhentas mil mortes segundo o *CORONA virus situation report* da OMS (WHO, 2020).

O primeiro caso confirmado de COVID-19 do Brasil ocorreu em São Paulo no final de fevereiro de 2020. Passados quatro meses, o país acumula mais de 1 milhão e 300 mil casos confirmados e mais de 57 mil mortes, segundo o Ministério da saúde (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2020).

Observando os fatos em retrospectiva, ficou bastante claro que inicialmente várias autoridades sanitárias e políticas do ocidente subestimaram a gravidade da pandemia. A própria OMS só veio reconhecer oficialmente a situação de pandemia no dia 12 de março. No Brasil não foi diferente, somente após a OMS decretar a situação de pandemia é que Ministério da Saúde, governadores e prefeitos passaram a orientar e adotar medidas mais efetivas com relação ao distanciamento social, porém sem critérios técnicos unificados e sem estabelecer, ainda no mês de março, uma política nacional coordenada de combate à pandemia no país.

Tensões políticas entre os entes federativos e próprio Congresso Nacional, levou o Supremo Tribunal Federal no dia 15 de abril a reconhecer o direito dos governadores e prefeitos para adotar medidas mais restritivas em relação ao distanciamento social com finalidade sanitária. A situação foi agravada pelo baixo nível de testagem no país, em parte devido à dificuldade de conseguir insumos no mercado global.

Hoje vemos diferentes regiões do país com diferentes níveis de controle sobre a propagação da doença. Na cidade de São Paulo (mais de 7 mil novos casos em 28/06), por exemplo, implementa uma política gradual de reabertura criticada por especialistas que apontam que acarretará aumento da taxa de crescimento do número de casos. Já Blumenau-SC viu o número de casos diários crescer 34% no final de junho, tendo reaberto seu comércio em abril.

O *contágio* da COVID-19 ocorre quando uma pessoa saudável entra em contato com gotículas contaminadas expelidas pela boca ou nariz de uma pessoa doente. Estas gotículas ficam pouco tempo em suspensão no ar, podendo ser inadvertidamente inaladas iniciando a infecção. Quando as gotículas caem sobre objetos, eles podem ficar contaminados por alguns dias. Uma pessoa pode ser infectada ao tocar objetos contaminados e levar as mãos à boca, nariz ou olhos.

Assim, o contágio pode ser evitado por meio do uso de máscaras, que bloqueiam parte das gotículas, e com a frequente higienização das mãos, lavando com água e sabonete ou pelo uso de álcool 70%, que eliminam o vírus (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2020). Depois de infectado, passam-se de 1 a 14 dias até a manifestação dos sintomas (*incubação*), também segundo a página da OMS.

## **2. COVID-19 em Petrolina e Juazeiro.**

No dia 23 de março foram confirmados os primeiros casos de COVID-19 nas cidades de Petrolina e Juazeiro, sendo um caso em cada cidade. Considerando que não há vacina para a doença, o isolamento social é o principal instrumento de controle da pandemia. Por isso, abaixo fazemos uma breve exposição sobre decretos municipais que se referem a medidas de isolamento ou distanciamento social emitidos pelas duas prefeituras no contexto da pandemia de COVID-19.

### **2.1. Enfrentamento à COVID-19 em Petrolina.**

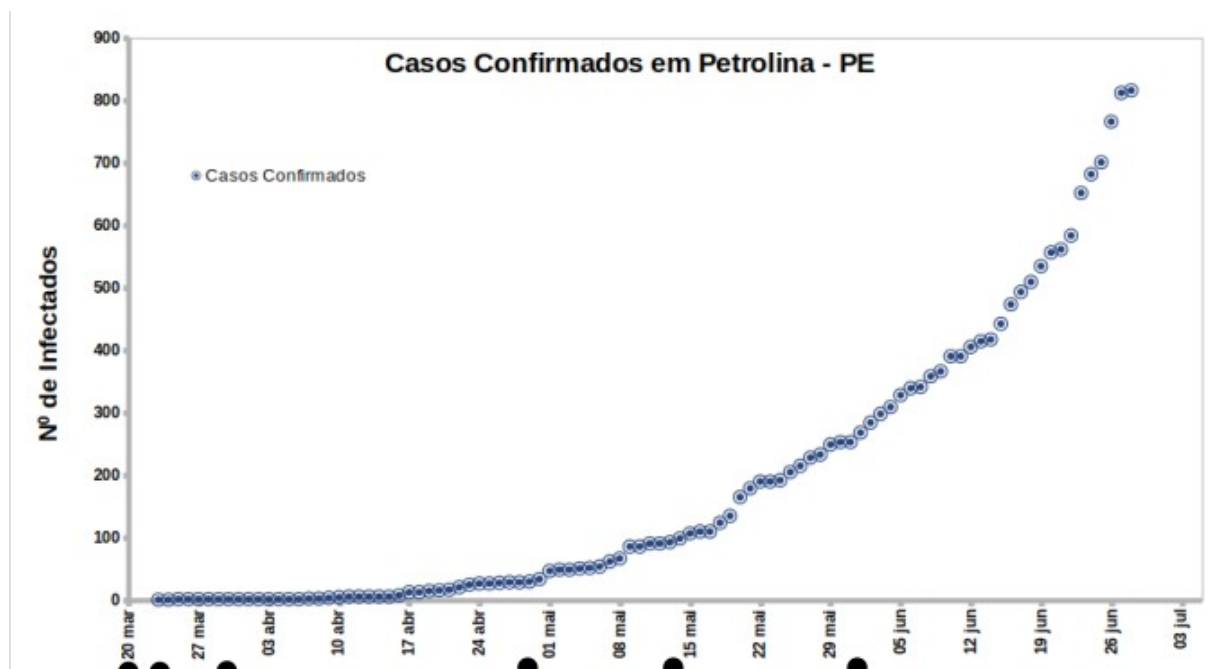
Entre o começo de março e o final de maio a prefeitura de Petrolina emitiu ao menos nove decretos que tratam direta ou indiretamente de medidas de distanciamento social no combate à pandemia. Por exemplo, no dia 14 de março o Decreto Nº11 estabelece a suspensão de eventos com mais de 100 pessoas.

Três dias depois o Decreto Nº12 estabeleceu o estado de emergência de saúde pública. Este decreto suspendeu aulas e trazia recomendações de suspensão de diversas atividades de comércio. No dia 18 de março outro decreto recomendava a suspensão do funcionamento do Shopping e feiras livres e restringia o número de pessoas em supermercados a cinquenta por vez.

Porém, a partir do final de março, com o decreto de número 37/2020, a prefeitura adotou medidas de afrouxamento do isolamento social. Na segunda metade de junho a mídia noticiou um imbróglgio jurídico decorrente do referido decreto, com a concessão de liminar a pedido do MPPE, que impedia a realização do plano de reabertura do comércio. No dia seguinte, o decreto estadual 49131/20 permitiu que a prefeitura procedesse à reabertura, segundo nota do Sindilojas Petrolina.

Na **Figura 1**, é apresentado um infográfico que mostra alguns decretos municipais nos diferentes momentos da pandemia. Estes decretos estão ordenados de acordo com a sua data de publicação no diário oficial. Vemos que no final de março, antes mesmo do primeiro caso confirmado, a prefeitura já tomava medidas para estimular o distanciamento social. Em contrapartida, observe que no dia 01 de junho o gráfico apresenta concavidade para cima, o que indica que os casos de COVID-19 cresciam de forma acelerada no município. Tal período coincide com a reabertura do comércio e dos serviços não essenciais.

**Figura 1: Alguns decretos de Petrolina e a evolução do COVID-19 no município.**



**Dias 17/03 e 18/3**

O decretos Nº 11,12 e 13 declaram estado de emergência e suspende aulas. Recomendações de fechamento do comércio e Shopping e suspensão de feiras livres.

**Dias 20/03 e 23/03**

O decreto Nº 17 proíbe visitas recreativas às ilhas. O decretos Nº 18 visa diminuir lotação em transporte público.

**Dia 24/03**

Decretado estado de Calamidade pública. Decreto Nº20. Então Petrolina tinha 1 caso confirmado e zero

**Dia 01/06**

O decreto Nº 37 cria um plano de reabertura gradual do comércio que se inicia nesta data.

**Dias 30/04 e 11/05**

Os decreto Nº 30 libera o funcionamento de feiras públicas com restrições. O decreto Nº 34 estabelece protocolos sanitários para estes serviços.

**Dia 30/03**

O decreto Nº 22 estabelece que cidadãos vindo do exterior devem fazer quarentena.

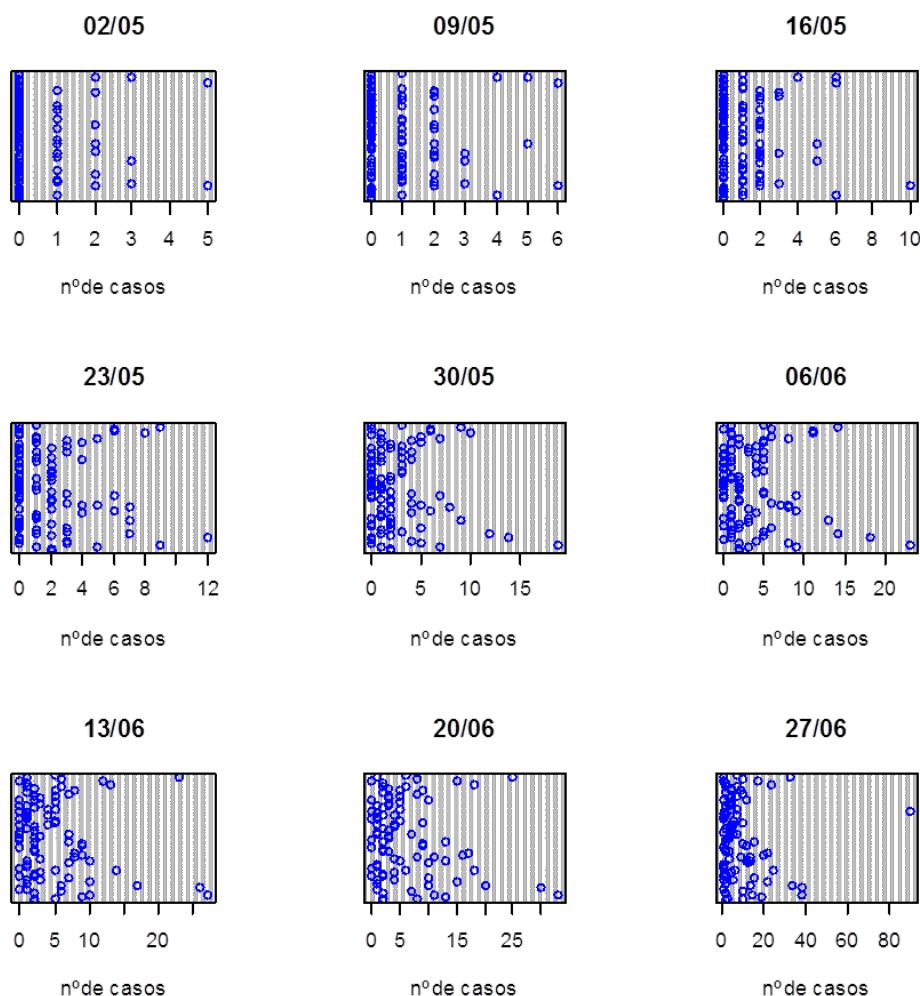
## 2.2. Evolução dos números da COVID-19 nos bairros de Petrolina

Nesta seção trataremos da evolução dos números de casos da Covid-19 no município de Petrolina ao longo dos meses de maio e junho. A Figura 2 abaixo mostra claramente a evolução dos números de casos da Covid-19 no município de Petrolina ao longo dos meses de maio e junho. Das 94 localidades investigadas foi possível identificar que na primeira data, dois de maio, Petrolina apresentava 28 localidades com casos confirmados com a doença e ao final do mês de junho todas apresentaram pelo um caso confirmado da doença.

Cada círculo azul representa um bairro de Petrolina. Vemos que no dia 02 de maio (primeiro quadrinho), temos muitos círculos situados sobre o número 0 e poucos círculos na região à direita do número 3. Isto indica que em 02 de maio existiam ainda muitos bairros sem casos confirmados de COVID-19 e poucos bairros com mais de três casos.

O aumento do número de casos, que era de 49 no começo de maio e passou a 881 nos últimos dias de junho, foi acompanhado com o aumento de localidades que apresentaram moradores infectados. Isso evidencia que a doença está disseminada em todas as regiões da cidade.

**Figura 2 : Numero de casos de Covid-19 nos bairros de Petrolina-PE (02/05 a 27/06/2020)**



Fonte: Secretaria de Saúde de Petrolina-PE e GPDIN-UNIVASF

Focalizando a análise no mês de junho foi possível identificar, por meio da Figura 5 e Quadro 1 abaixo, como se dá a localização e a dispersão dos dados nas diferentes datas analisadas. Nas três primeiras datas, 05, 06 e 13 de junho, há ainda, dentre os bairros investigados, locais sem casos confirmados. É percebido um aumento no número médio de casos, de 3,6 para 5,8 caso por

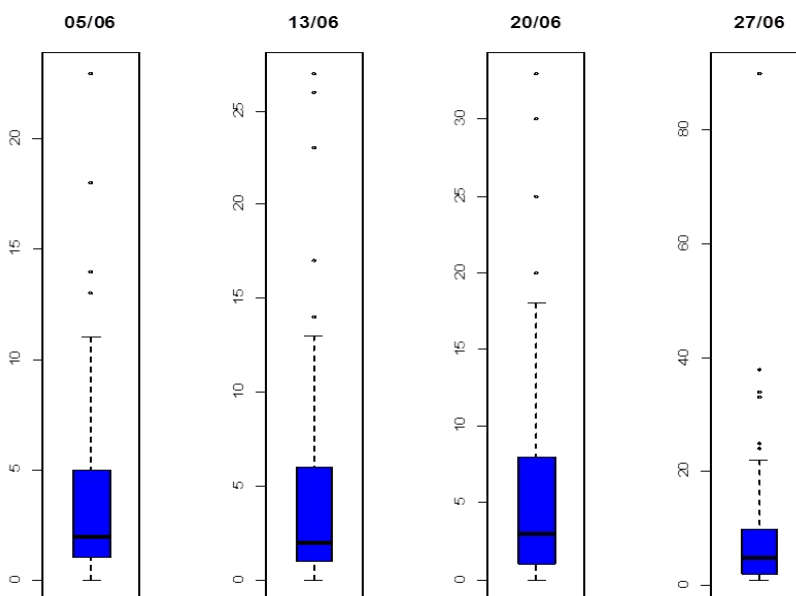
bairro e também uma mudança no terceiro quartil, que passa de 5 para 8 casos por bairro. Nestas três datas os bairros Areia Branca , Centro, Cohab Massangano, Vila Mocó, Gersino Coelho e Vila Eduardo são os locais com os maiores quantitativos e isto reflete nos “outliers” que surgem nos boxplot’s apresentados na Figura 3 abaixo.

A última data analisada no mês de junho apresenta um crescimento importante nas medidas encontradas. O primeiro quartil, pela primeira vez, atinge o valor dois. O número mediano de casos, que até a semana anterior não passava de três casos por bairro, agora é de cinco casos por bairro. O número médio atinge oito casos por bairro e o terceiro quartil agora é de dez casos. A inclusão dos resultados do Presídio Dr. Edvaldo Gomes, que aparece pela primeira vez com um quantitativo na análise dos dados afeta o número de casos já que ele passa ser o local com maior número de casos, com 90, o que representa um número maior que a soma dos locais que estão respectivamente na segunda e terceira colocação, Areia Branca e Centro, com 38 casos cada um. Essas três localidades, somadas à Cohab Massangano, com 34 casos, Vila Mocó, com 33 casos, Gersino Coelho com 25 casos e Vila Eduardo com 24 casos representam aproximadamente 34,8% dos casos confirmados.

**Quadro 1: Medidas descritivas para o número de casos de Covid-19 em diferentes datas nos bairros do município de Petrolina-PE**

Data	Mínimo	1º Quartil	Mediana	Média	3º Quartil	Máximo
05/06	0	1	2	3,6	5	23
13/06	0	1	2	4,4	6	27
20/06	0	1,25	3	5,8	8	33
27/06	1	2	5	8,6	10	90

**Figura 3: Boxplot’s dos números de casos de Covid-19 nos bairros de Petrolina-PE**

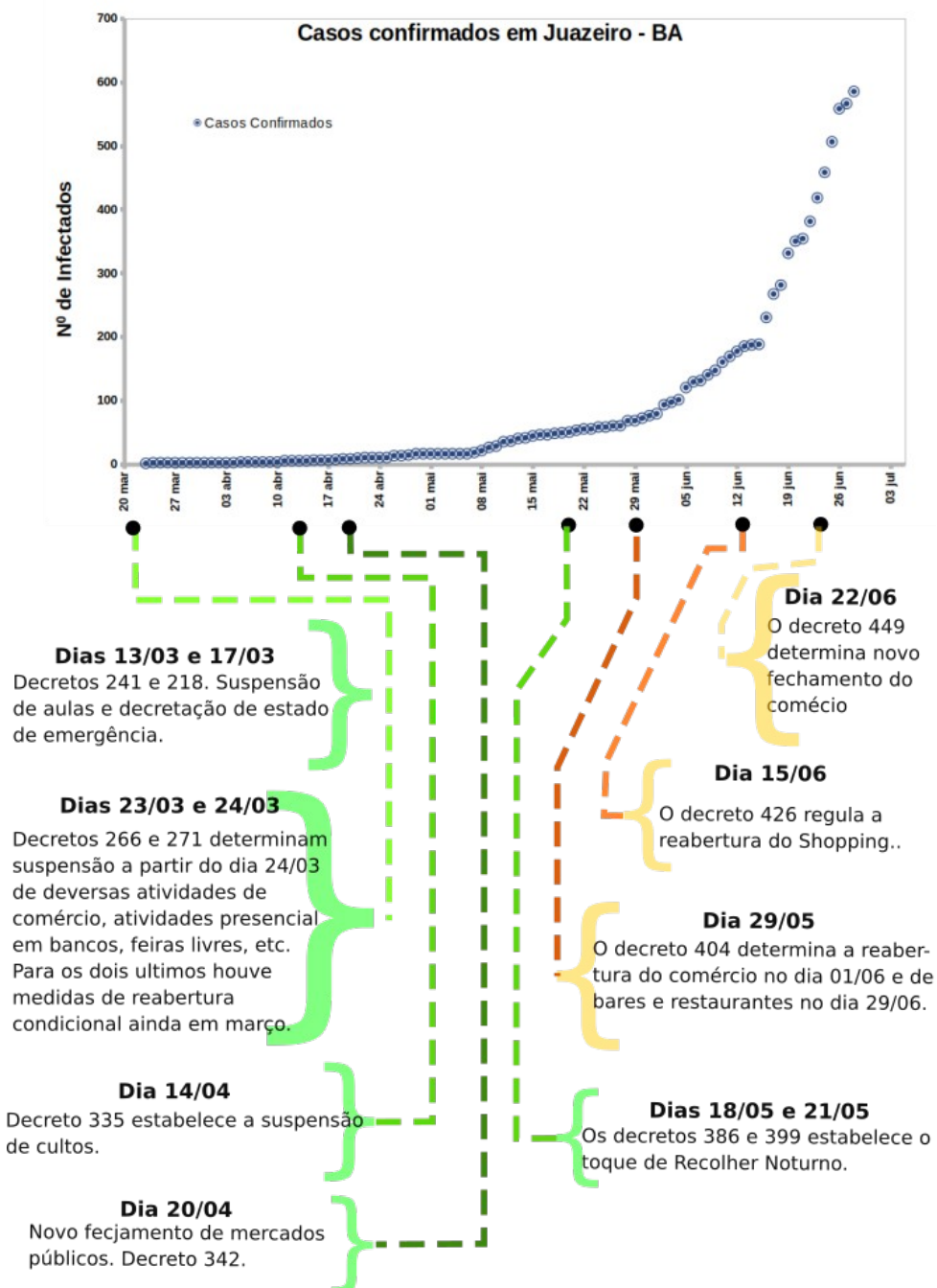


### 2.3. Enfrentamento à COVID-19 em Juazeiro.

Juazeiro começou a tomar medidas sanitárias preventivas ainda no começo de março. Já no dia 13, foi decretada a suspensão das aulas em escolas do município. Isto ocorreu não só pela pandemia de COVID-19, mas também pela ocorrência de casos suspeitos de H1N1. No dia 23 de março, quando a cidade tinha seu primeiro caso confirmado, foi decretado o fechamento do comércio.

Observa-se que de março a maio os decretos demonstram, em geral, uma política que favorece o distanciamento e o isolamento social. No final de maio, dia 29, o decreto número 404/2020 libera a reabertura do comércio de forma controlada. O aumento no número de casos levou a prefeitura a novamente decretar o fechamento do comércio em 22 de junho. Na **Figura 4** temos um infográfico com alguns decretos emitidos pela prefeitura de Juazeiro a medida que a COVID-19 se disseminava.

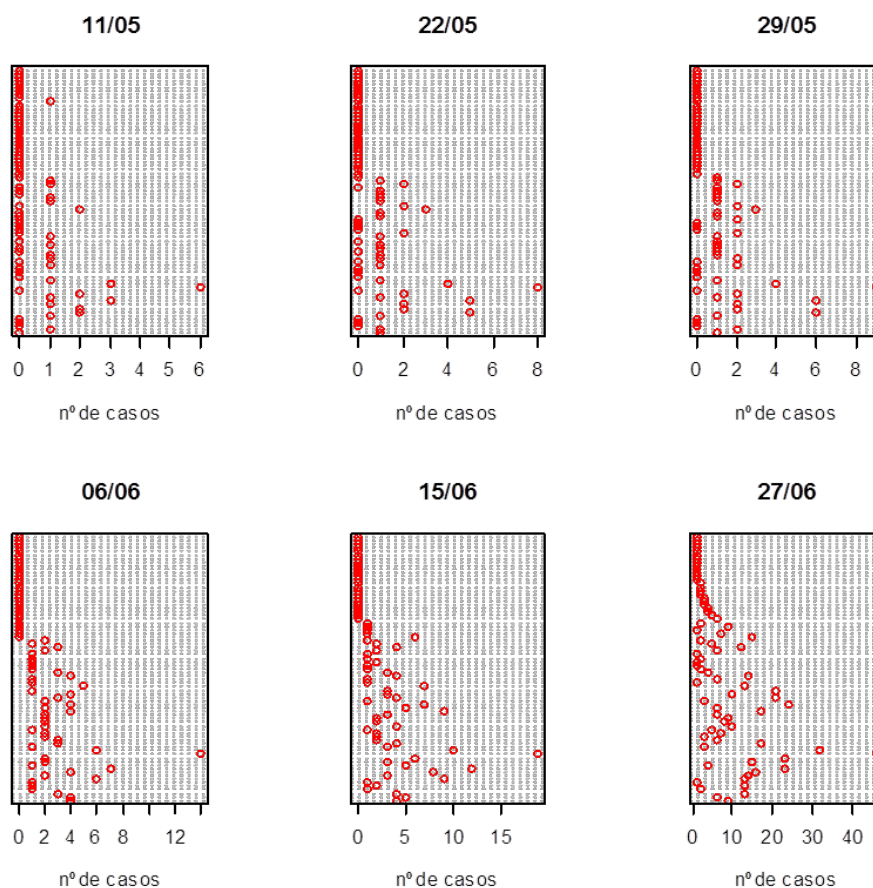
**Figura 4: Alguns decretos de Juazeiro e a evolução do COVID-19 no município.**



## 2.4. Evolução dos números da COVID-19 nos bairros de Juazeiro.

No caso do município de Juazeiro, o período analisado foi de 11 de maio a 27 de junho em 76 localidades. Em Juazeiro houve, em determinadas datas, a falta da informação de alguns dos bairros, o que fez com repetíssemos o valor encontrado na data anterior. Os casos confirmados passaram, no período, de 35 para aproximadamente 560 no total. Na primeira data foram encontradas vinte duas localidades com casos confirmados e já no final do período, todas as localidades investigadas possuíam pelo menos um caso confirmado de Covid-19. A Figura 5 abaixo apresenta o mesmo comportamento identificado em Petrolina, ou seja, o crescimento do número de casos confirmados, apesar de um pouco mais lento que a cidade vizinha, acompanhado pelo aumento de localidades que possuem casos da doença. Cada círculo vermelho representa um bairro. Vemos que no dia 11 de maio (primeiro quadrinho), temos muitos círculos situados sobre o número 0 e apenas um círculo na região à direita do número 3. Isto indica que em 11 de maio muitos bairros não apresentavam casos confirmados de COVID-19, fato que se alterou consideravelmente ao longo das semanas.

**Figura 5: Numero de casos de Covid-19 nos bairros de Juazeiro-BA (11/05 a 27/06/2020)**



Fonte: Secretaria de Saúde de Juazeiro-BA e GPDIN-UNIVASF

Com relação às medidas de localização e tendência central, que podem ser observadas no Quadro 2 e na Figura 6 abaixo, é possível notar que, da mesma maneira que ocorreu em Petrolina, há um crescimento mais importante na data de 27 de junho. Nesta data, todas as localidades investigadas apresentam pelo menos um caso confirmado. O número mediano de casos passa ser quatro e a média de ocorrências que estava em 2,5 casos atinge o patamar de aproximadamente 7,4.

Outra medida que reflete este crescimento é o terceiro quartil, que apresenta um valor até superior ao encontrado em Petrolina na mesma data. Temos assim, que pelo menos 25% dos bairros

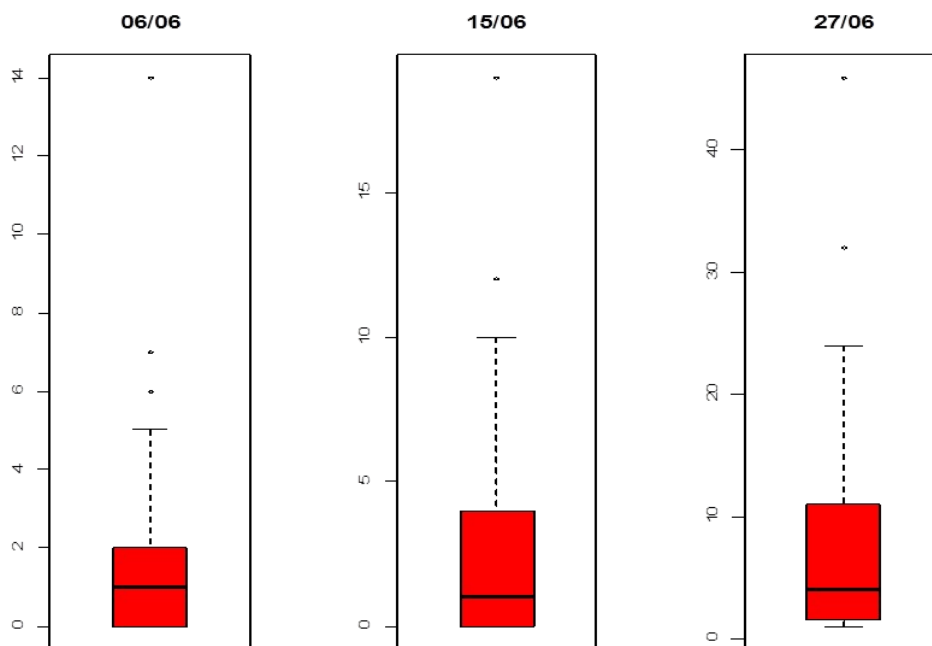


têm no mínimo 11 casos. Bairros como Santo Antônio, Piranga, Maringá, Centro são os que apresentam os quantitativos maiores nas duas primeiras datas. No dia 27 de junho o Santo Antônio e Centro passam a apresentar números bem maiores que os outros dois bairros, com 46 e 32 casos respectivamente. É nesta data também que outros bairros começam a aparecer com números importantes de infectados, como por exemplo, Alagadiço, Coréia, Dom Thomaz, São Geraldo, Alto da Aliança, Itaberaba, Jardim Flórida, Alto da Maravilha e Tabuleiro, Jardim Vitória e João Paulo II. Todos os casos desses bairros mencionados anteriormente correspondem a aproximadamente 53% dos casos confirmados no município em 27 de junho e todos eles tem no mínimo o maior quantitativo registrado no dia 06 de junho, a primeira data avaliada.

**Quadro 2: Medidas descritivas para o número de casos de Covid-19 em diferentes datas nos bairros do município de Juazeiro-BA**

Data	Mínimo	1º Quartil	Mediana	Média	3º Quartil	Máximo
06/06	0	0	1	1,67	2	14
15/06	0	0	1	2,53	4	19
27/06	1	1,5	4	7,45	11	46

**Figura 6: Boxplot's dos números de casos de Covid-19 nos bairros de Juazeiro-BA**



Fonte: Secretaria de Saúde de Juazeiro-BA e GPDIN-UNIVASF

### 3. Análise dos boletins junho de 2020:

#### 3.1. Introdução.

Os boletins semanais do GMC-VASF trazem estimativas obtidas por meio de modelos matemáticos que são ajustados aos dados ( casos confirmados e mortes) do Report sobre COVID-19 (FACAPE) e em dados da Secretaria de Saúde de Juazeiro. Modelos matemáticos são equações matemáticas usadas para descrever a evolução da doença com o passar do tempo.

O leitor leigo deve ter em mente que os modelos matemáticos, a despeito de sua precisão, são representações limitadas da realidade, tal qual as fotografias. Assim, ao observarmos a fotografia de uma árvore poderemos dizer que ela tem folhas verdes, flores amarelas, um tronco e galhos. Com alguma paciência podemos até contar o número de galhos da árvore. Esta contagem será mais ou menos acurada a depender da qualidade da câmera, do ângulo, da iluminação entre tantas outras coisas. Assim também os diferentes modelos matemáticos revelarão alguns diferentes aspectos da realidade da propagação da doença mas não todos. E também um mesmo modelo matemático em momentos diferentes dará estimativas e previsões diferentes. Isto por quê o número de casos aumenta com o tempo, os indivíduos mudam seus hábitos e os governos tomam medidas que podem favorecer o controle ou descontrole da epidemia.

Por esta razão o GMC-VASF precisa refazer suas estimativas diariamente, sempre que novos dados são divulgados. É por esta razão também que o grupo usa diferentes modelos matemáticos para então escolher aqueles que melhor representam a realidade da evolução da pandemia de COVID-19 em Juazeiro e Petrolina. Todos os modelos matemáticos que usamos são consolidados na epidemiologia e usados internacionalmente para surtos de doenças semelhantes à COVID-19. A saber usamos os seguintes modelos: Logístico Generalizado, Richards, Richards Generalizado, Gaussiano, q-Gaussiano, q-Exponencial e polinomiais de 2º, 3º e 4º ordem, para fazermos as previsões dos números casos confirmados e óbitos acumulado; e os modelos: SI, SIR, SIRD, SEIR, SIQR e SEIARD, para extrairmos os parâmetros epidemiológicos que representam o avanço do COVID-19 na nossa região, possibilitando o cálculo de propriedades tais como o número básico de reprodução ( $R_0$ ), período de duplicação dos casos ( $t_0$ ), razão do nº de infectados e os casos confirmados e período de inflexão. Para mais detalhes sobre os modelos matemáticos e técnicas que usamos veja o Apêndice e as referências indicadas.

Nesta seção discutiremos diferentes aspectos dos modelos analisados nos boletins ao longo do mês de junho.

#### 3.2. A evolução do número básico de reprodução ( $R_0$ ).

A taxa básica de reprodução ( $R_0$ ) está relacionada ao número de pessoas infectadas por um único doente em meio a uma população não imunizada. Ela dá uma ideia do “quão grave” está a disseminação da doença. Nos diferentes modelos matemáticos usam-se diferentes fórmulas para o valor de  $R_0$ . O GMC-VASF usa os modelos SIRD e SEIRD para este cálculo.

O  $R_0$  é um número importante para a epidemiologia. Isto por que determinar o  $R_0$  pode ajudar a calcular a porção da população que deve ser imunizada para impedir a propagação da

doença. Trata-se da (atualmente malversada) *imunidade de rebanho*, que dá uma medida da porção da população que deverá ser vacinada ( quando houver vacina) para impedir novos surtos.

O valor do  $R_0$  estimado sem nenhuma medida de isolamento social é da ordem de 3 . Já para as cidades de Petrolina e Juazeiro, os nos três boletins do GMC-VASF (10/06, 17/06 e 26/06 ), vemos o intervalo de variação do  $R_0$  sofrer pequenas flutuações a medida que novos dados são considerados.

### 3.3. O Período de inflexão ( $t_0$ ).

O período de inflexão ( $t_0$ ) é o momento em que regime de crescimento de casos começa a diminuir. A estimativa do  $t_0$  pode orientar, por exemplo, decisões de flexibilização do isolamento social, nos lugares em que é adotada esta medida.

Nos boletins de junho do GMC-VASF mostram o  $t_0$  afastar-se a cada novo boletim. O primeiro boletim previa a inflexão no dia 18 de julho e o último boletim a colocava no dia 06 de agosto.

Esta mudança no  $t_0$  pode decorrer de algum tipo de “ruído” advindo de imprecisões nos dados ou também pela mudança de comportamento do crescimento do número de casos na nossa região. Assim, é razoável supor que os modelos matemáticos tenham detectado uma “aceleração” do número de casos a cada novo boletim. Desta forma a data de inflexão foi sendo postergada semana após semana.

Para o cálculo do  $t_0$  utilizamos o modelo Logístico e o modelo de Richards, cujo ponto de inflexão é conhecido na literatura.

### 3.4. Razão entre $N^\circ$ de infectados e casos confirmados.

Esta razão é um indício da taxa de *subnotificação*. Por definição a taxa de subnotificação não pode ser medida diretamente. Ela pode ser indiretamente estimada a partir dos modelos matemáticos. Portanto este número deve ser tratado com bastante rigor nas análises e previsões.

Nos boletins do GMC-VASF esta razão é extraída do modelo SIQR. Este modelo separa a população em quatro categorias com relação à COVID-19:

- S: são os *suscetíveis*, isto é pessoas saudáveis que não são imunes à doença;
- I: *infectados*, são pessoas que estão com COVID-19, podendo ter sintomas ou não;
- Q: são pessoas que estão em *quarentena* por se saberem infectados.
- R: são todos os *retirados* que inclui os mortos e os recuperados da COVID-19.

Para mais informações sobre o modelo SIQR consulte o Apêndice A.6. deste relatório e as referências.

A partir dos dados inseridos, o modelo SIQR informa a quantidade de pessoas de cada categoria ao longo do tempo. Assim, sugere-se que a razão I/Q determinada pelo SIQR pode representar a estimativa da subnotificação seguindo, vide Crokidakis, 2020.

Nos boletins de junho a média desta razão é 5,4 infectados para cada confirmado.

### 3.5. Período de duplicação do número de casos

Novamente utilizando o modelo SIQR, comentado na subseção anterior, obtemos o período de duplicação do número de casos, ou seja, uma estimativa do tempo em que o número de casos confirmados na nossa região irá duplicar.

Essa estimativa fornece uma previsão de como os casos estão evoluindo na nossa região e fornece uma ideia de quantos casos confirmados teremos num período indicado.

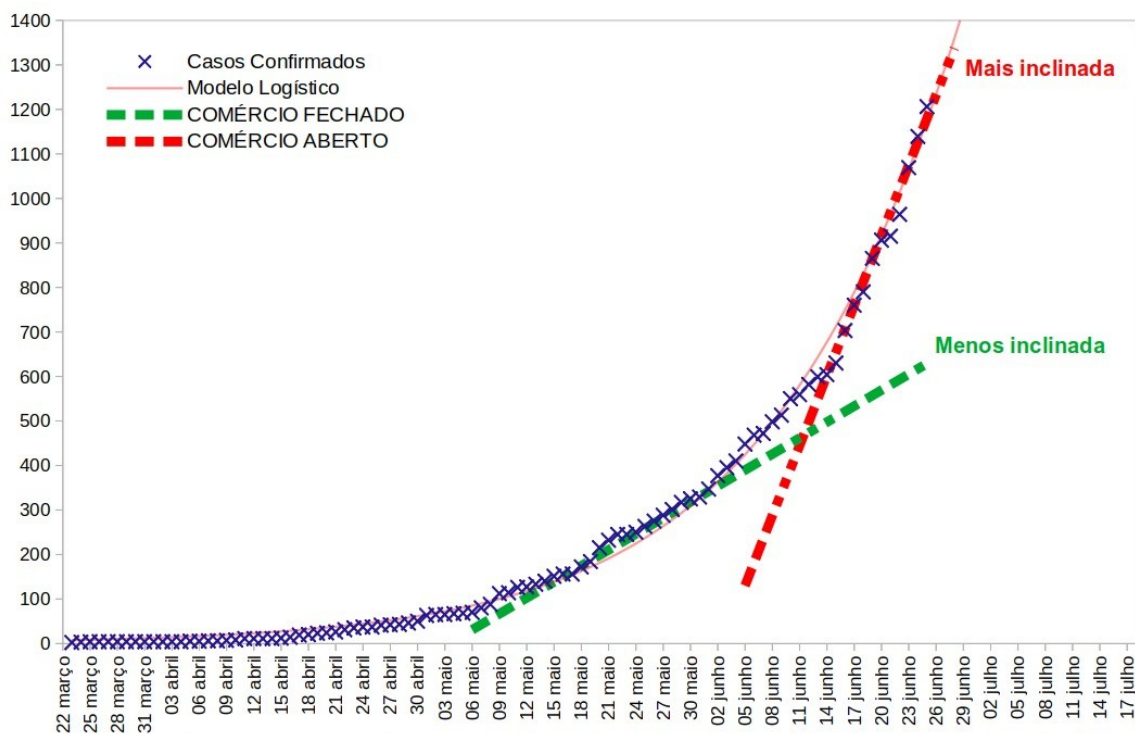
### 3.6. Período provável em que 60% da população da região estaria infectada

O período provável estimado para que 60% da população das duas cidades esteja infectada é obtido com um cálculo matemático bastante simples. Inicialmente, se estima um número real de pessoas infectadas em uma determinada data multiplicando o número de casos confirmados nas duas cidades neste dia pela razão entre número de infectados e casos confirmados que é determinada pelo modelo SIQR (seção 3.4). Posteriormente, através de uma progressão geométrica, levando em conta o período de duplicação do número de casos (seção 3.5), se chega a uma semana provável de um mês futuro em que cerca de 60% da população da região estará infectada pelo novo coronavírus. Esta porcentagem é usada como referência porque, a partir do valor  $R_0$  (seção 3.2) estimado para o SARS-COV-2, se acredita que a transmissão do vírus seria bloqueada quando mais de 60% da população adquirisse imunidade para a COVID-19 (“imunidade de rebanho”).

### 3.7. A inclinação no gráfico e a reabertura do comércio.

No terceiro boletim do GMC-VASF, aparece em um dos gráficos duas retas com diferentes inclinações. Estas retas são chamadas retas tangentes ao gráfico e suas inclinações indicam a taxa de crescimento instantâneo, isto é, a quantidade diária de novos casos. Observe que na Figura 7 a inclinação da reta vermelha é consideravelmente maior do que a inclinação da reta verde. Isto indica um considerável aumento do número de casos confirmados de COVID\_19 após a reabertura do comércio.

**Figura 7: Número acumulado de casos confirmados em Juazeiro-BA e Petrolina-PE (Modelo Logístico).**



## APÊNDICE

### Uma breve apresentação de modelos epidemiológicos.

Modelos epidemiológicos são equações matemáticas que descrevem a evolução da pandemia. O GMC-VASF utiliza modelos epidemiológicos do tipo dinâmico, isto é, que variam no tempo (Martcheva). Estes modelos usam *equações diferenciais*, ou seja, equações matemáticas que envolvem taxas de variação instantânea (derivadas).

Nesta seção queremos proporcionar ao leitor uma breve mostra de como funcionam os modelos epidemiológicos e mais detalhes sobre as estatísticas relativas aos bairros das duas cidades. Antes de começarmos a descrevê-los é importante o leitor ter em mente que os modelos epidemiológicos fazem muitas simplificações, de modo que nem todas as características de uma doença, no nosso caso COVID-19, são fielmente representadas nos modelos.

#### A.1. Modelo SIR

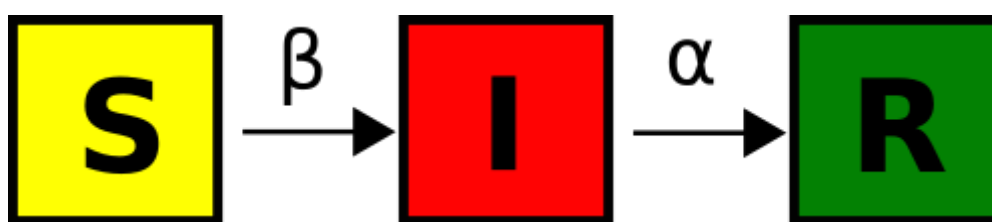
Entre os modelos epidemiológicos fundamentais está o chamado modelo SIR desenvolvido por Kermack and McKendrick em 1927, veja Martcheva, 2015. Este modelo divide a população em

- S: *suscetíveis* são pessoas que podem adquirir a doença;
- I: *infectados*, são pessoas que atualmente estão doentes;
- R: *retirados*, são pessoas que estão curados ou morreram.

No modelo SIR os valores S, I e R variam, mas a população é constante, isto é, a soma  $S+I+R=N$  não varia com o passar do tempo. Além disso, neste modelo todo infectado é considerado infeccioso, portanto capaz de transmitir a doença. Por sua vez os retirados nunca voltam a contrair a doença em questão.

#### A.2. Modelo SIR em compartimentos:

O modelo SIR divide a população em três compartimentos S, I e R, e pode ser representado em um fluxograma como abaixo:



**Figura 8: Fluxogram do modelo SIR**

A figura indica que as pessoas passam da categoria de suscetível para infectadas e de infectadas a retiradas. Veremos como o modelo descreve as taxas de passagem entre as três categorias na próxima subseção.

#### A.3. Equações do SIR

Matematicamente o SIR é dado pelo seguinte sistema de equações:

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -\beta SI \\ \frac{dI}{dt} = \beta SI - \alpha I \\ \frac{dR}{dt} = \alpha I \end{cases}$$

Nos nossos boletins o tempo é contado em dias. Desta forma  $dS$  é a taxa diária de pessoas que passam da categoria de suscetíveis para a de infectados. Quanto mais pessoas infectadas, maiores as chances de um suscetível ter contato com a doença. Assim, a probabilidade de um suscetível encontrar um infectado é  $\beta I$  onde  $\beta$  é uma constante de proporcionalidade. Portanto o total diário de novos infectados é  $dS/dt = -(\beta I) \times S$ , sendo que o sinal negativo indica que estas pessoas estão deixando a condição de suscetíveis.

**OBSERVAÇÃO:** Ações que alteram a probabilidade de encontros entre pessoas, como isolamento social afetam os resultados do modelo SIR, pois afetam o parâmetro  $\beta$ .

Por sua vez,  $dI$  é a taxa diária de novos infectados. Note que a cada dia a categoria de *infectados* recebe todos os que saíram da categoria de *suscetível* e perde os que tornam-se *retirados*, seja por morte ou recuperação.

Por fim,  $dR/dt$  é taxa variação diária do número de retirados. Daí a forma da segunda equação. Já a categoria R recebe diariamente todos os que saem da categoria S, logo  $dR/dt = \alpha I$ , onde  $\alpha$  é a taxa de recuperação diária.

#### A.4. Taxa básica de reprodução ( $R_0$ ) no modelo SIR.

A taxa básica de reprodução ( $R_0$ ) está relacionada ao número de pessoas infectadas pelo por um único doente em meio a uma população não imunizada. Nos diferentes modelos matemáticos usam-se diferentes fórmulas para o  $R_0$ . No modelo SIR temos  $R_0 = \beta/\alpha$ .

#### A.5. Modelos derivados do modelo SIR.

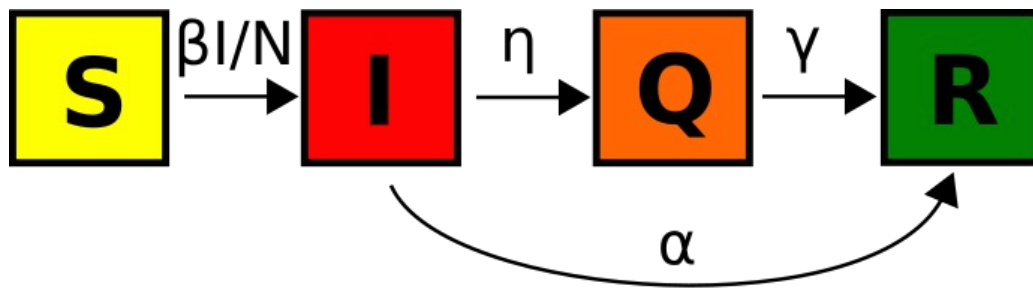
Do modelo SIR derivam outros modelos compartimentados que consideram diferentes estágios da evolução da epidemia. Temos o SIRD (Suscetíveis, Infectados, Morto e Recuperado), SIQR (Suscetíveis, infectados, quarentena e retirados) discutido nas seções 3.4 e 3.5. O SEIRD (Suscetível, Exposto, Infectado, Morto e Recuperado) que acrescenta a classe dos expostos, que são pessoas que tiveram contato mas que ainda não tem a infecção. Outro modelo semelhante é o SEIARD, que além das categorias do SEIRD, também contém a categoria A (assintomáticos).

Por um lado, modelos mais sofisticados tendem a trazer mais nuances sobre a evolução da epidemia, porém, quanto mais complexo o modelo torna-se mais difícil o tratamento matemático, o que muitas vezes leva a imprecisões. Abaixo discutiremos brevemente sobre o modelo SIQR que é

usado pelo GMC-VASF na estimativa da razão entre o número de infectados e os casos confirmados (Seção 3.4).

### A.6. Modelo SIQR

Neste modelo, diferente dos anteriores consideramos que os indivíduos infectados que foram confirmados com a doença, são mantidos em quarentena representado pelo compartimento (Q), até serem removidos, que neste caso engloba a possibilidade do indivíduo se recuperar e de ele vir a óbito (R). O fluxograma é apresentado na figura 9.



**Figura 9: Fluxograma do modelo SIQR.**

As equações que descrevem este modelo é determinada por

$$\begin{aligned}\frac{dS}{dt} &= -\frac{\beta I}{N}S \\ \frac{dI}{dt} &= \frac{\beta I}{N}S - \alpha I - \eta I \\ \frac{dQ}{dt} &= \eta I - \gamma Q \\ \frac{dR}{dt} &= \gamma Q + \alpha I\end{aligned}$$

neste modelo a partir das referências (Crokidakis, 2020; Petersen, 2020; Tiwari, 2020), ajustamos os dados com os casos confirmados acumulados ao modelo, extraindo o melhor valor dos parâmetros que representam a dinâmica do COVID-19 na nossa região. Assim calculamos:

- Período de duplicação do número de casos:

$$\tau = \ln(2)/(\beta - \alpha - \eta)$$

- Razão do número de infectados e os casos confirmados:

$$I/Q = (\gamma + \beta - \alpha - \eta)/\eta$$

que são informações muito sensíveis aos parâmetros.

## B. Modelos baseados no ajuste de funções

Iremos agora explicitar as funções utilizadas para realizarmos as previsões e o cálculo do ponto de inflexão. Nas previsões utilizamos um conjunto de diferentes funções realizando diversos ajustes aos dados, em seguida, a partir desses diferentes ajustes formamos o intervalo de previsão a fim de contemplar os diversos valores obtidos.

### B.1. Modelo Logístico.

O modelo logístico no contexto de modelos epidemiológicos deriva do chamado modelo SI, dado pelas equações diferenciais:

$$\begin{cases} dS = -\frac{\beta I}{N}S \\ dI = \frac{\beta I}{N}S. \end{cases} \quad \text{Eq. 01}$$

Aqui, S é a categoria de suscetíveis como nos modelos anteriores, mas I representa os casos acumulados. A população total N é considerada constante. Assim  $I+S=N$ , ou seja,  $S=N-I$ . Segue que:

$$dI = \frac{\beta}{N}I(N - I). \quad \text{Eq.02}$$

A equação acima é conhecida como equação logística. A equação acima é conhecida como equação logística, cujo ponto de inflexão depende dos parâmetros ajustados e é dado por

$$t_0 = \frac{1}{\beta} \ln \left( \frac{N}{I_0} - 1 \right)$$

sendo  $I_0$  a condição inicial da equação diferencial para  $t = 0$ .

Uma generalização desse modelo modelo consiste em

$$\frac{dI}{dt} = \beta(I)^p \left( 1 - \frac{I}{N} \right)$$

onde p é um novo parâmetro para auxiliar no ajuste (Wu, 2020).

## C. Metodologia para o ajuste das curvas aos dados.

Nas análises do grupo GMC-VASF utilizamos dados provenientes do Report sobre o avanço do Covid-19 no Brasil e no mundo (FACAPE) e da Secretaria de Saúde de Juazeiro. Então, para cada modelo epidemiológico é feito o ajuste de seus parâmetros. É este ajuste dos parâmetros que faz com que a curva gerada pelo modelo se aproxime das informações concretas.

A medida de precisão do ajuste é feita por meio do desvio padrão médio e os cálculos necessários para ajustar as curvas são realizados com o R-cran (R-CRAN, 2013), e o ambiente de desenvolvimento Rstudio (RSTUDIO, 2010).



## Referências

CORONA virus disease situation report-162. World Health Organization. Disponível em: <[https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/20200630-covid-19-sitrep-162.pdf?sfvrsn=e00a5466\\_2](https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/20200630-covid-19-sitrep-162.pdf?sfvrsn=e00a5466_2)> . Acesso em: 01/07/2020.

CROKIDAKIS, Nuno. Data Analysis and Modeling of evolution of COVID-19 in Brazil. ArXiv preprint arXiv: 2003.12150, 2020.

ESCOBAR, Herlton. Flexibilização do isolamento tende a endurecer pandemia. Jornal da USP, São Paulo, 19 de junho de 2020. Disponível em: <<https://jornal.usp.br/atualidades/flexibilizacao-do-isolamento-tende-a-endurecer-pandemia/>>. Acessado em 01/07/2020.

MARTCHEVA, Maia. An Introduction to Mathematical Epidemiology. New York, Springer, 2015.  
MELO, Jamildo. TJPE atende pedido do MPE e suspende parte do decreto de Petrolina sobre reabertura do comércio. Disponível em: <<https://blogs.ne10.uol.com.br/jamildo/2020/06/18/tjpe-atende-pedido-do-mppe-e-suspende-parte-do-decreto-de-petrolina-sobre-reabertura-do-comercio/>>. Acesso em: 01/07/2020.

MINISTERIO DA SAUDE. Sus Analitico, 2020. Disponível em: <<https://susanalitico.saude.gov.br/#/dashboard/>>. Acesso em: 01/07/2020.

NOTA conjunta sobre decreto estadual 49131/20. SINDILOJAS PETROLINA. Disponível em <<https://sindilojaspetrolina.com.br/nota-conjunta-sobre-decreto-estadual-49131-20/>>. Acesso em 01/07/2020.

PREFEITO de Petrolina anuncia reabertura de atividades econômicas; primeira fase começa nessa segunda (1º). Petrolina, 29 de maio de 2020. Disponível em: <<https://g1.globo.com/pe/petrolina-regiao/noticia/2020/05/29/prefeito-de-petrolina-anuncia-reabertura-gradual-das-atividades-economicas-primeira-fase-comeca-nesta-segunda-1o.ghtml>>. Acesso em: 01/07/2020.

REABERTURA gradual do comércio terá início a partir de 01/06, anuncia prefeito durante live. Disponível em <<https://sindilojaspetrolina.com.br/reabertura-gradual-do-comercio-tera-inicio-a-partir-de-01-06-anuncia-prefeito-durante-live/>> . Acesso em 06/07/2020.

R-CORE TEAM. R: A language and environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, (2013). Disponível em <<https://cran.r-project.org>>. Acessado em: 01/07/2020.

REPORT sobre o avanço do Covid-19 no Brasil e no mundo. Facape. Disponível em: <<https://1732-26884.el-ait.com/8373-2/>>. Acessado em: 03 de junho de 2020.

RSTUDIO TEAM. Rstudio: Integrated development for R. Rstudio, INC., Boston, MA. 2015. Disponível em <[www.rstudio.com](http://www.rstudio.com)>. Acessado em: 01/07/2020.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. WHO, 2020. Q&A on COVID-19. Disponível em: <<https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/question-and-answers-hub/q-a-detail/q-a-coronaviruses>> Acesso em: 01/07/2020.

## **Referências a decretos com data de publicação nos respectivos diários oficiais**

JUAZEIRO-BA. **Decreto nº 217, de 13 de março de 2020.** Dispões sobre as medidas preventivas para enfrentamento da emergência de saúde pública de importância nacional, estadual e internacional decorrente do coronavírus e H1N1, e dá outras providências. Disponível em: <https://doem.org.br/ba/juazeiro>. Acesso em: 7 jul. 2020.

JUAZEIRO-BA. **Decreto nº 241, de 17 de março de 2020.** Declara estado de emergência na saúde pública no âmbito do território do Município de Juazeiro-BA decorrente do Novo coronavírus (COVID-19) e dá outras providências. Disponível em: <https://doem.org.br/ba/juazeiro>. Acesso em: 7 jul. 2020.

JUAZEIRO-BA. **Decreto nº 266, de 23 de março de 2020.** Dispõe sobre novas medidas preventivas a serem adotadas no enfrentamento da emergência de saúde pública decorrente do Coronavírus (COVID-19) e ao H1N1 no âmbito municipal, aprovadas pelo comitê Municipal de Prevenção e enfrentamento ao novo Coronavírus (COVID-19) e ao H1N1, e dá outras providências. Disponível em: <https://doem.org.br/ba/juazeiro>. Acesso em: 7 jul. 2020.

JUAZEIRO-BA. **Decreto nº 271, de 24 de março de 2020.** Altera o Decreto 266, de 23 de março de 2020, que dispõe sobre novas medidas preventivas a serem adotadas no enfrentamento da emergência de saúde pública decorrente do Coronavírus (COVID-19) e ao H1N1 no âmbito municipal, aprovadas pelo comitê Municipal de Prevenção e enfrentamento ao novo Coronavírus (COVID-19) e ao H1N1, e dá outras providências. Disponível em: <https://doem.org.br/ba/juazeiro>. Acesso em: 7 jul. 2020.

JUAZEIRO-BA. **Decreto nº 294, de 06 de abril de 2020.** Dispõe sobre medidas complementares preventivas a serem adotadas no enfrentamento da emergência de saúde pública decorrente do Coronavírus (COVID-19) e ao H1N1 no âmbito municipal, aprovadas pelo comitê Municipal de Prevenção e enfrentamento ao novo Coronavírus (COVID-19) e ao H1N1, e dá outras providências. Disponível em: <https://doem.org.br/ba/juazeiro>. Acesso em: 7 jul. 2020.

JUAZEIRO-BA. **Decreto nº 335 de 14 de abril de 2020.** Dispõe sobre novas medidas preventivas a serem adotadas no enfrentamento da emergência de saúde pública decorrente do Coronavírus (COVID-19) e ao H1N1 no âmbito municipal, aprovadas pelo comitê Municipal de Prevenção e enfrentamento ao novo Coronavírus (COVID-19) e ao H1N1, e dá outras providências.. Disponível em: <https://doem.org.br/ba/juazeiro>. Acesso em: 7 jul. 2020.

JUAZEIRO-BA. **Decreto nº 342 de 20 de abril de 2020.** Altera dispositivos do decreto nº278, de 17 de abril de 2020, que declarou Situação de Emergência em saúde Pública, no âmbito de Municipal, em decorrência do novo coronavírus (COVID-19) e das incidências de H1N1 e convalidou as medidas preventivas para enfrentamento da emergência de saúde pública nesta cidade e das outras providências. Disponível em: <https://doem.org.br/ba/juazeiro>. Acesso em: 7 jul. 2020.

JUAZEIRO-BA. **Decreto nº 386 de 18 de maio de 2020.** Dispõe sobre medidas preventivas a serem adotadas no enfrentamento da emergência de saúde pública decorrente do Coronavírus (COVID-19) e ao H1N1 no âmbito municipal, aprovadas pelo Comitê Municipal de Prevenção e Enfrentamento ao novo Coronavírus (COVID-19) e ao H1N1, e dá outras providências. Disponível em: <https://doem.org.br/ba/juazeiro>. Acesso em: 7 jul. 2020.

JUAZEIRO-BA. **Decreto nº 404 de 29 de maio de 2020.** Dispõe sobre medidas complementares para o enfrentamento da emergência de saúde pública, decorrente do COVID-19 e do H1N1, com fases para a retomada das atividades comerciais, na forma de um plano de reabertura e dá outras providências. Disponível em: <https://doem.org.br/ba/juazeiro>. Acesso em: 7 jul. 2020.

JUAZEIRO-BA. **Decreto nº 426 de 15 de junho de 2020.** Altera dispositivo do Decreto nº 404, de 28 de maio de 2020, que dispõe sobre medidas complementares para o enfrentamento da emergência pública, decorrente do COVID-19 e do H1N1, com fases para a retomada das atividades comerciais, na forma de um plano de reabertura, e dá outras providências. Disponível em: <https://doem.org.br/ba/juazeiro>. Acesso em: 7 jul. 2020.

JUAZEIRO-BA. **Decreto nº 449 de 22 de junho de 2020.** Dispõe sobre novas medidas preventivas para enfrentamento da emergência de saúde pública nesta cidade e dá outras providências. Disponível em: <https://doem.org.br/ba/juazeiro>. Acesso em: 7 jul. 2020.

PETROLINA-PE. **Decreto nº 11 de 17 de março de 2020.** Estabelece medidas temporárias no âmbito do território deste município de Petrolina/PE de prevenção ao contágio pelo Novo Coronavírus (COVID-19) e dá outras providências. Disponível em: <https://doem.org.br/pe/petrolina>. Acesso em: 7 jul. 2020.

PETROLINA-PE. **Decreto nº 12 de 17 de março de 2020.** Declara estado de emergência na saúde pública no âmbito do território deste município de Petrolina/PE decorrente do novo COronavírus (COVID-19), e dá outras providências. Disponível em: <https://doem.org.br/pe/petrolina>. Acesso em: 7 jul. 2020.

PETROLINA-PE. **Decreto nº 13 de 20 de março de 2020.** Determina novas medidas temporárias para enfrentamento da emergência em saúde Pública decorrente do Novo Coronavírus (COVID-19) e dá outras providências. Disponível em: <https://doem.org.br/pe/petrolina>. Acesso em: 7 jul. 2020.

PETROLINA-PE. **Decreto nº 17 de 23 de março de 2020.** Determina novas medidas temporárias para enfrentamento da emergência em saúde Pública decorrente do Novo Coronavírus (COVID-19) e dá outras providências. Disponível em: <https://doem.org.br/pe/petrolina>. Acesso em: 7 jul. 2020.

PETROLINA-PE. **Decreto nº 20 de 24 de março de 2020.** Dereta situação anormal, caracterizada como "Estado de Calamidade Pública" no âmbito do município de Petrolina/PE, e dá outras providências.. Disponível em: <https://doem.org.br/pe/petrolina>. Acesso em: 7 jul. 2020.

PETROLINA-PE. **Decreto nº 22 de 01 de abril de 2020.** Prorroga "Estado de Emergência" no âmbito declarado por força do Decreto municipal nº 012/2020, disciplina medidas temporárias para enfrentamento da emergência em saúde pública decorrente do Novo Coronavírus (COVID-19), e dá outras providências. Disponível em: <https://doem.org.br/pe/petrolina>. Acesso em: 7 jul. 2020.

PETROLINA-PE. **Decreto nº 30 de 04 de maio de 2020.** Prorroga medidas temporárias para enfrentamento da emergência em saúde Pública decorrente do Novo Coronavírus (COVID-19) e dá outras providências. Disponível em: <https://doem.org.br/pe/petrolina>. Acesso em: 7 jul. 2020.

PETROLINA-PE. **Decreto nº 34 de 12 de maio de 2020.** Regulamenta protocolos de prevenção obrigatórios para segmentos que se encontram autorizados a funcionar em época de pandemia causada pelo Novo Coronavírus (COVID-19), e dá outras providências. Disponível em: <https://doem.org.br/pe/petrolina>. Acesso em: 7 jul. 2020.

PETROLINA-PE. **Decreto nº 37 de 29 de maio de 2020.** Regulamenta protocolos de prevenção obrigatórios para segmentos que se encontram autorizados a funcionar em época de pandemia causada pelo Novo Coronavírus (COVID-19), e dá outras providências. Disponível em: <https://doem.org.br/pe/petrolina>. Acesso em: 7 jul. 2020.