

# Utilização de indicadores ambientais e epidemiológicos no estudo da dinâmica de doenças transmitidas por vetores

Raphael Felberg Levy

Fundação Getulio Vargas  
Escola de Matemática Aplicada

**Orientador:**

Flávio Codeço Coelho

Trabalho de Conclusão de Curso  
12 de dezembro de 2023

- Introdução
- Metodologia
  - SIR-SEI original
  - SIR-SEI modificado
- Resultados
- Referências

**Base de referência:** Trajetórias – Base de referência para o TCC, elaborado por pesquisadores do Centro de Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos SinBiose/CNPq <sup>1</sup>. Inclui indicadores de diferentes dimensões para municípios da Amazônia Legal:

- Perda de biodiversidade: desmatamento, degradação florestal, queimadas, mineração
- Anomalias climáticas: precipitação, temperatura mínima
- Ocorrência de doenças: malária, doença de Chagas, leishmaniose, dengue



**Objetivo:** Estudo de dinâmicas da malária na região amazônica com base em fatores epidemiológicos, climáticos e ambientais.

**Metodologia:** Análise dos comportamentos da transmissão através de modelos SIR e SEI para populações de hospedeiros e vetores.

**Dados utilizados:** com base no dataset do Trajetórias, foram selecionados dados da malária causada pelo *Plasmodium Vivax*, espécie responsável pelo maior número de casos no Brasil <sup>2</sup>, na zona rural de Manaus entre os anos de 2004 e 2008, devido ao seu valor de maior incidência, que foi de 184030,772087255. A incidência é calculada da seguinte maneira:

$$\text{Inc}(d, m, z, t_1, t_2) = \frac{\text{Casos}(d, m, z, t_1, t_2)}{\text{Pop}(m, z, (t_1 + t_2)/2) \times 5 \text{ anos}} \times 10^5;$$

Tendo também o número de casos na municipalidade no período de 5 anos, que foi de 78745, foi possível estimar a população no meio do período como sendo de 8558 pessoas. Através do mesmo cálculo, utilizando casos de todo o município, foi possível estimar a população rural como sendo aproximadamente 0.5% da população total da cidade.

# Introdução

**Dados utilizados e teoria:** utilizando o censo do IBGE <sup>3</sup>, também estimei a população rural da cidade para cada ano do estudo, para que pudessem ser verificados em análises com dinâmicas demográficas.

Quanto aos fatores ambientais, foi decidido estudar impactos do desmatamento em geral, causado pela construção de estradas, assentamentos, práticas agrícolas e extrativistas, entre outras <sup>4</sup>.

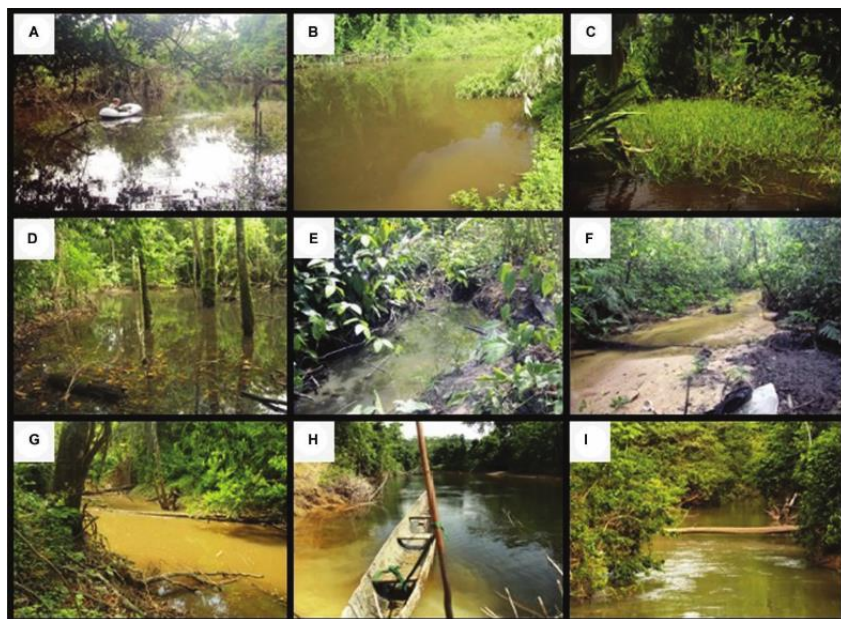


Foto 1: criadouros naturais do Anopheles <sup>5</sup>



Foto 2: bordas florestais se tornam criadouros ideais <sup>6</sup>

Ano	População rural estimada
2004	7717
2005	7889
2006	8061
2007	8233
2008	8492
2009	8751

**Formulação original:** elaborada por Paul E. Parham & Edwin Michael <sup>7</sup>, com o objetivo de considerar como os efeitos da sazonalidade podem ser incorporados em modelos e podem impactar a dinâmica da população de vetores.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS_H}{dt} = -ab_2 \left( \frac{I_M}{N} \right) S_H \\ \frac{dI_H}{dt} = ab_2 \left( \frac{I_M}{N} \right) S_H - \gamma I_H \\ \frac{dR_H}{dt} = \gamma I_H \\ \frac{dS_M}{dt} = b - ab_1 \left( \frac{I_H}{N} \right) S_M - \mu S_M \\ \frac{dE_M}{dt} = ab_1 \left( \frac{I_H}{N} \right) S_M - \mu E_M - ab_1 \left( \frac{I_H}{N} \right) S_M l(\tau_M) \\ \frac{dI_M}{dt} = ab_1 \left( \frac{I_H}{N} \right) S_M l(\tau_M) - \mu I_M \end{array} \right.$$

Funções e parâmetros utilizados:

Parâmetro	Definição	Cálculo
$T(t)$	Temperatura	$T_1(1 + T_2 \cos(\omega_1 t - \phi_1))$
$R(t)$	Precipitação	$R_1(1 + R_2 \cos(\omega_2 t - \phi_2))$
$b(R, T)$	Taxa de nascimento de mosquitos (/ dia)	$\frac{B_E p_E(R) p_L(R, T) p_P(R)}{(\tau_E + \tau_L(T) + \tau_P)}$
$a(T)$	Taxa de picadas (/dia)	$\frac{(T - T_1)}{D_1}$
$\mu(T)$	Taxa de mortalidade de mosquitos per capita (/ dia)	$-\log(p(T))$
$\tau_M(T)$	Duração do ciclo de esporozoitos (dias)	$\frac{DD}{(T - T_{min})}$
$\tau_L(T)$	Duração da fase de desenvolvimento das larvas (dias)	$\frac{1}{c_1 T + c_2}$
$p(T)$	Taxa diária de sobrevivência dos mosquitos	$e^{(-1/(AT^2+BT+C))}$
$p_L(R)$	Probabilidade de sobrevivência das larvas dependente de chuva	$(\frac{4p_{ML}}{R_L^2})R(R_L - R)$
$p_L(T)$	Probabilidade de sobrevivência das larvas dependente de temperatura	$e^{-(c_1 T + c_2)}$
$p_L(R, T)$	Probabilidade de sobrevivência das larvas dependente de temperatura e chuva	$p_L(R)p_L(T)$
$l(\tau_M)(T)$	Probabilidade de sobrevivência de mosquitos durante o ciclo de esporozoitos (/ dia)	$p(T)^{\tau_M(T)}$
$M(t)$	Número total de mosquitos	$S_M(t) + E_M(t) + I_M(t)$
$N(t)$	Número total de humanos	$S_H(t) + I_H(t) + R_H(t)$

Parâmetro	Definição
$b_1$	Proporção de picadas de mosquitos suscetíveis em humanos infectados que produzem infecção
$b_2$	Proporção de picadas de mosquitos infectados em humanos suscetíveis que produzem infecção
$\gamma$	1/Duração média da infecciosidade em humanos (dias <sup>-1</sup> )
$T_1$	Temperatura média na ausência de sazonalidade (°C)
$T_2$	Amplitude da variabilidade sazonal na temperatura
$R_1$	Precipitação mensal média na ausência de sazonalidade (mm)
$R_2$	Amplitude da variabilidade sazonal na precipitação
$\omega_1$	Frequência angular das oscilações sazonais na temperatura (meses <sup>-1</sup> )
$\omega_2$	Frequência angular das oscilações sazonais na precipitação (meses <sup>-1</sup> )
$\phi_1$	“Phase lag” da variabilidade da temperatura (defasagem de fase)
$\phi_2$	“Phase lag” da variabilidade da precipitação (defasagem de fase)
$B_E$	Número de ovos colocados por adulto por oviposição
$p_{ME}$	Probabilidade máxima de sobrevivência dos ovos
$p_{ML}$	Probabilidade máxima de sobrevivência das larvas
$p_{MP}$	Probabilidade máxima de sobrevivência das pupas
$\tau_E$	Duração da fase de desenvolvimento dos ovos (dias)
$b_3^*$	Taxa de infecção em mosquitos expostos (1/ $\tau_M(T)$ )

Parâmetro	Definição
$\tau_P$	Duração da fase de desenvolvimento das pupas (dias)
$R_L$	Chuva limite até que os sítios de reprodução sejam eliminados, removendo indivíduos de estágio imaturo (mm)
$T_{min}$	Temperatura mínima, abaixo dessa temperatura não há desenvolvimento do parasita: 14.5 (°C)
$DD$	“Degree days” para desenvolvimento do parasita. Número de graus em que a temperatura média diária excede a temperatura mínima de desenvolvimento. “Sum of heat” para maturação: 105 (°C dias)
$A$	Parâmetro empírico de sensibilidade (°C <sup>2</sup> dias <sup>-1</sup> )
$B$	Parâmetro empírico de sensibilidade (°C dias <sup>-1</sup> )
$C$	Parâmetro empírico de sensibilidade (dias <sup>-1</sup> )
$D_1$	Constante: 36.5 (°C dias)
$c_1$	Parâmetro empírico de sensibilidade (°C dias <sup>-1</sup> )
$c_2$	Parâmetro empírico de sensibilidade (dias <sup>-1</sup> )
$T^*$	Parâmetro empírico de temperatura (°C)



**Formulação adaptada:** para o desenvolvimento do TCC, as equações originais foram modificadas de forma a incluir uma taxa de natalidade e mortalidade de humanos  $\mu_H$ , um parâmetro de infecção de expostos  $b_3$ , além do fator  $k$  utilizado para estudar os efeitos do desmatamento.

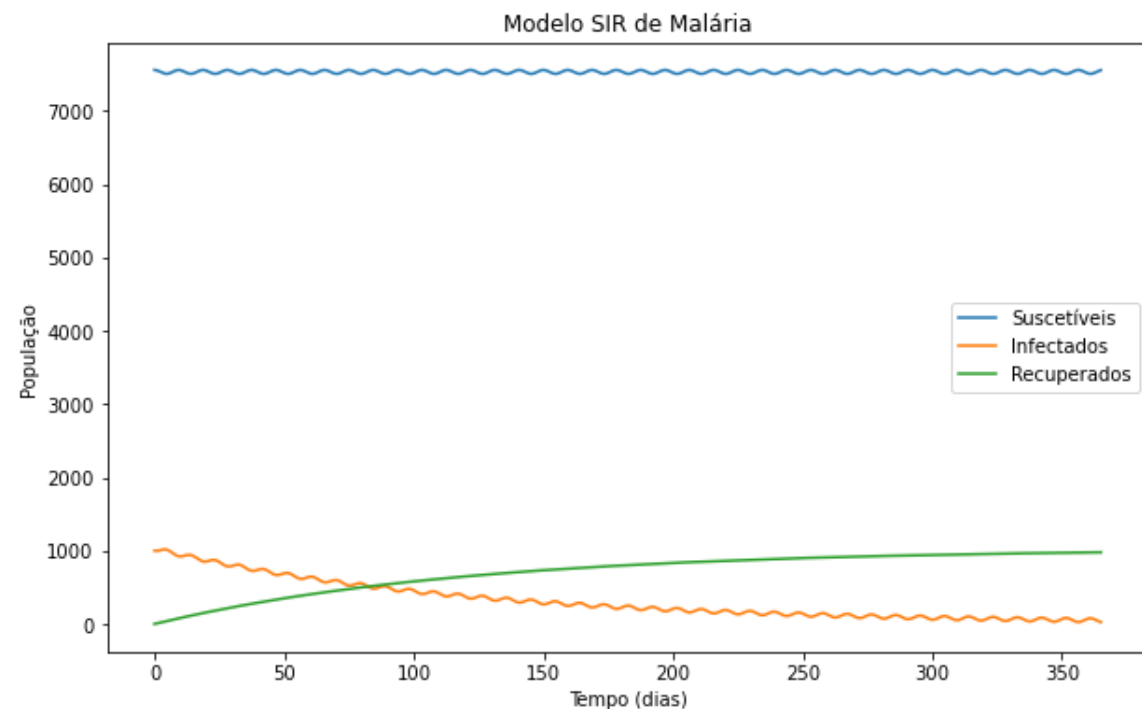
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS_H}{dt} = \mu_H N - akb_2 \left( \frac{I_M}{N} \right) S_H - \mu_H S_H \\ \frac{dI_H}{dt} = akb_2 \left( \frac{I_M}{N} \right) S_H - \gamma I_H - \mu_H I_H \\ \frac{dR_H}{dt} = \gamma I_H - \mu_H R_H \\ \frac{dS_M}{dt} = b - akb_1 \left( \frac{I_H}{N} \right) S_M - \mu S_M \\ \frac{dE_M}{dt} = akb_1 \left( \frac{I_H}{N} \right) S_M - \mu E_M - b_3 E_M - l E_M \\ \frac{dI_M}{dt} = b_3 E_M - \mu I_M \end{array} \right.$$



**Formulação original:** utilizando os métodos como foram definidos pelos autores de referência, assim como os valores passados para os parâmetros, os resultados foram como a seguir:

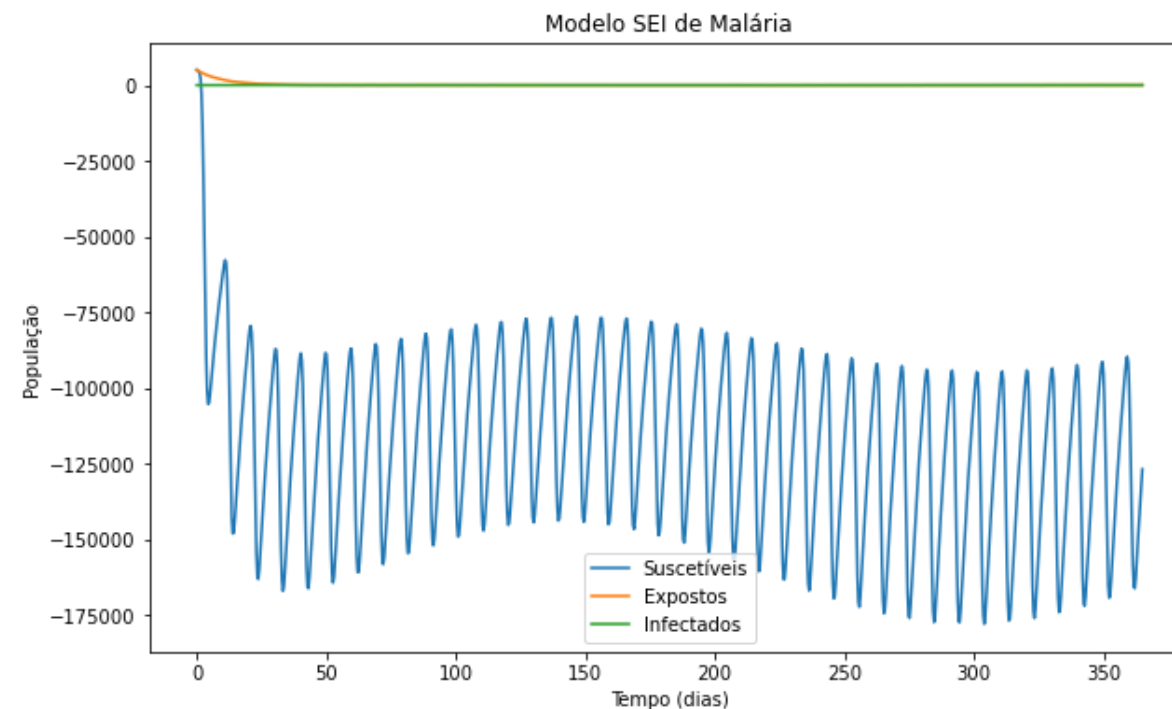
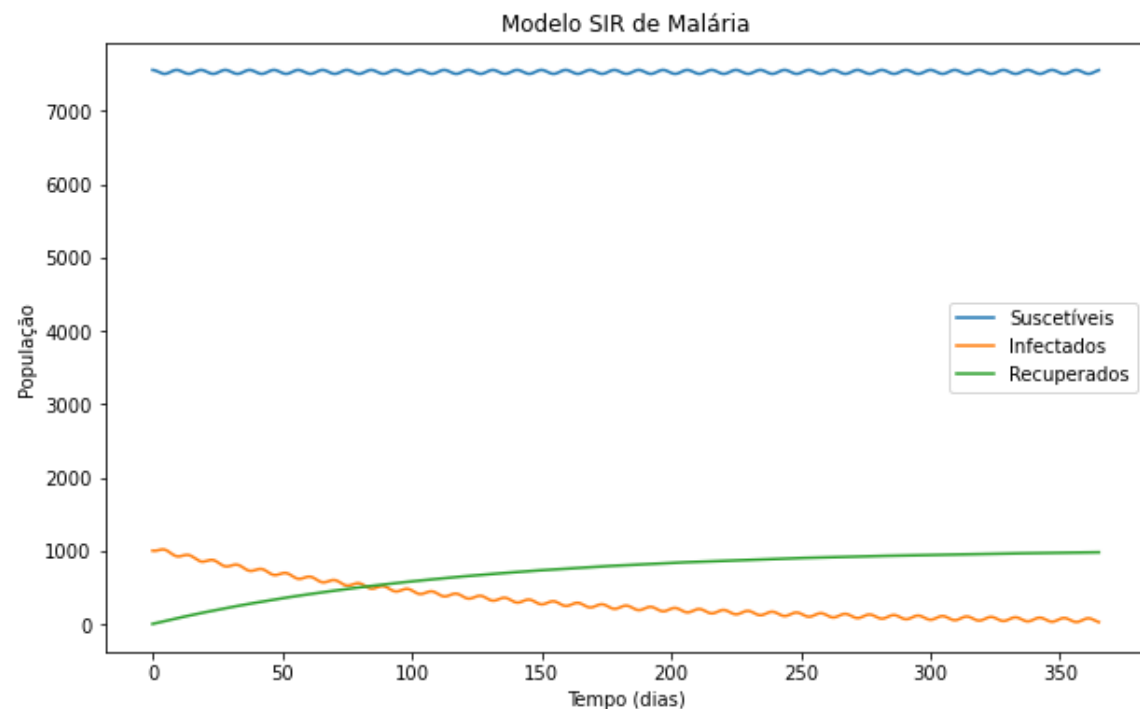
# Resultados

**Formulação original:** utilizando os métodos como foram definidos pelos autores de referência, assim como os valores passados para os parâmetros, os resultados foram como a seguir:



# Resultados

**Formulação original:** utilizando os métodos como foram definidos pelos autores de referência, assim como os valores passados para os parâmetros, os resultados foram como a seguir:



# Resultados

**Adaptando as funções R e T:** de forma a aproximar a temperatura e chuva em Manaus ao longo do ano <sup>8</sup>, modifiquei os fatores  $T$ ,  $R$ ,  $\omega$  e  $\Phi$ :

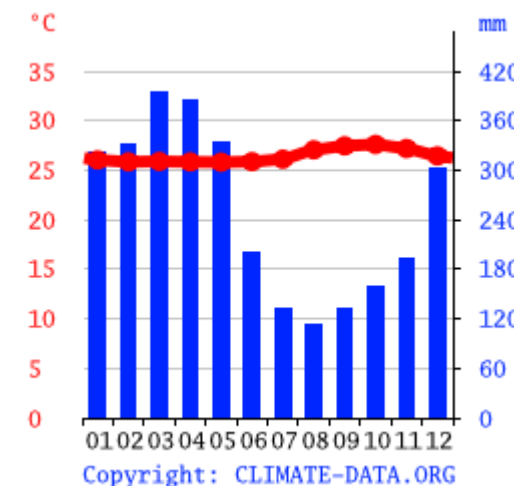
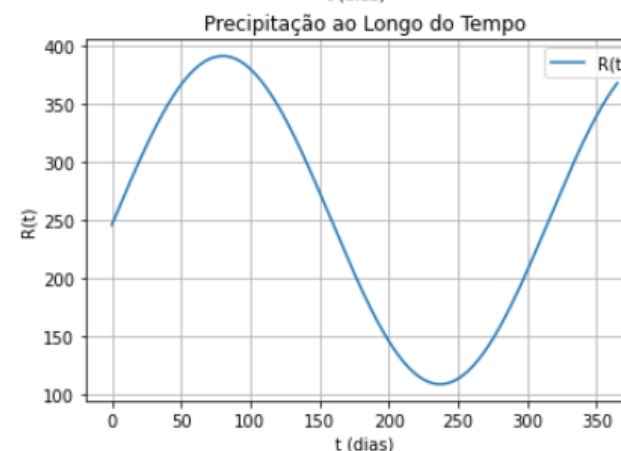
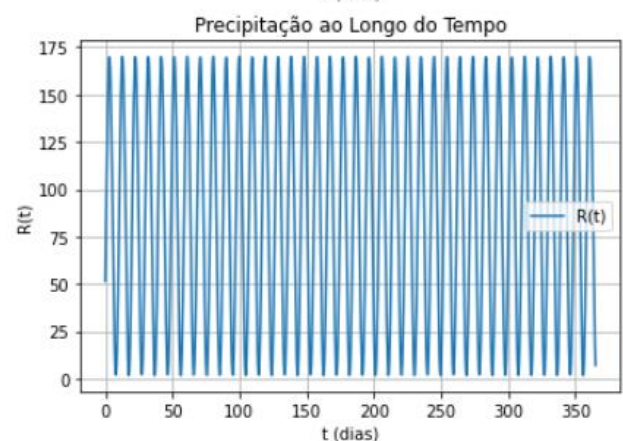
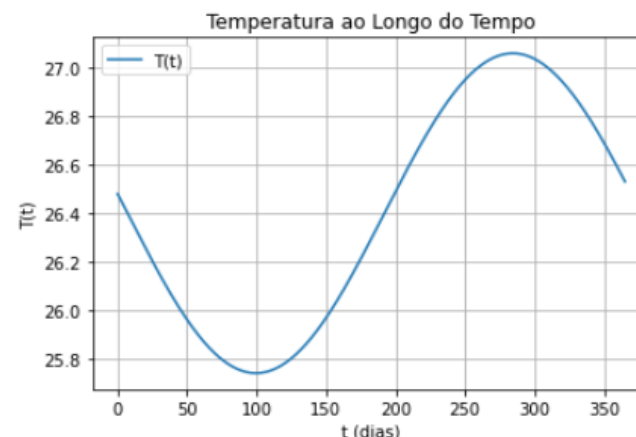
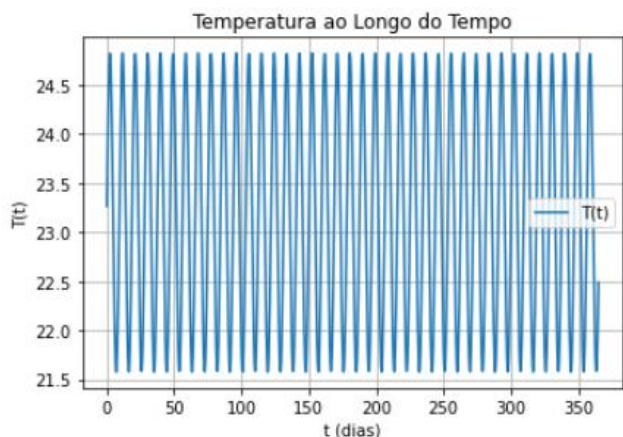


Foto 3: evolução da temperatura e precipitação em Manaus

# Trabalho Futuro

- Comparar a metodologia original e modificada e verificar o que poderia ser modificado para que, utilizando os parâmetros originais, o modelo ainda tivesse um equilíbrio endêmico.
- Analisar a evolução dos equilíbrios dados por funções osciladoras ao longo do tempo.
- Aplicar métodos estocásticos, de forma a incorporar as variáveis ambientais em constante mudança.

# Referências

1. Rorato, A.C., Dal'Asta, A.P., Lana, R.M. et al. Trajetórias: a dataset of environmental, epidemiological, and economic indicators for the Brazilian Amazon. Sci Data 10, 65 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41597-023-01962-1> (<https://zenodo.org/records/7098053#.ZA-AP3bMKUI>).
2. Oliveira-Ferreira, J., Lacerda, M.V., Brasil, P. et al. Malaria in Brazil: an overview. Malar J 9, 115 (2010). <https://doi.org/10.1186/1475-2875-9-115>.
3. Censo - Séries históricas. Brasil / Amazonas / Manaus. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/am/manaus/pesquisa/43/0?tipo=gráfico>.
4. Silva-Nunes, M. Impacto de Alterações Ambientais na Transmissão da Malária e Perspectivas para o Controle da Doença em Áreas de Assentamento Rural da Amazônia Brasileira. <https://revistas.ufrrj.br/index.php/oa/article/view/7101/5685>.
5. Sánchez-Ribas, J. et al. New classification of natural breeding habitats for Neotropical anophelines in the Yanomami Indian Reserve, Amazon Region, Brazil and a new larval sampling methodology. Mem Inst Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, Vol. 110(6): 760-770, September 2015. <https://www.scielo.br/j/mioc/a/HphVFKHGq65mVk4BxMPwwtS/?lang=en>.
6. Study links malaria to deforestation in the Amazon. <https://news.mongabay.com/2018/05/study-links-deforestation-and-malaria-in-the-amazon/>.
7. Parham, P.E., Michael, E. (2010). Modelling Climate Change and Malaria Transmission. In: Michael, E., Spear, R.C. (eds) Modelling Parasite Transmission and Control. Advances in Experimental Medicine and Biology, vol 673. Springer, New York, NY. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6064-1\\_13](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6064-1_13).
8. Climate Data. CLIMA MANAUS (BRASIL). [Clima Manaus: Temperatura, Tempo e Dados climatológicos Manaus \(climate-data.org\)](https://clima-manaus.org/).