

Influência dos Fenômenos Climáticos El Niño e La Niña sobre o aumento do número de casos de Dengue no Estado do Rio Grande do Sul/RS (Brasil)

Régis S. de Quadros¹, Leonardo F. dos Santos², Claus Haetinger³, Leonidas A. A. Baltazar⁴, Glênio A. Gonçalves⁵, Douglas S. Lindemann⁶, Daniela Buske⁷
PPGMMat/UFPel, Pelotas, RS

Resumo. Neste trabalho descreve-se a dinâmica de transmissão do vírus da dengue entre humanos e mosquitos. Um modelo epidemiológico compartimental do tipo SEIR, que considera a influência dos fenômenos climáticos El Niño, La Niña, Estiagem e Secas, os quais desempenham um papel importante nesta dinâmica, é utilizado no estudo. Os cenários obtidos nas simulações numéricas do sistema de EDO's envolvido, resolvido pelo método de Runge-Kutta explícito de 4ª ordem e 4 estágios, com a inclusão de parâmetros de temperatura, umidade e precipitação, ilustram a evolução ao longo de um ciclo da doença.

Palavras-chave. Dengue Clássica, Dengue Grave, Modelo SEIR, Runge-Kutta.

1 Introdução

Pandemias causadas por bactérias e vírus fazem parte da história da humanidade [19, 22]. No Brasil, há diversas doenças de caráter endêmico [13], sendo a Dengue o foco de estudo deste trabalho. Ela tem sido endêmica em mais de 100 países [20], especialmente nos de clima tropical e subtropical, e é considerada uma doença infecciosa febril, transmitida pelo mosquito fêmea *Aedes aegypti*, infectado por um arbovírus do gênero *Flavivirus*, família *Flaviviridae*. São conhecidos quatro sorotipos da dengue (DENV1 a DENV4) [12]. A doença é caracterizada por sintomas como febre alta, dores musculares e articulares, e todos os sorotipos podem se apresentar de forma benigna ou grave, dependendo de fatores como o vírus envolvido, ter tido infecção anterior pelo vírus da dengue, bem como fatores individuais, tais como doenças crônicas (diabetes, asma brônquica, anemia falciforme). Os sintomas duram, em média, 7 dias [20]. O Brasil teve um aumento de 252% nos casos de dengue no início de 2024. Em alguns estados, como no Rio Grande do Sul (RS), o crescimento atingiu 2.825% [16].

Sob o ponto de vista da epidemiologia, diversos modelos têm sido utilizados para descrever o comportamento de determinadas doenças, como é o caso da dengue. Alguns desses são o SIR (suscetível, infectado, recuperado), SIS (suscetível, infectado, suscetível), SEIR (suscetível, exposto, infectado, recuperado), SEIRS (suscetível, exposto, infectado, recuperado, suscetível), MSEIRS

¹quadros99@gmail.com

²ferreira141198@gmail.com

³claus.haetinger@gmail.com

⁴leonidasariasb@gmail.com

⁵gleniogoncalves@yahoo.com

⁶douglas.lindemann@ufpel.edu.br

⁷danielabuske@gmail.com

(imunes, suscetível, infectado, recuperado, suscetível) e outros [15]. Cada modelo apresenta vantagens e desvantagens em termos de aplicabilidade.

As mudanças climáticas representam uma grande ameaça à humanidade. Atividades antrópicas, como queima de combustíveis fósseis e desmatamento, têm contribuído para o aumento significativo dos níveis de dióxido de carbono e outros gases de efeito estufa na atmosfera nas últimas décadas, acarretando o aumento da temperatura média global, e outras alterações nos padrões climáticos em todo o mundo [18], o que implica no aumento da incidência de doenças transmitidas por vetores, como a dengue [11].

O fenômeno climático El Niño ocorre periodicamente no Oceano Pacífico, sendo caracterizado pelo aquecimento anormal das águas superficiais, que afetam padrões climáticos e condições meteorológicas em diversas regiões. Isto desempenha um papel significativo no aumento da incidência da dengue, por criar condições climáticas favoráveis (temperatura, umidade, regimes regionais de precipitação e variações atmosféricas) para a reprodução do vetor, representando um desafio adicional aos sistemas de saúde pública [5]. Por outro lado, o fenômeno climático oposto, La Niña, caracterizado pelo resfriamento anormal das águas superficiais do Oceano Pacífico, também pode influenciar a incidência da dengue. Durante o La Niña, podem ocorrer variações nas condições de umidade, com potencial para criar ambientes propícios à reprodução do mosquito *Aedes aegypti*. Altos níveis de umidade do ar, combinados com temperaturas adequadas, podem aumentar a atividade dos mosquitos [10] e, conseqüentemente, o risco de transmissão da doença. Portanto, além dos efeitos da temperatura, a umidade e a precipitação desempenham um papel fundamental na ecologia do mosquito vetor e na dinâmica de transmissão da dengue [8].

Considerando esses fatores climáticos, é possível entender melhor a propagação da dengue e desenvolver estratégias mais eficazes de prevenção e controle adaptadas às condições específicas de cada região. Sendo assim, o objetivo principal deste estudo foi verificar e analisar a influência dos fenômenos climáticos El Niño e La Niña sobre o aumento no número de casos de incidência da doença no Rio Grande do Sul/RS (Brasil).

2 Materiais e Métodos

Utilizou-se um modelo compartimental SEIR (Suscetíveis, Expostos, Infectados, Recuperados), com a inclusão dos parâmetros temperatura (temp), umidade (umi) e precipitação (precip) [6], não usuais na literatura pesquisada. A janela de tempo analisada foi de 2015 a 2023, por ter sido esta a fornecida pela Secretaria Estadual de Saúde do Rio Grande do Sul (SES/RS): Painel de Casos de Dengue, alimentado pelo Sistema de Informação de Agravos de Notificação (SINAN), o qual traz os casos notificados e os casos confirmados, considerando os casos autóctones, que se referem aos de uma doença que são originários ou adquiridos localmente em uma determinada área, em oposição aos casos importados ou introduzidos de fora da região.

O modelo matemático proposto é composto por 14 compartimentos, nos quais estão incluídos os humanos e os mosquitos, que mudam de magnitude ao longo do tempo e representam os diferentes estágios da doença. Não são especificados os sorotipos da doença, sendo consideradas somente as formas: dengue clássica e dengue grave. Neste caso, representa-se o número de indivíduos humanos, sempre no instante de tempo t , por: Sh : suscetíveis a todos os sorotipos; Eh_1 : expostos à dengue clássica e que ainda não tiveram a dengue grave; Ih_1 : infectados pela dengue clássica e que ainda não tiveram a dengue grave; Rh_1 : recuperados da dengue clássica e que ainda não tiveram a dengue grave; Sh_{12} : suscetíveis à dengue clássica e que ainda não tiveram a dengue grave; Ih_{12} : expostos à dengue clássica e que já tiveram a dengue grave; Rh_{12} : recuperados da dengue clássica e que já tiveram a dengue grave; Eh_2 : expostos à dengue grave e que ainda não tiveram a dengue clássica; Ih_2 : infectados pela dengue grave e que ainda não tiveram a dengue clássica; Rh_2 : recuperados da dengue grave e que ainda não tiveram a dengue clássica; Sh_{21} : suscetíveis à dengue clássica e que

já tiveram a dengue grave; Eh_{21} : expostos à dengue clássica e que já tiveram a dengue grave; Ih_{21} : infectados pela dengue clássica e que já tiveram a dengue grave; Rh_{21} : recuperados da dengue clássica e que já tiveram a dengue grave;

Foi considerado que um indivíduo possa desenvolver a forma grave da dengue, sem que tenha sido infectado anteriormente pelo vírus da dengue clássica, e reciprocamente [7].

O modelo desenvolvido é descrito pelo sistema formado pelas equações (1)-(14), conforme [1]:

$$\frac{dSh}{dt} = \delta \cdot Ih_2 + \frac{Nh}{T_{lh}} - \frac{Sh \cdot Iv_1 \cdot c_{vh}}{Nh} - \frac{Sh \cdot Iv_2 \cdot c_{vh}}{Nh} - \frac{Sh}{T_{lh}} \quad (1)$$

$$\frac{dEh_1}{dt} = \frac{(Sh + Sh_{21}) \cdot Iv_1 \cdot c_{vh}}{Nh} - Eh_1 \left(\frac{1}{T_{iit}} + \frac{1}{T_{lh}} \right) \quad (2)$$

$$\frac{dIh_1}{dt} = \frac{Eh_1}{T_{iit}} - Ih_1 \left(\frac{1}{T_{id}} + \frac{1}{T_{lh}} \right) \quad (3)$$

$$\frac{dRh_1}{dt} = \frac{Ih_1}{T_{id}} - \frac{Rh_1}{T_{lh}} - \frac{Rh_1}{T_{im}} \quad (4)$$

$$\frac{dEh_2}{dt} = \frac{(Sh + Sh_{12}) \cdot Iv_2 \cdot c_{vh}}{Nh} - Eh_2 \left(\frac{1}{T_{iit}} + \frac{1}{T_{lh}} \right) \quad (5)$$

$$\frac{dIh_2}{dt} = \frac{Eh_2}{T_{iit}} - Ih_2 \left(\frac{1}{T_{id}} + \frac{1}{T_{lh}} + \delta \right) \quad (6)$$

$$\frac{dRh_2}{dt} = \frac{Ih_2}{T_{id}} - \frac{Rh_2}{T_{lh}} - \frac{Rh_2}{T_{im}} \quad (7)$$

$$\frac{dSh_{12}}{dt} = \frac{Rh_1}{T_{im}} - \frac{Sh_{12} \cdot Iv_2 \cdot c_{vh}}{Nh} - \frac{Sh_{12}}{T_{lh}} \quad (8)$$

$$\frac{dSh_{21}}{dt} = \frac{Rh_2}{T_{im}} - \frac{Sh_{21} \cdot Iv_1 \cdot c_{vh}}{Nh} - \frac{Sh_{21}}{T_{lh}} \quad (9)$$

$$\frac{dSv}{dt} = \frac{\text{precip}}{T_{lv}} - \frac{Sv \cdot (Ih_1 + Ih_2) \cdot c_{hv}}{Nh} - \frac{Sv}{T_{lv}} \quad (10)$$

$$\frac{dEv_1}{dt} = \frac{Sv \cdot Ih_1 \cdot c_{hv}}{Nh} - Ev_1 \left(\frac{1}{T_{eit}} + \frac{1}{T_{lv}} \right) \quad (11)$$

$$\frac{dIv_1}{dt} = \frac{Ev_1}{T_{eit}} - \frac{Iv_1}{T_{lv}} \quad (12)$$

$$\frac{dEv_2}{dt} = \frac{Sv \cdot Ih_2 \cdot c_{hv}}{Nh} - Ev_2 \left(\frac{1}{T_{eit}} + \frac{1}{T_{lv}} \right) \quad (13)$$

$$\frac{dIv_2}{dt} = \frac{Ev_2}{T_{eit}} - \frac{Iv_2}{T_{lv}} \quad (14)$$

onde $Nh = Sh + Eh_1 + Ih_1 + Rh_1 + Sh_{12} + Ih_{12} + Rh_{12} + Eh_2 + Ih_2 + Rh_2 + Sh_{21} + Eh_{21} + Ih_{21} + Rh_{21}$ é a população total de humanos, mantida constante no tempo t .

Para os humanos: T_{lh} é a expectativa de vida; $\frac{1}{T_{lh}}$ corresponde às taxas de natalidade e mortalidade; T_{iit} é o período latente intrínseco; $\frac{1}{T_{iit}}$ corresponde à taxa na qual as pessoas passam da classe expostos para a classe infectados; T_{id} é a duração da infecção; $\frac{1}{T_{id}}$ corresponde à taxa de recuperação da doença; T_{im} é a duração da imunidade cruzada; $\frac{1}{T_{im}}$ é a taxa de perda dessa imunidade e δ é a taxa de mortalidade atribuída à dengue grave.

Para os mosquitos: $\frac{1}{T_{eit}}$ está relacionada à taxa de transição dos mosquitos da classe exposta para a classe infectada. $\frac{1}{T_{lv}}$ indicando a taxa de mortalidade. ps é o número de picadas por um mosquito suscetível por unidade de tempo, e pi é o número de picadas por mosquito infectado por unidade de tempo. A variável T_{lv_base} representa a expectativa de vida do mosquito. T_{eit_base} define o período latente extrínseco. A taxa de contato efetivo de humano para vetor é dada por $c_{hv_base} = ahv \times ps$, enquanto a taxa de contato efetivo de vetor para humano é representada por

$c_{vh_base} = avh \times pi$. As constantes ahv e avh representam, respectivamente, a probabilidade de transmissão do vírus durante a picada, de humano infectado para mosquito suscetível, e de mosquito infectado para humano suscetível, sendo essas taxas, influenciadas pelos elementos climáticos, sendo $c_{vh} = c_{vh_base} \cdot (1 + 0.2 \cdot (temp - 25^\circ))$, $c_{hv} = c_{hv_base} \cdot (1 + 0.2 \cdot (umid - 70\%))$, $T_{lv} = T_{lv_base} \cdot (1 + 0.1 \cdot (umid - 70\%))$ e $T_{eit} = T_{eit_base} \cdot (1 + 0.1 \cdot (temp - 25^\circ))$

3 Resultados e Discussões

Para a obtenção dos resultados numéricos foram utilizadas as seguintes condições iniciais: $Sh(0) = 50000$, $Eh_1(0) = 1$, $Ih_1(0) = 0$, $Rh_1(0) = 0$, $Eh_2(0) = 0$, $Ih_2(0) = 0$, $Rh_2(0) = 0$, $Sh_{12}(0) = 0$, $Sh_{21}(0) = 0$, $Sv(0) = 50000$, $Ev_1(0) = 0$, $Iv_1(0) = 0$, $Ev_2(0) = 0$, $Iv_2(0) = 0$.

Na Tabela 1 são descritos os demais parâmetros [7].

Tabela 1: Parâmetros utilizados nas simulações. Fonte: [7].

N_h	N_v	δ	T_{lh}	T_{id}	T_{iit}	T_{eit}	T_{lv}	c_{vh}	c_{hv}
5000	200	0.05	25000	3.0	5.0	10.0	4.0	0.75	0.375

Uma vez desenvolvido o modelo, o sistema de EDO's associado foi resolvido pelo método de Runge-Kutta explícito de 4ª ordem, amplamente utilizado devido à sua precisão e estabilidade, tornando-o uma escolha preferencial em uma variedade de aplicações numéricas, que vão desde simulações computacionais a modelos complexos de sistemas dinâmicos [2].

A partir das simulações numéricas, apresentadas na Figura 1, é possível observar a interferência dos fenômenos climáticos, comparados com os dados do modelo sem os efeitos das variáveis climáticas.

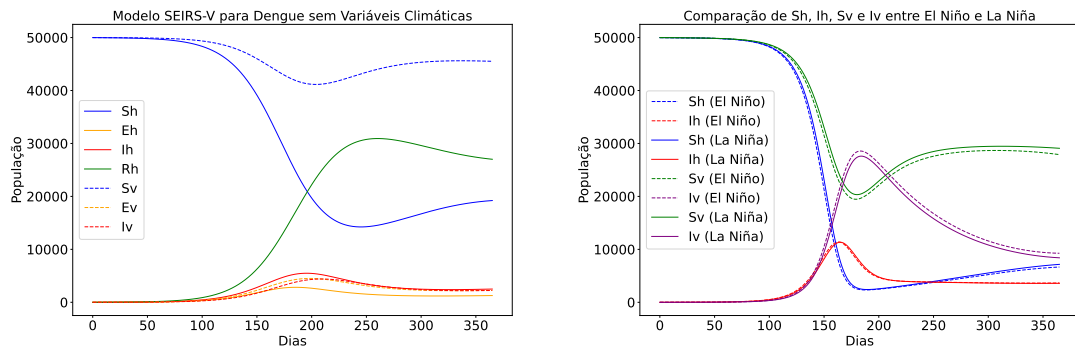


Figura 1: Dinâmica sem a influência da temp, umi e prec (esquerda) e S_v e I_v dos fenômenos (direita) ao longo do tempo. Fonte: Dos autores

Nos gráficos da Figura 1, à esquerda, evidencia-se a dinâmica da dengue sem a influência dos elementos climáticos. Nela percebe-se que o modelo se assemelha aos contidos na literatura para esse tipo de modelo [7]. Conforme a Figura 1, lado direito, os vetores infectados são mais numerosos durante o período do El Niño comparado a fase do La Niña, conseqüentemente, há também consideravelmente o aumento dos humanos infectados durante a fase positiva do ENOS.

Por mais que as diferenças nos compartimentos não seja grande, elas correspondem a um acréscimo de aproximadamente 3% a 10% no número de novos vetores infectados. Além disso, a

inclusão dos elementos climáticos alteram significativamente a dinâmica o longo do tempo, tornando assim, o modelo mais condizente com a realidade.

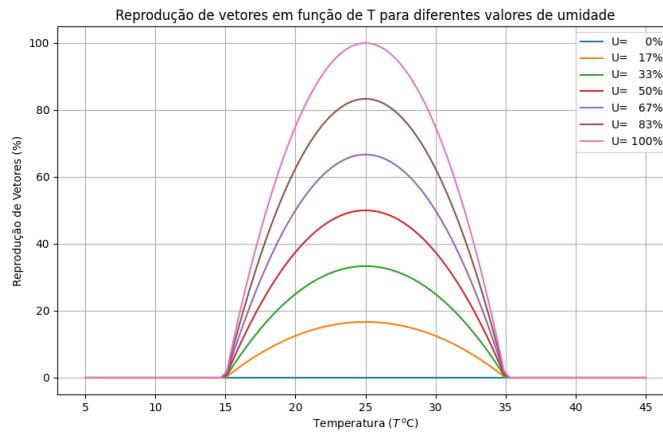


Figura 2: Reprodução dos vetores para diferentes valores de umidade. Fonte: Dos autores

Na Figura 2, é evidenciada a interação entre a umidade e a temperatura na reprodução dos mosquitos. Observa-se que a faixa de temperatura ideal para a reprodução destes é situada entre 15°C e 35°C. Quanto à umidade, verifica-se que sua elevação acelera o processo reprodutivo, atingindo seu ápice quando a temperatura é de 25°C e a umidade alcança 100%.

Os fenômenos climáticos El Niño e La Niña exercem forte influência nos casos de dengue, devido às condições favoráveis à incidência da doença que proporcionam. Durante La Niña, a redução do volume de chuvas prolonga o período de estiagem, ainda há uma diminuição da temperatura, bem como na umidade, desfavorecendo as condições ambientais necessárias para o desenvolvimento do vetor da dengue [14]. Por outro lado, o fenômeno El Niño contribui intensamente para uma maior proliferação do mosquito, devido à elevada umidade, pluviosidade e temperatura favorável ao desenvolvimento do *Aedes aegypti*, cuja faixa ideal de temperatura para reprodução se situa entre 22°C e 32°C, ao passo que, para a longevidade e fecundidade dos adultos, varia entre 22°C e 28°C [3].

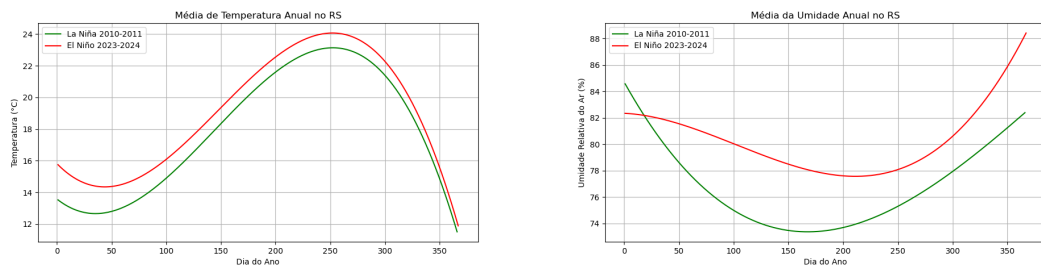


Figura 3: Variação da temperatura (esquerda) e da umidade (direita) ao longo do tempo. Fonte: Dos autores

Na Figura 3, é apresentado um comparativo entre umidade e temperatura em dois anos distin-

tos: 2023-2024, marcado pelo fenômeno El Niño, e 2010-2011, caracterizado por La Niña. Observa-se que, durante o ano com El Niño, a umidade ficou superior a 75%. Além disso, a temperatura se manteve consistentemente acima de 15°C, chegando até aproximadamente 25°C.

Do final de 2014 ao outono de 2016, houve a incidência de um dos maiores fenômenos El Niño já registrados [4]. Esta excepcionalidade foi seguida por um ano recorde em termos de altas temperaturas (2017) [17]. Como resultado, nos anos subsequentes, testemunhou-se uma redução no número de casos de dengue no RS, sendo confirmados apenas 24 e 28 casos, em 2017 e 2018, respectivamente [21]. Já em 2019 e 2020, após o fim do último El Niño registrado, houve um aumento alarmante nos casos de dengue, tendo sido confirmados 1.189 e 3.638 casos, respectivamente [21].

A ocorrência do fenômeno El Niño de 2014-2016 foi uma das mais intensas já registradas, com seis trimestres consecutivos de anomalias de temperatura da superfície do mar acima de 2°C. O aumento máximo de temperatura trimestral foi de 2,6°C. Já o El Niño de 2018-2019, conhecido como El Niño 3.4 [9], não alcançou a mesma intensidade prolongada e extrema do evento anterior.

A transição para o fenômeno climático oposto, La Niña, teve início em meados de 2020. Nos três anos seguintes, o número de casos confirmados de dengue atingiu níveis alarmantes. Em 2021, os registros aumentaram para 10.231 casos, alcançando um pico em 2022, com 67.330 casos e 66 óbitos relatados. No ano de 2023, apesar de uma diminuição em relação ao ano anterior, foram confirmados 38.310 casos, com 54 óbitos registrados [21].

Estes dados destacam a influência crítica da temperatura e da umidade dos fenômenos climáticos El Niño e La Niña na propagação e intensificação das doenças transmitidas por vetores, como a dengue.

4 Considerações Finais

Em síntese, é importante ressaltar que a umidade e a temperatura desempenham papéis cruciais na proliferação do mosquito transmissor da dengue. Quando esses fatores estão em níveis ideais, como temperaturas entre 15°C e 35°C e altos índices de umidade, ocorre um aumento significativo na incidência da doença. Note que, como El Niño apresenta aumento de umidade, precipitação e temperatura, há um ambiente favorável ao crescimento dos vetores em maior quantidade, o que se verifica com um atraso de dois a três meses no aumento do número de casos de pessoas infectadas. Por outro lado, em La Niña, há uma redução gradativa de intensidade de chuvas e umidade, reduzindo, por conseguinte, o número de mosquitos. Portanto, medidas preventivas e de controle são essenciais para mitigar os impactos desse ambiente favorável à transmissão da doença e, embora seja de suma importância para a saúde pública, o entendimento atual sobre como a temperatura ambiente e a umidade afetam a ecologia e evolução dos mosquitos ainda é bastante restrito.

Agradecimentos

À CAPES, CNPq e FAPERGS, o apoio financeiro parcial deste trabalho.

Referências

- [1] M. P. Amorim. “Modelos Matemáticos e Computacionais da Dengue via Equações Diferenciais Ordinárias com Estratégias de Controle”. Tese de doutorado. Volta Redonda: Universidade Federal Fluminense, 2020.
- [2] S. Arenales e A. Darezzi. **Cálculo numérico: aprendizagem com apoio de software**. São Paulo: Cengage Learning, 2010.

- [3] E. B. Beserra et al. “Efeitos da temperatura no ciclo de vida, exigências térmicas e estimativas do número de gerações anuais de *Aedes aegypti* (Diptera, Culicidae)”. Em: **Revista Brasileira de Entomologia** (2014). URL: <https://encurtador.com.br/vghBC>.
- [4] Climatempo. **O Legado do El Niño 2015**. 2016. URL: <https://encurtador.com.br/TMeZv>.
- [5] CNN Brasil. **Aquecimento global e El Niño impulsionam casos de dengue e Brasil enfrenta alta da doença**. URL: <https://abrir.link/pUQRo> (acesso em 04/03/2024).
- [6] N. L. Dennington et al. “Phenotypic adaptation to temperature in the mosquito vector, *Aedes aegypti*”. Em: **Global Change Biology** 30, e17041 (2023). DOI: 10.1111/gcb.17041. URL: <https://doi.org/10.1111/gcb.17041>.
- [7] A. O. Gemaque e P. M. Araujo. “Modelo Matemático da Transmissão de Dengue”. Curso de Licenciatura Plena em Matemática. Macapá-AP: Universidade Federal do Amapá, 2011.
- [8] R. G. S. Gomes. “Modelagem da incidência do dengue através de aspectos climáticos, entomológicos e sócio-demográficos no município de João Pessoa, Paraíba”. Dissertação de mestrado. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2011.
- [9] Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA). **A expectativa é de que o El Niño persista até o final do inverno**. <https://encurtador.com.br/ENNHn>. Acessado em 24 de março de 2024. 2019.
- [10] M. C. R. Meira et al. “Influência do clima na ocorrência de dengue em um município brasileiro de tríplice fronteira”. Em: **Open Journal Systems** (2021). URL: <https://abrir.link/lfhiW>.
- [11] F. Mendonça. “Clima, Tropicalidade e Saúde: Uma Perspectiva a Partir da Intensificação do Aquecimento Global”. Em: **Revista Brasileira de Climatologia** 1.1 (dezembro de 2005), p. 100.
- [12] Ministério da Saúde. **Dengue**. URL: <https://abrir.link/cyTps> (acesso em 04/03/2024).
- [13] Ministério da Saúde, Controle de Endemias. **Epidemiologia - Sistema Único de Saúde - SUS**. Brasília: Ministério da Saúde, 2011. ISBN: 85-334-0267-8.
- [14] B. C. Moraes et al. “Sazonalidade nas notificações de dengue das capitais da Amazônia e os impactos do El Niño/La Niña”. Em: **Cadernos de Saúde Pública** 37.6 (2021). DOI: 10.1590/0102-311X00123417.
- [15] M. J. Neto. “Análise de Modelos Epidemiológicos e Evolução”. Dissertação de mestrado. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2022.
- [16] O Globo. **Dengue: os 10 estados com maior alta de dengue em 2024; veja ranking**. URL: <https://abrir.link/eQkvZ> (acesso em 04/03/2024).
- [17] **ONU News - 2018**. URL: <https://encurtador.com.br/0CWTD> (acesso em 13/03/2024).
- [18] Organização das Nações Unidas. **Causas e Efeitos das Mudanças Climáticas**. URL: <https://abrir.link/N44VH> (acesso em 04/03/2024).
- [19] Organização Mundial da Saúde. **Situação da COVID-19: Mortes**. URL: <https://data.who.int/dashboards/covid19/deaths?n=c> (acesso em 26/02/2024).
- [20] Organização Pan-Americana de Saúde. **Dengue**. URL: <https://abrir.link/MWReU> (acesso em 04/03/2024).
- [21] **Painel de casos de dengue - Secretaria da Saúde do Rio Grande do Sul**. URL: <https://abrir.link/HcMLr> (acesso em 13/03/2024).
- [22] A. C. C. Toledo Jr. “História da Varíola”. Em: **História da Medicina** 15 (2005), pp. 58–65.