

## APLICAÇÃO DO MODELO SIR À COVID-19: distanciamento social e (des)evolução da pandemia no Tocantins

APPLICATION OF THE SIR MODEL TO COVID-19: social distance and (no-)evolution of the pandemic in state of the Tocantins

APLICACIÓN DEL MODELO SIR A LA COVID-19: distanciamiento social y (des)evolución de la pandemia en Tocantins

### Élis Gardel da Costa Mesquita

Doutor em Matemática (Universidade de Brasília - UnB). Professor do Programa de Mestrado em Rede de Matemática da Universidade Federal do Tocantins (UFT). [elisgardel@uft.edu.br](mailto:elisgardel@uft.edu.br).

 0000-0003-2385-4108

### Janeisi de Lima Meira

Doutor em Ensino de Ciências e Matemática (Universidade Federal do Pará - UFPA). Professor Adjunto da Universidade Federal do Tocantins (UFT), nos cursos de Matemática e no Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Saúde. [janeisi@uft.edu.br](mailto:janeisi@uft.edu.br).

 0000-0002-8081-8747

### José de Ribamar Leonel Dias Neto

Especialista em Matemática (Faculdade Antonio Propício Aguiar Franco - FAPAF). Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins (IFTO). [leonel@uft.edu.br](mailto:leonel@uft.edu.br).

 0000-0001-6319-3063

Correspondência: Universidade Federal do Tocantins, Campus Universitário de Arraias. Avenida Universitária Centro, 77330-000 - Arraias, TO - Brasil.

Recebido em: 15.03.2020

Aceito em: 03.04.2020.

Publicado em: 01.05.2020.

### RESUMO:

Esse artigo é um estudo acerca do comportamento e propagação da pandemia de COVID-19, no estado do Tocantins, a partir dos dados notificados no período de 18 de março a 10 de junho. Para tanto, utilizou-se uma modificação do modelo matemático SIR, no qual foram acrescentados alguns compartimentos auxiliares. Analisamos aspectos epidêmicos tal como a velocidade da curva de contágio e seus impactos no sistema de saúde. Como os dados são disponibilizados diariamente, foi realizada uma discretização do sistema de equações diferenciais que compõem o modelo e a partir da disponibilidade dos dados conhecidos investigamos a correlação entre o índice de isolamento social e o fator de reprodução básico. Através de uma interpolação bastante simples obteve-se taxas de contágio aproximadas propiciando avaliar o comportamento da evolução das curvas de contágio e daquelas que dependem delas, o que nos possibilita antecipar cenários com base nas linhas de tendência dos dados gerados auxiliando assim as tomadas de decisões do poder público.

**PALAVRAS-CHAVES:** COVID-19; Modelo matemático SIR; Índice de isolamento social; Estado do Tocantins.

### Introdução

A atual emergência planetária vivida recentemente em função da pandemia decorrente de doenças infecciosas causadas por síndromes respiratórias graves, não assombrava tanto antes do coronavírus (SARS-CoV-2), que originou a doença do novo coronavírus (COVID-19). O novo agente do coronavírus foi descoberto em 2019, após casos registrados na República Popular da China, no continente asiático. Estudos apontam que a COVID-19 é derivada da família do tipo SARS-Cov-2, tendo sido

inicialmente encontrado em animais silvestres, particularmente em frutos do mar e morcegos comercializados em mercados, na cidade de Wuhan, na província de Hubei, daquele país (BENVENUTO, 2020; WHO, 2020).

O coronavírus é conhecido desde 1937, mas somente a partir de 1965 foi descrito como coronavírus devido seu perfil se assemelhar a uma coroa. Embora seja comum a infecção de seres humanos pelo coronavírus, este apresenta ocorrências de baixa letalidade. A taxa de letalidade é um parâmetro para se ter dimensão da gravidade da doença em determinada localidade/região. Contudo, não significa que a pessoa acometida pela doença chegará a óbito, podendo, se recuperar e voltar às suas atividades habituais.

Segundo a WHO (2020), atualmente a humanidade está exposta a sete tipos de coronavírus (HCoV), a saber: HCoV-229E, HCoV-OC43, HCoV-NL63, HCoV-HKU1, SARS-COV (que causam síndromes respiratórias aguda grave), MERS-COV (que causa síndrome respiratória do Oriente Médio) e o, mais recente, novo coronavírus (que no início foi temporariamente nomeado 2019-nCoV, e, a partir de fevereiro de 2020, recebeu o nome de SARS-CoV-2). Esse novo coronavírus é responsável por causar a doença COVID-19, cuja letalidade varia de acordo com a região, no Brasil essa taxa de aproxima de 4%.

A gravidade do novo coronavírus (COVID-19) foi declarado, em janeiro de 2020, pela OMS, como sendo de "Emergência de Saúde Pública de Importância Internacional (ESPII) – que é o mais alto nível de alerta declarado por essa Organização, conforme está previsto no Regulamento Sanitário Internacional" (WHO, 2020). Esse tipo de emergência alerta para o risco de saúde pública a outros países de uma doença devido a sua disseminação internacional, exigindo assim ações coordenadas e imediatas para seu controle e ou tratamento a fim de prevenir a propagação mundial. Para este caso, tal preocupação decorre da dificuldade de controle e combate devido a alta capacidade de contaminação (IHR, 2005) e transmissibilidade que pode ocorrer, inclusive a partir de casos assintomáticos.

Neste sentido, o presente artigo consistiu na análise dos dados disponibilizado pelos órgãos públicos de saúde e das produções científicas acerca do novo coronavírus (SARS-Cov-2), causador da doença COVID-19. Diante disso, objetivou-se realizar uma análise sistemática a partir da aplicação de modelo matemático epidemiológico da situação epidêmica do estado do Tocantins, na região norte do Brasil, com a intenção de provocar reflexões e debates sobre o cotidiano enfrentado por este estado desde o registro do primeiro caso dessa doença, antevendo assim situações epidemiológicas com

base nas orientações dos órgãos de segurança e possibilitando ações por parte dos governantes.

Para isso, construímos um desenho metodológico com base nos dados disponibilizados pelos boletins epidemiológicos diários publicados pela Secretaria de Estado de Saúde do Tocantins. Adotamos como espaço temporal os boletins publicados no intervalo do dia 18 de março, quando houve o registro do primeiro caso no estado até o dia 10 de junho, data de submissão deste artigo. A sistematização e tratamento desses dados se deu a partir da aplicação rigorosa do modelo matemático epidemiológico SIR, com auxílio dos softwares Geogebra, Solver-LibreOffice e Calc-LibreOffice para gerar os gráficos e fazer algumas análises estatísticas de dados.

As análises realizadas a partir da aplicação do modelo matemático epidemiológico apontaram que as medidas de contenção sugeridas pela OMS, como distanciamento e isolamento social, medidas básicas de higiene pessoal, uso de máscara, testagem como método de monitoramento contribuíram para o desaceleramento do contágio que equivale ao achatamento da curva de contágio e com isso evitou o colapso do sistema de saúde e dos serviços funerários.

### **Do Sars-Cov-1 ao Sars-Cov-2**

Em 2003 foram publicados os primeiros trabalhos científicos relacionando um novo coronavírus de origem animal com o surto de pneumonia originada na China com rápida expansão para vários outros países da Ásia, ocorrido na segunda metade de 2002. A enfermidade passou a ser chamada Síndrome Respiratória Aguda Grave (Severe Acute Respiratory Syndrome coronavirus - SARS) e o novo coronavírus de SARS-CoV ou SARS-CoV-1 (CDC, 2003). As principais causas para a presença do novo vírus entre os humanos foram atribuídas ao acúmulo de animais silvestres em espaços superlotados em feiras e mercados úmidos aliados à falta de medidas de biossegurança (WEBSTER, 2004; WOO, 2006).

Além de sua alta taxa de contágio, o vírus teve sua disseminação rapidamente ampliada pelo grande fluxo de viagens aéreas internacionais e a ingerência de hospitais especializados em controle de infecções. Com mais de oito mil pessoas infectadas ao redor do mundo e uma taxa de mortalidade próximo a 10%, a SARS causou prejuízos econômicos, sociais além de sobrecarregar os sistemas de saúde dos países afetados, o que a caracterizou como a primeira grande pandemia do milênio (DROSTEN, 2003; KSIAZEK, 2003; PEIRIS, 2003).

Com a reabertura do mercado de animais silvestres no sul da China no final de 2003, surgiram ainda alguns casos da SARS em número muito reduzido e com fácil controle. Por volta de 2006, o descobrimento de um vírus muito semelhante em morcego-ferradura, o morcego do SARS-CoV, insinuou-se que uma nova epidemia de SARS poderia reaparecer caso as condições para a introdução, mutação e transmissão desse vírus permanecessem adequadas ao salto a humanos (CHE, 2006; LAU, 2005; LI, 2005; WANG, 2005).

Apesar dos alertas, em dezembro de 2019, na cidade Wuhan na China, foi encontrado, em um paciente apresentando forte pneumonia, com um novo vírus desconhecido e agressivo. Embora não se saiba a origem do vírus, as principais suspeitas são de que tenha surgido em uma feira de frutos do mar e animais silvestres que funciona no centro de Wuhan. O rápido contágio deste vírus fez com que o mesmo se alastrasse por outras regiões da China. O lugar de destaque econômico que a China alcançou, fez com que o vírus se disseminasse ao redor do mundo. A doença causada por esse novo vírus foi chamada de COVID-19 e o novo vírus de Sar-Cov-2 (novo coronavírus).

Em 11 de março de 2020, a Organização Mundial da Saúde declarou que o mundo vivia uma pandemia decorrente da COVID-19. Mas essa pandemia supera em números relativos e absolutos o surto da SARS de 2003. Por não se ter um tratamento certificado conhecido, esta nova doença tem causado grandes prejuízos econômicos e levado caos aos sistemas de saúde dos países em que ela chegou. Para conter o seu avanço medidas sanitárias drásticas foram tomadas e economias inteiras tiveram que parar.

Diante disso, os órgãos de saúde de todo o mundo passaram a criar dispositivos de vigilância epidemiológica, cuja intenção é apresentar medidas de proteção visando diminuir o rápido aumento de contaminação e minimizar os impactos socioeconômicos. No Brasil, o Ministério da Saúde (MS), é o principal órgão responsável pelo desenvolvimento de políticas e ações para o enfrentamento do novo coronavírus. Como medida preventiva e de combate à pandemia o MS criou os Planos de vigilância de Síndrome Respiratória Aguda Grave (SRAG) e Síndrome Gripal (SG), cujo objetivo foi atuar na “identificação, notificação e manejo oportuno de casos suspeitos de Infecção Humana pelo Novo Coronavírus de modo a mitigar os riscos de transmissão sustentada no território nacional” (BRASIL, 2020, p. 04).

Com a confirmação do primeiro caso em 26 de fevereiro, o MS intensificou as estratégias de monitoramento a essa emergência de saúde, com vistas às mudanças na dinâmica de transmissão e propagação da doença. Com efeito, a mobilização das ações de combate, prevenção e monitoramento estão articuladas colaborativamente com os

estados e municípios e diversos outros órgãos, dentre os quais destacamos as universidades públicas que desenvolvem pesquisas, produção de material de proteção, como EPIs, álcool 70%, máscaras e ações de orientação e prevenção da transmissão em relação ao quadro epidemiológico.

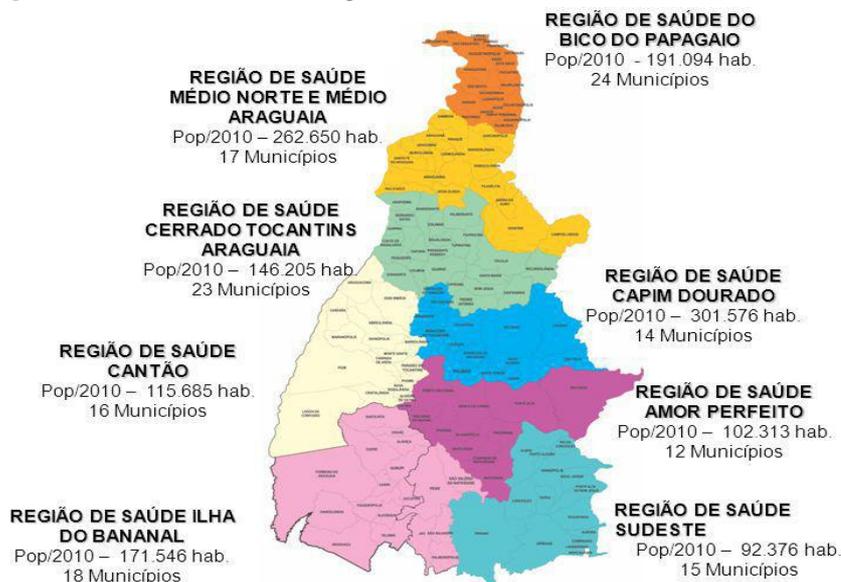
### **Espaço-tempo da investigação: o estado do Tocantins**

O Estado do Tocantins está localizado na Região Norte do Brasil, com população estimada, segundo o censo de 2019, em 1.572.866 habitantes. Possui área de 277.720.412 Km<sup>2</sup>, com densidade demográfica de 4,98 habitantes por km<sup>2</sup> (IBGE, 2019). O planejamento dos serviços de saúde está organizado em regiões de saúde seguindo o que preconiza o Decreto n.º 7.508/11, do governo federal.

Conforme orienta o decreto n.º 7.508/11, o território tocantinense, está dividido em 139 municípios, e distribuídos em oito regiões de saúde, a saber: Médio Norte Araguaia (17 municípios), Bico do Papagaio (24 municípios), Sudeste (15 municípios), Cerrado Tocantins Araguaia (23 municípios), Ilha do Bananal (18 municípios), Capim Dourado (14 municípios), Cantão (15 municípios), Amor perfeito (13 municípios). Em todo o estado, existem 19 hospitais regionais e 1 hospital filantrópico contratado, que são referências para essas regiões de saúde. Em geral, estes hospitais possuem perfis de atendimento diferenciado que vão desde o secundário geral, média complexidade até o terciário especializado, alta complexidade (TOCANTINS, 2007).

Ao redefinir seu território em regiões de saúde foi necessário criar o Plano Diretor de Regionalização (PDR), que foi atualizado pelo Decreto n.º 7.508, de 28 de julho de 2011 (TOCANTINS, 2007). No qual está previsto a distribuição das regiões de saúde ao longo de todo território, conforme se observa na Figura 1, de modo a atender as especificidades “delimitadas a partir de identidades culturais, econômicas e sociais e de redes de comunicação e infraestrutura de transportes compartilhados, com a finalidade de integrar a organização, o planejamento e a execução de ações e serviços de saúde” (BRASIL, 2011, p. 1).

**Figura 1** Distribuição das regiões de saúde do Tocantins.



Fonte: SESAU/TO.

A regionalização da assistência à saúde descentraliza o controle de risco e acompanhamento das ações oportunizando planejamento estratégico o que potencializa a atenção ao atendimento da população no desenvolvimento das boas práticas sanitárias e epidemiológicas.

No contexto do enfrentamento da COVID-19, convém destacar que inicialmente o Governo do Estado do Tocantins, adotou a medida de distanciamento social, em que recomenda à população que evitasse aglomerações, e a distância mínima de um metro e meio entre as pessoas em locais públicos. Com o avanço dos casos da COVID-19 foi adotado em todo estado o isolamento social, conforme decreto nº. 6092, de 05 de maio, cujo teor recomenda que as pessoas permaneçam em suas casas a fim de impedir a propagação do vírus, estabelecendo-se assim o distanciamento social ampliado. Para os suspeitos de infecção foi orientado a ficar em quarentena por até quatorze dias, que é o período de incubação, período no qual o vírus se manifesta no corpo (FARIAS, 2020).

Com o aumento do número de casos no estado, em 15 de maio foi publicado o Decreto nº 6.095/2020 que determinou a suspensão/bloqueio total de atividades não essenciais, conhecido como lockdown, para 33 municípios, com vistas à contenção do avanço da COVID-19. Essa medida foi determinada em decorrência da elevação do percentual de ocupação dos leitos dos hospitais, públicos e privados, incluindo UTI's específicas para atendimento de pessoas diagnosticadas com a COVID-19. Após o período do lockdown, que durou 7 dias, o governo estadual publicou o Decreto nº. 6096, de 22 de maio, que suspende o lockdown, para as cidades em que foi decretado, e

retroage aos efeitos do decreto nº. 6092, de 05 de maio. Essas medidas possibilitaram certo fôlego ao sistema de saúde, entretanto, o número de casos confirmados continuou ascendente.

### Modelo Matemático Epidemiológico SIR

Adotamos como instrumento de monitoramento da situação epidemiológica do estado do Tocantins o Modelo Matemático SIR, cujas primeiras inserções desse modelo na epidemiologia se deram em 1927, por Kermack e McKendrick (KEELING; ROHANI, 2008; KERMACK; MCKENDRICK, 1927; KRETZSCHMAR; WALLINGA, 2009) a fim de fazer previsões e análise qualitativa do alastramento de doenças infectocontagiosas em humanos. Mais recentemente, em 2013, esse modelo foi sistematicamente aprimorado por Isea e Lonngren (ISEA, 2013). Esse modelo é conhecido como modelo SIR em referência aos indivíduos Suscetíveis, Infectados, Removidos de uma certa população. Esse modelo consiste em fazer uma divisão da população em classes disjuntas de pessoas, denotadas da seguinte maneira:

$S$ : = Número de suscetíveis ao contágio;

$I$ : = Número de Infectados (pessoas que infectam);

$R$ : = Número de pessoas removidas (recuperados e mortos);

$N$ : = Número total de pessoas na população.

Esse modelo pretende compreender a dinâmica com que os indivíduos transitam de uma classe para a outra e os impactos que isso pode causar em uma determinada população.

### Probabilidade de contágio de uma população

A probabilidade de contágio é um número que depende do tempo de exposição entre o indivíduo infectado e o indivíduo suscetível. Com isso, introduzimos o termo  $\beta dt$  em que  $dt$  representa variação do tempo de contato e  $\beta$  a probabilidade de contágio por unidade de tempo. O fator  $\beta dt$  é a probabilidade de contágio entre dois indivíduos, sendo um infectado e o outro suscetível. Neste caso,  $\beta$  recebe o nome de *transmissibilidade*.

Em determinados cenários, por exemplo, em um ônibus coletivo lotado, não sabemos quem são as pessoas infectadas e nem aquelas que são suscetíveis. Contudo,

podemos determinar a probabilidade de se estar frente a uma pessoa infectada. Neste sentido, a probabilidade é dada pela razão  $I/N$ , que é a maneira clássica de se definir probabilidades, isto é, os casos favoráveis, dividido pelos casos possíveis.

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  $I/N$  obtemos a probabilidade de contágio de um indivíduo:  $c\beta(I/N)dt$ . Em resumo, uma pessoa suscetível possui probabilidade  $c\beta(I/N)dt$  de infecção ao ser exposta a pessoas infectadas numa variação de tempo  $dt$ .

### Deduzindo as Equações do modelo

O modelo SIR é caracterizado por uma tripla de equações diferenciais que fazem previsões aproximadas com vistas a situações reais de como uma determinada enfermidade se alastra ao longo do tempo. As equações diferenciais são nas incógnitas  $S$ ,  $I$ , e  $R$ . Passamos então, de modo intuitivo, a deduzir as equações do modelo. Ressaltamos que não faremos aqui um tratamento matemático das equações no que se refere a existência e unicidade de soluções, comportamento assintótico de soluções e dependência nas condições iniciais.

Inicialmente vamos deduzir a equação para  $S$ . Desse modo, seja  $dS$  a taxa de variação de pessoas suscetíveis no tempo  $dt$ . Então, o número  $S c\beta(I/N)dt$  é a probabilidade total de pessoas suscetíveis a serem infectadas no tempo  $dt$ . Logo, o conjunto de pessoas suscetíveis  $S$  perde a quantidade  $S c\beta(I/N)dt$  na variação de tempo  $dt$ . Assim,  $dS = -c\beta(I/N)S dt$ . Decorrente disso, temos a equação diferencial em  $S$ :  $\frac{dS}{dt} = -\frac{\beta c I}{N} S$ .

Agora, procedemos de maneira análoga para obtermos a equação  $I$ . Observemos que numa variação de tempo  $dt$ , a variação de  $I$ ,  $dI$ , absorverá aquelas pessoas que eram suscetíveis e que se contaminaram, a saber,  $c\beta(I/N)S dt$ . Nesta mesma variação de tempo,  $dI$ , perderá a variação dos indivíduos que se recuperaram ou morrem,  $dR$ . Com isso, obtemos a segunda equação do modelo:  $\frac{dI}{dt} = \frac{\beta c I}{N} S - \frac{dR}{dt}$ .

Vamos denotar por  $\gamma$  a taxa de remoção de um indivíduo em um determinado período de tempo. Assim o número  $\gamma I dt$  é a quantidade total de indivíduos removidos no tempo  $dt$ . Com isso, chegamos à terceira equação do modelo SIR:  $\frac{dR}{dt} = \gamma I$ .

Substituindo a equação acima na equação em função de  $\frac{dI}{dt}$  obtemos:  $\frac{dI}{dt} = \frac{\beta cI}{N} S - \gamma I$ .

Estas três equações compõem o modelo SIR. Algumas modificações são feitas neste modelo para se obter interpretações cada vez mais precisas da realidade. No entanto, uma vez que nosso objetivo é apresentar os indicativos do modelo de modo didático vamos omitir tais modificações. Em resumo, matematicamente, temos o seguinte sistema de equações:

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -\frac{\beta cI}{N} S \\ \frac{dI}{dt} = \frac{\beta cI}{N} S - \gamma I \\ \frac{dR}{dt} = \gamma I. \end{cases}$$

Além de compreendermos a dinâmica de contágio, precisamos entender qual o impacto na rede de saúde. Para isso, supondo resolvido o sistema de equações, vamos considerar  $D = \sigma I$ ,  $H = \theta I$  e  $U = \tau I$ , em que  $D$  representa a quantidade de infectados que falecem com taxa  $\sigma$ ;  $H$  a quantidade de infectados que precisam de hospitalização com taxa  $\theta$  e  $U$  a quantidade de infectados que precisam de UTI cuja taxa é representada por  $\tau$ .

### Algumas interpretações qualitativas do modelo

Nesta seção vamos analisar as duas primeiras equações. Lembremos que as incógnitas  $S, I$  e  $R$  estão relacionadas por  $S + I + R = N$ . Para simplificar o modelo vamos fazer a seguinte mudança de variáveis no tempo:  $t \mapsto (1/\beta c)u$ . Então  $\frac{dS}{dt} = \beta c \frac{dS}{du}$ . Com isso, podemos reescrever a primeira equação do modelo como:  $\frac{dS}{du} = -\frac{I}{N} S$ .

Ou seja, fazendo um reescalamento do tempo obtemos uma equação bastante simplificada, no entanto, nos oferece condições de aproximar cada vez mais da realidade. Da equação  $\frac{dS}{du} = -\frac{I}{N} S$ , vemos que  $\frac{dS}{du} < 0$ , pois  $I(u), S(u)$  e  $N$  são números positivos para quaisquer valores de  $u$ . Portanto, o número de pessoas suscetíveis vai diminuir com o passar do tempo. Isto é, as pessoas vão sair da classe dos suscetíveis e vão entrar na classe das pessoas infectadas em algum momento.

Vamos analisar o comportamento da função  $I(u)$ , ou seja, o comportamento do número de infectados com o passar do tempo. Temos, após a mudança de variáveis conforme apresentado acima:

$$\frac{dI}{du} = \frac{I}{N}S - \frac{\gamma}{\beta c}I = \left(\frac{S}{N} - \frac{\gamma}{\beta c}\right)I.$$

Se  $\gamma/(\beta c) < S/N$ , então, como  $I(u)$ ,  $S(u)$  e  $N$  são números positivos para quaisquer valores de  $u$ ,  $I(u)$  é uma função crescente e, portanto, o número de pessoas infectadas irá aumentar com o passar do tempo ocasionado uma epidemia.

Se  $\gamma/(\beta c) > S/N$ , então, como  $I(u)$ ,  $S(u)$  e  $N$  são números positivos para quaisquer valores de  $u$ ,  $I(u)$  é uma função decrescente, o que significa que o número de pessoas infectadas irá diminuir com o passar do tempo e, conseqüentemente, tem-se a possibilidade de controle da doença. Assim, para termos condições de lidar com o crescimento do número de infectados, a fim de frear o alastramento do contágio, devemos controlar bem os parâmetros  $\gamma$ ,  $\beta$  e  $c$ .

Se  $\gamma/(\beta c) = S/N$ , então  $I(u)$  é uma função constante. Isto significa que o número de infectados permanece constante.

Os fatos matemáticos clássicos que nos permitem fazer estas conclusões são:

- a) uma função com derivada negativa é decrescente;
- b) uma função com derivada positiva é crescente;
- c) uma função com derivada nula é constante.

Uma interpretação da argumentação apresentado acima é que os indivíduos vão sair do compartimento das pessoas suscetíveis e vão entrar na classe dos infectadas e depois de algum tempo irão entrar no compartimento/classe dos removidos.

Um número que desempenha um papel importante para se compreender o comportamento epidemiológico é o número  $R_0 = (\beta c)/\gamma$ . O mesmo é chamado fator de reprodução ou número de reprodução.

Agora estamos em condições de traduzir as informações matemáticas discutidas acima para a linguagem epidemiológica:

- Se a velocidade de contágio do indivíduo é maior que a velocidade com a qual ele se recupera ou morre, isto é,  $\beta c > \gamma$ , então  $R_0 > 1$  implicando, portanto, que não temos controle sobre o número de infectados, ocasionando uma epidemia.
- Se a velocidade de contágio do indivíduo é menor que a velocidade com a qual ele se recupera ou morre, isto é,  $\beta c < \gamma$ , então  $R_0 < 1$  implicando que temos possibilidade de controle sobre o número de infectados.
- Se  $R_0 = 1$  então temos uma condição de equilíbrio epidêmico ou limiar epidêmico.

Estas são as principais conclusões do modelo SIR. Para que consigamos frear a propagação de uma doença causada por algum agente infeccioso, devemos diminuir o fator  $\beta c$  em relação ao fator  $\gamma$ , ou forçar uma aproximação entre os dois fatores a fim de que cheguemos ao equilíbrio epidêmico.

Para que isso ocorra, devemos reduzir a transmissibilidade  $\beta$ , a partir da adoção de medidas de proteção através do uso de máscaras, luvas, higienização constante, por exemplo. Devemos também reduzir a taxa média de contato  $c$ , e isso pode ser feita por meio de medidas restritivas como instalação de quarentena, distanciamento social, ou outros meios de contenção. Aliado a essas medidas, devemos aumentar o fator de remoção  $\gamma$ , e isso pode ser feito por meio do uso de medicamentos e vacinação da população. Contudo, ainda não foi encontrado uma vacina ou um tratamento eficaz contra o novo coronavírus o que fortalece ainda mais as orientações epidemiológicas dos órgãos de saúde. Para mais detalhes sugerimos (KRETZSCHMAR; WALLINGA, 2009), (TODA, 2020).

Como faremos isso? Como ficará claro a seguir, o distanciamento social é uma primeira solução para podermos ter algum controle sobre a velocidade da propagação da doença.

### Discretização das equações

O processo de discretização que adotaremos aqui consiste em permitir que a variável tempo  $t$  percorra somente o conjunto dos números naturais. Com isso, podemos pensar no tempo como dia, hora, minutos, etc. Neste caso, fazemos as seguintes adequações: Se  $f$  é uma função de  $t$ , então ao fazermos  $t = n$ , usamos a notação  $f(n) = f_n$  para a imagem da função  $f$  e  $df_n = \Delta f_n = f_{n+1} - f_n$  para a variação da função do

instante  $n$  para o instante  $n + 1$ . Assim, podemos reescrever o sistema de equações que compõem o modelo SIR como:

$$\begin{cases} \Delta S_n = -\frac{\beta c I_n}{N} S_n \\ \Delta I_n = \frac{\beta c I_n}{N} S_n - \gamma I_n \\ \Delta R_n = \gamma I_n. \end{cases}$$

Ou equivalentemente:

$$\begin{cases} S_{n+1} = S_n - \frac{\beta c I_n}{N} S_n \\ I_{n+1} = I_n + \frac{\beta c I_n}{N} S_n - \gamma I_n \\ R_{n+1} = R_n + \gamma I_n. \end{cases}$$

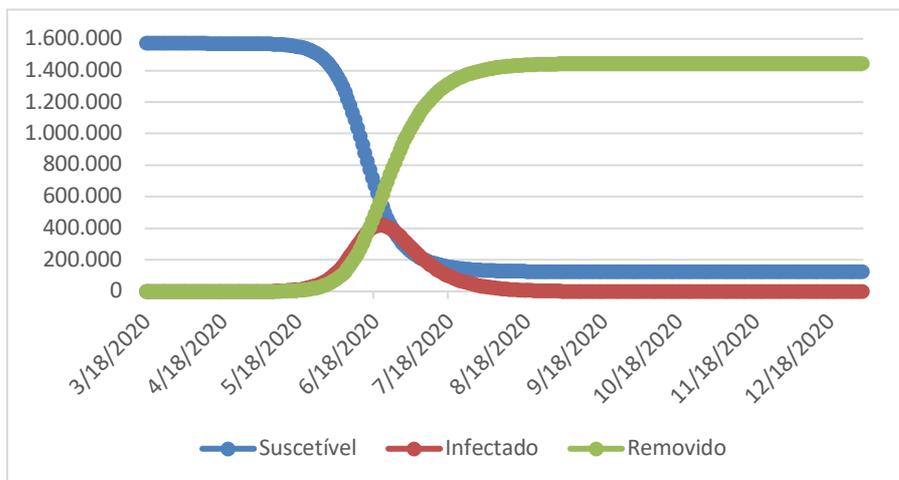
As novas equações que surgem desse processo são chamadas equações a diferenças finitas ou equações recorrentes. Deste modo, com a interpretação desse tipo de modelagem é que se conhece os dados de um determinado fenômeno no instante  $n$ , então podemos prever como esse fenômeno se comporta no instante seguinte  $n + 1$ . Além disso, podemos, a partir de dados disponibilizados previamente, fazer projeções de propagação da doença a longo prazo e usar planilhas tipo Calc do LibreOffice. (KRETZSCHMAR; WALLINGA, 2009).

### Aplicação do modelo SIR à Covid-19 no Tocantins

Uma das grandes dificuldades que os cientistas vêm enfrentando em relação à Covid-19, é a falta de dados e parâmetros precisos. Por esta razão, vamos utilizar os parâmetros disponíveis nos trabalhos (MOSSONG, 2008), (ROCKLÖV, 2020). Seguindo estes autores, tomaremos  $c = 13,4$ ,  $\beta = 2\%$  e  $\gamma = 0,1$ . O valor  $\gamma = 0,1$  significa que tempo médio de remoção é de 10 dias. Consideramos também,  $\sigma = 0,9\%$  a taxa de mortalidade, que  $\theta = 13,80\%$ , a proporção dos infectados que precisam de hospitalização e que  $\tau = 4,70\%$ , a proporção dos infectados que precisam de cuidados de UTI.

Ao considerarmos um cenário hipotético, no qual nenhuma medida de isolamento social, nem medidas de proteção sejam tomadas, o modelo SIR se comportaria de acordo com a situação descrita na Figura 2, abaixo.

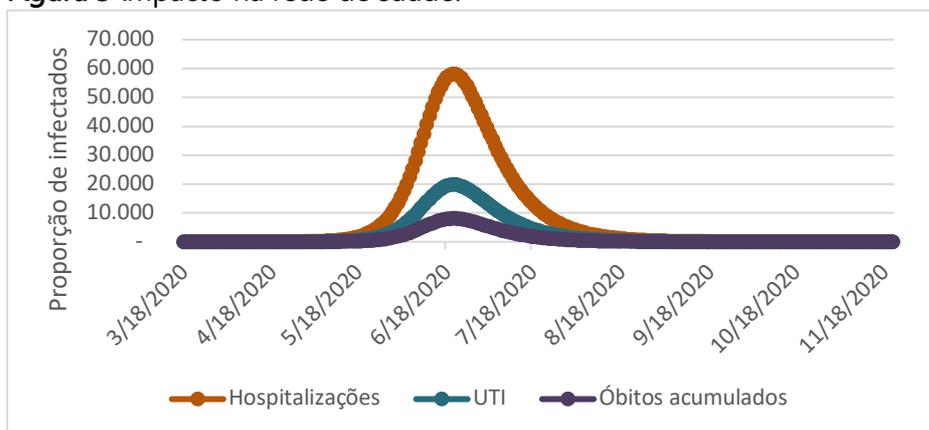
**Figura 2** Simulação do modelo SIR sem medidas de restrição.



Fonte: autores da pesquisa.

Como podemos observar na Figura 2, ao considerarmos o caso do Tocantins, cujo primeiro caso confirmado aconteceu em 18 de março de 2020, a pandemia atingiria o pico da curva de contágios acumulados no dia 18 de junho deste ano, com aproximadamente 421 mil pessoas infectadas. Por outro lado, a primeira onda de contágio teria fim por volta do dia 18 de agosto do mesmo ano.

**Figura 3** impacto na rede de saúde.



Fonte: autores da pesquisa.

A figura 3, mostra que durante o pico da epidemia, o número de pessoas hospitalizadas poderia ser próximo de 60 mil. Já o número de pessoas que necessitaria de UTI, neste contexto, é de aproximadamente 20 mil. Estas 80 mil pessoas necessitando de leitos hospitalares, considerando que a rede de saúde disponibilizou um número por volta de 2 mil, levaria a um cenário catastrófico, colapsando o sistema de saúde do estado

(TOCANTINS, 2020b). O serviço funerário também seria atingido, uma vez que no pico da epidemia poderíamos ter até 3975 mortes.

Toda a situação prevista pelo modelo sugere que medidas sejam adotadas, no sentido de que as pessoas não devem contrair a infecção numa velocidade crescente ou ao mesmo tempo. Isto significa que as medidas a serem tomadas precisam garantir que o pico da curva de contágio fique abaixo da capacidade de atendimento da rede de saúde e assim contribua para o achatamento da curva de contágio, o que segundo o modelo é descrito por  $R_0$  próximo de 1.

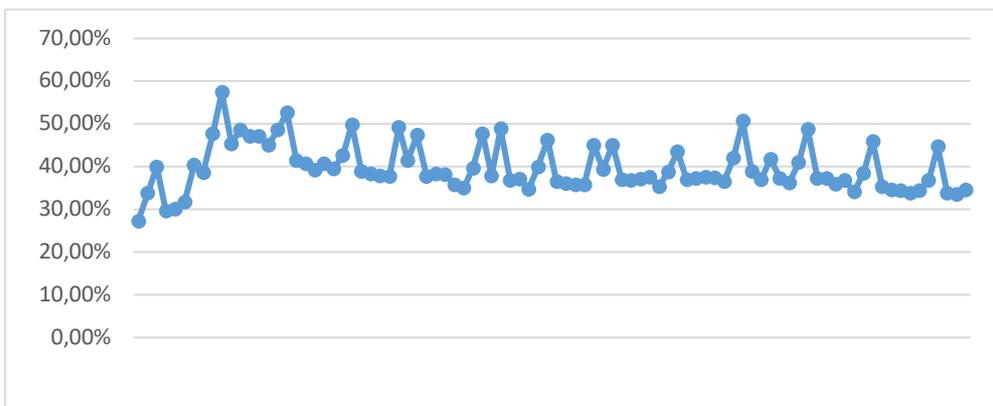
Assim, visando garantir a segurança da saúde da população tocaninense, a partir de 18 de março à 16 de maio as autoridades do estado, sob orientação do comitê próprio de enfrentamento à COVID-19, recomendaram o distanciamento social ampliado, como medida de contenção do avanço da doença.

#### **Distanciamento Social e (des)evolução da pandemia**

Nesta seção, fazemos uma análise minuciosa sobre distanciamento social no Tocantins e sua relação com comportamento da evolução da pandemia. Mais precisamente, investigamos o impacto de medidas como o lockdown na taxa de desaceleração da disseminação do vírus.

A Figura 4, a seguir, exibe o comportamento do índice de isolamento social no estado no período de 01 de fevereiro a 10 de junho, dados estes disponibilizados em (INLOCO, 2020). Para tanto, nos interessa cinco períodos específicos: de 13/03 (data em que os primeiros casos foram notificados no estado) a 29/03 (data limite em que o índice de isolamento teve tendência de crescimento); de 30/03 (data em que começa a tendência de decrescimento) a 15/05 (data limite antes da vigência do lockdown); de 16/05 (início do lockdown) a 24/05 (final do lockdown); 25/05 a 10/06 (período restante); de 30/03 a 10/06 período desde o início da tendência de decaimento.

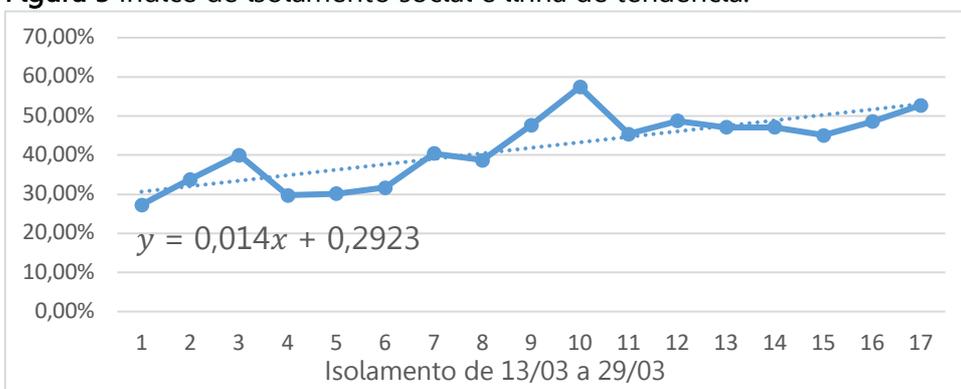
**Figura 4** Índice de isolamento social.



Fonte: autores da pesquisa.

13/03 a 29/03. Este período compreende o início das notificações dos primeiros casos e a data limite da tendência de crescimento do isolamento social. Isto pode ser visto na Figura 5, em que a taxa de crescimento é 0,014, e média de isolamento de 41,85%. Como veremos mais adiante, este período de crescimento no isolamento social tem forte influência na diminuição do fator de reprodução da pandemia, o que é de muita relevância para o controle da doença.

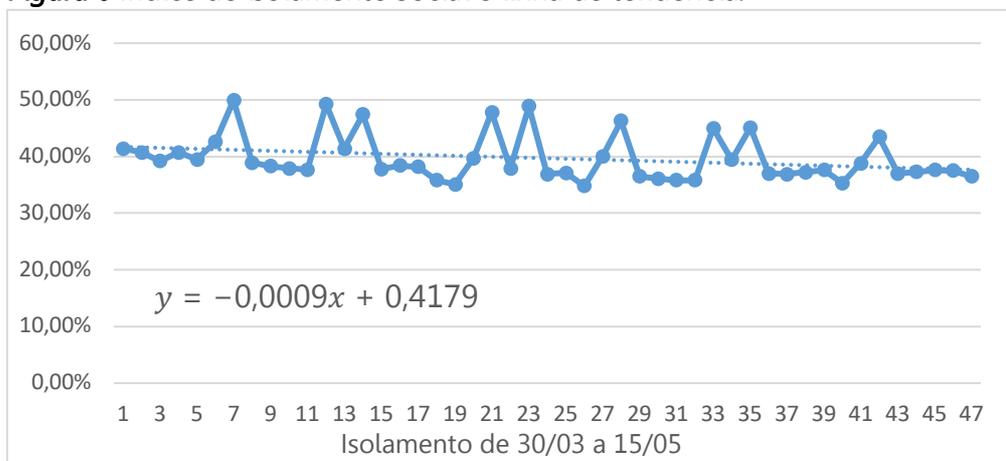
**Figura 5** Índice de isolamento social e linha de tendência.



Fonte: autores da pesquisa.

30/03 a 15/05. A partir de 30/03 o índice de isolamento social tem tendência decrescente, ou seja, em média o isolamento está decaindo. A taxa de decaimento é de  $-0,0009$  e a média de isolamento é de 39,69%. Com isso, teve-se uma queda de 5,16% em média e relação ao período anterior. A Figura 6, a seguir, ilustra a reta de tendência e o comportamento do índice de isolamento social.

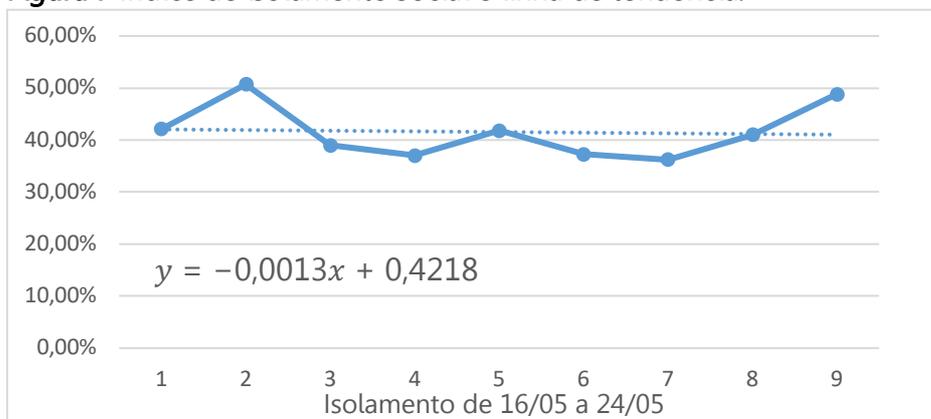
**Figura 6** Índice de isolamento social e linha de tendência.



Fonte: autores da pesquisa.

16/05 a 24/05. Este foi o período em o que o lockdown vigorou nas cidades com maior incidência de casos no estado de acordo com o decreto de nº. 6093. Mesmo com essa medida mais restritiva, a tendência do isolamento ainda é de decrescimento com taxa  $-0,0013$  e a média no período é de  $41,54\%$ . Observe que houve um aumento de  $4,67\%$  em relação ao período anterior. Note também, que em relação ao período anterior, o coeficiente ou taxa de decrescimento passa de  $-0,0009$  para  $-0,0013$ . Isto significa que a velocidade da queda do índice de isolamento social diminuiu  $30,76\%$  em relação à velocidade de decrescimento no período anterior. Conforme se observa na Figura 7, abaixo.

**Figura 7** Índice de isolamento social e linha de tendência.

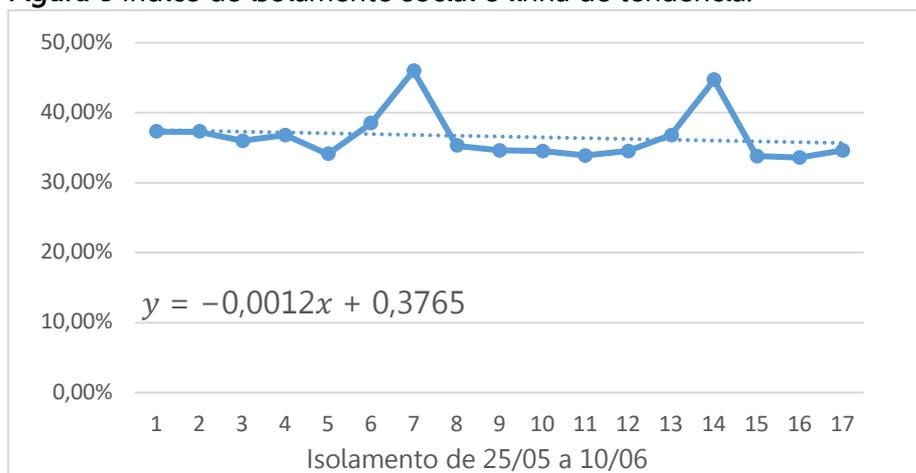


Fonte: autores da pesquisa.

25/05 a 10/06. A partir do dia 25/05 o estado saiu do lockdown e voltou ao distanciamento social ampliado. Neste período temos uma tendência de decrescimento

linear com taxa  $-0,0012$ . Já que  $-0,0012 > -0,0013$ , então a velocidade de decaimento do isolamento social aumentou em relação ao período anterior. O aumento foi de 7,69%. A média do índice de isolamento social nesse período é 36,61% o que significa que tivemos uma queda de 11,88% em relação ao período anterior, o que pode ser observado na Figura 8, abaixo.

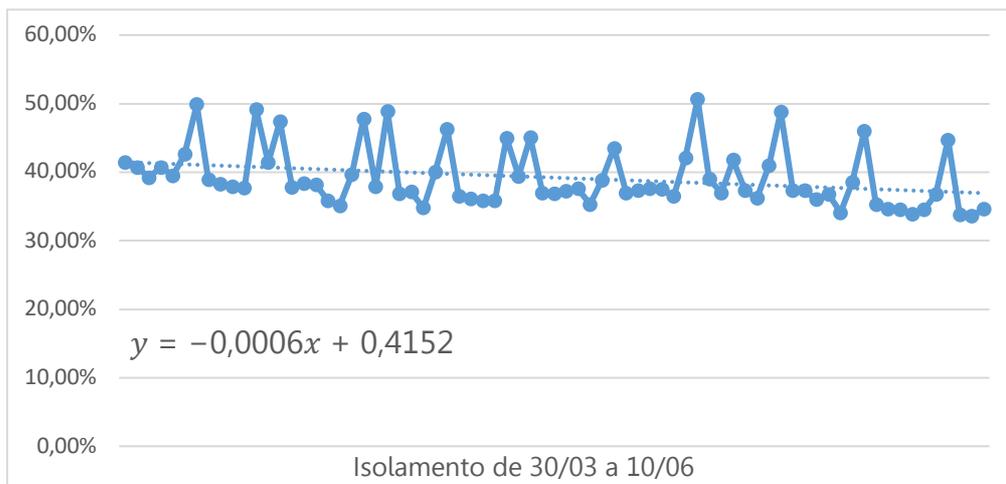
**Figura 8** Índice de isolamento social e linha de tendência.



Fonte: autores da pesquisa.

30/03 a 10/06. Este compreende todo período de decaimento no índice de isolamento social. Como vimos acima, de 30/03 a 15/05, a taxa de decaimento era de  $-0,0009$ . Isto significa que, se nada fosse feito, essa tendência poderia perdurar até o dia 10/06, fazendo com que o índice de isolamento social chegasse a números ainda mais preocupantes, dado que o ideal em tempos de pandemia é um número entre 60% e 70%. Entretanto, como podemos observar na Figura 9, a seguir, a taxa da linha de tendência de 30/03 a 10/06 é  $-0,0006$ . Isto significa que o lockdown ocasionou uma redução de 33,33% em valor absoluto na taxa de decaimento do isolamento social no período citado. A média do período é de 39,20% a qual é aproximadamente a média do período de 30/03 a 15/05.

**Figura 9** Índice de isolamento social e linha de tendência.



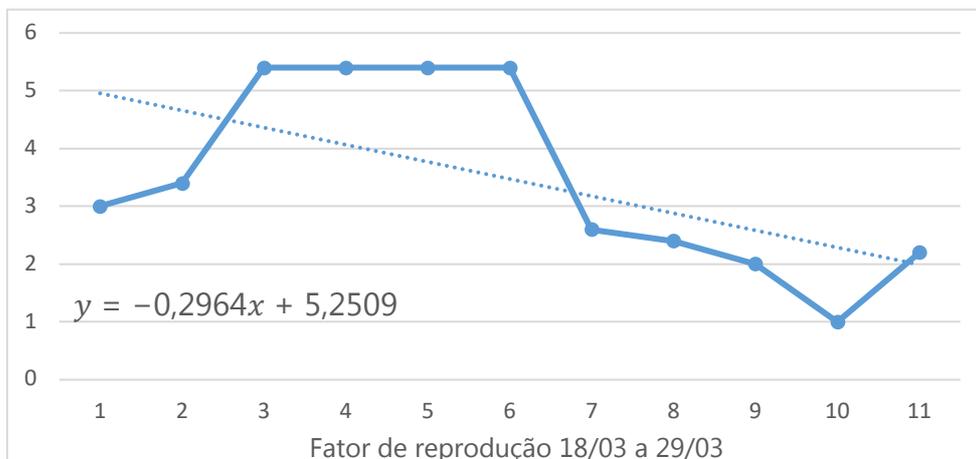
Fonte: autores da pesquisa.

### Fator de Reprodução

Aqui vamos explorar a relação entre o índice de isolamento social e a taxa média de contato, e conseqüentemente com o fator de reprodução  $R_0$ . Segue das deduções do modelo SIR, que  $R_0$  desempenha um importante elemento a ser ressaltado no estudo das epidemias. A seguir passamos a descrever o comportamento do fato de reprodução no período de 18 de março a 29 de maio. Isto é feito utilizando a fórmula  $R_0 = (c\beta)/\gamma$ , da seguinte maneira. Fixamos os valores de  $\beta$ , que é a transmissibilidade do vírus,  $\gamma$  o inverso do tempo de remoção. Feito isto, lançamos mão dos dados disponíveis sobre infectados e resolvendo as equações diferenças relativas ao dia em questão, encontramos o valor  $c$ , a taxa média de contato diário. Assim, podemos calcular o valor de  $R_0$  diariamente.

Tomando como base o período citado, resolvemos o sistema em cada dia e plotamos o gráfico dos valores do fator de reprodução diários e a linha de tendência. Isso está plotado na Figura 10, abaixo. Neste intervalo de tempo o fator de reprodução médio foi 3,47.

**Figura 10** Fator de reprodução e linha de tendência.

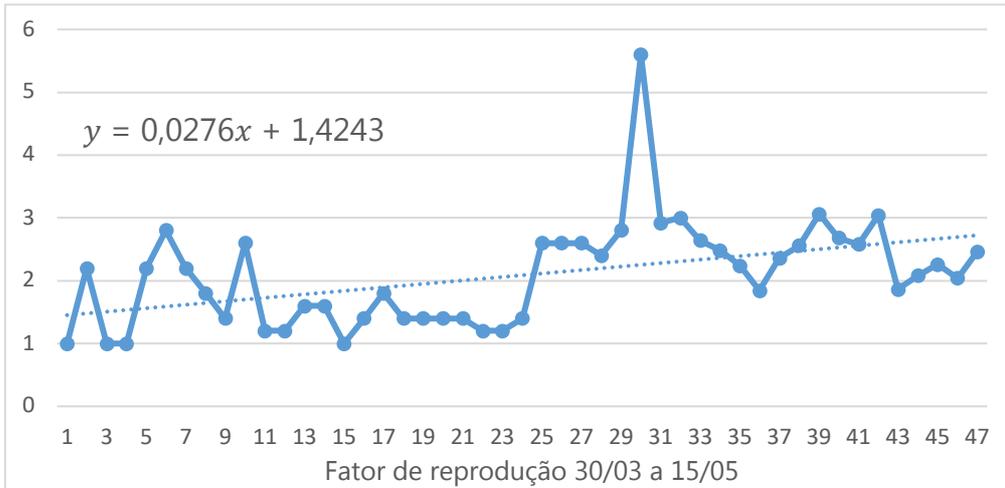


Fonte: autores da pesquisa.

Note que a linha de tendência é decrescente, enquanto neste mesmo período o índice de isolamento social tem tendência crescente. Isto confirma a intuição de que o fator de reprodução da doença é inversamente proporcional ao índice de isolamento social.

Agora analisemos o fator de reprodução no período de 30/03 a 15/05. A Figura 11, a seguir, exibe o comportamento do fator de produção e a linha de tendência. Note que a linha de tendência é crescente com taxa 0,0276. Perceba que no mesmo período a tendência do índice de isolamento social é decrescente, indicando que à medida em que o distanciamento social diminui o número de reprodução aumenta. Observe que se no período anterior o fator de reprodução se aproximou de 1 enquanto o isolamento social aumentava, já neste período o fator de reprodução se afasta de 1, com tendência crescente, como consequência da diminuição do isolamento social. Ainda assim, dado que a taxa de crescimento do índice de isolamento social é baixa, a média do fator de reprodução ficou em 2,08, o que ainda é alto.

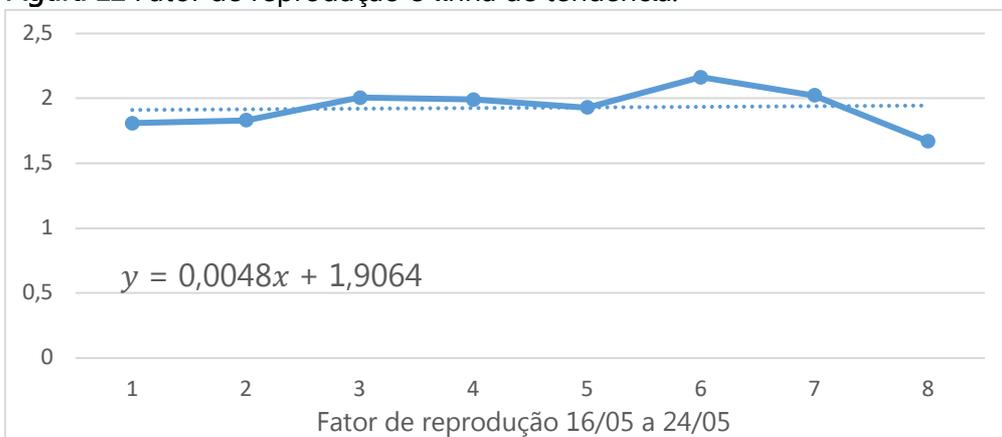
**Figura 11** Fator de reprodução e linha de tendência.



Fonte: autores da pesquisa.

A Figura 12, a seguir, exibe o comportamento do fator de reprodução durante o lockdown, isto é, de 16/05 a 24/05. Veja que as restrições impostas pelo poder público impactaram numa desaceleração no crescimento da linha de tendência. Em outras palavras, a taxa 0,0276 do período antes do lockdown teve uma queda de 82,6%. A média dos valores de  $R_0$  neste intervalo de tempo foi de 1,92, o que significa que teve uma queda de 7,69%. Embora tenha diminuído em relação ao período anterior, esta média ainda é bastante alta. Lembre-se que para ter condição de controle da pandemia é necessário que  $R_0$  fique e permaneça menor que (ou o mais próximo) de 1. Percebemos também que neste intervalo de tempo o isolamento social tinha tendência de decrescimento.

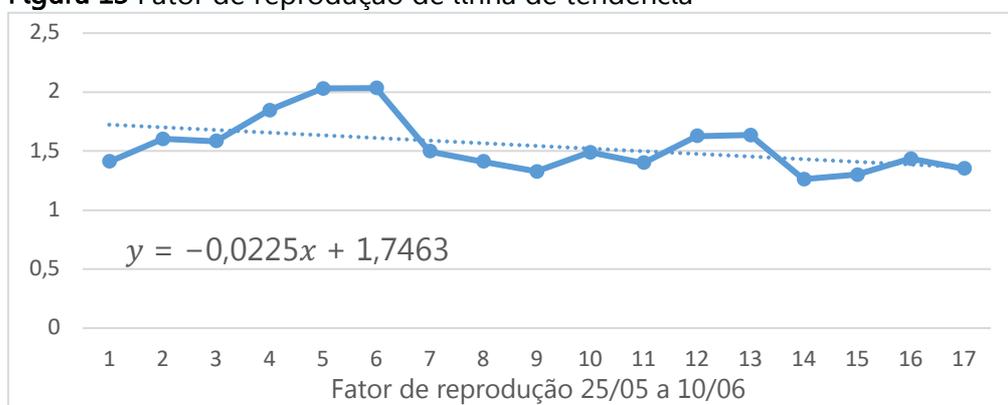
**Figura 12** Fator de reprodução e linha de tendência.



Fonte: autores da pesquisa.

Agora passamos ao período de 25/05 a 10/06. Neste período, a linha de tendência do isolamento social tinha taxa de decréscimo quase nulo. No entanto, como podemos ver na Figura 13, a baixo, o fator de reprodução tem tendência negativa com taxa  $-0,0225$ . Isto indica que, mesmo com o índice de isolamento baixo, as medidas de segurança como uso de máscara, lavagem constante de mãos, desempenharam um papel importante no cálculo  $R_0$ . A média nesse período foi de 1,54 considerando duas casas decimais.

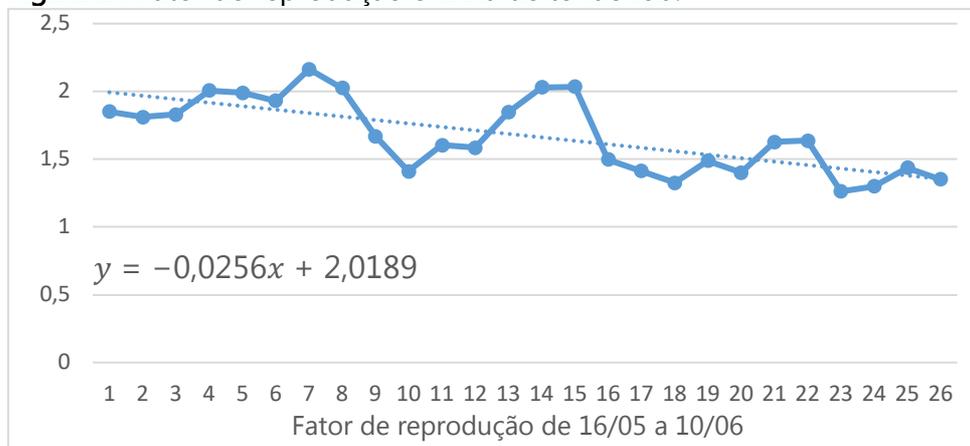
**Figura 13** Fator de reprodução de linha de tendência



Fonte: autores da pesquisa.

Uma maneira de fazer uma previsão a curto e médio prazo é observar a linha de tendência dos valores diários do fator de reprodução. Note que esta linha, reta pontilhada na Figura 14, é dada por  $y = -0,0256x + 2,0189$ . Então, vamos tomar  $R_0(x) = -0,0256x + 2,0189 + (-1)^x \text{sen}(1/x)$  que é uma boa aproximação para  $y$ .

**Figura 14** Fator de reprodução e linha de tendência.



Fonte: autores da pesquisa.

Diante disso, podemos construir a Tabela 1, abaixo, com estimativas para  $R_0$  em função do dia, a partir da data de 11/06 até o dia 21/06.

**Tabela 1** Estimativas para  $R_0$ .

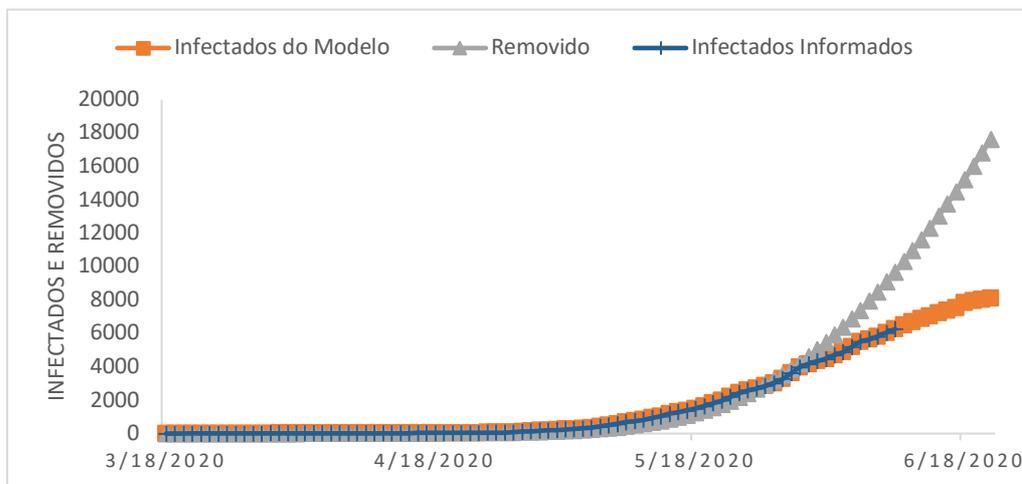
$x$	Data	$R_0(x)$
26	11/06	1,3917
27	12/06	1,2906
28	13/06	1,33780
29	14/06	1,2420
30	15/06	1,2842
31	16/06	1,1930
32	17/06	1,2309
33	18/06	1,4438
34	19/06	1,1779
35	20/06	1,0943
36	21/06	1,1250

Fonte: autores da pesquisa.

Sendo assim, a partir do  $R_0$ , gerado na tabela 1, acima, podemos plotar, no mesmo gráfico, os casos de infectados informados pela secretaria de saúde do estado e os dados de infectados gerados pelo modelo, conforme pode ser observado na Figura 15, a seguir. A indicação é que se o fator de reprodução continue, mesmo que oscilando, tendendo a ficar menor que 1 com o passar dos dias, então o número de contágios da doença entrará em decaimento. De outro modo, o equivalente a isso no que se refere às ações do poder público, é garantir que o índice de isolamento social e medidas de higiene que venha a prevenir o contágio, se mantenha constante ou crescente com o passar do tempo.

A interpretação do modelo, nessa configuração considerando o intervalo de tempo 18/03 a 21/06, é que o novo pico foi trasladado o que significa que a curva de contágio foi achatada. Observa-se que, sem medidas de restrição, o número de contaminados no pico da infecção seria por volta de 421 mil pessoas, enquanto que, ao adotar-se as medidas de restrição conforme indica o modelo, este número foi reduzido para um número próximo a 8,1 mil infectados. Isso, alivia a rede de saúde além de salvar vidas.

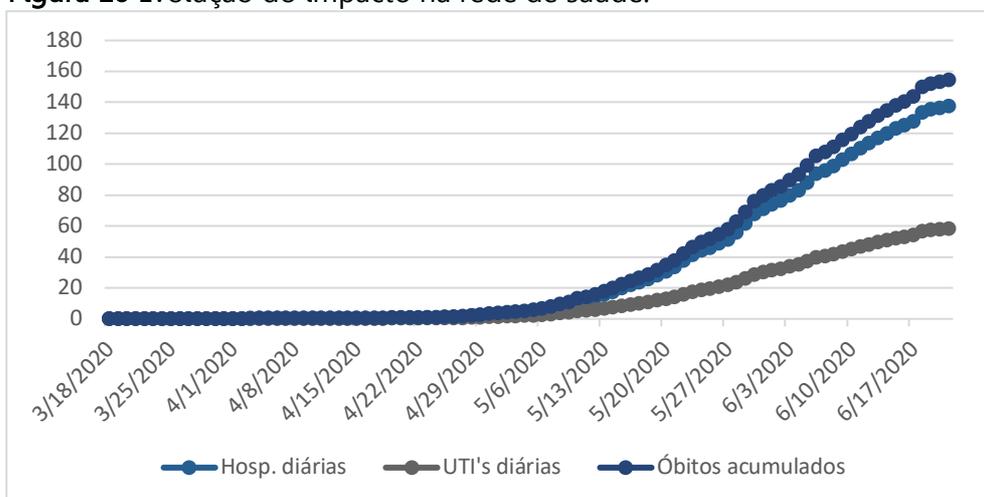
**Figura 15** Figura modelo SIR sem suscetíveis.



Fonte: autores da pesquisa.

Os efeitos das medidas de distanciamento social no sistema de saúde podem ser vistos na Figura 16, a seguir. Com o número reduzido de pessoas sendo contaminadas ao mesmo tempo, podemos ver que até o dia 10 de junho, última data de coleta de dados, o sistema de saúde no estado não entrou em colapso, podendo atender aos novos casos que surgiam necessitando de hospitalização e serviços de UTI. Nesta data, 107 pessoas das 6257 testadas positivo, número acumulado, faziam uso de serviços hospitalares, o que representa 1,71% dos casos confirmados acumulados. O número de pessoas na UTI chegou a 45, o que representa 0,72% dos casos confirmados acumulados. O número de mortes acumulados era 120, representando 1,92% do total de casos, (TOCANTINS, 2020a).

**Figura 16** Evolução do impacto na rede de saúde.



Fonte: autores da pesquisa.

### Considerações finais

O presente estudo analisou o impacto na rede de saúde do estado do Tocantins, decorrente da pandemia de Covid-19, causada pelo novo coronavírus (SARS-CoV-2), a partir da aplicação do modelo matemático epidemiológico SIR. As simulações do modelo indicaram situações semelhante 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.

Inicialmente as medidas de contenção e barreiras sanitárias, imposta 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 Médio Norte Araguaia e Bico do Papagaio, comprometendo assim os resultados esperados pelas estratégias de enfrentamento da doença.

Como vimos, o fator de reprodução  $R_0$  é inversamente proporcional ao índice de isolamento social. Isto significa que a medida em que o índice de isolamento cai, a força de contágio aumenta. Foi observado ainda que o índice de isolamento social a partir do dia 01 de maio até o dia 10 de junho, teve queda acentuada ficando em média próximo a 38,49% enquanto o valor ideal indicado é um número entre 60% e 70%. Isto indica que se o índice continuar nesta tendência (decaindo),  $R_0$  se afastará em média do valor 1, implicando o surgimento explosivo de novos casos e com isso a aceleração do contágio, o que pode acarretar o colapso do sistema de saúde.

Muito embora o modelo matemático SIR ofereça condições de monitoramento da situação epidêmica do estado do Tocantins, o forte apelo à abertura prematura do comércio e a flexibilização das regras de distanciamento social podem ocasionar um aumento acelerado de novos casos, dando origem a uma segunda onda de contágio. Sendo assim, o indicado é que se deve tomar muita cautela adotando medidas seguras de proteção e distanciamento para que a queda no índice de isolamento social não seja abrupta ou ainda mais acentuada em relação à tendência já observada.

### Referências

- BRASIL, Ministério da Saúde. Boletim Epidemiológico. Secretaria de Vigilância em Saúde. Ministério da Saúde, 4 COE Nº 01, Jan. 2020.
- BRASIL. Presidência da República Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos, DECRETO Nº 7.508, DE 28 DE JUNHO DE 2011. Regulamenta a Lei nº 8.080, de 19 de setembro de 1990, para dispor sobre a organização do Sistema Único de

- Saúde - SUS, o planejamento da saúde, a assistência à saúde e a articulação interfederativa, e dá outras providências. publicado no DOU 123 de 29.06.2011.
- CDC, CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION (CDC et al. Outbreak of severe acute respiratory syndrome--worldwide, 2003. MMWR. Morbidity and mortality weekly report, v. 52, n. 11, p. 226, 2003.
- CDC, CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION (CDC et al. Prevalence of IgG antibody to SARS-associated coronavirus in animal traders-Guangdong Province, China, 2003. MMWR. Morbidity and mortality weekly report, v. 52, n. 41, p. 986, 2003.
- CHE, Xiao-yan et al. A patient with asymptomatic severe acute respiratory syndrome (SARS) and antigenemia from the 2003–2004 community outbreak of SARS in Guangzhou, China. *Clinical Infectious Diseases*, v. 43, n. 1, p. e1-e5, 2006.
- DROSTEN, Christian et al. Identification of a novel coronavirus in patients with severe acute respiratory syndrome. *New England journal of medicine*, v. 348, n. 20, p. 1967-1976, 2003.
- FARIAS, Heitor Soares de. O avanço da Covid-19 e o isolamento social como estratégia para redução da vulnerabilidade. *Espaço e Economia. Revista brasileira de geografia econômica*, 2020.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas. *Panorama Tocantins*. 2019. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/to/panorama>>.
- INLOCO, Mapa brasileiro da Covid-19: mapa de isolamento social. Disponível em: <<https://mapabrasileirodacovid.inloco.com.br/pt/>>. Acessado em: 20 jun. 2020.
- INTERNATIONAL HEALTH REGULATIONS (IHR), 3rd ed. Publications of the World Health Organization are available on the WHO website ([www.who.int](http://www.who.int)) or can be purchased from WHO Press, World Health Organization, 20 Avenue Appia, 1211 Geneva 27, Switzerland, 2005.
- ISEA, R.; LONNGREN, K. E. On the mathematical interpretation of epidemics by KEELING, M. J.; ROHANI, P. Modeling infectious diseases in humans and animals. *kermack and mckendrick. Gen*, v. 19, n. 2, p. 83-87, 2013.
- KERMACK, W. O.; MCKENDRICK, A. G. A contribution to the mathematical theory of epidemics. In: THE ROYAL SOCIETY. *Proceedings of the Royal Society of London. mathematical, physical and engineering sciences*. 1927. v. 115, n. 772, p. 700-721.
- KRETZSCHMAR, M.; WALLINGA, J. *Mathematical models in infectious disease*.
- KSIAZEK, Thomas G. et al. A novel coronavirus associated with severe acute respiratory syndrome. *New England journal of medicine*, v. 348, n. 20, p. 1953-1966, 2003.

- LAU, Susanna KP et al. Severe acute respiratory syndrome coronavirus-like virus in Chinese horseshoe bats. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 102, n. 39, p. 14040-14045, 2005.
- LI, Wendong et al. Bats are natural reservoirs of SARS-like coronaviruses. *Science*, v. 310, n. 5748, p. 676-679, 2005.
- MOSSONG, Joël et al. Social Contacts and Mixing Patterns Relevant to the Spread of Infectious Diseases. *Plos Medicine*, Vol. 5, n. 3, 2008.
- PEIRIS, J. S. M. et al. Coronavirus as a possible cause of severe acute respiratory syndrome. *The Lancet*, v. 361, n. 9366, p. 1319-1325, 2003. Princeton University Press, 2008.
- ROCKLÖV, Joacim et al. COVID-19 outbreak on the Diamond Princess cruise ship: estimating the epidemic potential and effectiveness of public health countermeasures, *Journal of Travel Medicine*, Volume 27, Issue 3, April 2020.
- TOCANTINS. Secretaria da Saúde. Gabinete do Secretário. Diretoria de Gestão do Planejamento e Descentralização da Saúde. Plano Estadual de Saúde 2008-2011. Secretaria de Estado da Saúde, Diretoria de Gestão do Planejamento e Descentralização da Saúde. – Palmas: Secretaria de Estado da Saúde, 201 p. 2007. Disponível em: <<https://central3.to.gov.br/arquivo/241753/>>.
- TOCANTINS. Secretaria Estadual de Saúde do Tocantins. Relatório Situacional de Enfrentamento à COVID19 pela Secretaria de Saúde do Estado do Tocantins. 1ª. Edição. Palmas-TO, 2020 (b). Disponível em: <<https://central3.to.gov.br/arquivo/507701/>>. Acessado em: 15 abr. 2020.
- TOCANTINS. Secretaria Estadual de Saúde do Tocantins. Boletim epidemiológico n. 87, 2020(a), disponível em: <[da-covid-19-no-tocantins--1006/](https://saude.to.gov.br/noticia/2020/6/10/acompanhe-o-87-boletim-epidemiologico-)>. Disponível em: <<https://saude.to.gov.br/noticia/2020/6/10/acompanhe-o-87-boletim-epidemiologico->>. Acessado em: 12 jun. 2020.
- TODA, Alexis Akira. Susceptible-infected-recovered (sir) dynamics of covid-19 and economic impact. arXiv preprint arXiv:2003.11221, 2020.
- WANG, Ming et al. SARS-CoV infection in a restaurant from palm civet. *Emerging infectious diseases*, v. 11, n. 12, p. 1860, 2005.
- WEBSTER, Robert G. Wet markets—a continuing source of severe acute respiratory syndrome and influenza?. *The Lancet*, v. 363, n. 9404, p. 234-236, 2004.
- WHO, world Health organization. Disponível em: <<https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019>>. Acessado em: 20 abr. 2020.

WHO, world Health organization. Disponível em:

<<https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019>>. Acessado em: 20 abr. 2020.

WOO, Patrick CY; LAU, Susanna KP; YUEN, Kwok-yung. Infectious diseases emerging from Chinese wet-markets: zoonotic origins of severe respiratory viral infections. *Current opinion in infectious diseases*, v. 19, n. 5, p. 401-407, 2006.

**ABSTRACT:**

This article is a study about the behavior and spread of the Covid-19 pandemic, in the state of Tocantins, based on data reported from March 18 to June 10. A modification of the mathematical model SIR was used, in which some auxiliary compartments were added. We analyzed epidemic aspects such as the speed of the contagion curve and its impacts on the health system. As the data are made available daily, a discretization of the system of differential equations that make up the model was performed, and based on the availability of known data, we investigated the correlation between the social isolation index and the basic reproduction factor. Through a very simple interpolation, approximate contagion rates were obtained, enabling us to evaluate the behavior of the evolution of contagion curves and those that depend on them, which allows us to anticipate scenarios based on the trend lines of the data generated, thus helping decision making public power.

**KEYWORDS:** COVID-19; mathematical model SIR; Social isolation index; State of the Tocantins.

**RESUMEN:**

Este artículo es un estudio sobre el comportamiento y la propagación de la pandemia de Covid-19, en el estado de Tocantins, basado en datos reportados del 18 de marzo al 10 de junio. Se utilizó una modificación del modelo matemático SIR, en el que se agregaron algunos compartimentos. Analizamos aspectos epidémicos como: la carga sobre el sistema de salud; ralentizar la curva de contagio o aplanar la curva. A medida que los datos se ponen a disposición diariamente, se realizó una discretización del sistema de ecuaciones diferenciales que componen el modelo en función de la disponibilidad de datos conocidos, con los que se generaron las tasas iniciales. Mediante una interpolación muy simple, se obtuvieron tasas de contagio aproximadas, lo que nos permitió evaluar el comportamiento de la evolución de las curvas de contagio y las que dependen de ellas, lo que nos permite anticipar escenarios basados en las líneas de tendencia de los datos generados, lo que ayuda a la toma de decisiones del poder público.

**PALABRAS-CLAVES:** COVID-19; Modelo matemático SIR; Índice de aislamiento social; Estado de Tocantins.