

1 **Modelo SIR com taxa de exposição para estudo da**
2 **projeção de casos de COVID-19 no estado de Sergipe**

3
4 *SIR model with exposure rate for the study of the*
5 *projection of COVID-19 cases in Sergipe*

6
7 Augusto S. Freitas^{1*}; Silvio S. Lacrose Sandes²

8 ¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe, Coordenadoria de Licenciatura
9 em Física, Lagarto – SE - Brasil, 49400-000. <http://orcid.org/0000-0002-9349-0250>

10 ²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe, Coordenação de Ciências
11 Humanas e Sociais, Lagarto – SE - Brasil, 49400-000. <https://orcid.org/0000-0002-0231-1107>

12 *Contato: asfisfsa@yahoo.com.br

13
14
15 **RESUMO**

16 Utilizamos neste trabalho dois modelos para o estudo do comportamento da curva epidêmica da
17 COVID-19 no estado de Sergipe entre os dias 14 de março de 2020 e 02 de maio de 2020: modelo
18 SIR convencional e uma variante deste, que incorpora o número de indivíduos mais expostos ao
19 contágio do que o restante da população. Construímos essa variante do modelo SIR com base em
20 outro modelo proposto para descrever o surto epidêmico da COVID-19 na Coreia do Sul e em
21 Portugal. No modelo SIR com exposição aqui proposto, introduzimos um fator de exposição,
22 denominado β_1/β_2 , que permite descrever a influência de fatores, como afastamento social, no
23 espalhamento da doença. Em nosso trabalho, para fazer a comparação entre os dados obtidos via
24 simulação e o número de casos oficialmente registrados no estado de Sergipe, consideramos que
25 há entre três e nove casos reais para cada caso registrado oficialmente, que há indivíduos com
26 maior probabilidade de contágio do que outros, aqui denominados indivíduos expostos, e que o
27 número de reprodução varia com o tempo, crescendo exponencialmente na fase início do surto
28 epidêmico. Os resultados da simulação mostram que a taxa de contágio se encontra na faixa de
29 2,9 ou superior, valor em que há maior concordância entre o modelo e dados coletados.

30
31 Palavras-chave: coronavírus; SARS-CoV-2; Modelo SIR; Sergipe.

32
33
34 **ABSTRACT**

35 In this work, we used two models to study the behavior of the epidemic curve of COVID-19 in
36 Sergipe between March 14, 2020 and May 2, 2020: conventional SIR model and a variant thereof,
37 which incorporates the number of individuals more exposed to contagion than the rest of the
38 population. We built this variant of the SIR model based on another model proposed to describe
39 the epidemic outbreak of COVID-19 in South Korea and Portugal. In the SIR model with
40 exposure proposed here, we introduced an exposure factor, called β_1/β_2 , which allows us to
41 describe the influence of factors, such as social withdrawal, on the spread of the disease. In our
42 work, to compare the data obtained through simulation and the number of cases officially

43 registered in Sergipe; we consider that there are between three and nine real cases for each
44 officially registered case, that there are individuals more likely to be infected than others, here
45 exposed individuals, and that the number of reproduction varies over time, growing exponentially
46 in the beginning of the outbreak epidemic. The simulation results show that the contagion rate is
47 in the range of 2.9 or higher, a value in which there is greater agreement between the model and
48 the data collected.

49

50 Keywords: coronavirus; SARS-CoV-2; SIR model; Sergipe.

51

52

53

54 **1. INTRODUÇÃO**

55

56 O estado de Sergipe registrou oficialmente o primeiro caso de COVID-19 em 14
57 de março de 2020 e passou praticamente um mês com relativa estabilidade no registro de
58 novos casos (total inferior a cinquenta casos até o dia 15 de abril de 2020). A partir da
59 metade do mês de abril o número de casos registrados começou a crescer
60 exponencialmente, isso sem considerar as subnotificações, que são em número alarmante
61 segundo vários estudos (WALKER, 2020).

62 As dificuldades para registro e controle de casos de COVID-19 mundo afora têm
63 sido enormes, mesmo em países com sistemas públicos de saúde universais e
64 estruturados, a exemplo de França e Reino Unido. O caso de Sergipe é ainda mais
65 complicado devido às peculiaridades da economia local, densidade demográfica e a
66 população que é atendida pelo seu sistema público de saúde deficitário. O setor de
67 serviços corresponde a aproximadamente 68% (OBSERVATÓRIO DE SERGIPE, 2020)
68 da economia do estado, o que indica que o impacto econômico das medidas de restrição
69 social é maior e pode interferir na adesão da população local a tais medidas, assim como
70 posteriores dificuldades com fechamento de pequenos negócios e demissões em massa.

71 A densidade demográfica pode ser outro fator a indicar possibilidade de alta
72 propagação do vírus: Sergipe apresenta a quinta maior densidade demográfica do país,
73 com quase metade da população concentrada em cinco das setenta e cinco cidades do
74 estado (Aracaju, Nossa Senhora do Socorro, Lagarto, Itabaiana, São Cristóvão e
75 Estância). Aracaju, por exemplo, concentra uma população que compreende cerca de 25
76 % da população de todo o estado de Sergipe e tem uma densidade demográfica de
77 3.140,65 hab/km² (IBGE, 2020), aproximadamente 33 vezes a densidade demográfica do
78 estado de Sergipe (94,36hab/km²), já alta em comparação com outros estados da
79 Federação. É plausível admitir considerável influência da densidade demográfica na

80 propagação de qualquer doença infecciosa, especialmente em um estado com alta taxa de
81 urbanização (aproximadamente 70 %), como é o caso de Sergipe (OBSERVATÓRIO DE
82 SERGIPE, 2020).

83 É evidente que, com a explosão do número de casos de COVID-19 no Brasil e no
84 mundo, é importante entender como ocorre a evolução da curva epidêmica para que se
85 possa avaliar se as medidas de afastamento social tomadas pelo governo do estado de
86 Sergipe e prefeituras até o momento foram efetivas, bem como determinar as próximas
87 ações a serem executadas com o intuito de evitar o colapso do sistema de saúde.

88 O modelo S.I.R. (HERBEN, 2000) permite projetar a evolução de uma doença
89 infecciosa em uma população de acordo com suas taxas de infecção e com suas condições
90 iniciais $S(0)$, $I(0)$ e $R(0)$ e consegue, com razoável precisão, descrever de maneira
91 quantitativa, por exemplo, o intervalo de tempo que vai desde o primeiro contágio até o
92 número de infectados atingir o pico epidêmico, informação importante que permite que
93 governos desenvolvam ações para diminuir o número de infectados ou, pelo menos,
94 estender o tempo em que esse pico de contágios será atingido (SCHIMIT, 2010; JO *et al.*,
95 2020). A variante do modelo SIR aqui apresentada tomará como base o que foi feito nos
96 trabalhos de Teles (2020), adaptando o modelo SIR para descrever o comportamento da
97 curva de infectados pelo coronavírus em Portugal, e Freitas, Sandes e Silva (2020) na
98 descrição de um possível cenário para a propagação da COVID-19 no Brasil.

99 Neste trabalho, nós propomos a utilização, além do modelo S.I.R. convencional,
100 de uma variação do modelo S.I.R., tomando inicialmente o descrito pelo trabalho de JO
101 *et al.* (2020), para descrever de forma qualitativa e quantitativa a projeção de casos de
102 COVID-19 no estado de Sergipe, Brasil, desde o primeiro dia em que casos foram
103 confirmados, 14 de março de 2020, até o dia 02 de maio de 2020 (dados de infectados até
104 essa data). Nas seções seguintes, apresentaremos o modelo e o método utilizado para
105 resolver as equações diferenciais oriundas dele; em seguida apresentaremos os resultados
106 obtidos, seguindo-se as considerações finais.

107

108 **2. MODELO E METODOLOGIA**

109

110 Neste trabalho serão propostos dois modelos distintos para a descrição, a partir de
111 certas condições, do cenário previsto para a propagação da epidemia de COVID-19 em
112 Sergipe: **i)** uma variante do modelo S. I. R. - cuja sigla significa, Infectados e Removidos
113 (recuperados ou mortos) – com número fixo para a população (normalizado, $N=1$), sem

114 levar em conta a quantidade de nascimentos/mortes, mas levando-se em conta que, no
 115 universo dos indivíduos suscetíveis, $S(t)$, há um número menor de indivíduos $E(t)$, que
 116 são aqueles suscetíveis, porém mais expostos à infecção, a exemplo de pessoas que não
 117 podem aderir ao completo isolamento social ou os profissionais de saúde, que estão na
 118 linha de frente do atendimento dos infectados; **ii**) o modelo S.I.R. convencional, para uma
 119 comparação entre os resultados por ele obtidos, levando-se em conta alguns valores para
 120 a taxa de contágio efetiva.

121 A variante do modelo S.I.R. aqui proposta é a mesma descrita em trabalho anterior
 122 (FREITAS, SANDES, SILVA, 2020) e leva em conta que um número $S(t) - E(t)$ de
 123 indivíduos pode ser infectado a uma taxa β_1 e um número $E(t)$ de indivíduo pode ser
 124 infectado a uma taxa $\beta_2 > \beta_1$ (probabilidade de exposição), uma vez que os indivíduos
 125 expostos têm maior probabilidade de contrair o vírus e infectar outros indivíduos. As
 126 funções que representam os indivíduos, $S(t)$, infectados, $I(t)$, expostos, $E(t)$, e
 127 removidos/recuperados, $R(t)$, relacionam-se com suas respectivas taxas da variação
 128 temporal a partir do sistema de equações diferenciais (para um tempo $t > 0$):

$$\begin{aligned}
 \frac{dS}{dt} &= -\beta_1 SI - \beta_2 SI, \\
 \frac{dI}{dt} &= \beta_2 SI - \gamma I, \\
 \frac{dE}{dt} &= \beta_1 SI, \\
 \frac{dR}{dt} &= \gamma I,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

129
 130 em que γ é a taxa de recuperação média ($1/\gamma$ é o período em que a infecção se mantém)
 131 e o fator de reprodução é $R_0 = \frac{\beta_1}{\beta_2 \cdot \gamma}$, sendo que as funções $S(t)$, $I(t)$, $E(t)$ e $R(t)$ obedecem
 132 às seguintes condições:

133
 134
$$S + I + R + E = 1,$$

 135
$$\frac{dS}{dt} + \frac{dI}{dt} + \frac{dE}{dt} + \frac{dR}{dt} = 0.$$

136

137 O modelo S.I.R. convencional é dado pelo sistema de equações diferenciais não
138 lineares (com as mesmas condições das anteriores, mas sem a presença da função $E(t)$):

139

140
$$\frac{dS}{dt} = -\beta SI,$$

141
$$\frac{dI}{dt} = \beta SI - \gamma I,$$

142
$$\frac{dR}{dt} = \gamma I,$$

143

144 em que β é a taxa de contágio e $R_0 = \beta/\gamma$ é o número de reprodução.

145 No modelo S.I.R. convencional, no início da epidemia tem-se que o número de
146 indivíduos suscetíveis se aproxima da unidade (população normalizada), $S \approx I$, portanto
147 a segunda das equações (2), torna-se:

148
$$\frac{dI}{dt} \sim (\beta - \gamma)I(t),$$

149

150 cuja solução aproximada é

151
$$I(t) \sim \exp\left(\int (\beta - \gamma) dt\right),$$

152 sendo o número de reprodução efetiva, em um intervalo de tempo T , dado por R_t
153 $= \exp\left(\frac{1}{t} \int (\beta - \gamma) dt \cdot T\right)$ (JO *et al.*, 2020). É importante frisar que isso significa que o fator
154 de reprodução muda com tempo, crescendo exponencialmente para t baixo, atingindo um
155 pico (no ápice da infecção) e decaindo mais lentamente após isso, como previsto pelo
156 trabalho de JO *et al.* (2020). Quanto mais rapidamente cair o fator de reprodução, mais
157 rapidamente a epidemia será controlada, dado importante para a adoção de medidas que
158 venham a mitigar os efeitos da pandemia no estado e que precisa ser levado em conta por
159 autoridades sanitárias.

160 O modelo mais utilizado para doenças que se espalham rapidamente e que
161 conferem imunidade aos sobreviventes (o que ainda é somente uma hipótese no caso da
162 COVID-19), é o modelo S.I.R. convencional (SCHIMIT, 2010). Tal modelo foi utilizado
163 para a previsão da situação da epidemia de COVID-19 na Coreia do Sul (JO *et al.*, 2020),
164 mas pode, sem perda de generalidade, ser utilizado para descrever a disseminação de vírus
165 e pragas diversos em redes das mais variadas topologias, por exemplo, já que os processos
166 de propagação, da doença ou informação, são muito parecidos (HASTINGS, 2003;

167 PACHI, 2006). Modelos que incluem uma variedade maior de parâmetros também são
168 utilizados (TELES, 2020), porém um excesso de parâmetros pode interferir nos resultados
169 obtidos a longo prazo, deixando as equações diferenciais não lineares mais suscetíveis às
170 pequenas mudanças nas condições iniciais ou de contorno.

171 As Equações (1) e (2) são de difícil resolução analítica, o que leva a
172 aproximações ou busca por tratamento numérico para se chegar às curvas que
173 representam $S(t)$, $I(t)$, $E(t)$ e $R(t)$ (ou $S(t)$, $R(t)$ e $I(t)$ no modelo S.I.R. convencional. Para
174 tanto, uma rotina computacional foi desenvolvida para linguagem *Octave* com o intuito
175 de obter as soluções numéricas para esse modelo e aplicá-lo ao estudo da disseminação
176 da COVID-19 em Sergipe, sem considerar as diferenças de cada localidade, por exemplo
177 (basta lembrar que a população sergipana não está uniformemente distribuída entre todas
178 as regiões do estado). O *Octave* é um *software* de distribuição livre, seguindo os padrões
179 de distribuição da *General Public License* (GNU), com diversas funções para resolução
180 de equações diferenciais ou sistemas de equações diferenciais (SCHERER, 2005). Aqui,
181 supomos que todos os indivíduos pertencentes à população têm igual probabilidade de
182 contrair/transmitir a doença em certo intervalo de tempo (KEELING, ROHANI, 2008;
183 NEWMANN, 2002).

184

185

186 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

187

188 As previsões oriundas dos modelos propostos neste trabalho servem unicamente
189 para a descrição de um intervalo de tempo em que há maior probabilidade de colapso do
190 sistema de saúde sergipano em decorrência do pico da epidemia no estado. É difícil
191 descrever o dia exato em que o pico ocorrerá por dois motivos principais: **a)** As equações
192 diferenciais utilizadas são não lineares, portanto altamente suscetíveis a pequenas
193 mudanças de parâmetros ou das condições iniciais; **b)** Nenhum modelo matemático
194 incorpora todas as variáveis que podem influenciar no comportamento da curva
195 epidêmica, trazendo um retrato simplificado do espalhamento da epidemia com base em
196 interações simples entre os indivíduos suscetíveis (fator de contágio não necessariamente
197 é constante num dado intervalo de tempo, por exemplo).

198 Primeiro, partiremos de algumas hipóteses para a descrição do número de casos
199 registrados em Sergipe até que o pico da infecção seja atingido. **Cenário 1):** Tendo cerca
200 de três vezes mais infectados do que o número oficial de registros, e com uma taxa de

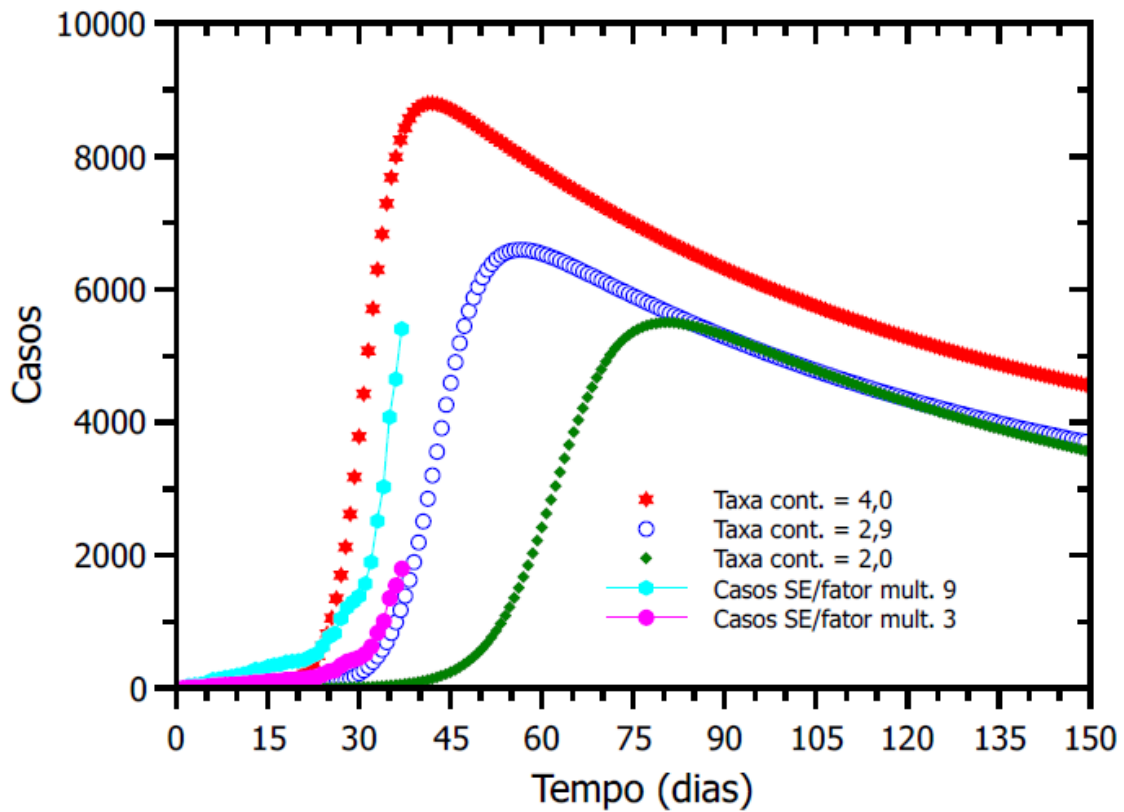
201 infecção (número de reprodução) constante e igual a 2,0, no pico epidêmico o estado terá
202 um total de cerca de 6600 infectados; **Cenário 2)** Tendo cerca de nove vezes mais
203 infectados do que o número oficial de registros, e com uma taxa de infecção (número de
204 reprodução) constante e superior a 3,0, no pico epidêmico o estado terá um total de cerca
205 de 8800 infectados. A possibilidade de o Brasil ter entre 2,5 vezes e mais de 9,0 vezes o
206 número oficial de casos registrado já foi descrita em estudo divulgado pelo Imperial
207 College London (IMPERIAL COLLEGE, 2020; WALKER *et al.*, 2020).

208 Além de tais cenários, deve-se considerar também que: **i)** A taxa de contágio não
209 varia com o tempo e é a mesma para todos os indivíduos; **ii)** A relação entre os parâmetros
210 β_1 e β_2 , especificamente a razão β_1/β_2 , é o coeficiente importante para a análise sobre os
211 impactos da alta exposição ao vírus e suas conseqüências no que diz respeito à
212 disseminação da infecção pela população; **iii)** A ausência de políticas de isolamento social
213 (alta exposição de fatia relativamente grande da população) implica mais, em nossa
214 análise, num maior número de casos do que na significativa mudança do tempo em que a
215 curva epidêmica atinge o pico, como já proposto em trabalho anterior (FREITAS,
216 SANDES, SILVA, 2020).

217 De acordo com nossa proposta, variáveis importantes para a descrição do
218 comportamento da curva epidêmica no estado de Sergipe serão: **iv)** alta taxa de infecção,
219 com igual exposição para todos os indivíduos suscetíveis; **v)** taxa de infecção variando
220 com a exposição relativa, tal como proposto por outro trabalho desenvolvido (FREITAS,
221 SANDES, SILVA, 2020). Levando-se em conta todos esses cenários e modelos,
222 encontramos um intervalo de dias em que ocorrerá, muito provavelmente, o pico
223 epidêmico no estado de Sergipe: entre quinze e trinta dias, contados a partir do dia 1º de
224 maio de 2020, como pode ser observado nos gráficos das Figs. 1 e 2. Pode-se observar
225 nestes mesmos gráficos que descrever a rapidez com a qual a epidemia se alastra só é
226 possível com uma estimativa razoável do número real de casos, algo hoje totalmente fora
227 dos registros oficiais no Brasil.

228 Na Fig. 1, vemos que se o número de casos for três vezes maior, a curva que
229 melhor se ajusta aos dados é que leva em conta uma taxa de contágio igual a 2,9,
230 aproximadamente, resultado corroborado pelo estudo do Imperial College London
231 (2020), que obteve uma taxa aproximada de 2,8 para o Brasil. Se o número real de casos
232 for nove vezes o registrado pelas autoridades sanitárias, vemos no gráfico da Fig. 1 que a
233 taxa de contágio é superior a três, o que, se confirmado, pode fazer com que o número de
234 casos acumulados no estado de Sergipe seja de cerca de quase 9.000 no pico. Esse

235 intervalo para o fator de multiplicação (entre três e nove vezes o número registrado de
236 casos) foi proposto, em versão atualizada, pelo estudo do Imperial College London
237 (2020).

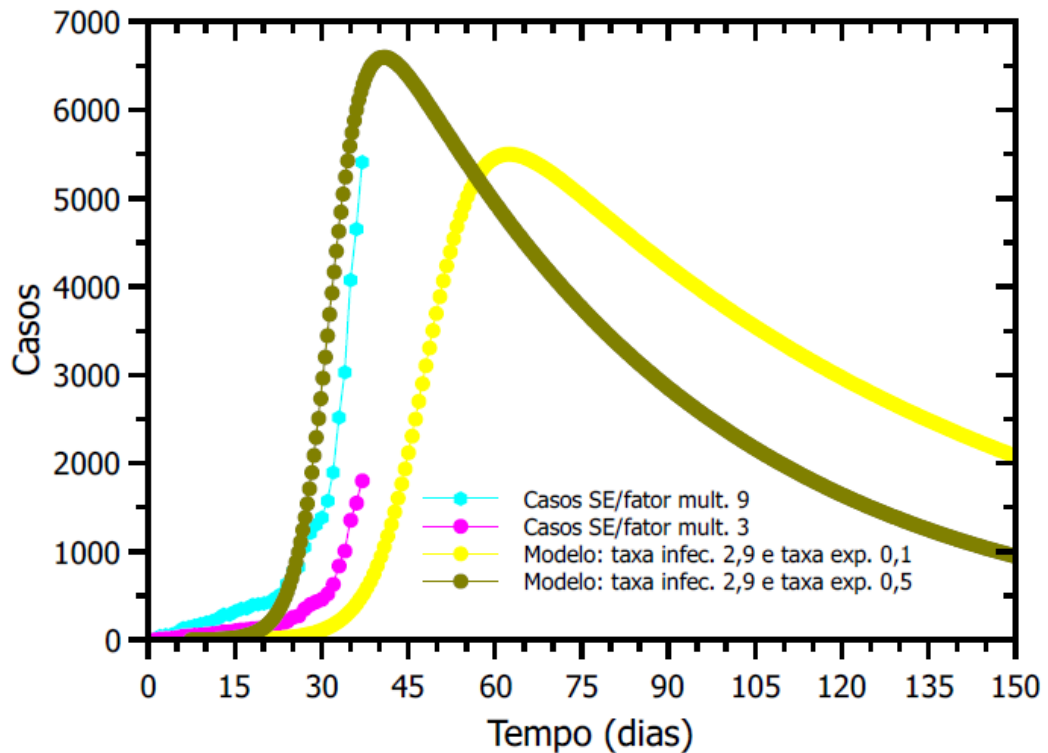


238

239 **Figura 1.** Curvas epidêmicas para vários cenários, com taxas de contágio distintas (sem levar em conta a
240 exposição). Utilizando a hipótese de que há entre três e nove casos para cada caso oficialmente notificado
241 no Sergipe, as curvas que melhor se ajustam ao número de casos registrados no estado entre 14 de março e
242 02 de maio de 2020 são aquelas com fatores de contágio iguais a 2,9 e 4,0 (na suposição de nove casos para
243 cada registro, a taxa de contágio fica entre 3,0 e 4,0). Dados disponíveis em Coronavírus Brasil,
244 <https://covid.saude.gov.br/>.

245

246



247

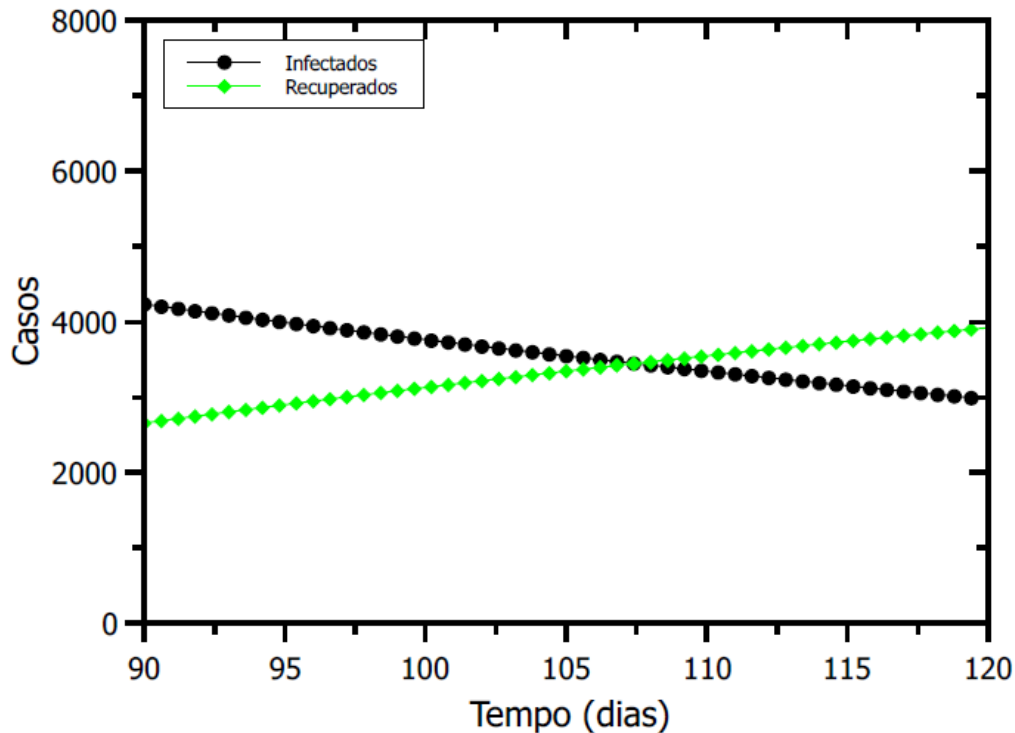
248 **Figura 2.** Curvas epidêmicas obtidas do modelo com taxas de exposição distintas (mesma taxa de
 249 contágio). Utilizando a hipótese de que há entre três e nove casos para cada caso oficialmente notificado
 250 no estado de Sergipe, as curvas que melhor se ajustam ao número de casos registrados no estado entre 14
 251 de março e 02 de maio de 2020 são aquelas com taxas de exposição maiores do que 0,1 e menores que 0,5.
 252 Dados disponíveis em Coronavírus Brasil, <https://covid.saude.gov.br/>.

253

254 Uma informação importante que pode, ao menos de maneira qualitativa, ser
 255 extraída do modelo matemático proposto é o quanto a alta exposição está interferindo na
 256 propagação do coronavírus no estado, para uma dada população de suscetíveis. Em
 257 primeiro lugar, deve-se lembrar que nem todos os suscetíveis estão altamente expostos ao
 258 contágio: profissionais de saúde ou prestadores de serviços essenciais que têm contato
 259 com um grande número de pessoas, a exemplo de entregadores ou motoristas de táxi e
 260 aplicativos (como discutido acima, a economia sergipana é basicamente centrada no setor
 261 de serviços), têm chance maior de contrair o vírus. Outro fator é a adesão maior ou menor,
 262 por diversos motivos, da população do estado ao regime de distanciamento social,
 263 portanto, incorporar um fator de exposição ao modelo é importante até para se discutir
 264 qualitativamente o alcance de tais medidas.

265 Considerando a taxa de exposição como o percentual de indivíduos suscetíveis
 266 que estão mais expostos, percebe-se claramente no gráfico da Fig. 4 que uma alta taxa de
 267 exposição, por exemplo 0,5, faz com que a curva epidêmica atinja um pico num tempo t
 268 menor do que aquela obtida para uma população pouco exposta (fator de exposição 0,1

269 na figura). Mesmo com uma alta taxa de contágio, exposição maior ou menor aqui no
270 modelo proposto significa, na prática, fazer com que essa taxa aumente com o tempo.
271



272
273 **Figura 3.** Gráficos com as curvas de infectados e recuperados (taxa de infecção de 2,9), tal como rotulados
274 na legenda da figura, em função do tempo, levando-se em conta como primeiro dia da infecção em Sergipe
275 14 de março de 2020. O ponto de cruzamento entre as curvas de infectados e recuperados indica
276 estabilização da pandemia, a exemplo do discutido no trabalho de Jo *et al.* (2020), mas neste trabalho
277 prefere-se a cautela ao afirmar que, com base no que se obtém do modelo, a estabilização não ocorrerá antes
278 da segunda metade do mês de junho de 2020.

279
280 É natural esperar que o fator de reprodução efetiva aumente exponencialmente
281 durante o início da epidemia, especialmente porque medidas de afastamento social
282 geralmente não são implantadas de imediato, mas uma maior exposição ao vírus ao longo
283 da pandemia pode fazer com que esse fator não decresça rapidamente como esperado (JO
284 *et al.*, 2020), o que implica num maior intervalo de tempo em relação ao qual o número
285 de casos continuará ocorrendo, e em maior velocidade.

286 Um dado crucial para definir políticas de relaxamento da quarentena obtido pelo
287 modelo aqui proposto é o intervalo de tempo em que ocorrerá a estabilização dos casos.
288 O tempo de estabilização da epidemia é obtido a partir do ponto de cruzamento entre a
289 curva que representa o número de infectados com a curva que representa o número
290 cumulativo de indivíduos recuperados, como mostra o gráfico da Fig. 3.

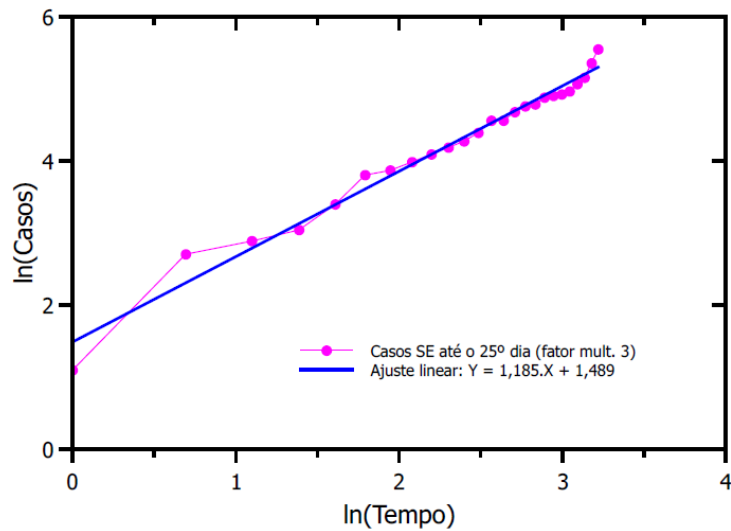
291 Preferimos aqui apontar um intervalo em que mais provavelmente ocorrerá essa
292 estabilização do que um dia específico: a estabilização correrá provavelmente entre o 100°
293 e 120° dia a partir do primeiro caso registrado em Sergipe. Como o primeiro caso foi
294 registrado aqui no dia 14 de março de 2020, nesse cenário, a estabilização da epidemia
295 está prevista para ocorrer após o dia 22 de junho de 2020.

296 Deve-se lembrar que tais números podem variar consideravelmente a depender
297 das condições postas: uma alta flexibilização de medidas de afastamento social, registro
298 insuficiente de casos (subnotificação), colapso do sistema de saúde do estado, dentre
299 outras. Dificilmente teremos uma estabilização no número de casos antes da segunda
300 metade do mês de junho, levando-se em conta tais resultados e comparações feitas com o
301 que vem ocorrendo em outros países.

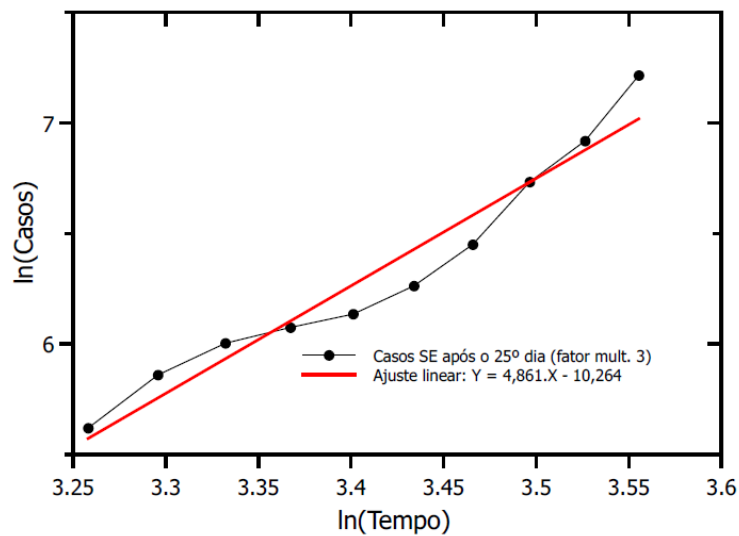
302 A análise da razão de crescimento da curva epidêmica em intervalos distintos de
303 tempo é outro fator importante para a verificação da eficácia de medidas de afastamento
304 social, especialmente para a construção de um planejamento para a retomada gradual das
305 atividades em diversos setores. O chamado gráfico log-log (na verdade será utilizada aqui
306 a função $\ln(x)$) lineariza as curvas de infectados em função do tempo e o valor da
307 inclinação da reta que ajusta essas curvas nos dá a informação relativa a um crescimento
308 mais lento ou mais acelerado dos casos de COVID-19 no estado de Sergipe.

309 Nos gráficos das Figs. 4.a) e 4.b) traçamos dois panoramas distintos: o gráfico da
310 Fig. 4.a) representa o ajuste linear para os casos **até** o 25° dia após o primeiro registro no
311 estado, enquanto o gráfico da Fig. 4.b) representa o ajuste linear para os casos **após** o 25°
312 dia do primeiro caso registrado. A inclinação da reta que melhor se ajusta aos dados do
313 gráfico da Fig. 4.a) é 1,185, enquanto que a inclinação da reta que melhor se ajusta aos
314 dados da Fig. 4.b) é 4,861, ou seja, cerca de quatro vezes maior. Isso significa que houve
315 um aumento considerável na rapidez com que a COVID-19 vem se alastrando por todo o
316 estado de Sergipe após o 25° dia de registro, dado preocupante e que indica que se
317 medidas para o controle da propagação da doença provocada pelo coronavírus não forem
318 adotadas, a tendência é de uma explosão nos casos de COVID-19 no estado, provocando
319 um rápido colapso do sistema de saúde.

320



a)



b)

321 **Figura 4.** Gráficos com os ajustes de curvas para os casos de COVID-19 registrados no estado de
 322 Sergipe (considerando fator multiplicativo = 3): a) **até** o 25º dia após o primeiro registro no estado; b) **após**
 323 o 25º dia de registro dos primeiros casos no estado. A inclinação da reta do gráfico b) é mais do que quatro
 324 vezes a da reta do gráfico a), o que indica um aumento na velocidade de propagação da doença no estado
 325 após o 25º dia.

326

327

328 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

329

330 Em resumo, foram utilizados dois modelos para o estudo do comportamento da
 331 curva epidêmica da COVID-19 no estado de Sergipe: modelo SIR convencional e uma
 332 variante deste modelo que incorpora o número de indivíduos suscetíveis mais expostos

333 do que o restante da população ao contágio. Em nosso trabalho, para fazer a comparação
334 entre os dados obtidos via simulação e o número de casos oficialmente registrados no
335 estado de Sergipe, consideramos que há entre três e nove casos reais para cada caso
336 registrado oficialmente, que há indivíduos suscetíveis com maior probabilidade de
337 contágio do que outros, aqui denominados indivíduos expostos, e que o número de
338 reprodução varia com o tempo, crescendo exponencialmente na fase início do surto
339 epidêmico. Os resultados da simulação mostram que a taxa de contágio se encontra na
340 faixa de 2,9 ou superior, região em que há maior concordância entre modelo e dados
341 coletados.

342

343

344 REFERÊNCIAS

345

346 FREITAS, A. S; SANDES, S. S. L.; SILVA, L. S.*et al.* New S.I.R. model used in the
347 projection of COVID 19 cases in Brazil. *medRxivdoi: 10.1101/2020.04.26.20080218*,
348 2020.

349 HASTINGS, A.; PALMER, M. A. A Bright Future for Biologists and Mathematicians?
350 *Science*. v 299. p.2003-2004. 2003.

351

352 HERBEN, W. Hethcote. The mathematics of infectious diseases. *SIAM Review*, 2000, v.
353 42, n. 41, p. 599-648.

354

355 IBGE. Sergipe. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/se/panorama> . Acessado
356 em: 30 de abr. de 2020.

357

358 IMPERIAL COLLEGE LONDON. Short-term forecasts of COVID-19 deaths in multiple
359 countries. Disponível em: <https://mrc-ide.github.io/covid19-short-term-forecasts/index.html>. Acessado em 30 de abri. de 2020.

360

361 JO, Hyeontae *et al.* Analysis of COVID-19 spread in South Korea using the SIR model
362 with time-dependent parameters and deep learning. *medRxivdoi:*
363 *10.1101/2020.04.13.20063412*, 2020.

364

365 KEELING, M. J.; ROHANI, P. *Modeling Infectious Diseases in Humans and Animals*.
366 Princeton University Press. 2008.

367

368 NEWMAN, M. E. J. Spread of epidemic disease on networks. *Physical Review E*. v. 66.
369 016128. 2002.

370

371 OBSERVATÓRIO DE SERGIPE. Sergipe em números. Disponível em:
372 <http://docs.observatorio.se.gov.br/wl/?id=9U1e1Ib1bO0AMkDALrhGCydT7S15gijn>. Acesso
373 em: 01 de mai. de 2020.

374

375

376 PACHI, C. G. F. *Modelo matemático para o estudo da propagação de informações por*
377 *campanhas educativas e rumores*. Tese de doutorado. USP. São Paulo. 2006.
378
379 SCHIMIT, P. H. T. *Modelagem e controle de propagação de epidemias usando autômatos*
380 *celulares e Teoria dos Jogos*. Tese de doutorado. USP. São Paulo. 2010.
381
382 SCHERER, C. *Métodos computacionais da Física*. 1ª ed. Editora Livraria da Física. São
383 Paulo. 2005.
384
385 WALKER, Patrick GT *et al.* The global impact of COVID-19 and strategies for
386 mitigation and suppression. ImperialCollege London, *doi: https://doi.*
387 *org/10.25561/77735*, 2020.
388
389 ZHANG, *et al.* The use of anti-inflammatory drugs in the treatment of people with severe
390 coronavirus disease 2019 (COVID-19): The experience of clinical immunologists from
391 China. *Clinical Immunology*. p. 108393. 2020.
392
393
394