



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA  
CAMPUS I  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ESTATÍSTICA  
CURSO DE BACHARELADO EM ESTATÍSTICA**

**ELIONARA LUIZA NÓBREGA ARAÚJO**

**ANÁLISE DA EVOLUÇÃO CONTAGIOSA DA PANDEMIA DE COVID-19 NA  
PARAÍBA**

**CAMPINA GRANDE - PB**

**2021**

ELIONARA LUIZA NÓBREGA ARAÚJO

**ANÁLISE DA EVOLUÇÃO CONTAGIOSA DA PANDEMIA DE COVID-19 NA  
PARAÍBA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Bacharelado em Estatística do Departamento de Estatística do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Estatística.

**Orientador:** Prof. TIAGO ALMEIDA DE OLIVEIRA

**Coorientador:** Prof(a). JANAÍNA APARECIDA CEZARIO

**CAMPINA GRANDE - PB**

**2021**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

A663a Araújo, Elionara Luiza Nóbrega.  
Análise da evolução contagiosa da pandemia de Covid-19 na Paraíba [manuscrito] / Elionara Luiza Nobrega Araujo. - 2021.

36 p.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Estatística) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2021.

"Orientação : Prof. Dr. Tiago Almeida de Oliveira , Departamento de Estatística - CCT."

1. Coronavírus. 2. Modelagem de epidemias. 3. Modelo SIR. I. Título

21. ed. CDD 519.85

ELIONARA LUIZA NÓBREGA ARAÚJO

ANÁLISE DA EVOLUÇÃO CONTAGIOSA DA PANDEMIA DE COVID-19 NA PARAÍBA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Bacharelado em Estatística do Departamento de Estatística do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Estatística.

Trabalho aprovado em 03 de dezembro de 2021.

**BANCA EXAMINADORA**

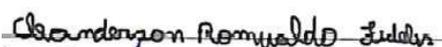


---

Prof. TIAGO ALMEIDA DE OLIVEIRA )  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)  
e.mail: tadolive@servidor.uepb.edu.br



Prof. Marcelino Alves Rosa de Pascoa  
Universidade Federal do Mato Grosso (UFMT)



---

Prof. Cleanderson R. Fidelis  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)  
e-mail: cleanderson@usp.br

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, pela oportunidade de cursar Estatística e por nunca ter desistido do que gosto e assim é com grande satisfação que concluo mais uma etapa da minha vida.

À minha mãe pela oportunidade de estudar, por todo o incentivo, por me aguentar nos dias difíceis e por sempre acreditar no meu potencial, sem ela nada disso seria possível.

Ao meu esposo por me ajudar quando necessário, por estar por perto nos momentos difíceis e por me apoiar e incentivar sempre.

À toda minha família pelo apoio emocional e financeiro.

Ao professor Tiago Almeida de Oliveira, por aceitar me orientar, pelo aprendizado, pelo apoio e principalmente pelos conselhos.

À todas as mulheres que estão ou estiveram presentes na minha vida pessoal e acadêmica, por me mostrarem força e determinação, por me inspirarem em todos os aspectos possíveis, sou grata por existirem.

Aos professores membros da banca por terem aceitado o convite.

A todos os meus professores do curso, que de alguma forma sempre me motivaram a seguir em frente independente das dificuldades que encontramos.

Aos meus amigos do curso, que sempre estiveram presentes e me motivaram.

Por ultimo a todos meus professores de matemática do ensino básico que enxergaram meu potencial e me incentivaram de alguma forma a fazer o curso na área relacionada à Matemática.

“No meio da dificuldade  
encontra-se a oportunidade.”  
(Albert Einstein)

## RESUMO

Os tipos do vírus da influenza são objetos de estudo de várias pesquisas, em virtude do fato de serem doenças cíclicas. De fato, desde o início do século passado até os anos atuais, a Organização Mundial da Saúde contabilizou nove epidemias causadas por vírus de influências. Em particular, a mais recente, conhecida popularmente por coronavírus despertou novamente a necessidade de estudos epidemiológicos visando minimizar os efeitos de tal vírus sobre a população. A modelagem matemática é uma das ferramentas mais utilizadas para a análise de uma enfermidade. No presente trabalho analisaremos o comportamento da influenza SARS-CoV-2 através do modelo SIR, desenvolvido por Kermack e McKendrick em 1927, a fim de fazer previsões e análise qualitativa do alastramento de doenças infectocontagiosas em humanos, realizamos simulações e aplicamos o modelo para o estado da Paraíba onde conseguimos perceber que o modelo foi adequado no início da pandemia mas ao passar do tempo não se mostrou eficiente para estudar a evolução da pandemia mas ao passar do tempo não se mostrou eficiente para estudar a evolução da pandemia.

**Palavras-chaves:** Modelo SIR. Sars-CoV-2. Coronavírus.

## **ABSTRACT**

Influenza virus types are objects of study of several researches, due to the fact that they are cyclical diseases. In fact, from the beginning of the last century to the present years, the World Health Organization has counted nine epidemics caused by influenza viruses. In particular, the most recent, commonly known as coronavirus, has awakened the need for epidemiological studies to minimize the effects of this virus on the population. Mathematical modeling is one of the most used tools for analyzing a disease. In the present work, we will analyze the behavior of SARS-CoV-2 influenza through the SIR model, developed by Kermack and McKendrick in 1927, in order to make predictions and qualitative analysis of the spread of infectious diseases in Paraíba. We performed simulations and applied the model to the state of Paraíba, where we were able to see that the model was adequate at the beginning of the pandemic, but over time it was not efficient to study the evolution of the pandemic.

**Keywords:** Model SIR. SARS-CoV-2. Coronavirus.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – REPRESENTAÇÃO VISUAL DO SARS-CoV-2 . . . . .	14
Figura 2 – ESTRUTURA DE UMA PARTÍCULA VIRAL . . . . .	16
Figura 3 – ESTADO DA PARAÍBA . . . . .	18
Figura 4 – NÚMERO DE CASOS CONFIRMADOS ENTRE PAÍSES . . . . .	24
Figura 5 – PAÍSES EM EVIDÊNCIA NA PANDEMIA . . . . .	25
Figura 6 – CASOS CONFIRMADOS, RECUPERADOS E ÓBITOS NO BRASIL. . .	26
Figura 7 – CASOS CONFIRMADOS NA PARAÍBA. . . . .	26
Figura 8 – CASOS CONFIRMADOS E ÓBITOS NA PARAÍBA. . . . .	27
Figura 9 – MÉDIA MÓVEL DE CASOS CONFIRMADOS E ÓBITOS NA PARAÍBA	27
Figura 10 – ESTADO DA POPULAÇÃO NO INÍCIO DA PANDEMIA . . . . .	28
Figura 11 – CASOS CONFIRMADOS AO LONGO DO TEMPO. . . . .	29
Figura 12 – INFECTADOS AO LONGO DO TEMPO. . . . .	29
Figura 13 – SUCETÍVEIS AO LONGO DO TEMPO. . . . .	30
Figura 14 – MODELO SIR NA PARAÍBA PARA OS 30 PRIMEIROS DIAS. . . . .	31
Figura 15 – AJUSTE DO MODELO SIR PARA OS 30 PRIMEIROS DIAS. . . . .	31
Figura 16 – MODELO SIR NA PARAÍBA EM 250 DIAS. . . . .	32
Figura 17 – AJUSTE DO MODELO SIR PARA 250 DIAS. . . . .	32

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – PRINCIPAIS SINTOMAS .....	17
Tabela 2 – PARÂMETROS PARA SIMULAÇÃO DO MODELO SIR NA PARAÍBA. ....	28

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
CLP	Centro de Liderança Pública.
FDA	Food and Drug Administration (Administração de Alimentos e Medicamentos).
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
OMS	Organização Mundial da Saúde.
PCR	Proteína C-Reativa
PNAD	Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\gamma$	Letra grega Gama
$\lambda$	Letra grega Lambda
$\beta$	Letra grega beta

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	13
2.1	PANDEMIA .....	13
2.2	COVID-19.....	14
2.2.1	<i>Origem</i> .....	15
2.2.2	<i>O que é?</i> .....	15
2.2.3	<i>Característica</i> .....	15
2.2.4	<i>Incubação/Contágio</i> .....	16
2.2.5	<i>Diagnóstico/Sintomas</i> .....	16
2.2.6	<i>Tratamento/vacina</i> .....	17
2.2.7	<i>Descrição do COVID-19 na Paraíba</i> .....	18
3	MODELO SIR .....	20
3.1	REPRODUTIVIDADE BASAL.....	20
3.2	SIR.....	20
4	ANÁLISE .....	23
4.1	PACOTES NO R PARA ANÁLISE DO COVID-19 .....	23
4.2	RESULTADOS .....	24
4.2.1	<i>Simulação</i> .....	27
4.2.2	<i>Aplicação</i> .....	30
5	CONCLUSÃO .....	34
	REFERÊNCIAS.....	35

## 1 INTRODUÇÃO

Em tempos de crise, de pandemia, utilizar a ciência a fim de obter respostas para perguntas que são feitas pela sociedade a todo instante é o melhor caminho para resolver diversas situações e poder prever cenários atuais e futuros fazendo estimativas e projeções. A COVID-19 (Sars-CoV-2) vem sendo um grande obstáculo em todo o mundo por estar abalando os recursos de saúde, como leitos de enfermaria/UTI, ventiladores respiratórios e suprimentos médicos. Se faz então necessário o conhecimento de ferramentas para auxiliar os governos na tomada de decisão, por exemplo, medidas farmacológicas ou de até mesmo endurecimento ou afrouxamento de distanciamento social, medidas que estão sendo tomadas atualmente para tentar conter o avanço da pandemia de COVID-19 em todo o mundo.

Este trabalho tem como objetivo fazer uma análise da pandemia de COVID-19 no estado da Paraíba, utilizando um estudo descritivo de forma quantitativa e qualitativa da projeção dos casos, com dados oficiais fornecidos pelo Ministério da Saúde as Secretarias de Saúde do Estado e Municípios. Para isso utilizaremos o modelo SIR que possui três compartimentos classificando os indivíduos em: suscetíveis, infectados, recuperados. A razão de reprodutividade basal que representa o número médio de infecções secundárias, para assim tornar conhecido os casos que podem aumentar, diminuir ou ficar em um ponto de equilíbrio (SOUZA; SIQUEIRA; GRASSIOLLI, 2020).

Para auxiliar nas análises dos dados utilizaremos os softwares R e Excel, os quais irão facilitar o controle sobre a instabilidade do projeto por se tratar de um grande volume de dados.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 PANDEMIA

Pandemia é a disseminação mundial de uma nova doença e esse termo passa a ser usado quando uma epidemia afeta uma região se espalha por diferentes continentes e a transmissão ocorre de pessoa para pessoa. Um dos fatores que favorece uma pandemia é a facilidade de deslocamento das pessoas em curto período de tempo onde alguém infectado pode estar contaminado e propagar a doença, outro fator é a falta de higiene que pode favorecer a transmissão (FIOCRUZ, 2021).

Antes da COVID-19 a pandemia mais recente tinha sido em 2009, com a chamada Gripe Suína causada pelo vírus H1N1, sendo detectado o primeiro caso no México. A OMS (Organização Mundial da Saúde) elevou o status da doença para pandemia em junho/2009, após contabilizar 36 mil casos em 76 países. No total, 187 países registraram casos e quase 300 mil pessoas morreram (UNAIDS, 2021).

O fim da pandemia H1N1 foi decretado pela OMS em agosto de 2010. São listadas a seguir algumas das pandemias que atingiram o mundo:

- **Peste do Egito (430 a.C.):** A febre tifóide matou um quarto das tropas atenienses e um quarto da população da cidade durante a Guerra do Peloponeso. A causa exata da peste foi por muitos anos desconhecida, até que em janeiro de 2006, investigadores da Universidade de Atenas analisaram dentes recuperados de uma sepultura e confirmaram a presença de bactérias responsáveis pela febre.
- **Peste Antonina (165-180):** Possivelmente causada pela varíola, matou um quarto dos infectados, 5 milhões no total cerca de 2 mil pessoas por dia em Roma.
- **Peste de Cipriano (250-271):** Possivelmente causada pela varíola ou pelo sarampo, iniciou-se nas províncias orientais e espalhou-se pelo Império Romano inteiro. Segundo relato, em seu auge chegou a matar 5 mil pessoas por dia em Roma.
- **Peste de Justiniano (541-544):** A primeira contaminação registrada da peste bubônica começou no Egito e chegou a Constantinopla, enquanto matava 10 mil pessoas por dia, atingindo 40% dos habitantes da cidade. Foi eliminada até um quarto da população do oriente médio. A peste foi transmitida por pulgas e ratos infectados.
- **Peste Negra (1347-1353):** A contaminação começou na Ásia, chegando a Europa mediterrânea e ocidental em 1348 e matou 20 milhões de europeus em 6 anos, cerca de 50 milhões no total. Foi transmitida por cadáveres infectados pela peste bubônica.
- **Gripe Espanhola (1918-1920):** A gripe espanhola foi uma pandemia do vírus influenza que sofreu uma mutação em 1918 e infectou 500 milhões de pessoas, cerca de um quarto da população mundial da época. Estima-se o número de mortos entre 17 e 100 milhões

dependendo da projeção, independente da diferença entre os números, trata-se de uma das pandemias mais mortais da história da humanidade.

Não se sabe o local exato que surgiu, algumas teorias cita a China ou Estados Unidos, e os primeiros casos registrados foi nos Estados Unidos. A disseminação da gripe espanhola foi baseada no isolamento social.

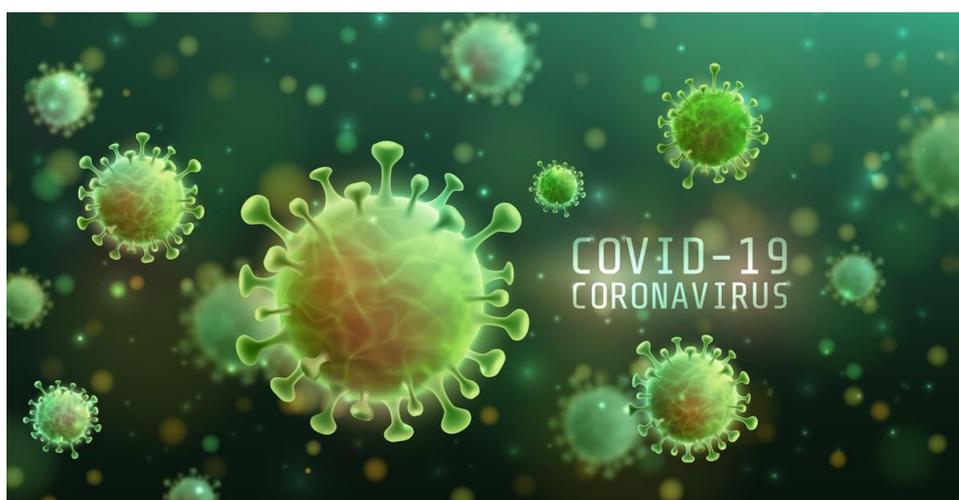
- **Aids (1981-1995):** Atingindo o sistema imunológico dos pacientes o aumento de casos começou ser notado nos Estados Unidos com pessoas morrendo de pneumonia ou câncer em homens considerados saudáveis, sendo a Aids ainda desconhecida, os casos foram aumentando e em 1982 começaram a ser encaixados como Síndrome da Imunodeficiência Adquirida (Aids), no ano seguinte foi descoberto que a doença era causada por um vírus: o HIV (vírus da imunodeficiência humana).

Após um tempo, descobriu-se que a doença era causada pela troca de fluídos, principalmente sangue ou sêmen. Teve maior pico até 1995 porém até 2020 estima-se cerca de 42 milhões de mortos pela Aids.

- **H1N1 (2009-2010):** Conhecido como vírus da gripe suína, o H1N1 começou no México e logo se expandiu para outros continentes onde a OMS a definiu como pandemia já que se espalhou de forma rápida e crescente, podemos ver essas informações de grandes epidemias na (EDUCAÇÃO, 2021).

## 2.2 COVID-19

Figura 1 – REPRESENTAÇÃO VISUAL DO SARS-CoV-2



Fonte: Branca (2021)

### 2.2.1 *Origem*

Recentemente um relatório dos Estados Unidos apontou que vários pesquisadores do Instituto de Virologia de Wuhan na China, adoeceram em novembro de 2019 e tiveram que ser hospitalizados, gerando suspeita de que o coronavírus tivesse escapado do laboratório, a China declarou a OMS que o primeiro paciente com sintomas da doença foi fixado em Wuhan no dia 8 de dezembro de 2019 (CNNBRASIL, 2021).

Ainda não foi divulgado o motivo da hospitalização dos pesquisadores, sendo assim a origem do COVID-19 é indefinida, contudo acredita-se na teoria de que o vírus originou-se a partir do contato humano-animal, porém há também a possibilidade de ter ocorrido um vazamento acidental do instituto Wuhan onde estava sendo realizada pesquisa em morcegos infectados com coronavírus (TOZZI INGRID LOURENÇO, 2021).

### 2.2.2 *O que é?*

Chamado cientificamente de SARS-CoV-2:

- **SARS:** é a abreviação de uma síndrome chamada *Severe Acute Respiratory Syndrome*, traduzida como Síndrome Respiratória Aguda Grave, forma grave de muitas doenças respiratórias e o principal sintoma é a dificuldade de respirar;
- **CoV:** é a abreviação de coronavírus;
- **2:** usado por ser um vírus muito parecido com outra espécie de coronavírus que quase virou uma pandemia em 2002, o SARS-CoV.

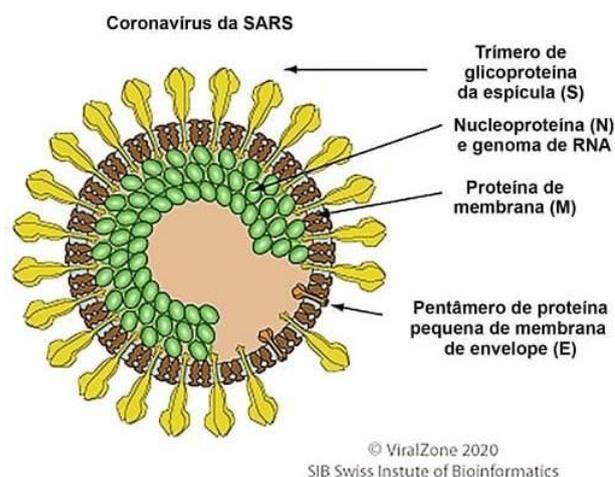
O vírus é composto por uma fita simples de RNA (é um ácido nucléico que se relaciona com a síntese de proteínas), infecta tanto animais quanto humanos, causando problemas respiratórios, hepáticos, neurológicos e gastrointestinais. A família do coronavírus é extremamente mutável, devido a sua alta densidade genética e frequente recombinação de genomas.

### 2.2.3 *Característica*

A SARS-CoV-2 é caracterizada por um quadro gripal com febre e tosse, podendo evoluir para casos mais graves com pneumonia e falta de ar. Estes tipos de vírus possuem um material genômico de RNA, fita simples, sentido positivo que serve diretamente para síntese proteica, ocorrendo assim com maior velocidade novas cópias de vírus.

São envolvidas por uma capa de gordura e proteínas, dentre elas a Proteína Spike ou Proteína S que é espícula glicoproteica que se liga fortemente à enzima ECA2, presente nas células humanas tornando a infecção mais fácil.

Figura 2 – ESTRUTURA DE UMA PARTÍCULA VIRAL



Fonte: Gruber (2021)

#### 2.2.4 Incubação/Contágio

O tempo médio para desenvolver sintomas é de 2 a 14 dias como visto em (COURSERA, 2021) onde,

5% em até 2 dias

50% em até 5 dias

95% em até 14 dias.

após serem infectados, porém em muitos casos o hospedeiro é assintomático tornando-se um potencial transmissor. A transmissão ocorrerá enquanto persistirem os sintomas e no caso dos assintomáticos enquanto estiverem infectados, o método de contágio é de pessoa para pessoa ou de superfície para pessoa, podendo acontecer 2 dias antes dos sinais e sintomas até o final da doença.

Doença leve - cerca de 10 dias.

Doença grave - cerca de 15 dias ou mais.

#### 2.2.5 Diagnóstico/Sintomas

A COVID-19 afeta diferentes tipos de pessoas em diferentes faixas etárias, a maioria apresenta sintomas leves a moderado, não necessitando de hospitalização. Principais sintomas podemos ver na Tabela 1.

Tabela 1 – PRINCIPAIS SINTOMAS

SINTOMAS COMUNS	Febre e calafrios Tosse seca Cansaço Dores pelo corpo Dor de cabeça Diarréia
SINTOMAS GRAVES	Dificuldade de respirar ou falta de ar Dor ou pressão no peito Perda de fala ou movimento

Fonte: Proprio autor

O diagnóstico é obtido com a coleta de materiais respiratórios ou pela amostra de sangue.

**PCR** (proteína C-reativa) é capaz de detectar a presença do vírus nos pacientes, é feito a partir da coleta de material da garganta e do nariz. Este é recomendado para pessoas com até 12 dias de sintomas.

**Sorologia** é capaz de detectar níveis de anticorpos IgM e IgG em amostra de sangue e é aconselhado para pessoas a partir do sétimo dia com sintomas, que é o tempo que leva para os anticorpos começarem a serem produzidos.

**Teste de Antígeno** identifica a infecção atual e é realizado quando uma pessoa apresenta sinais ou sintomas, pode ser feito em pacientes assintomáticos que tiveram contato com positivo. Este é o exame mais rápido na divulgação dos resultados levando de 2 a 3 horas após aplicação do teste, o uso de machine learning auxilia no diagnóstico.

Não há registros científicos que comprovem a imunidade após um indivíduo ter sido infectado com o coronavírus, contudo após as variantes do Sars-Cov-2 já houveram vários casos de reincidência. Para ser confirmado que o paciente teve uma nova infecção os profissionais de saúde exigem um intervalo mínimo de 3 meses entre a primeira e a segunda infecção, para descartar a possibilidade do mesmo vírus ter permanecido no organismo por um longo tempo. Além disso, nas duas infecções é realizado o sequenciamento genético do vírus.

Sabemos que há fatores que aumenta o risco da doença para casos mais grave como: idosos, hipertensos diabéticos, fumantes, pessoas com doenças respiratórias, com problemas cardiovasculares e com sistema imunológico comprometido.

### 2.2.6 Tratamento/vacina

Não existe tratamento específico para o COVID-19, apenas autocuidados principalmente com higiene. Alguns tratamentos paliativos são o repouso, oxigênio em casos graves, suporte respiratório para casos críticos.

A Rússia anunciou no dia (13/07/2020) que concluiu parte dos testes clínicos necessários para comprovar a eficácia da imunização de uma vacina contra a COVID-19 desenvolvida por iniciativa do governo russo, a vacina aprovada foi desenvolvida pelo Centro Nacional de Pesquisa

para Epidemiologia e Microbiologia Gamalei.

As vacinas são produtos que protegem as pessoas de serem contaminadas por uma determinada doença. Geralmente contêm o vírus ou a bactéria causadora da enfermidade em forma atenuada ou inativa, ou seja, inofensivos para a saúde. As vacinas desempenham um papel fundamental para o mundo voltar a normalidade, no dia 08/12/2020 o Reino Unido iniciou a vacinação de sua população, no Brasil a vacinação começou no final de janeiro de 2021.

O laboratório Pfizer anunciou no dia 05/11/2021 que um teste clínico sobre seu comprimido Paxlovid, que conseguiu reduzir em cerca de 89% o risco de hospitalização ou morte entre pacientes adultos com elevado risco de desenvolver formas graves da doença. Os resultados do teste clínico intermediário são considerados tão bons que o laboratório americano enviará os dados para a Agência de Alimentos e Medicamentos FDA( Food and Drug Administration), dos Estados Unidos e posteriormente a Anvisa (Agência Nacional de Vigilância Sanitária) o mais rápido possível, para obter autorização de uso de emergência do novo medicamento. A Pfizer começou a desenvolver o medicamento especificamente contra o coronavírus em março de 2020.

### 2.2.7 Descrição do COVID-19 na Paraíba

A Paraíba é uma das 27 unidades federativas do Brasil. Localiza-se no leste da Região Nordeste limitando-se com três estados: Rio Grande do Norte (Norte), Pernambuco (Sul) e Ceará (oeste), além do Oceano Atlântico (leste). Seu território de 56.469,778km<sup>2</sup> é dividido em 223 municípios com uma cerca de 3,9 milhões de habitantes. A Paraíba é o 14º estado mais populoso do Brasil, a capital João Pessoa é o município mais populoso, outros municípios com população superior a 100.000 habitantes são: Campina Grande, Santa Rita e Patos. No que se refere aos aspectos econômicos, social e político, a Paraíba está dividida em 4 mesorregiões, assim denominadas, de acordo com a classificação estabelecida pelo IBGE: Mata Paraibana, Agreste Paraibano, Borborema e Sertão Paraibano, como vemos na figura 3.

Figura 3 – ESTADO DA PARAÍBA



Fonte: Mapas (2021)

A Paraíba está entre os estados da Federação que tiveram o melhor desempenho frente ao combate do novo coronavírus. De acordo com o levantamento realizado pelo Centro de Liderança Pública (CLP), publicado em agosto de 2020, o estado estava entre os cinco mais satisfatórios no ranking, em dezembro do mesmo ano a Paraíba estava na 11<sup>o</sup> posição (PARAÍBA, 2020). A avaliação leva em conta um conjunto de ações: transparência, taxa de mortalidade pelo COVID-19, proporção de casos por habitantes, etc..

A Paraíba deu início ao plano de contingência para combate ao COVID- em fevereiro de 2020. O primeiro caso suspeito foi notificado no dia 26 de fevereiro de 2020, sendo o primeiro caso confirmado em 18 de março de 2020 na cidade de João Pessoa.

### 3 MODELO SIR

#### 3.1 REPRODUTIVIDADE BASAL

A força de infecção indica o grau de contaminação no grupo de indivíduos suscetíveis pelos agentes infecciosos transmitidos por todos os indivíduos infectados. Já a razão de reprodução básica, também conhecida como  $R_0$ , pode ser interpretada como o número de casos secundários que um indivíduo infeccioso pode gerar em uma população que está totalmente suscetível. Este parâmetro está diretamente relacionado com o Teorema do Valor Limiar (DIEKMANN; HEESTERBEEK; METZ, 1990), que determina a existência de uma densidade mínima de pessoas na população em estudo que são suscetíveis a uma doença e acima da qual é favorável o surgimento de uma epidemia transmitida diretamente. Para cada doença epidemiológica é possível estabelecer o parâmetro  $R_0$  pelo qual podemos verificar o desenvolvimento dos infectados. Além disso, como a razão de reprodução básica é uma grandeza matemática, ela poderá ser derivada da força de Infecção.

A reprodutividade basal é medida pelo parâmetro  $R_0$  (taxa de reprodução) e significa o número médio de pessoas que são infectadas por um único indivíduo,  $R_0 = \frac{\beta}{\gamma}$ . Segundo publicado no Imperial College (ZHAO et al., 2020), este valor varia entre 2 e 4 (2.6 à 3.5), no caso do COVID-19. Este valor se modifica ao longo do desenvolver da pandemia. Sendo assim, o parâmetro  $R_0$  poderá assumir os seguintes valores:

- \* Se  $R_0 = 1$ , temos uma condição de equilíbrio epidêmico;
- \* Se  $R_0 < 1$ , então o número de infectados será decrescente e a pandemia se cessará;
- \* Se  $R_0 > 1$ , a epidemia continuará na população.

Conhecendo  $R_0$  e  $\gamma$  podemos encontrar a taxa de infecção  $\beta$ . Lembrando que a tendência estimada da curva pode ser alterada conforme as ações implementadas pelo governo, (SOUZA; SIQUEIRA; GRASSIOLLI, 2020).

#### 3.2 SIR

Este modelo é considerado robusto para modelar epidemias como a COVID-19, é bem conhecido na literatura e mostra a evolução de uma população *suscetível*  $S$ , *infectada*  $I$  e *recuperada*  $R$  (MCKENDRICK, 1927). Este modelo tem sido amplamente utilizado para modelar o SARS-CoV-2 como por (ABRIL et al., 2020), (VISBAL; PEDRAZA, 2020) e (MARTINS et al., 2020). O conjunto de equações mais simples do modelo SIR é dados por:

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{\beta IS}{N} \quad (3.1)$$

$$dI = \frac{\beta IS}{N} - \gamma I \quad (3.2)$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I \quad (3.3)$$

onde  $\beta$  e  $\gamma$  são positivos, sendo  $\beta$  a taxa de transmissão que determina a taxa de novas infecções e  $\gamma$  determina a taxa de recuperação dos indivíduos,  $dt$  representa a variação do tempo em relação aos suscetíveis e aos recuperados e  $N = S + I + R = K$  é o total da população,  $N$  é constante ( $K$ ) e não é considerado natalidade e mortalidade devido à outros fatores. Temos ainda, o modelo matemático SIR de equações diferenciais ordinárias.

$$\frac{dS}{dt} = -\beta \cdot S(t) \cdot I(t) \quad (3.4)$$

$$\frac{dI}{dt} = \beta \cdot S(t) \cdot I(t) - \gamma \cdot I(t) \quad (3.5)$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma \cdot I(t) \quad (3.6)$$

e como resultado disto, pode-se afirmar que a soma das taxas de mudança de **Suscetíveis**, **Infectados** e **Recuperados**, como mostrado abaixo.

$$\frac{dS}{dt} + \frac{dI}{dt} + \frac{dR}{dt} = 0 \quad (3.7)$$

Neste trabalho, utilizaram-se taxas, portanto

$$S = \frac{s}{N} \quad (3.8)$$

$$I = \frac{i}{N} \quad (3.9)$$

$$R = \frac{r}{N} \quad (3.10)$$

assim,

$$S + I + R = 1 \quad (3.11)$$

- **SUSCETÍVEIS:** indivíduos ainda não expostos e que podem adquirir a infecção. Todos os indivíduos nascem suscetíveis. Não consideramos emigração ou imigração.;
- **INFECTADOS:** indivíduos infectados, doentes ou não, que podem transmitir para outras pessoas;

- **RECUPERADOS / REMOVIDOS:** indivíduos que se infectaram, adquirindo imunidade; ou que morreram em decorrência da doença. Eles ganham imunidade total.

No modelo SIR temos dois parâmetros importantes:

- a taxa de transmissão  $\beta$  para quantas pessoas, em média, um indivíduo pode transmitir a doença, e
- a taxa de recuperação  $\gamma$  considera-se que os indivíduos já infectados não podem ser infectados novamente.

Diante disso, denotemos por  $c$  o número médio de contatos que um indivíduo faz num determinado intervalo de tempo com pessoas infectadas. Então, multiplicando os fatores  $\beta dt$ ,  $c$  e  $\frac{I}{N}$  obtemos a probabilidade de contágio de um indivíduo:  $c\beta(\frac{I}{N})dt$ . Em resumo, uma pessoa suscetível possui probabilidade  $c\beta(\frac{I}{N})dt$  de infecção ao ser exposta a pessoas infectadas numa variação de tempo  $dt$ .

## 4 ANÁLISE

Para análise foi utilizado os dados do site Brasil.IO (2021) e para auxiliar nas análises dos dados foi utilizado os softwares R e Excel os quais facilitaram o controle sobre a instabilidade do projeto por se tratar de grandes massas de dados. Os pacotes principais utilizados no **software R** foram: ggplot2, nCov2019, dplyr, scales e deSolve.

Os dados são de março de 2020 até outubro de 2021 e foram utilizadas 6 variáveis:

- data (de registro),
- estado (PB),
- casos confirmados dia,
- casos confirmados acumulado (583 dias),
- óbitos dia e
- óbitos acumulado (583 dias).

assim veremos a média de casos confirmados e de óbitos no estado da Paraíba.

Os dados obtidos foram submetidos à análise descritiva e a uma análise mais robusta para modelar epidemias como a COVID-19 utilizando o modelo SIR, ele é bem conhecido na literatura e mostra a evolução de uma população suscetível S, infectada I e recuperada R.

### 4.1 PACOTES NO R PARA ANÁLISE DO COVID-19

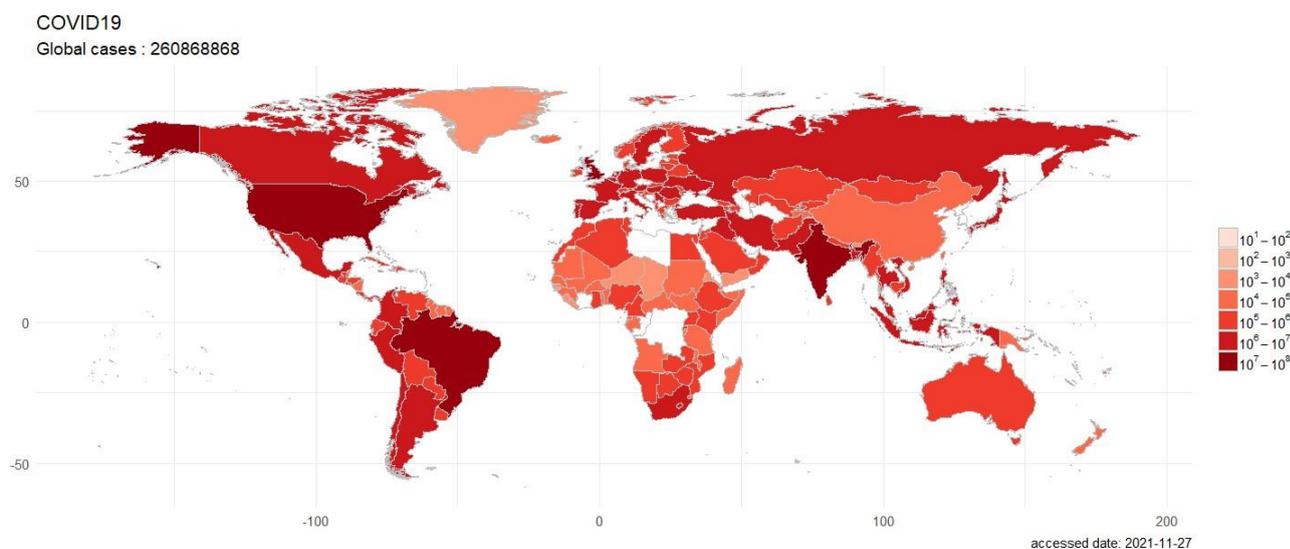
- **COVIDIBGE** - Pacote para facilitar o download, importação e análise dos dados amostrais realizado pelo IBGE. A PNAD (Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios) possui um tipo de microdados mensal, que contém a parte básica investigada pela pesquisa contendo as informações sobre mercado de trabalho e síndrome gripal. Através do objeto criado com este pacote, é possível utilizar o pacote survey para realizar análises considerando o efeito do esquema de seleção utilizado no plano amostral complexo da pesquisa e calcular corretamente as medidas de erro das estimativas, considerando o estimador de pós-estratificação utilizado na pesquisa, mais informações podemos ver pela página de (ASSUNCAO, 2021).
- **CORONABR** - é um pacote de R para fazer download e visualizar os dados dos casos diários de coronavírus (COVID-19) disponibilizados por diferentes fontes: Brasil.IO, Ministério da Saúde e Johns Hopkins University. O objetivo é facilitar o acesso aos dados de diferentes fontes, usando ferramentas de acesso aberto e que permitam reprodutibilidade, mais informações em (CI., 2021).

- **NCOV2019** - Pacote que fornece acesso aos dados epidemiológicos sobre o surto de coronavírus, estatísticas de base detalhadas, ele também inclui informações sobre o desenvolvimento de vacinas e candidatos a terapêuticas (WU et al., 2021).
- **COVID19** - Covid19 usa um banco de dados Postgres para armazenar os dados coletados. Crie um banco de dados e um usuário postgres com permissões para criar novas tabelas e índices. A Covid19 cuidará da própria criação da tabela, mais informações em (LAMBIN, 2021).

## 4.2 RESULTADOS

Utilizando o pacote nCov2019 foi primeiramente feito os gráficos de número de casos nos países como visto na Figura 4.

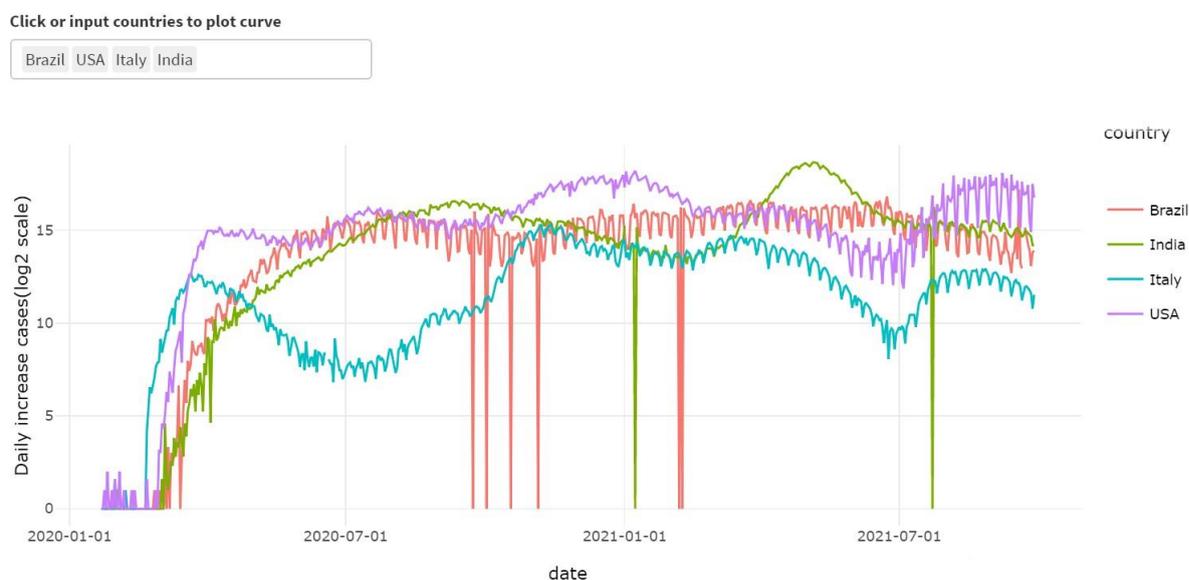
Figura 4 – NÚMERO DE CASOS CONFIRMADOS ENTRE PAÍSES



Fonte: Próprio Autor

Na Figura 4, temos os números de casos para os países do globo terrestre. Percebe-se que o Brasil, Itália, EUA e Índia tem tom na paleta coroplética mais escura, indicando que entre os 223 países analisados são os que apresentam maior quantidade de casos de Covid-19; Em relação ao número de casos ao longo do tempo via série histórica.

Figura 5 – PAÍSES EM EVIDÊNCIA NA PANDEMIA



Fonte: Próprio Autor

Pode-se observar na figura 5 a comparação ao longo do tempo dos números de casos entre os países que mais tiveram destaque na pandemia, como Itália, EUA, Índia e Brasil. Percebe-se que os EUA seguidos da Índia, Brasil e Itália são os países que diariamente ao longo do tempo apresentam maioria no número de casos confirmados e algumas quedas acentuadas dadas por **lockdowns** onde obriga a população a manter distanciamento social em larga escala.

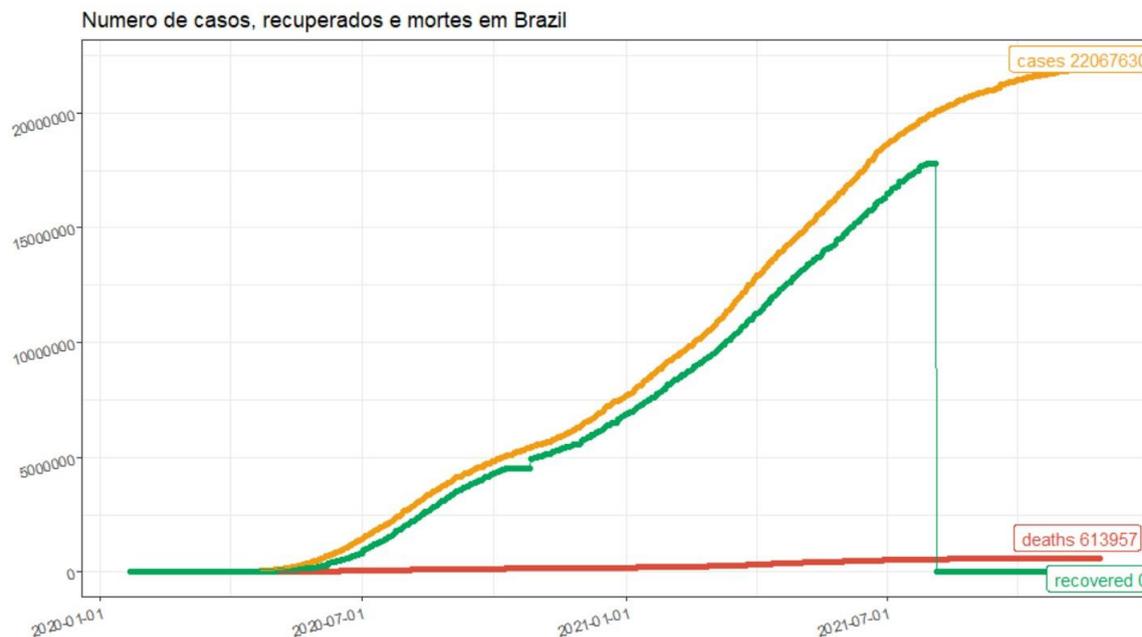
A Figura 6 foi gerada no pacote nCov2019 com dados do mesmo onde mostra a quantidade de casos acumulados: confirmados, recuperados e óbitos no Brasil. Podemos ver que após Julho de 2021 pararam com a contagem de recuperados, um erro nos dados do próprio pacote.

A quantidade de casos acumulados na Paraíba está representada na Figura 7, onde podemos ver que aconteceu dois picos mais elevados do número positivo de casos no estado e que nos últimos meses houve uma estabilidade no crescimento de casos confirmados.

A quantidade de casos e mortes na Paraíba são apresentadas na Figura 8, esse primeiro gráfico mostra 4 picos do aumento de casos confirmados, acontecendo no primeiro momento entre jun./2020 à set./2020 e no último entre set./2021 à out./2021, podemos ver também que houve uma queda entre out./2020 à dez./2020 e de ago./2021 à set./2021.

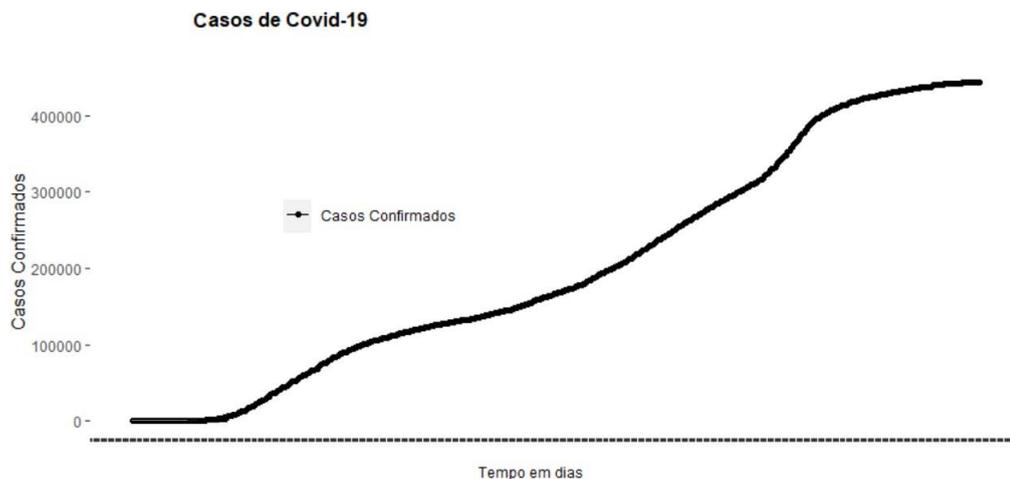
A Figura 9, apresenta as médias móveis de casos confirmados e mortes para o estado da Paraíba. O número de casos e mortes no estado da Paraíba foi calculado via os dados do pacote Brasil.IO (BRASIL.IO, 2021). De forma geral, percebe-se que há de acordo com o gráfico três momentos distintos caracterizados pelas ondas impulsionados pelas variantes do novo Coronavírus. Utilizando das médias móveis, que é rastreador de tendência muito utilizado

Figura 6 – CASOS CONFIRMADOS, RECUPERADOS E ÓBITOS NO BRASIL.



Fonte: Próprio Autor

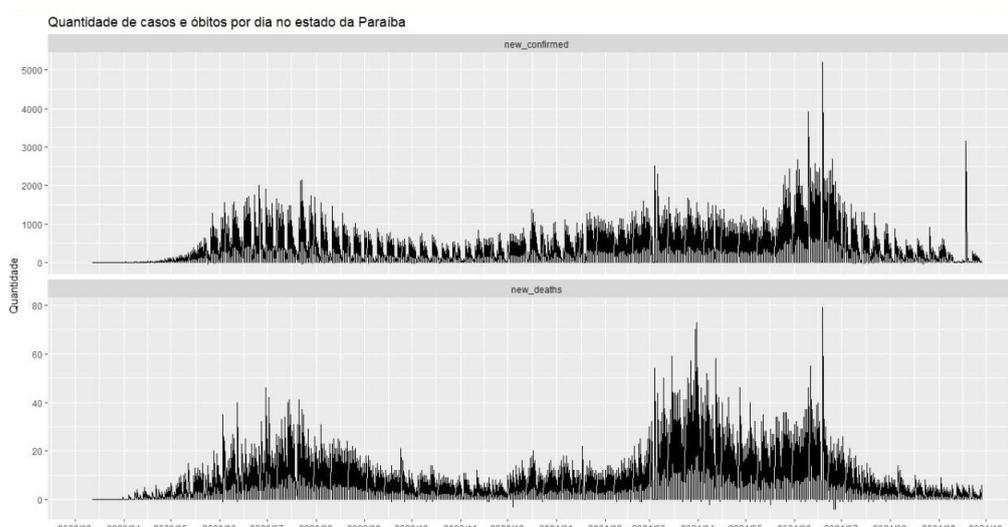
Figura 7 – CASOS CONFIRMADOS NA PARAÍBA.



Fonte: Próprio Autor

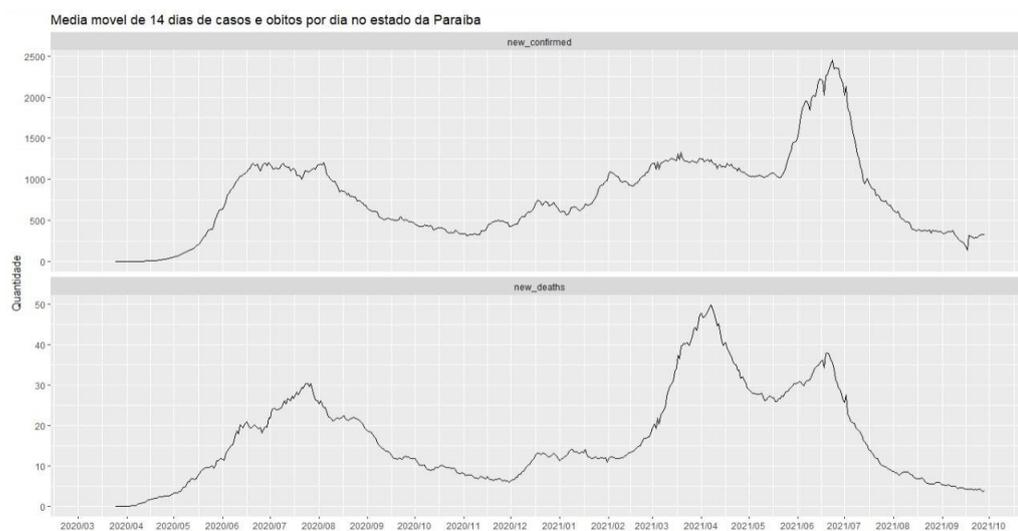
na análise técnica, tendo como função nessa análise exibir a média de casos confirmados e de óbitos durante a pandemia COVID-19, além de mostrar sua mudança com o passar do tempo na Figura 8. A média móvel de 14 dias é suavizada dando a real proporção do comportamento da pandemia no Estado.

Figura 8 – CASOS CONFIRMADOS E ÓBITOS NA PARAÍBA.



Fonte: Próprio Autor

Figura 9 – MÉDIA MÓVEL DE CASOS CONFIRMADOS E ÓBITOS NA PARAÍBA



Fonte: Próprio Autor

#### 4.2.1 Simulação

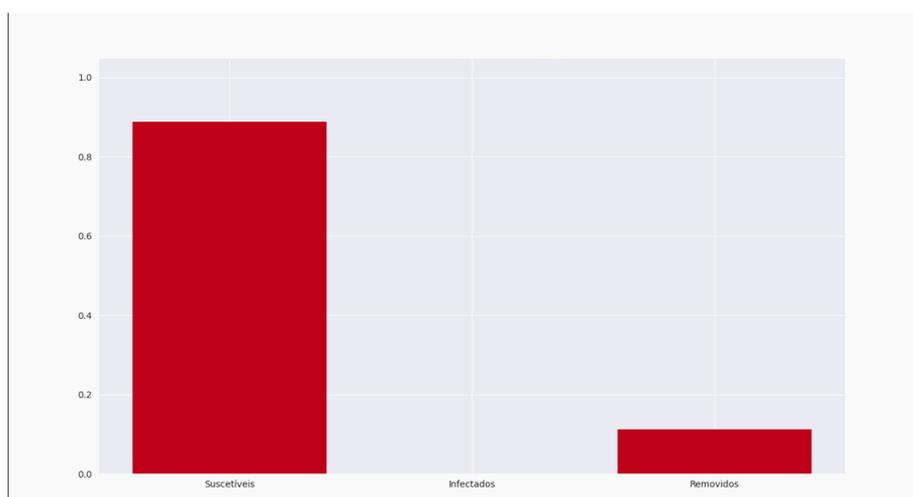
Foi realizado uma simulação do modelo SIR na Paraíba pelo simulador (GOMES SEBASTIÃO CÍCERO PINHEIRO; ROCHA, 2021), onde os parâmetros utilizados podemos ver na Tabela 2.

As Figuras 10, 11,12 e 13 foram feitas com dados simulados já citados na Tabela 2.

Tabela 2 – PARÂMETROS PARA SIMULAÇÃO DO MODELO SIR NA PARAÍBA.

PARAMETROS	VALORES
<b>População</b>	3969342
<b>Nº de casos confirmados</b>	444649
<b>Nº de recuperados</b>	444453
<b>Percentual de circulação</b>	81,2
<b>Tempo de infecção</b>	5,5
<b>Índice de reprodução basal</b>	2,25
<b>Taxa de quarentena</b>	5,973

Figura 10 – ESTADO DA POPULAÇÃO NO INÍCIO DA PANDEMIA



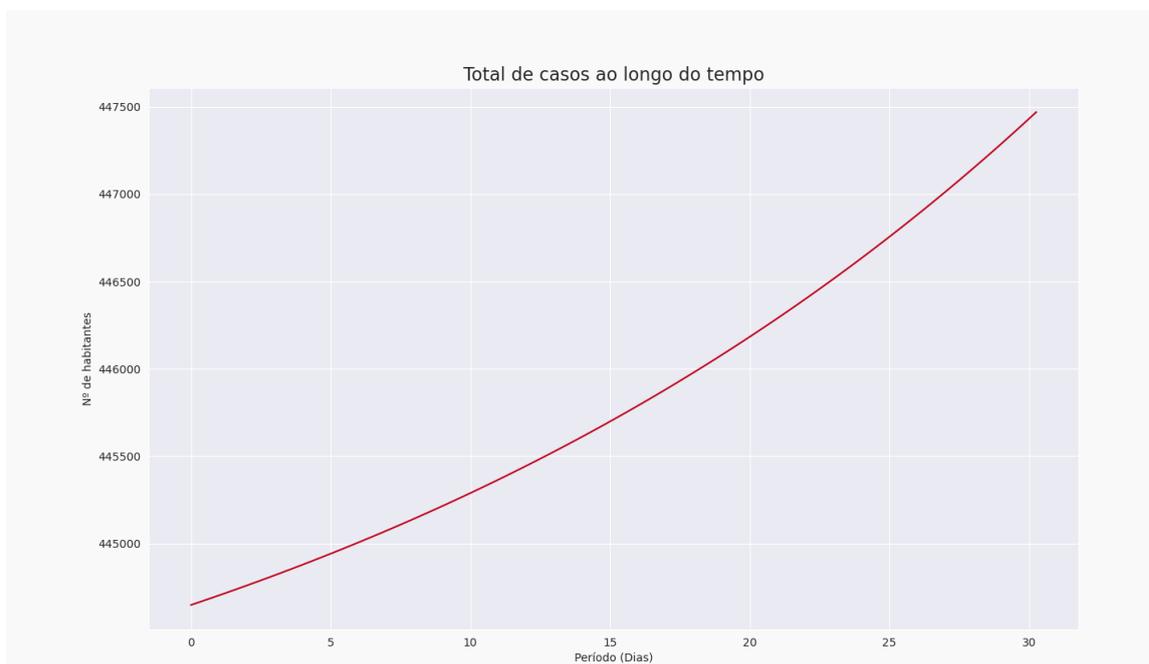
Fonte: Próprio Autor

A Figura 10 mostra a população suscetível, infectada e recuperada no início da pandemia, onde podemos ver que quase toda a população suscetível ao vírus, ninguém infectado e poucas pessoas recuperadas/removidas.

A Figura 11 mostra a quantidade acumulada de casos ao longo do tempo chegando a quase 450.000 de pessoas contaminadas, já na Figura 12 a quantidade de infectados ao longo do tempo chega a quase 550 infectados por dia.

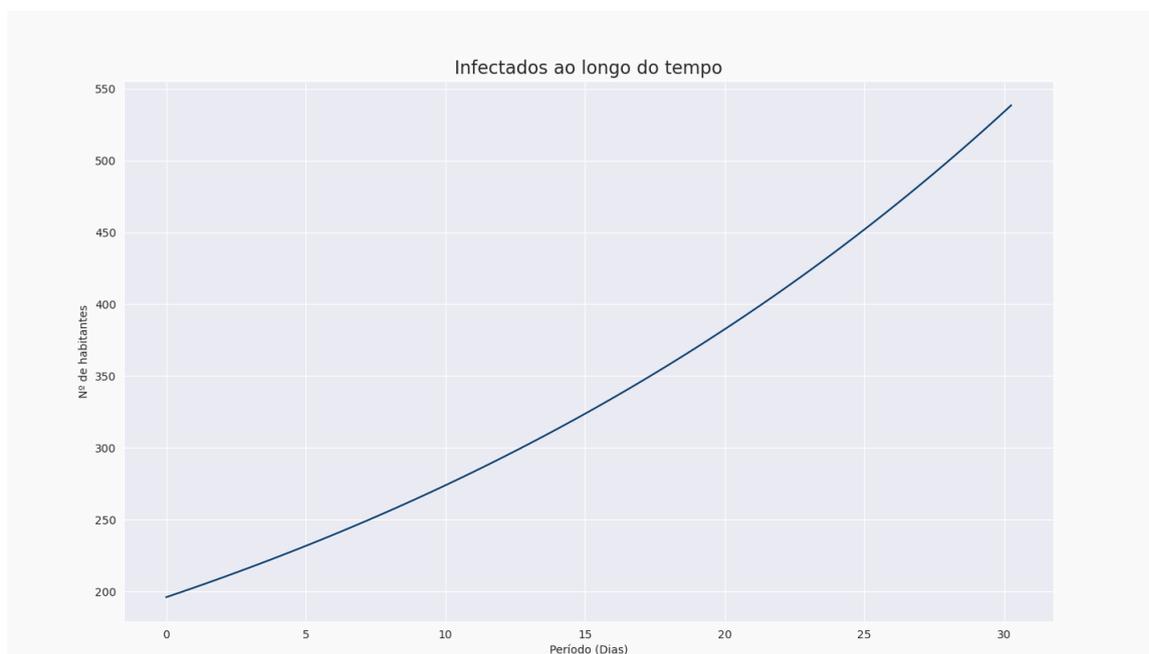
A figura 13 mostra a população suscetível ao longo do tempo. Note que há uma pequena projeção em cada Figura de 15 há 30 dias, essa simulação chega bem perto da nossa realidade.

Figura 11 – CASOS CONFIRMADOS AO LONGO DO TEMPO.



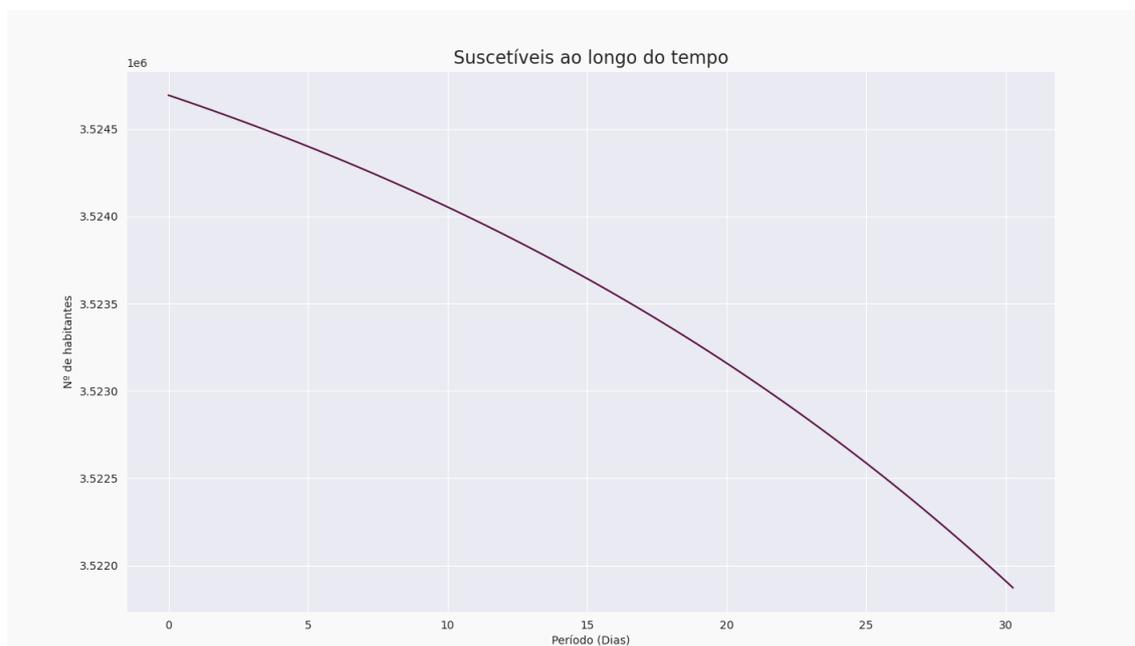
Fonte: Próprio Autor

Figura 12 – INFECTADOS AO LONGO DO TEMPO.



Fonte: Próprio Autor

Figura 13 – SUCETÍVEIS AO LONGO DO TEMPO.

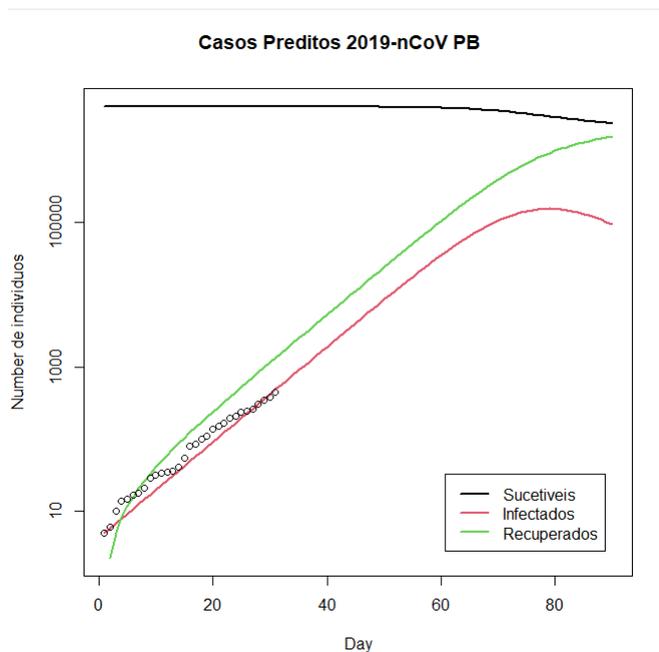


Fonte: Próprio Autor

#### 4.2.2 Aplicação

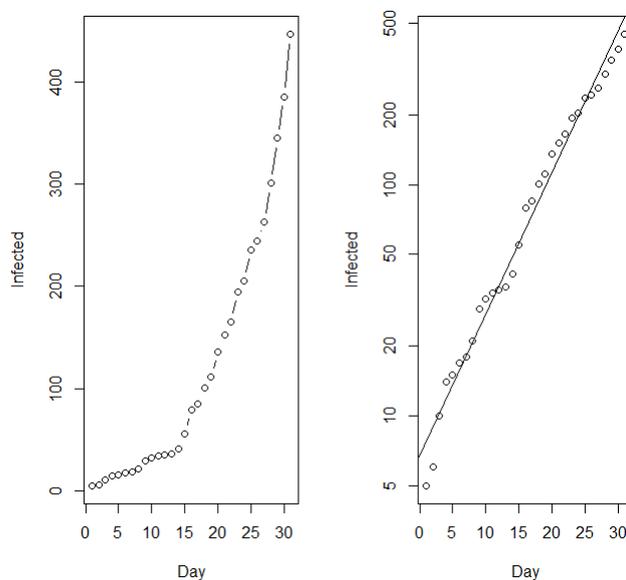
Foi feita a aplicação do modelo SIR nos 30 primeiros dias da pandemia no estado da Paraíba e uma projeção de 50 dias, onde o modelo funcionou perfeitamente mostrando a população suscetível, infectada e recuperada e a projeção respectivamente como mostrado na Figura 14.

Figura 14 – MODELO SIR NA PARAÍBA PARA OS 30 PRIMEIROS DIAS.



Fonte: Próprio Autor

Figura 15 – AJUSTE DO MODELO SIR PARA OS 30 PRIMEIROS DIAS.



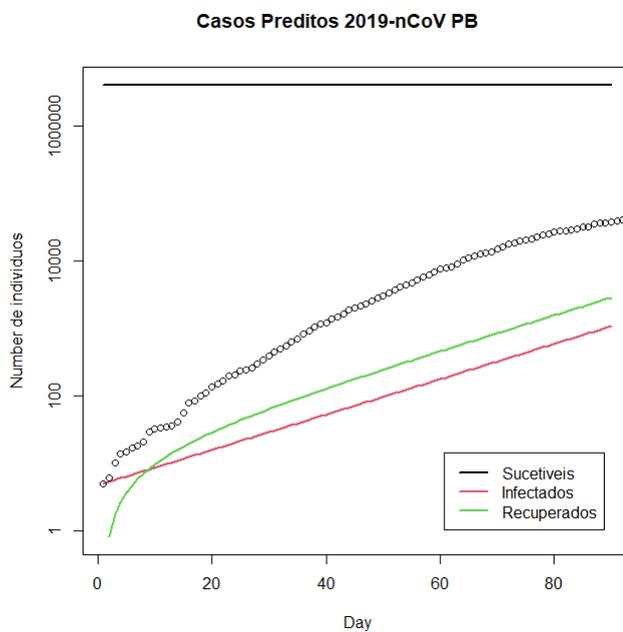
Fonte: Próprio Autor

Na figura 15 podemos ver o ajuste do modelo referente aos 30 dias, que demonstra a convergencia do modelo SIR na fase inicial da pandemia.

Após sucesso na aplicação dos primeiros dias de pandemia foi aplicado o modelo para

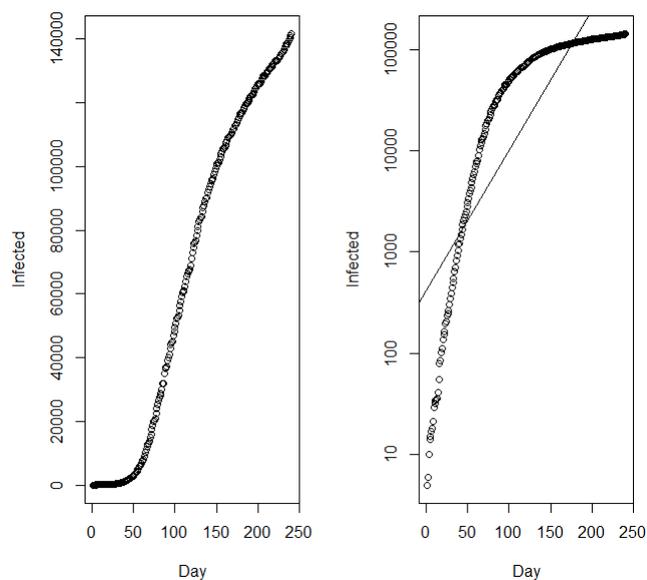
250 dias de pandemia onde visivelmente não houve um bom ajuste como podemos ver na Figura 16 e na Figura 17.

Figura 16 – MODELO SIR NA PARAÍBA EM 250 DIAS.



Fonte: Próprio Autor

Figura 17 – AJUSTE DO MODELO SIR PARA 250 DIAS.



Fonte: Próprio Autor

---

Após alguns testes, pode-se afirmar que os dados da Paraíba não ajusta ao modelo SIR, onde um dos motivos pode ser a tabulação de dados que sofre uma queda de casos no final de semana e na segunda-feira tem uma alta de casos bem elevado. Infelizmente a estimação dos parâmetros não converge e um dos motivos pode ser a variabilidade de casos confirmados, recuperados e óbitos que acontece com o COVID-19.

## 5 CONCLUSÃO

O presente estudo analisou o impacto na rede de saúde no estado da Paraíba, decorrente da pandemia de Covid-19, causada pelo novo coronavírus (SARS-CoV-2), a partir da aplicação do modelo matemático epidemiológico SIR. A simulação do modelo para os 30 primeiros dias de pandemia indicaram situações semelhantes a realidade enfrentada pelo estado, possibilitando dessa forma, orientar na tomada de decisões por parte dos gestores estaduais e municipais a fim de garantir condições de saúde e biossegurança à população, porém ao usar esse modelo ao longo do tempo da pandemia o mesmo não se ajustou.

Inicialmente as medidas de contenção e barreiras sanitárias, impostas pelo poder público, foram suficientes para conter o avanço da taxa de contaminação. Contudo, algumas cidades atingiram níveis elevados de contágio saturando a rede de saúde em regiões de saúde como Santa Rita e João Pessoa, comprometendo assim os resultados esperados pelas estratégias de enfrentamento da doença.

Não foram encontrados trabalhos que façam o monitoramento do Covid-19 com aplicação do modelo SIR na Paraíba. Muito embora, que para este estudo usando os dados da Paraíba não foi possível ajustar modelo matemático SIR, uma opção seria trabalhar com modelo SIR MODIFICADO para descrever os dados estudados, onde espera-se obter resultados que descrevam melhor os dados ao longo do tempo.

## REFERÊNCIAS

- ABRIL, F. M. et al. Modelo sir de la pandemia de covid-19 en colombia. Instituto de Salud Publica, Facultad de Medicina-Universidad Nacional de . . . , 2020. Citado na página 20.
- ASSUNCAO, G. Análise de microdados da pnad covid19 com os pacotes covidibge e survey. jun. 2021. Disponível em: <<https://rpubs.com/gabriel-assuncao-ibge/covid>>. Citado na página 23.
- BRANCA, P. M. de S. *COVID-19*. 2021. Disponível em: <<http://santabranca.sp.gov.br/covid-19/>>. Citado na página 14.
- BRASIL.IO. dataset: dataset covid19. out. 2021. Disponível em: <<https://brasil.io/dataset/covid19/files/>>. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 25.
- CI., S. M. K. G. A. S. T. T. Download de dados de covid-19 no brasil. 2021. Disponível em: <<https://github.com/liibre/coronabr>>. Citado na página 23.
- CNNBRASIL. Novos dados sobre pesquisadores de wuhan aumentam debate sobre origens da covid. maio 2021. Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/saude/novos-dados-sobre-pesquisadores-de-wuhan-aumentam-debate-sobre-origens-da-covid/>>. Citado na página 15.
- COURSERA. Natural history of sars-cov-2. 2021. Disponível em: <<https://www.coursera.org/learn/covid-19-contact-tracing/quiz/yqkP6/natural-history-of-sars-cov-2-unlimited-attempts-permitted?redirectToCover=true>>. Citado na página 16.
- DIEKMANN, O.; HEESTERBEEK, J.; METZ, J. On the definition and the computation of the basic reproduction ratio  $r_0$  in models for infectious diseases in heterogeneous populations. *Journal of Mathematical Biology*, Springer Science and Business Media LLC, v. 28, n. 4, jun 1990. Citado na página 20.
- EDUCAÇÃO, M. *As piores epidemias da história*. 2021. Disponível em: <<https://mundoeducacao.uol.com.br/curiosidades/as-piores-epidemias-historia.htm>>. Citado na página 14.
- FIOCRUZ. *O que é uma pandemia*. 2021. Disponível em: <<https://www.bio.fiocruz.br/index.php/br/noticias/1763-o-que-e-uma-pandemia>>. Citado na página 13.
- GOMES SEBASTIÃO CÍCERO PINHEIRO; ROCHA, C. R. M. I. O. Modelagem dinâmica aplicada à covid-19. jan. 2021. Citado na página 27.
- GRUBER, A. *A origem do Sars-CoV-2*. 2021. Jornal da USP. Disponível em: <<https://pfarma.com.br/coronavirus/5439-origem-covid19.html>>. Citado na página 16.
- LAMBIN, C. covid19. 2021. Disponível em: <<https://github.com/clambin/covid19/pkgs/container/covid19>>. Citado na página 24.
- MAPAS, B. Mapa da paraíba – mesorregiões. out. 2021. Disponível em: <<https://www.baixarmapas.com.br/mapa-da-paraiba-mesorregioes/>>. Citado na página 18.

MARTINS, C. M. et al. PREDICTIVE MODEL FOR COVID-19 INCIDENCE IN a MEDIUM-SIZED MUNICIPALITY IN BRAZIL (PONTA GROSSA, PARANÁ). *Texto & Contexto - Enfermagem*, FapUNIFESP (SciELO), v. 29, 2020. Citado na página 20.

MCKENDRICK, W. O. K. e A. A contribution to the mathematical theory of epidemics. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, The Royal Society, v. 115, n. 772, p. 700–721, aug 1927. Disponível em: <<https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.1927.0118>>. Citado na página 20.

PARAÍBA, G. do Estado da. *Paraíba está entre os Estados com melhor desempenho no combate ao coronavírus*. 2020. Disponível em: <[SOUZA, T. A. de; SIQUEIRA, B. S.; GRASSIOLLI, S. OBESIDADE, COMORBIDADES e COVID19: UMA BREVE REVISÃO DE LITERATURA. \*Varia Scientia - Ciências da Saúde\*, Universidade Estadual do Oeste do Parana - UNIOESTE, v. 6, n. 1, p. 72–82, jul 2020. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 20.](https://paraiba.pb.gov.br/noticias/paraiba-esta-entre-os-estados-com-melhor-desempenho-no-combate-ao-coronavirus#:~:text=ParaíbaestáentreosEstadoscommelhordesempenhonocombateaocoronavírus,-Compartilhar&text=AParaíbafiguraentreos,coronavírus(Covid-19).> Citado na página 19.</p></div><div data-bbox=)

TOZZI INGRID LOURENÇO, V. T. M. A. N. J. R. A. A. R. C. e. M. N. M. *VOCÊ SABE COMO SURTIU O CORONAVÍRUS SARS-COV-2?* 2021. Disponível em: <<https://coronavirus.saude.mg.gov.br/blog/27-como-surgiu-o-coronavirus>>. Citado na página 15.

UNAIDS. *Estatísticas*. 2021. Disponível em: <<https://unaids.org.br/estatisticas/>>. Citado na página 13.

VISBAL, J. H. W.; PEDRAZA, M. C. C. Aproximación matemática del modelo epidemiológico sir para la comprensión de las medidas de contención contra la covid-19. *Rev. esp. salud pública*, p. 0–0, 2020. Citado na página 20.

WU, T. et al. nCov2019: an r package for studying the COVID-19 coronavirus pandemic. *PeerJ*, PeerJ, v. 9, p. e11421, jun 2021. Citado na página 24.

ZHAO, S. et al. Preliminary estimation of the basic reproduction number of novel coronavirus (2019-nCoV) in china, from 2019 to 2020: A data-driven analysis in the early phase of the outbreak. *International Journal of Infectious Diseases*, Elsevier BV, v. 92, p. 214–217, mar 2020. Citado na página 20.