

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Instituto de Física e Matemática
Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática



Dissertação

**A Influência dos Fenômenos Climáticos El Niño e La Niña na Incidência de
Dengue no Rio Grande do Sul: uma Abordagem Interdisciplinar com
Aperfeiçoamento de um Modelo Compartmental**

Leonardo Ferreira dos Santos

Pelotas, 2025

Leonardo Ferreira dos Santos

A Influência dos Fenômenos Climáticos El Niño e La Niña na Incidência de Dengue no Rio Grande do Sul: uma Abordagem Interdisciplinar com Aperfeiçoamento de um Modelo Compartmental

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática do Instituto de Física e Matemática da Universidade Federal de Pelotas, para a obtenção do título de Mestre em Modelagem Matemática.

Orientador: Prof. Dr. Régis Sperotto de Quadros
Coorientador: Prof. Dr. Claus Haetinger

Pelotas, 2025

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação da Publicação

S237i Santos, Leonardo Ferreira dos

A Influência dos Fenômenos Climáticos El Niño e La Niña na Incidência de Dengue no Rio Grande do Sul [recurso eletrônico] : uma Abordagem Interdisciplinar com Aperfeiçoamento de um Modelo Compartimental / Leonardo Ferreira dos Santos ; Régis Sperotto de Quadros, orientador ; Claus Haetinger, coorientador. — Pelotas, 2024.
87 f.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática, Instituto de Física e Matemática, Universidade Federal de Pelotas, 2024.

1. Modelagem Matemática. 2. Interdisciplinaridade. 3. Dengue. 4. Fenômenos Climáticos. I. Quadros, Régis Sperotto de, orient. II. Haetinger, Claus, coorient. III. Título.

CDD 614.56

**A INFLUÊNCIA DOS FENÔMENOS CLIMÁTICOS EL NIÑO E LA NIÑA NA
INCIDÊNCIA DE DENGUE NO RIO GRANDE DO SUL: UMA ABORDAGEM
INTERDISCIPLINAR COM APERFEIÇOAMENTO DE UM MODELO
COMPARTIMENTAL**

por

Leonardo Ferreira dos Santos

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática, PPGMMat,
do Instituto de Física e Matemática da Universidade Federal de Pelotas, como parte dos
requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Modelagem Matemática

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Régis Sperotto de Quadros – Orientador (UFPel)

Prof. Dr. Claus Haetinger – Co-Orientador (UFPel)

Prof. Dr. Adriano De Cezaro (FURG)

Prof. Dr. Alexandre Sacco de Athayde (UFPel)

Profa. Dra. Douglas da Silva Lindemann (UFPel)

Pelotas, 18 de novembro de 2024

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus orientadores, Régis Quadros e Claus Haetinger, a trajetória que compartilhamos. Não foi um caminho fácil, especialmente para mim, vindo de uma graduação totalmente voltada para o ensino. Com o auxílio de vocês, pude compreender o verdadeiro significado da matemática aplicada. Sou profundamente grato pelo imenso conhecimento transmitido ao longo deste percurso e, especialmente, pela paciência que tiveram comigo.

Também gostaria de expressar minha gratidão à grande coordenadora do programa, Daniela Buske, cujo empenho e dedicação são inestimáveis. Obrigado pelos puxões de orelha, conselhos e momentos de descontração que tornaram este caminho mais leve.

Meu eterno agradecimento vai para os meus familiares: Marisa Ferreira (minha mãe) e Josias Aquino (meu padrasto), pelo apoio financeiro e emocional incondicional durante toda essa jornada; Camila Ferreira (minha irmã), Julia Ferreira (minha sobrinha) e Vilson Messa (meu pai), por sempre acreditarem em mim. Ser o primeiro mestre da família é uma conquista nossa, e serei, com orgulho, o futuro doutor.

Nesta etapa da minha vida, fiz poucos, mas valiosos amigos. Meu agradecimento eterno à minha colega e amiga Maria da Graça, e aos meus amigos Bruno Benites e Luiza Muniz. Não poderia deixar de mencionar também os amigos de longa data, desde a graduação: Luis Eduardo Bairros e as professoras Daiane Soares, Melissa Silveira, Patrícia Pujól e Karla Vivian Silveira.

Não poderia esquecer minha fiel companheira, Amarela, minha filha de quatro patas, que esteve ao meu lado nos momentos mais difíceis, trazendo conforto e alegria quando eu mais precisava.

Por fim, agradeço à CAPES o apoio durante este percurso.

*"Não tenho medo de errar, só medo de desistir
Mas tenho vinte e poucos anos e não vou parar aqui"*
— LAGUM

RESUMO

SANTOS, Leonardo Ferreira dos. **A Influência dos Fenômenos Climáticos El Niño e La Niña na Incidência de Dengue no Rio Grande do Sul: uma Abordagem Interdisciplinar com Aperfeiçoamento de um Modelo Compartimental**. Orientador: Régis Sperotto de Quadros. 2025. 85 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) – Instituto de Física e Matemática, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2025.

A dengue representa um grave problema de saúde pública em várias regiões do Brasil, incluindo o Rio Grande do Sul (RS). Neste estudo, é abordada a influência dos fenômenos climáticos El Niño e La Niña na incidência de dengue no estado, investigando-se como as variações climáticas afetam a ecologia do vetor transmissor e a dinâmica da doença. De forma interdisciplinar, combinaram-se conhecimentos de epidemiologia, climatologia e modelagem matemática. Um modelo compartimental do tipo Suscetível-Exposto-Infectado-Recuperado-Suscetível (SEIRS), foi aprimorado, com 14 compartimentos. As equações descrevem os diferentes estágios da doença em função do tempo. Este foi resolvido numericamente pelo método de Runge-Kutta de quarta ordem (RK4). Realizou-se um estudo do El Niño-Oscilação Sul (ENOS) entre 2009 e 2024, com base nos dados do *Climate Prediction Center*, categorizando os fenômenos conforme sua intensidade. A seguir, foram obtidos dados meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para calcular as médias de temperatura, precipitação e umidade durante esses anos, relacionando-os com os casos de dengue no RS. A validação do modelo foi realizada comparando os resultados obtidos e as previsões do modelo epidemiológico com os dados observacionais disponíveis na literatura. As simulações mostraram que as variações climáticas associadas aos fenômenos El Niño e La Niña têm um impacto direto na incidência de dengue, com maior número de casos observados durante o El Niño. O modelo proposto é consistente com os dados do INMET, sendo uma inovação ao incorporar os elementos climáticos específicos do RS. As soluções identificadas corroboram estudos anteriores ao mostrar a associação destes ao crescimento nos casos de dengue, sendo adequado para simular as dinâmicas epidemiológicas sob a influência destes fatores, fornecendo uma base confiável para análise. O estudo disponibiliza informações ao planejamento e implementação de estratégias de controle e prevenção da dengue, especialmente no contexto das mudanças climáticas, destacando a importância da interdisciplinaridade para a compreensão do problema e o desenvolvimento de soluções eficazes.

Palavras-chave: Modelagem Matemática; Interdisciplinaridade; Dengue; Fenômenos Climáticos.

ABSTRACT

SANTOS, Leonardo Ferreira dos. **The Influence of El Niño and La Niña Climate Phenomena on the Incidence of Dengue in Rio Grande do Sul: an Interdisciplinary Approach with Improvement of a Compartmental Model.** Advisor: Régis Sperotto de Quadros. 2025. 85 f. Dissertation (Masters in Mathematical Modeling) – Institute of Physics and Mathematics, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2025.

Dengue represents a serious public health issue in several regions of Brazil, including Rio Grande do Sul (RS). This study addresses the influence of the El Niño and La Niña climate phenomena on the incidence of dengue in the state, investigating how climate variations affect the ecology of the transmitting vector and the dynamics of the disease. In an interdisciplinary approach, knowledge from epidemiology, climatology, and mathematical modeling was combined. A Susceptible-Exposed-Infected-Recovered-Susceptible (SEIRS) compartmental model was enhanced, with 14 compartments. The equations describe the different stages of the disease as a function of time. This model was numerically solved using the fourth-order Runge-Kutta method (RK4). A study of the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) between 2009 and 2024 was conducted, based on data from the Climate Prediction Center, categorizing the phenomena according to their intensity. Then, meteorological data from the National Institute of Meteorology (INMET) were obtained to calculate the average temperature, precipitation, and humidity during these years, relating them to dengue cases in RS. The model validation was performed by comparing the results and predictions of the epidemiological model with the observational data available in the literature. The simulations showed that climate variations associated with the El Niño and La Niña phenomena have a direct impact on dengue incidence, with a higher number of cases observed during El Niño. The proposed model is consistent with INMET data and represents an innovation by incorporating the specific climatic elements of RS. The identified solutions corroborate previous studies by showing the association between these phenomena and the growth in dengue cases, making it suitable for simulating epidemiological dynamics under the influence of these factors, providing a reliable basis for analysis. The study provides information for the planning and implementation of dengue control and prevention strategies, especially in the context of climate change, highlighting the importance of interdisciplinarity in understanding the problem and developing effective solutions.

Keywords: Mathematical Modeling; Interdisciplinarity; Dengue; Weather Phenomena.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Transmissão	22
Figura 2	Esquema dos órgãos do mosquito <i>Aedes Aegypti</i>	22
Figura 3	Fase de desenvolvimento do <i>Aedes Aegypti</i>	23
Figura 4	Predominância dos sorotipos da dengue no Brasil	25
Figura 5	Acumulados de dengue por semana epidemiológica	26
Figura 6	Localidades da ocorrência do ENOS	29
Figura 7	Diagrama do modelo da transmissão da dengue.	41
Figura 8	Mapa das estações meteorológicas.	48
Figura 9	Caso teste 1	53
Figura 10	Caso teste 2	54
Figura 11	Caso teste 3	54
Figura 12	Médias dos elementos climáticos durante o El Niño 2015-2016 . . .	55
Figura 13	Médias dos elementos climáticos	55
Figura 14	Médias dos elementos climáticos	56
Figura 15	Médias dos elementos climáticos	57
Figura 16	Médias dos elementos climáticos	58
Figura 17	Comparativo ENOS forte	59
Figura 18	Comparativo ENOS moderado	60
Figura 19	Comparativo ENOS fraco	60
Figura 20	Precipitação diária ENOS forte	61
Figura 21	Precipitação diária ENOS moderado	61
Figura 22	Precipitação diária ENOS fraco	61
Figura 23	Precipitação média mensal ENOS forte	62
Figura 24	Precipitação média mensal ENOS moderado	62
Figura 25	Precipitação média mensal ENOS fraco	63
Figura 26	Temperatura média ao longo do ano.	63
Figura 27	Umidade média ao longo do ano.	64
Figura 28	Precipitação média ao longo do ano.	64
Figura 29	Sh , Sh_1 e Sh_2	65
Figura 30	$ Eh_1$ e $ Eh_2$	66
Figura 31	$ Ih_1$ e $ Ih_2$	66
Figura 32	$ Rh_1$ e $ Rh_2$	67
Figura 33	$ S_v$	67
Figura 34	$ Ev_1$ e $ Ev_2$	68
Figura 35	$ Iv_1$ e $ Iv_2$	68
Figura 36	Casos confirmados e notificados: ENOS forte	70

Figura 37	Casos confirmados e notificados: ENOS moderado	70
Figura 38	Casos confirmados e notificados: ENOS fraco	71
Figura 39	Casos confirmados por semana epidemiológica	72
Figura 40	Janela temporal 2009-2019.	72
Figura 41	Janela temporal 2019-2024.	73
Figura 42	Relação entre temperatura e umidade	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Variáveis de estado do modelo para humanos	43
Tabela 2	Variáveis de estado do modelo para mosquitos	43
Tabela 3	Anomalias da TSM relacionadas ao fenômeno ENOS por meio do ONI	46
Tabela 4	Tipos de fenômeno ENOS: significados e traduções	47
Tabela 5	Definição dos Trimestres	47
Tabela 6	Início e Fim dos Fenômenos ENOS	48
Tabela 7	Coordenadas geográficas e altitudes das cidades do Rio Grande do Sul	51
Tabela 8	Parâmetros utilizados nas simulações (em dias).	52
Tabela 9	Condições iniciais.	53
Tabela 10	Intensidade dos eventos de El Niño e La Niña	59

LISTA DE SÍMBOLOS MATEMÁTICOS

$\%$	Porcentagem
α	Taxa de migração dos vetores [dias]
α_1	Taxa de variação da temperatura [dias]
α_2	Taxa de variação da umidade [dias]
α_3	Taxa de variação da precipitação [dias]
β	Taxa de transmissão [dias]
δ	Taxa da perda da imunidade [dias]
γ	Taxa de recuperação [dias]
\overline{Prec}	Média de precipitação [milímetros]
\overline{Temp}	Média de temperatura [Graus Celsius]
\overline{Um}	Média de umidade [porcentagem]
σ	Período de incubação [dias]
Eh_1	Humanos expostos à dengue clássica no instante t [número de indivíduos]
Eh_2	Humanos expostos à dengue grave no instante t [número de indivíduos]
Ev_1	Vetores expostos à dengue clássica no instante t [número de indivíduos]
Ev_2	Vetores expostos à dengue grave no instante t [número de indivíduos]
Ih_1	Humanos infectados pela dengue clássica no instante t [número de indivíduos]
Ih_2	Humanos infectados pela dengue grave no instante t [número de indivíduos]
Iv_1	Vetores infectados pela dengue clássica no instante t [número de indivíduos]
Iv_2	Vetores infectados pela dengue grave no instante t [número de indivíduos]
Rh_1	Humanos recuperados da dengue clássica no instante t [número de indivíduos]
Rh_2	Humanos recuperados da dengue grave no instante t [número de indivíduos]

Sh	Humanos suscetíveis a todos os sorotipos no instante t [número de indivíduos]
Sh_1	Humanos suscetíveis à dengue clássica já afetados pela dengue grave no instante t [número de indivíduos]
Sh_2	Humanos suscetíveis à dengue grave e já afetados pela dengue clássica no instante t [número de indivíduos]
Sv	Vetores suscetíveis no instante t [número de indivíduos]
C	Graus Celsius
$\frac{1}{T_{eit}}$	Taxa de transição dos mosquitos da classe exposta para a classe infectada [dias ⁻¹]
$\frac{1}{T_{id}}$	Taxa de recuperação da doença [dias ⁻¹]
$\frac{1}{T_{iit}}$	Taxa de transição dos indivíduos da classe exposta para a classe infectada [dias ⁻¹]
$\frac{1}{T_{im}}$	Perda da imunidade cruzada [dias ⁻¹]
$\frac{1}{T_{lh}}$	Taxa de natalidade e mortalidade natural [dias ⁻¹]
$\frac{1}{T_{lv}}$	Taxa de mortalidade dos vetores [dias ⁻¹]
c_{hv_base}	Taxa de transmissão do humano para o vetor consolidado na literatura [dias]
c_{hv}	Taxa de transmissão do humano para o vetor dependente de t [dias]
c_{vh_base}	Taxa de transmissão do vetor para o humano consolidado na literatura [dias]
c_{vh}	Taxa de transmissão do vetor para o humano dependente de t [dias]
k_{base}	Capacidade de suporte ambiental do vetor consolidado na literatura [dias]
pi	Número médio de picadas por vetor infectado
$Prec$	Precipitação [milímetros]
ps	Número médio de picadas por vetor suscetível
T_{eit_base}	Período latente extrínseco consolidado na literatura [dias]
T_{eit}	Período latente extrínseco dependente de t [dias]
T_{id}	Duração da infecção [dias]
T_{iit}	Período latente intrínseco [dias]
T_{im}	Duração da imunidade cruzada [dias]
T_{lh}	Expectativa de vida [dias]
T_{lv_base}	Expectativa de vida do mosquito consolidado na literatura [dias]

T_{lv} Tempo médio de vida do vetor dependente de t [dias]

$Temp$ Temperatura [Graus Celsius]

Um Umidade [porcentagem]

k Capacidade de suporte ambiental do vetor dependente de t [dias]

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMJ	Abril, Maio, Junho
ASO	Agosto, Setembro, Outubro
CDC	Centro de Controle e Prevenção de Doenças
CGLAB	Coordenação-Geral de Laboratórios de Saúde Pública
CSV	Comma Separated Value
DC	Dengue Clássica
DG	Dengue Grave
DJF	Dezembro, Janeiro, Fevereiro
EL	El Niño
ENOS	El Niño Oscilação-Sul
FMA	Fevereiro, Março, Abril
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
JAS	Julho, Agosto, Setembro
JFM	Janeiro, Fevereiro, Março
JJA	Junho, Julho, Agosto
LA	La Niña
ML	Moderate La Niña (La Niña Moderada)
MAM	Março, Abril, Maio
MJJ	Maio, Junho, Julho
N	Neutrality (Neutralidade)
NDJ	Novembro, Dezembro, Janeiro
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
ONI	Oceanic Niño Index/Índice Oceânico Niño
OND	Outubro, Novembro, Dezembro
OPAS	Organização Pan-Americana de Saúde
RJ	Rio de Janeiro

RK4	Runge-Kutta de Quarta Ordem
RR	Roraima
RS	Rio Grande do Sul
SE	Strong El Niño (El Niño Forte)
SEIR	Suscetíveis-Expostos-Infectados-Recuperados
SEIRS	Suscetíveis-Expostos-Infectados-Recuperados-Suscetíveis
SES	Secretaria Estadual de Saúde
SINAN	Sistema de Informação de Agravos de Notificação
SIR	Suscetíveis-Expostos-Recuperados
SIS	Suscetíveis-Expostos-Suscetíveis
SI	Suscetíveis-Infectados
SL	Strong La Niña (La Niña Forte)
SON	Setembro, Outubro, Novembro
SUS	Sistema Único de Saúde
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
VSE	Very Strong El Niño (El Niño Muito Forte)
WE	Weak El Niño (El Niño Fraco)
WL	Weak La Niña (La Niña Fraca)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivos	18
1.1.1	Objetivo geral	18
1.1.2	Objetivos específicos	18
1.2	Estruturação do trabalho	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	Dengue	20
2.2	Dengue no Brasil	24
2.3	Dengue no Rio Grande do Sul	26
2.4	Vacinação	27
2.5	El Niño - Oscilação Sul (ENOS)	27
2.6	Influência do ENOS na incidência da dengue	29
2.7	Epidemiologia e modelos compartimentais	31
2.8	Suposições gerais dos modelos epidemiológicos	32
2.8.1	SI	33
2.8.2	SIS	34
2.8.3	SIR	34
2.8.4	SIRS	35
2.8.5	SEIR	36
2.8.6	SEIRS	37
2.8.7	Modelo SEIRS-SEI (SEIR-SEI) com Dinâmica Vital para Humanos e Vetores	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1	Modelo epidemiológico aprimorado	40
3.2	Análise temporal da intensidade do ENOS	45
3.3	Análise de dados climáticos	46
3.3.1	Coleta de dados	46
3.3.2	Cálculo das médias diárias e ajuste de curvas	49
3.4	Normalização	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
4.1	Validação do modelo	52
4.2	Caracterização das variáveis ENOS	55
4.3	Percepções do modelo proposto	63
4.4	Simulação do modelo	65
4.5	Análise	68

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS	75
	REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

Desde doenças endêmicas que afligem pequenas regiões, até pandemias globais que atravessam fronteiras internacionais, os vírus representam uma ameaça constante à saúde e ao bem-estar da humanidade. O Brasil apresenta diversas doenças endêmicas, tais como a leishmaniose, a febre amarela e a dengue (Ministério da Saúde, Controle de Endemias, 2011), sendo o país mais afetado pela dengue nas Américas (Organização Pan-Americana da Saúde, 2024).

A Dengue é uma doença viral, transmitida por mosquitos fêmeas do gênero *Aedes aegypti*, podendo se manifestar de forma benigna ou grave. Ela afeta milhões de pessoas anualmente em todo o mundo, especialmente em regiões tropicais e subtropicais (WU; WU; LI, 2021), sendo uma preocupação constante, devido à sua alta incidência e impacto socioeconômico (OLIVEIRA; ITRIA; LIMA, 2019). Dentre os estados brasileiros, o Rio Grande do Sul (RS), embora historicamente menos afetado em comparação com regiões tropicais, tem enfrentado um aumento alarmante nos casos nas últimas décadas (BERMANN et al., 2024). Atualmente, 470 dos 497 municípios do estado (94,57%) estão infestados pela doença (Secretaria da Saúde do Rio Grande do Sul, 2024a). De acordo com a literatura, um município é considerado infestado quando há registro de focos de larvas nas armadilhas localizadas em locais estratégicos, tais como ferros-velhos, borracharias e cemitérios (Secretaria da Saúde do Rio Grande do Sul, 2024b).

Ainda que seja amplamente reconhecido que o clima representa um papel importante na ecologia do vetor *Aedes aegypti* (GABRIEL et al., 2018; JÚNIOR; SILVA, 2019) e, conseqüentemente, na transmissão da dengue, a forma como esses fatores interagem, especialmente no contexto específico do RS, há poucos trabalhos a esse respeito. Assim sendo, esta dissertação visa colaborar com o preenchimento desta lacuna ao investigar como os fatores climáticos podem influenciar a incidência da dengue nesta região. Mais especificamente, o estudo se concentra na análise integrada de dados climáticos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e no aprimoramento e aplicação de um modelo compartimental, utilizando o método Runge-Kutta de 4ª ordem (RK4) (MOLTER et al., 2016). Este modelo permite simular as dinâmicas

de transmissão da dengue em diferentes cenários climáticos.

Assim sendo, o presente projeto de dissertação tem como questão norteadora a seguinte: **De que modo os fenômenos climáticos El Niño e La Niña têm influenciado a incidência de dengue no RS?**

A seguir, são apresentados o objetivo geral e os específicos.

1.1 Objetivos

Nesta seção são apresentados os objetivos que norteiam esta dissertação, divididos em objetivo geral e objetivos específicos. Os objetivos específicos detalham as etapas necessárias para alcançar o objetivo geral, incluindo a descrição dos fatores climáticos, a análise dos dados epidemiológicos, e a validação do modelo proposto.

1.1.1 Objetivo geral

Verificar o modo de influência dos fenômenos climáticos El Niño e La Niña na incidência da dengue no RS, gerando um modelo matemático epidemiológico interdisciplinar que permita estimar o número de novos casos a partir de valores específicos das variáveis envolvidas.

1.1.2 Objetivos específicos

1. Descrever fatores climáticos que influenciam a ecologia do vetor da dengue;
2. Investigar a forma como estes fatores climáticos contribuem para a incidência da dengue;
3. Comparar a temperatura, umidade e precipitação durante os períodos de La Niña e de El Niño, considerando sua intensidade (fraca, moderada e forte);
4. Investigar como as variações da temperatura e da umidade influenciam a incidência da dengue durante os diferentes estágios dos fenômenos climáticos La Niña e El Niño;
5. Investigar padrões espaciais e temporais da incidência da dengue em relação às variações climáticas específicas nos diferentes períodos de La Niña e El Niño;
6. Analisar modelos matemáticos epidemiológicos que descrevem a dinâmica da dengue em populações de mosquitos e humanos;
7. Aprimorar o modelo compartimental SEIRS, com a inclusão das variáveis temperatura e umidade, aplicando-o ao contexto da dengue no RS;
8. Comparar o modelo utilizado com os dados oficiais de incidência de dengue no RS;

A relevância deste estudo ultrapassa o meio acadêmico, visando contribuir com a prática de saúde pública e epidemiológica. Compreendendo como os fatores climáticos influenciam a dengue no RS, pode auxiliar estratégias mais eficazes e eficientes de prevenção, monitoramento e controle da doença. Considerando o recente aumento da incidência de dengue e a complexidade das mudanças climáticas, profissionais de saúde e legisladores necessitam de ferramentas de apoio à decisão para tomar medidas eficientes que diminuam os impactos da doença e protejam as comunidades em risco. Além disso, os resultados deste estudo podem fornecer uma base sólida para futuras investigações sobre a relação entre clima e outras doenças transmitidas por vetores.

1.2 Estruturação do trabalho

Composto por quatro capítulos: no primeiro, é apresentada a introdução, a justificativa, a questão norteadora e os objetivos geral e específicos. O segundo capítulo aborda a fundamentação teórica, que compreende uma revisão abrangente sobre a dengue, fenômenos climáticos, modelos compartimentais, sorotipos da doença e vacinação. O terceiro capítulo é dedicado à descrição dos materiais e métodos utilizados para cada um dos objetivos específicos, além de apresentar os resultados e suas discussões. Por fim, no quarto capítulo, apresenta-se a conclusão da pesquisa, destacando a importância dos resultados obtidos para a saúde pública e sugerindo possíveis direções para futuras pesquisas na área.

Ademais, a dissertação inclui uma bibliografia abrangente, composta por trabalhos relevantes na literatura relacionados aos tópicos abordados. Desta forma, a estrutura da dissertação garante que cada seção forneça o contexto necessário para as análises subsequentes, com especial atenção à revisão teórica e aos métodos utilizados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este referencial teórico apresenta vários assuntos fundamentais para a compreensão da dengue e sua relação com fatores climáticos. Primeiramente, explora-se o que é a dengue, seus sintomas, a evolução da dengue clássica para a forma grave, os diferentes sorotipos do vírus, a anatomia do vetor e as medidas de controle. Em seguida, é analisada a situação da dengue no Brasil, com um foco específico no estado do Rio Grande do Sul (RS), onde a incidência da doença tem aumentado recentemente. Este aumento é preocupante, especialmente considerando as variações climáticas que podem influenciar a proliferação do mosquito vetor.

Outrossim, abordam-se as estratégias de vacinação existentes contra a dengue e sobre eventos climáticos, como El Niño e La Niña. Por fim, são discutidos os modelos matemáticos compartimentais, incluindo SI, SIR, SIS, SIRS, SEIR e SEIRS, utilizados para modelar a dinâmica de diversas doenças, inclusive a dengue, sendo possível prever surtos.

2.1 Dengue

A dengue é considerada uma doença infecciosa (Ministério da Saúde, 2017) não contagiosa, pois não há transmissão inter-humana, diferente das doenças infectocontagiosas, como rubéola, caxumba, dentre outras. O vírus da dengue é transmitido por mosquitos hematófagos fêmeas do gênero *Aedes*, principalmente o *Aedes aegypti*, sendo esses, pertencentes à família *Flaviviridae*, a mesma do vírus da febre amarela e zika (HASAN et al., 2016; KHAN et al., 2023).

A dengue clássica (DC) em sua forma mais branda da doença, apresenta sintomas que podem ser confundidos com outras doenças que causam febre, dor de cabeça e mal estar (Ministério da Saúde, 2017). O sintoma mais comum é o quadro febril, dor no corpo e nas articulações, dor atrás dos olhos e manchas vermelhas no corpo (Agência Brasil, 2024).

Os sintomas iniciais da Dengue Grave (DG) são os mesmos que em sua forma mais branda, os sinais de alerta surgem de 24h a 48h após o desaparecimento da fe-

bre (MONITORAMENTO DAS ARBOVIROSES, 2024). Os sintomas da dengue grave, incluem dor abdominal intensa, vômito persistente, às vezes com sangue, sangramento pelo nariz ou gengivas, sangue nas fezes, confusão mental e fadiga (Ministério da Saúde. Biblioteca Virtual em Saúde, 2007; KULARATNE; DALUGAMA, 2022).

Aproximadamente uma em cada 20 pessoas infectadas com o vírus da dengue pode desenvolver a forma grave da doença (Centers for Disease Control and Prevention (CDC), 2023), neste caso, o risco de desenvolver a forma grave é maior em mulheres grávidas e em bebês, além dos indivíduos que sofrem a infecção pela segunda vez (Instituto Butantan, 2024a), além de fatores individuais, como diabetes, anemia falciforme e asma brônquica.

Existem quatro tipos diferentes de vírus da dengue, que são denominados DENV-1, DENV-2, DENV-3 e DENV-4. A suscetibilidade ao vírus da dengue é universal, o que significa que qualquer pessoa pode contrair a doença se exposta ao vírus. A imunidade é geralmente permanente para um mesmo sorotipo, proporcionando proteção duradoura contra infecções repetidas pelo mesmo vírus. Apesar da imunidade contra o vírus da dengue ser específica para cada sorotipo, é possível que o indivíduo apresente alguma imunidade cruzada contra os demais durante um período de 1 a 3 meses após a infecção por um deles. Contudo, após esse período, acontece uma seleção clonal dos anticorpos específicos, ficando apenas os anticorpos IgG ligados ao tipo que causou a infecção (FIOCRUZ, 2023; Universidade Federal Fluminense, 2024; Ministério da Saúde, 2024a).

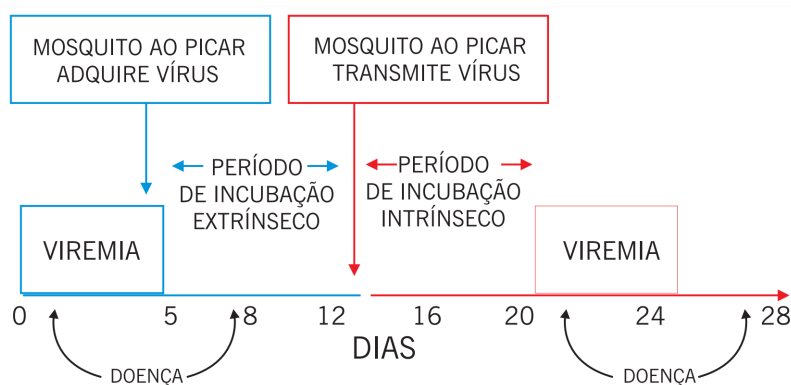
Todos os sorotipos da dengue têm a capacidade de gerar manifestações assintomáticas, leves e graves, incluindo formas fatais, sendo crucial considerar três aspectos fundamentais:

1. Os quatro sorotipos podem resultar em dengue grave durante a primeira infecção, sendo mais frequente após a segunda ou terceira infecção. Não há uma diferença estatisticamente comprovada entre a gravidade após a segunda ou terceira infecção.
2. Existe uma proporção de casos nos quais a infecção é subclínica. Isso significa que algumas pessoas são expostas à picada de um mosquito *Aedes aegypti* infectado, mas não desenvolvem clinicamente a doença, ainda assim adquirem imunidade ao sorotipo específico com o qual foram infectadas. Essa condição ocorre em 20 a 50% das pessoas infectadas.
3. A segunda infecção por qualquer sorotipo da dengue tende a ser mais grave que a primeira, independentemente dos sorotipos e de sua sequência. Contudo, os sorotipos 2 e 3 são considerados mais virulentos, aumentando o risco de complicações durante uma segunda infecção.

Essas considerações destacam a complexidade da resposta imunológica à dengue e enfatizam a importância de avaliar cuidadosamente os fatores de risco associados a múltiplas infecções por diferentes sorotipos (Ministério da Saúde. Biblioteca Virtual em Saúde, 2007).

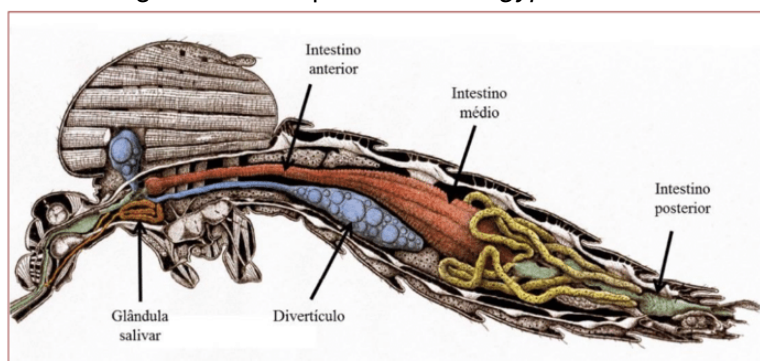
Para que o ciclo da transmissão da dengue inicie (Figura 1), é necessário que o vetor (mosquito) se alimente do sangue de uma pessoa já infectada e que esteja no período de viremia, que ocorre de 3 a 6 dias após a infecção, o que caracteriza o período de incubação intrínseco no ser humano. Em seguida, o vírus se multiplica no corpo do mosquito, iniciando-se no intestino médio até chegar a suas glândulas salivares, durante o período de incubação extrínseco (ORFANÓ, 2016) (Figura 2), que dura de 8 a 12 dias, momento a partir do qual ele se torna infeccioso por toda sua vida, possibilitando a transmissão por meio dos seus fluidos salivares injetados no humano enquanto se alimenta (PONTES; RUFFINO-NETTO, 1994; CATÃO; GUIMARÃES, 2011).

Figura 1 – Transmissão



Fonte: Brasil, 2008.

Figura 2 – Esquema dos órgãos do mosquito *Aedes Aegypti*



Fonte: Ófano, 2016.

O *Aedes aegypti* é um mosquito que passa por quatro etapas até chegar à forma adulta: ovo, larva, pupa e mosquito, como mostrado na Figura 3. O tempo de duração de cada fase varia de acordo com a temperatura, a disponibilidade de alimentos e a quantidade de larvas no mesmo criadouro. Em condições ambientais favoráveis, as fases do ovo até a forma adulta podem ocorrer em um período de 7 a 10 dias (FIOCRUZ, 2023).

Figura 3 – Fase de desenvolvimento do *Aedes Aegypti*



Fonte: SES/RS, 2023.

Por esse motivo, é fundamental que a eliminação de criadouros seja realizada pelo

menos uma vez por semana, para que o ciclo de vida do mosquito seja interrompido. Isso pode ser feito por meio de medidas simples, como a remoção de recipientes que possam acumular água parada, como pneus velhos, garrafas e latas, e a limpeza regular de calhas e ralos. Dessa forma, é possível reduzir a proliferação do mosquito e prevenir a transmissão da dengue e de outras doenças por ele transmitidas.

2.2 Dengue no Brasil

A dengue no Brasil teve início no século XVIII, sendo associada à introdução dos mosquitos *Aedes aegypti*, originários do Egito, África, devido ao comércio marítimo de escravos oriundo desse país (Ministério da Saúde, 2024a).

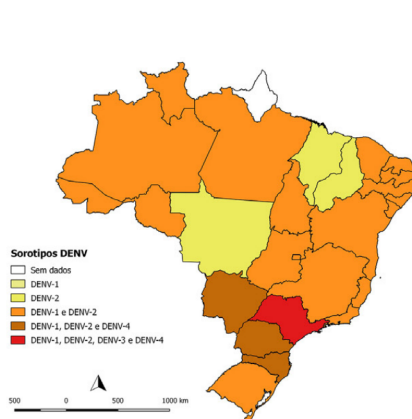
Os primeiros relatos da dengue foram datados ao fim do século XIX e início do século XX, mas exames laboratoriais para confirmação foram realizados somente no ano de 1982, em Boa Vista (RR), onde os sorotipos 1 e 4 foram detectados. Em 1986, foi detectado o sorotipo 1 em três estados: Alagoas, Ceará e Rio de Janeiro. Com isso, o Brasil teve sua primeira epidemia, sendo o estado do RJ o mais afetado, com cerca de 1 milhão de contaminados. A partir de lá, ocorreu a dispersão para diversas cidades do Brasil (Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde, 1996; SALLES et al., 2018).

A inserção do sorotipo 2, entre 1989 e 1990, ocorreu no estado do RJ, onde houve o primeiro caso de dengue grave, e por fim, houve a introdução do sorotipo 3, em 2000. Um evento importante a ser destacado, entre 1958 a 1967, é que o vetor foi erradicado do país, não devido à dengue, mas sim pela preocupação com a febre amarela urbana e, em 1958, durante a 15.^a Conferência Sanitária PanAmericana, realizada em San Juan, Porto Rico, a Organização Pan-Americana da Saúde (OPAS) declarou o Brasil livre do *Aedes aegypti* (Magalhães, Rodrigo Cesar da S., 2015).

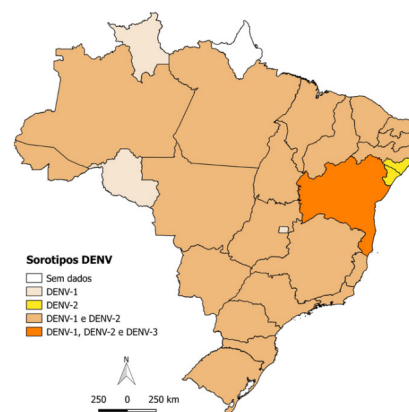
As maiores notificações de casos, até o presente ano, foram em 2010, 2013, 2015, 2016, 2019, 2020, 2022 e 2023, variando de 1.011.548, em 2010 e 1.688.688, 1.641.278 em 2015 e 2023, respectivamente (Ministério da Saúde, 2024b), neste ano (2024), os óbitos registrados chegaram à marca dos 5486 (MONITORAMENTO DAS ARBOVIROSES, 2024), batendo os recordes de anos anteriores, 2023, 2022 e 2015 com 1079, 1016 e 986 óbitos, respectivamente (Ministério da Saúde, 2024c).

Como visto anteriormente, os quatro sorotipos estão em circulação, mas os sorotipos com maior evidência são do tipo 1 e 2, como mostra a figura 4. Não há dados acerca da predominância dos sorotipos nos boletins epidemiológicos 2009-2019.

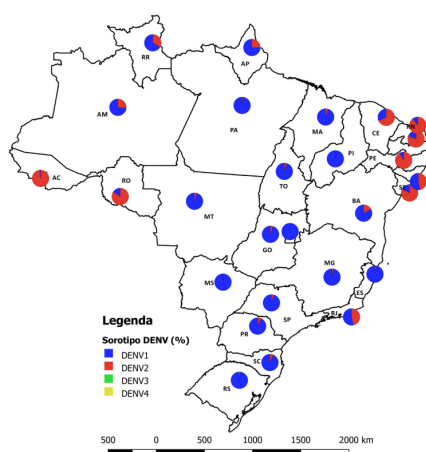
Figura 4 – Predominância dos sorotipos da dengue no Brasil



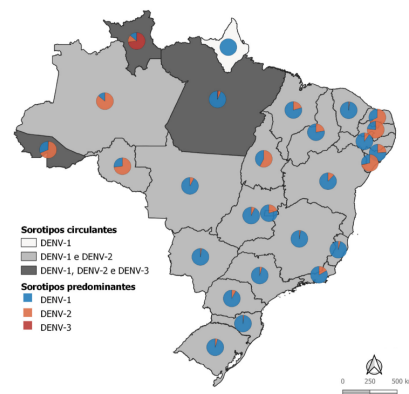
(a) Identificação do sorotipo em 2020



(b) Identificação do sorotipo em 2021



(c) Identificação do sorotipo em 2022



(d) Identificação do sorotipo em 2023

Fonte: Coordenação-Geral de Laboratórios de Saúde Pública (CGLAB) (2020-2023)

As porcentagens acerca dos sorotipos foram calculadas pelo autor desta dissertação com base nos boletins epidemiológicos fornecidos pelo Ministério da Saúde. Em 2020, o sorotipo predominante foi a DENV-1 e não há porcentagem em seu boletim epidemiológico, somente as áreas de concentração, sendo Minas Gerais com 21,1%, São Paulo, 20,3% e Goiás com 10,3%. Em 2020, a predominância foi da DENV-2 com cerca 81,9%. Além do sorotipo 1, nos estados do Acre, Amazonas, Rondônia, Roraima, Pará, Tocantins, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia, Minas Gerais, Espírito Santo, Rio de Janeiro, Goiás, Distrito Federal e Rio Grande do Sul, foi detectado também do sorotipo 2.

Na região sul, exceto o Rio Grande do Sul, bem como o Mato Grosso do Sul, foram detectados os sorotipos 1, 2 e 4 e, em São Paulo, houve a detecção dos quatro sorotipos (DENV 1, 2, 3 e 4).

No ano de 2021, o sorotipo 1 representou 51,0% das amostras positivas, enquanto

o sorotipo 2, 48,9%. Já o ano de 2022, apresentou a seguinte distribuição: 84,2% para o sorotipo 1 e 15,8% para o sorotipo 2. Em 2023, não houve porcentagem dos sorotipos, embora o boletim epidemiológico deste ano traga o domínio dos sorotipos 1 e 2 nas últimas décadas.

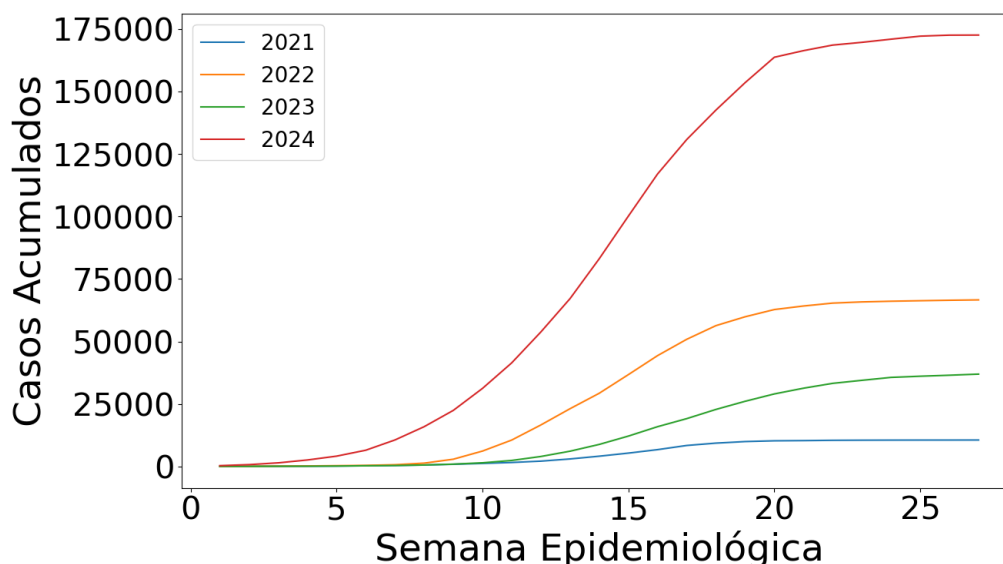
A seção seguinte aborda a dengue no estado, mostrando o número de casos confirmados ao longo dos anos.

2.3 Dengue no Rio Grande do Sul

Segundo o Painel de casos de Dengue do RS, a situação no estado tem sido preocupante, com um aumento significativo no número de casos confirmados em relação aos anos anteriores (Secretaria da Saúde do Rio Grande do Sul, 2024a). A maior marca registrada foi em 2022, com 67 mil, atualmente os casos aproximam-se de 180 mil. Além disso, os registros de óbitos deste ano já ultrapassaram os acumulados desde 2015, superando a marca de 275.

Até a semana epidemiológica 27, os casos acumulados em 2024, em comparação com o ano anterior (2023), são cerca de 600% maiores. Em relação ao ano de 2022, o aumento é de aproximadamente 133,3%. Comparando com 2021, o aumento é ainda mais significativo, cerca de 1650%, conforme é possível analisar no gráfico contido na Figura 5:

Figura 5 – Acumulados de dengue por semana epidemiológica



Fonte: Do autor.

É observado um aumento expressivo nos casos confirmados ao longo das semanas epidemiológicas. Os anos anteriores foram descartados para análise, pois possuem menos dados, o que resultaria em gráficos praticamente constantes.

2.4 Vacinação

Em 2023, o Ministério da Saúde anunciou a incorporação da vacina contra a dengue no Sistema Único de Saúde (SUS). A decisão foi tomada após a avaliação da Comissão Nacional de Incorporação de Tecnologias no SUS (CONITEC), que considerou os benefícios da imunização para o controle da doença no país (UNA-SUS, 2024; CONITEC, 2023).

Com isso, o Brasil se tornou pioneiro na implementação da vacinação contra os quatro sorotipos da dengue, utilizando o imunizante Qdenga, desenvolvido pelo laboratório japonês Takeda (Ministério da Saúde, 2023). O objetivo principal é reduzir o número de hospitalizações, casos graves da doença e óbitos, especialmente em regiões onde a dengue é endêmica. O esquema vacinal prevê duas doses, com um intervalo de três meses entre elas (Ministério da Saúde, CONITEC, 2023).

A história da vacinação contra a dengue no Brasil teve início em 2015 com a introdução da vacina Dengvaxia, desenvolvida pela Sanofi Pasteur. Composta por três doses, essa vacina foi recomendada apenas para pessoas que já tiveram contato prévio com o vírus (Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), 2018). Por essa razão, a Dengvaxia não foi incorporada ao SUS (Agência Brasil, 2024).

O Brasil também tem investido no desenvolvimento da vacina Butantan-DV, por meio de colaborações com o Instituto Nacional de Saúde dos EUA e o Instituto Butantan (ZANOTTO; LEITE, 2018). Após aprovação da ANVISA, a Butantan-DV se encontra na fase três dos ensaios clínicos e possui grande potencial para ser incorporada ao SUS, uma vez que requer apenas uma dose para a imunização (Instituto Butantan, 2024b).

Apesar da vacinação ser uma ferramenta importante, o Ministério da Saúde destaca que ela não substitui outras medidas de controle da dengue, como a eliminação de criadouros do mosquito e campanhas de conscientização (Ministério da Saúde, 2024d). A combinação de diferentes abordagens continua sendo necessária para diminuir os efeitos da doença no Brasil, que ainda enfrenta desafios em regiões com altos índices de infestação do *Aedes aegypti* (Confederação Nacional de Municípios, 2024).

Até o momento, foram abordados os conceitos relacionados à dengue no geral e a ecologia do vetor, destacando-se as principais medidas de controle, como a vacinação. Em seguida, será explorado o fenômeno climático analisado nesta dissertação, associando-o à incidência da dengue em escala global, até restringir o foco ao RS.

2.5 El Niño - Oscilação Sul (ENOS)

A Oscilação Sul do El Niño (ENOS) é uma variação sazonal do sistema oceano-atmosfera no Pacífico tropical, que afeta o clima global (Reef Resilience Network,

2024). Esse fenômeno está associado a mudanças nos padrões normais da Temperatura da Superfície do Mar (TSM), resultando em aquecimento, conhecido como El Niño, ou em resfriamento, denominado La Niña (PEREIRA; REBOITA; AMBRIZZI, 2017).

A ocorrência dos fenômenos El Niño e La Niña varia em ciclos geralmente de três a cinco anos; entretanto, registros históricos mostram que esse intervalo pode oscilar entre dois e sete anos (Climate Prediction Center, 2024). O El Niño costuma durar de 9 a 12 meses, enquanto o La Niña pode perdurar entre 1 e 3 anos. Ambos os fenômenos tendem a se desenvolver entre março e junho, atingindo seu pico de intensidade entre dezembro e abril, e gradualmente enfraquecem de maio a julho.

Diversos índices são utilizados para avaliar a intensidade do El Niño-Oscilação Sul (ENOS), sendo o Índice de Oscilação Sul (IOS) um dos principais (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, 2024a). Esse índice é baseado nas variações da pressão atmosférica de superfície entre duas localidades estratégicas: Taiti, no Pacífico, e Darwin, na Austrália (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, 2024b).

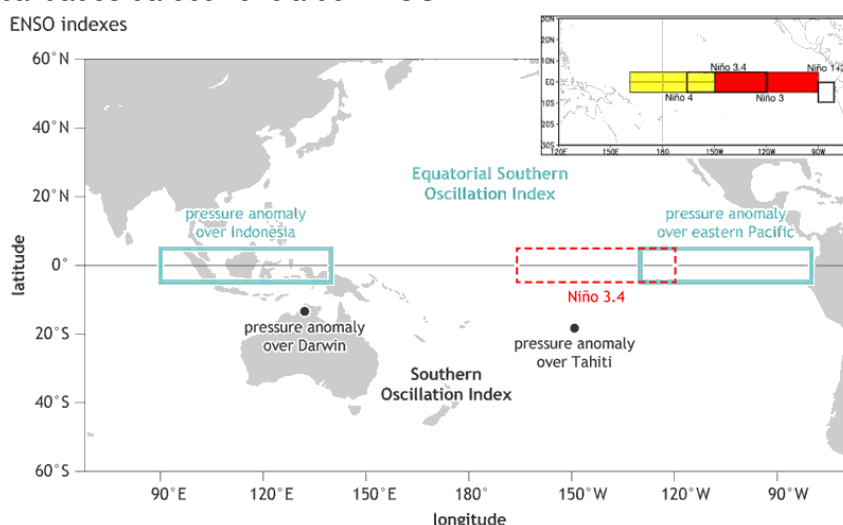
Além das variações de pressão atmosférica, a TSM na região conhecida como Niño 3 também é considerada, com o IOS refletindo o componente atmosférico da Oscilação Sul, enquanto a TSM da região Niño 3 representa o componente oceânico associado ao El Niño (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, 2024a).

Durante os episódios de El Niño, o IOS tende a apresentar valores negativos, indicando menor pressão atmosférica em Taiti e maior em Darwin. Por outro lado, durante os episódios de La Niña, o IOS é positivo, indicando maior pressão no Taiti e menor em Darwin, reforçando as características típicas desse fenômeno (SOUZA; REBOITA, 2021).

Outro índice relevante é o *Oceanic Niño Index* (ONI) — ou Índice Oceânico Niño, em tradução literal. Esse é o principal indicador utilizado pela National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (Climate Prediction Center, 2024) para o monitoramento do ENOS. O ONI é calculado com base na média móvel trimestral da temperatura da superfície do mar (TSM) na região Niño 3.4. Para que um evento seja classificado como El Niño ou La Niña, as anomalias de TSM devem exceder $+0,5^{\circ}\text{C}$ ou $-0,5^{\circ}\text{C}$ por, no mínimo, cinco meses consecutivos (SOUZA; REBOITA, 2021).

A Figura 6 mostra a localização da ocorrência do ENOS, bem como as regiões onde são calculados os índices IOS e ONI.

Figura 6 – Localidades da ocorrência do ENOS



Fonte: Do autor.

O fenômeno ENOS exerce um impacto significativo nas condições climáticas do RS, influenciando principalmente a precipitação e a temperatura. Pesquisadores destacam que La Niña está associado à redução da precipitação pluvial, especialmente nas estações de primavera e verão (FONTANA; BERLATO, 1997; GRIMM; SANT'ANNA, 2000; PUCHALSKI, 2000). Em contrapartida, El Niño é caracterizado por um aumento na pluviosidade e na temperatura média, resultando em invernos mais amenos (KOUSKY; CAVALCANTI, 1984).

As temperaturas médias tendem a aumentar durante El Niño, enquanto La Niña provoca um resfriamento mais acentuado, sobretudo no inverno (WREGGE et al., 2018). Análises de séries temporais indicam que, ao longo das últimas décadas, as temperaturas médias globais têm-se elevado (UNEP, 2022), o que inclui o RS, o que pode intensificar os efeitos desses fenômenos em eventos futuros (LATIF; KEENLYSIDE, 2009; CAI et al., 2020; SENGE-RS, 2016).

2.6 Influência do ENOS na incidência da dengue

Pesquisas demonstram que fenômenos climáticos, como El Niño e La Niña, exercem influência direta sobre elementos como a temperatura, a umidade e a precipitação. Esses fatores, por sua vez, afetam a ecologia de vetores, aumentando a incidência de doenças vectoriais (RAMASAMY; SURENDRAN, 2012; BAI; MORTON; LIU, 2013). Alterações no clima podem modificar a distribuição geográfica e a taxa de reprodução de vetores, como mosquitos, ampliando o risco de transmissão de doenças em determinadas regiões (FERREIRA et al., 2022).

Por exemplo, no sul do Equador, o El Niño foi identificado como um fator que afeta

a transmissão interanual da dengue, e em regiões como o Peru, a presença do ENOS está relacionada à distribuição geográfica e ao risco de infecção por dengue (SILVA-CASO et al., 2019). Além disso, investigações em países como Colômbia e Tailândia ressaltam a importância da interação entre fatores climáticos, como o ENOS, e variáveis locais na dinâmica da dengue (TIPAYAMONGKHOLGUL et al., 2009; RUA-URIBE et al., 2012).

Durante eventos de El Niño, observa-se um aumento no número de casos de dengue (KAKARLA et al., 2019), pois as variações climáticas podem criar condições favoráveis para a reprodução do mosquito vetor da dengue, aumentando o risco de transmissão da doença. Por outro lado, La Niña é caracterizada por temperaturas mais frias do que o normal na superfície do mar no Oceano Pacífico equatorial, resultando em mudanças nos padrões climáticos globais (CLAAR et al., 2018). Frequentemente, La Niña está associada a um aumento nas chuvas em algumas regiões, potencializando eventos climáticos extremos, como inundações e tempestades (KEMARAU; EBOY, 2021).

Evidências sugerem que La Niña pode criar condições adequadas para a reprodução do mosquito vetor da dengue (MORAES et al., 2019), levando a surtos da doença devido ao aumento da disponibilidade de criadouros (MORAES et al., 2019). Portanto, considerar a influência do La Niña e do El Niño na dinâmica da dengue é essencial para a implementação de medidas de vigilância e controle em áreas propensas a essas condições climáticas.

No Brasil, a relação entre as mudanças climáticas, especialmente as características do ENOS, e a incidência da dengue no Brasil tem sido uma temática crescente no país (STOLERMAN; MAIA; KUTZ, 2019; ROCKLÖV; DUBROW, 2020; JÚNIOR; MENDONÇA, 2021; MARINHO et al., 2022). As flutuações climáticas associadas ao ENOS têm implicações diretas na dinâmica epidemiológica da dengue, tornando-se um fator crucial a ser considerado nas estratégias de controle e prevenção da doença no país.

Estudos indicam que as fases do ENOS, especialmente o El Niño, estão associadas a um aumento na incidência de dengue. Durante eventos de El Niño, as temperaturas mais elevadas e as mudanças nos padrões de precipitação favorecem a proliferação do mosquito *Aedes aegypti*, vetor da dengue (MORAES et al., 2019; FERREIRA et al., 2022). Pesquisas revelam que, durante esses períodos, regiões como a Amazônia sofrem impactos consideráveis na dinâmica de transmissão da dengue, com um aumento expressivo nos casos devido às condições climáticas alteradas (MORAES et al., 2019).

Além disso, a variabilidade climática causada pelo ENOS pode criar ambientes propícios para a reprodução do vetor, com maior probabilidade de surtos de dengue. Uma análise detalhada sugere que a frequência e a intensidade dos eventos de El Niño estão diretamente ligadas à periodicidade e à gravidade das epidemias, espe-

cialmente em anos de El Niño mais forte (FERREIRA et al., 2022). Esses fatores se somam a elementos como desmatamento e elevação das temperaturas, intensificando os impactos da dengue no Brasil (MARINHO et al., 2022).

No contexto do RS, a interação entre El Niño e La Niña tem efeitos notáveis sobre a umidade, a precipitação e a temperatura, elementos que também influenciam a ecologia do vetor (PETROVA et al., 2020). Durante eventos de El Niño, o estado apresenta um aumento nas temperaturas e na pluviosidade (COLLISCHONN; MAIO; BRANDOLT, 2019), criando condições mais favoráveis para a proliferação do mosquito *Aedes aegypti*. Em contraste, durante La Niña, a redução das chuvas e a queda nas temperaturas tendem a diminuir a atividade do vetor, embora possam ocorrer surtos em regiões específicas (FONTANA; BERLATO, 1997; PUCHALSKI, 2000).

As condições globais impostas pelo ENOS, somadas às variações climáticas da região, tornam o estado uma área de estudo importante para entender a interação entre os fenômenos climáticos e a dinâmica da dengue.

Na próxima seção, faz-se necessário compreender os modelos compartimentais e suas aplicações, destacando sua relação com a dengue.

2.7 Epidemiologia e modelos compartimentais

A epidemiologia, em sua essência, é a ciência que investiga o processo saúde-doença em coletividades humanas. Ela analisa a distribuição e os fatores determinantes das enfermidades, danos à saúde e eventos associados à saúde coletiva, propondo medidas específicas de prevenção, controle ou erradicação de doenças, e fornecendo indicadores para o planejamento, administração e avaliação das ações de saúde (ROUQUAYROL; GOLDBAUM, 2003).

Nesse contexto, a utilização de modelos matemáticos em epidemiologia desempenha um papel valioso, possibilitando a avaliação do impacto de diferentes intervenções, como campanhas de vacinação, medidas de quarentena e mudanças nos hábitos de higiene (ROCHA, 2012; Universidade Estadual de Campinas, 2020). Além disso, são essenciais para simular cenários futuros e entender o comportamento de epidemias, como a evolução de surtos, os picos de transmissão, efeitos da imunização de rebanho, permitindo o auxílio em tomada de decisões e no planejamento de políticas de saúde pública (Sociedade Brasileira de Medicina Tropical (SBMT), 2020; Universidade Federal de Pelotas (UFPeL), 2020).

No caso da dengue, os modelos epidemiológicos são essenciais para compreender os padrões de transmissão e identificar os fatores de risco que contribuem para surtos, como os elementos climáticos (XU et al., 2016), sendo capazes de capturar as complexidades da transmissão da dengue, incluindo a presença de um grande reservatório assintomático e a circulação de múltiplos sorotipos do vírus. Além disso, o

triângulo epidemiológico da dengue e da febre hemorrágica da dengue (FHD) abrange os hospedeiros, patógenos e os vetores, e suas interações ecológicas enfatizam a importância de modelos que considerem tais elementos (MIORELLI, 1999).

O emprego de modelos compartimentais, que incluem fatores adicionais como variáveis climáticas e ambientais, é crucial para a compreensão da dinâmica espaço-temporal da dengue (PIOVESAN, 2009; ZHANG et al., 2019; MIELKE, 2024). Esses modelos oferecem uma estrutura para prever o risco de surtos e entender os padrões epidemiológicos de infecção por dengue observados em diferentes cenários (LOWE et al., 2015).

A interseção entre a epidemiologia e a modelagem matemática é fundamental para o desenvolvimento de estratégias eficazes de controle da dengue e outras doenças infecciosas (AMORIM, 2020). A compreensão das dinâmicas de transmissão e a identificação de fatores de risco não só auxiliam na execução de intervenções, mas também estabelecem uma fundamentação sólida para a seleção do modelo epidemiológico mais adequado.

Assim, a seguir, são exploradas as definições e características dos principais modelos epidemiológicos, utilizados na análise da propagação de doenças e na avaliação da eficácia de intervenções de saúde pública. Essa discussão permitirá aprofundar a compreensão de como esses modelos podem ser aplicados para prever e atenuar surtos de dengue, contribuindo para uma abordagem mais robusta no enfrentamento dessa e de outras doenças.

2.8 Suposições gerais dos modelos epidemiológicos

Os modelos epidemiológicos apresentados nesta seção partem de algumas suposições básicas fundamentais para a sua construção e análise. Refletem as condições simplificadas sob as quais as doenças se propagam em uma população. As principais suposições são:

- **População constante:** Assume-se que a população total N é constante ao longo do tempo, ou seja, não há nascimentos, mortes (exceto as causadas diretamente pela doença) ou migrações. Assim, a soma dos indivíduos nos diferentes compartimentos, como suscetíveis, infectados e recuperados, permanece a mesma em cada modelo.
- **Homogeneidade:** Supõe-se que todos os indivíduos da população têm a mesma probabilidade de contato entre si, ou seja, a população é bem misturada, sem subgrupos isolados ou diferenças geográficas que afetem a taxa de transmissão da doença.
- **Taxas constantes:** Em cada modelo, há uma ou mais taxas que determinam

a dinâmica da doença. A taxa de transmissão da doença, denotada por β , representa a probabilidade de que um contato entre um suscetível e um infectado resulte em uma nova infecção. A taxa de recuperação, denotada por γ , indica a velocidade com que os infectados se recuperam da doença. Dependendo do modelo, outras taxas, como a taxa de perda de imunidade δ ou o período de incubação σ , podem ser adicionadas.

- **Sem variação nas características individuais:** Supõe-se que todos os indivíduos dentro de um compartimento (suscetíveis, infectados, etc.) são idênticos em termos de sua suscetibilidade à doença, duração da infecção e recuperação. Não há distinções individuais como idade, comorbidades ou diferenças de comportamento.

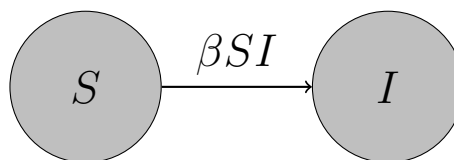
A seguir, serão discutidas as variações específicas que cada modelo epidemiológico apresenta, como a inclusão ou não de imunidade, estágios de incubação e possibilidade de reinfeção.

2.8.1 SI

O modelo Suscetível-Infectado (SI), apresentado no sistema 1, é um modelo compartimental usado em epidemiologia para estudar a dinâmica de doenças infecciosas. Assume-se que os indivíduos se movem apenas do compartimento suscetível para o infectado, sem a possibilidade de recuperação ou imunidade. Este modelo é particularmente útil para doenças em que os indivíduos não desenvolvem imunidade após a infecção, ou seja, não retornam a classe dos suscetíveis (ALMEIDA; TEIXEIRA, 2023).

$$\begin{aligned}\frac{dS}{dt} &= -\beta SI \\ \frac{dI}{dt} &= \beta SI\end{aligned}\tag{1}$$

Diagrama do Modelo SI



Fonte: Do Autor

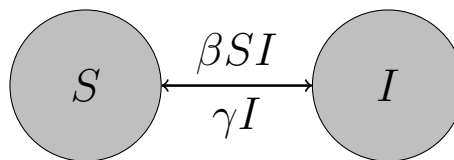
O modelo SI é útil na pesquisa epidemiológica, fornecendo visões sobre a dinâmica de transmissão de doenças infecciosas em que os indivíduos não adquirem imunidade pós-infecção, dessa forma, não é adequado para a dinâmica da dengue, pois não inclui a fase de recuperação dos infectados, não captura a interação entre humanos e mosquitos vetores, o que é fundamental para compreender a transmissão da dengue.

2.8.2 SIS

O modelo Suscetível-Infetado-Suscetível (SIS) é uma variação do modelo SI, que se aplica a doenças em que a recuperação não resulta em imunidade permanente. Neste modelo, os indivíduos da população podem ser suscetíveis à infecção, tornar-se infectados e, após um período de infecção, retornar ao estado suscetível, como mostra o sistema 2, essa característica torna o modelo particularmente relevante para infecções onde os indivíduos não ganham imunidade permanente após a recuperação e podem ser reinfectados, como a gripe e outras infecções virais (CAVALCANTE, 2020), onde a reinfeção é comum.

$$\begin{aligned}\frac{dS}{dt} &= -\beta SI + \gamma I \\ \frac{dI}{dt} &= \beta SI - \gamma I\end{aligned}\tag{2}$$

Diagrama do Modelo SIS



Fonte: Do Autor

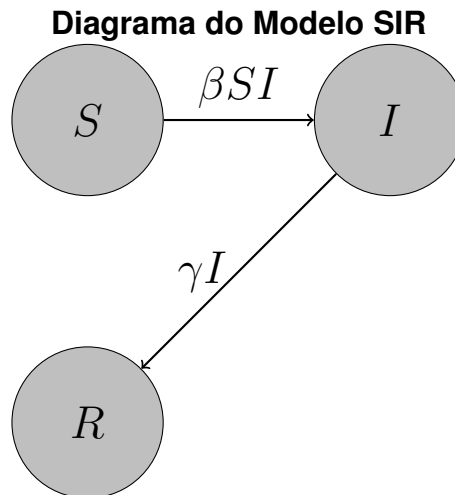
No contexto da dengue, o modelo SIS pode ser útil para descrever a dengue, pois permite que indivíduos recuperados voltem a ser suscetíveis, refletindo a reinfeção por diferentes sorotipos. No entanto, não é adequado para a dinâmica completa da dengue, não considera o período de incubação e o da imunidade temporária, nem captura a interação entre humanos e mosquitos vetores, pontos essenciais para modelar a transmissão da doença.

2.8.3 SIR

Entre os modelos compartimentais utilizados em epidemiologia, o modelo Suscetível-Infetado-Recuperado (SIR), contido no sistema 3, destaca-se por sua simplicidade. Embora seja um dos modelos mais básicos, sua eficácia na representação da dinâmica de doenças infecciosas é notável (SILVA, 2018; LIMA, 2022).

É considerado que os indivíduos, após a infecção, adquiram imunidade permanente, tendo como uma de duas principais características, prever o pico da endemia e a dimensão final da mesma, sendo importante para as intervenções públicas e o planejamento de recursos de saúde (TAVARES, 2017; HAN; WANG; JIN, 2024).

$$\begin{aligned}
 \frac{dS}{dt} &= -\beta SI \\
 \frac{dI}{dt} &= \beta SI - \gamma I \\
 \frac{dR}{dt} &= \gamma I
 \end{aligned}
 \tag{3}$$



Fonte: Do Autor

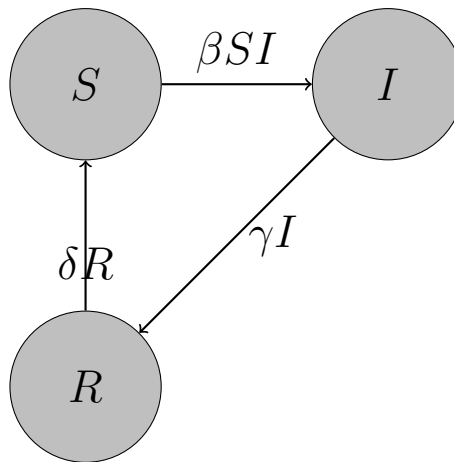
Embora o modelo SIR tenha benefícios significativos, como sua simplicidade e eficiência na modelar a dinâmica de algumas doenças infecciosas, ele não será aplicado na análise da dengue, pois assume que os indivíduos recuperados não retornam ao estado suscetível, o que não se alinha com a realidade da dengue, em que a imunidade pode ser temporária devido à presença de múltiplos sorotipos do vírus, permitindo reinfecções.

2.8.4 SIRS

O modelo SIRS (Suscetíveis, Infectados e Recuperados) é uma extensão dos modelos epidemiológicos básicos que considera a dinâmica da infecção em uma população. Assume que a imunidade adquirida após a recuperação não é permanente, permitindo que os indivíduos recuperados retornem ao compartimento suscetível após um determinado período, como é o caso de doenças como as influências (FERREIRA et al., 2014), malária e tuberculose.

O sistema de equações diferenciais que descreve o modelo SIRS é dado pelo sistema 4:

$$\begin{aligned}
 \frac{dS}{dt} &= -\beta SI + \delta R \\
 \frac{dI}{dt} &= \beta SI - \gamma I \\
 \frac{dR}{dt} &= \gamma I - \delta R
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Diagrama do Modelo SIRS

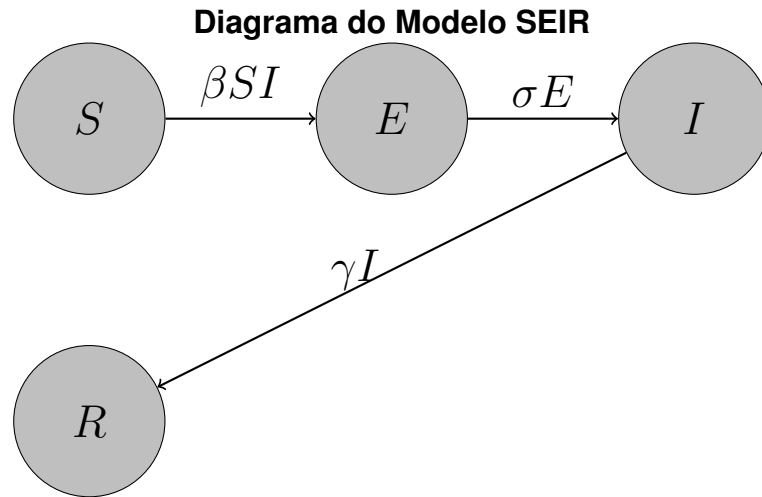
Fonte: Do Autor

O modelo SIRS oferece vantagens significativas para a modelagem de doenças infecciosas, destacando-se pela flexibilidade em simular cenários de imunidade temporária, comum em muitas infecções, e pela capacidade de prever surtos ao considerar reinfecções e a interação entre os compartimentos suscetíveis e infectados. No entanto, optou-se por não utilizar o modelo SIRS na análise da dengue visto que o mesmo não considera o período de incubação, crucial para a dinâmica da dengue, tornando sua aplicação inadequada para capturar a complexidade da transmissão da doença.

2.8.5 SEIR

O modelo Suscetível-Exposto-Infetado-Recuperado (SEIR), contido no sistema 5, é uma extensão do modelo SIR (Suscetíveis-Infetados-Recuperados), incorporando um estágio de exposição antes que os indivíduos se tornem infecciosos, oferecendo uma visão mais realista para doenças que não possuem transmissão imediata, além de seus aprimoramentos, como no caso do COVID-19, a implementação de intervenções como *lockdown* e o efeito do medo na dinâmica (ALQAHTANI, 2024), tornando-se essencial para a previsão e o controle de surtos, além de auxiliar na formulação de políticas de saúde pública (DOLBEAULT; TURINICI, 2020; PADMANABHAN et al., 2021).

$$\begin{aligned}
 \frac{dS}{dt} &= -\beta SI \\
 \frac{dE}{dt} &= \beta SI - \sigma E \\
 \frac{dI}{dt} &= \sigma E - \gamma I \\
 \frac{dR}{dt} &= \gamma I
 \end{aligned} \tag{5}$$



Fonte: Do Autor

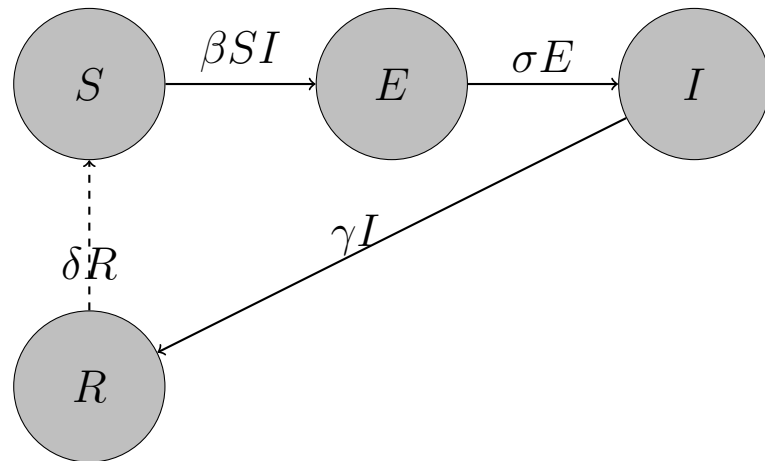
O modelo SEIR pode ser utilizado para a dengue devido à sua capacidade de incorporar a fase de incubação da doença, que é crucial para a transmissão do vírus, já que os indivíduos expostos não são imediatamente infecciosos (PIOVESAN, 2009). No entanto, a sua aplicação na dengue é limitada, pois não considera a possibilidade de reinfeção dos indivíduos recuperados. Ainda que ofereça vantagens em termos de representação do ciclo da doença, o fato de os indivíduos não retornarem à classe dos suscetíveis o torna inadequado para capturar a transmissão da dengue.

2.8.6 SEIRS

O modelo Suscetível-Exposto-Infeccioso-Recuperado-Suscetível (SEIRS) é uma extensão do modelo SEIR, incorporando uma categoria adicional para indivíduos que se recuperam da infecção, mas podem ser reinfectados, conforme o sistema 6. Este modelo é utilizado na modelagem de epidemias, como no caso da pandemia de COVID-19 (MALKOV, 2020) e na dinâmica de doenças sazonais, tal como a dengue (GEMAQUE; ARAUJO, 2011; ALHAJ, 2023; CIRINO, 2003).

$$\begin{aligned}
 \frac{dS}{dt} &= -\beta SI + \xi R \\
 \frac{dE}{dt} &= \beta SI - \sigma E \\
 \frac{dI}{dt} &= \sigma E - \gamma I \\
 \frac{dR}{dt} &= \gamma I - \xi R
 \end{aligned} \tag{6}$$

Diagrama do Modelo SEIRS



Fonte: Do Autor

Pelo exposto, o foco principal deste estudo será o modelo SEIRS, pois é um modelo compartimental mais complexo, capaz de levar em conta várias fases da doença nos indivíduos.

2.8.7 Modelo SEIRS-SEI (SEIR-SEI) com Dinâmica Vital para Humanos e Vetores

O modelo adotado para a modelagem da dengue é o SEIRS complementado pelo SEI para os vetores, ambos considerando dinâmica vital¹. Esse modelo tem sido amplamente empregado para compreender a dinâmica de transmissão de doenças infecciosas e avaliar medidas de controle.

Na análise da malária, por exemplo, ele é utilizado para demonstrar a eficácia de intervenções como vacinação e tratamento (RESMAWAN; SIANTURI; NUGRAHANI, 2017) e para explorar a interação entre humanos e mosquitos em diferentes cenários (HAKIZIMANA; NTAGANDA, 2021). Para a dengue, adaptações do modelo incluem variáveis climáticas, como temperatura, que influenciam diretamente a população de vetores e o risco de transmissão. Estudos mostram que variações climáticas podem alterar significativamente a dinâmica da doença (CALDWELL et al., 2020), além de validar a aplicabilidade do modelo em contextos reais (SABRAN; JANNAH, 2020).

A flexibilidade do modelo também permite a análise de estratégias de controle, como a vacinação, que reduz o número básico de reprodução e, conseqüentemente, o número de infecções ao longo do tempo (RESMAWAN; NURWAN, 2017). Esses resultados reforçam a relevância do modelo SEIRS-SEI na investigação de fatores climáticos e estratégias de intervenção para doenças transmitidas por vetores.

¹A dinâmica vital incorpora as taxas de nascimento e morte nas populações, permitindo que indivíduos ingressem e saiam das classes por processos naturais, como natalidade e mortalidade. No caso do modelo SEIRS-SEI, as equações contemplam as taxas de mortalidade (μ para humanos e μ_v para vetores) e as taxas de nascimento (μN para humanos e $\mu_v N_v$ para vetores).

Para a população humana:

$$\begin{aligned}
 \frac{dS}{dt} &= \mu N - \beta_h S I_v - \mu S + \xi R \\
 \frac{dE}{dt} &= \beta_h S I_v - \sigma E - \mu E \\
 \frac{dI}{dt} &= \sigma E - \gamma I - \mu I \\
 \frac{dR}{dt} &= \gamma I - \xi R - \mu R
 \end{aligned} \tag{7}$$

Para a população de vetores:

$$\begin{aligned}
 \frac{dS_v}{dt} &= \mu_v N_v - \beta_v S_v I - \mu_v S_v \\
 \frac{dE_v}{dt} &= \beta_v S_v I - \sigma_v E_v - \mu_v E_v \\
 \frac{dI_v}{dt} &= \sigma_v E_v - \mu_v I_v
 \end{aligned} \tag{8}$$

Essa formulação captura a interação dinâmica entre humanos e vetores, considerando a propagação da infecção, perda de imunidade, progressão da doença e a dinâmica específica dos mosquitos transmissores. A abordagem integrada possibilita uma análise detalhada da transmissão da dengue, representando com maior precisão as interações entre as populações humanas e vetoriais, bem como o impacto de variáveis climáticas e estratégias de controle.

Na sequência, são apresentados os materiais e métodos utilizados neste trabalho, com um detalhamento específico para cada metodologia empregada.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para abordar a complexa interação entre os fatores climáticos e a incidência da dengue, a metodologia adotada nesta dissertação é dividida em duas partes principais: o modelo epidemiológico e a análise de dados climáticos, que passam a ser detalhados a seguir.

3.1 Modelo epidemiológico aprimorado

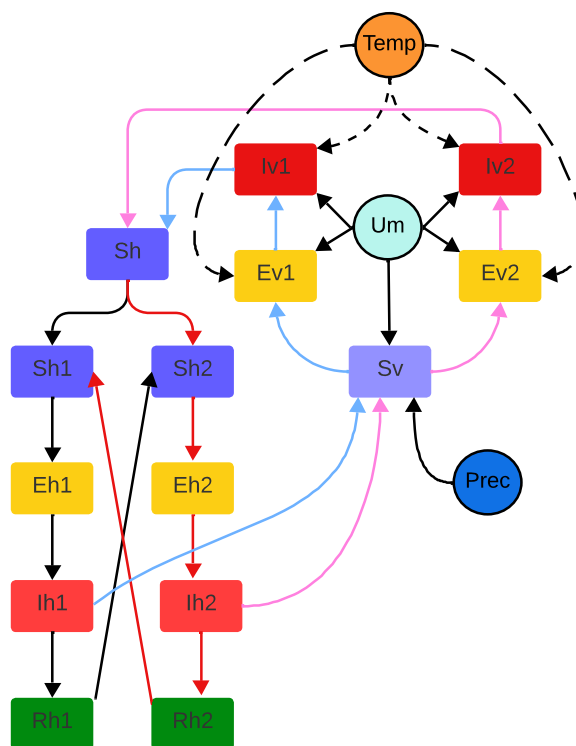
O modelo epidemiológico utilizado neste estudo é baseado em um sistema de equações diferenciais que descreve a dinâmica da transmissão da dengue entre humanos e mosquitos, sendo fundamental para compreender como se dá a propagação da doença e quais são os principais fatores que influenciam essa disseminação. Assim, um indivíduo que se recupera de uma infecção retorna à classe dos suscetíveis após um período de imunidade, tornando-se suscetível a uma infecção por outro sorotipo. A imunidade para o sorotipo previamente contraído permanece intacta. No modelo apresentado, não há especificação de sorotipos, apenas são consideradas as duas principais formas em que a doença se manifesta: clássica e grave. A garantia de que cada indivíduo não adquira dengue mais do que quatro vezes é assegurada pela escolha da taxa de perda de imunidade cruzada (heteróloga), de modo que o período dessa imunidade não seja inferior a 25% da expectativa de vida humana.

Algumas pesquisas aplicam o modelo originalmente proposto por Newton e Reiter sem modificações, além de estudos que incluem medidas de controle (ALHAJ, 2023; HAAFIDHOH; ADI; IRSALINDA, 2023). No entanto, este estudo aprimorou o modelo que será mencionado na próxima seção, na qual introduz alterações que resultaram em um sistema em que as equações dos vetores sofrem influências dos elementos climáticos, sendo a precipitação definida por **Prec**, temperatura por **Temp** e umidade denominada **Um**.

A inclusão dos elementos climáticos influencia diretamente cada compartimento do modelo, com a temperatura afetando a taxa de reprodução do vetor, enquanto a umidade pode modificar a mortalidade do vetor e a eficiência da transmissão. A preci-

pitação impacta a densidade populacional dos vetores, aumentando a capacidade de infecção.

Figura 7 – Diagrama do modelo da transmissão da dengue.



Fonte: Do autor.

O diagrama da Figura 7 ilustra a sequência de eventos que ocorre quando um mosquito suscetível pica um indivíduo infectado com dengue clássica (**Ih1**). Após essa picada, o mosquito deixa a classe dos suscetíveis (**Sv**) e passa para o compartimento dos expostos (**Ev1**), no qual o vírus começa a se replicar em seu organismo por um período de aproximadamente seis dias. Ao final desse período, o mosquito se torna infectado e passa para a classe dos infectados (**Iv1**), ficando apto a transmitir a doença.

Quando esse mosquito infectado pica um humano suscetível (**Sh**), o indivíduo se move para a classe dos suscetíveis à dengue clássica (**Sh1**), que, em seguida, vai diretamente para a classe dos expostos (**Eh1**). Nessa fase, o vírus se desenvolve no corpo do humano por um período de oito a doze dias. Após esse intervalo, o indivíduo se torna infectado e entra na classe dos infectados (**Ih1**), onde permanece por cerca de uma semana, o tempo necessário para se curar.

Após a recuperação, o indivíduo passa da classe dos infectados para a classe dos recuperados (**Rh1**). Com o tempo, ao perder a imunidade, o indivíduo migra para a

classe dos suscetíveis à dengue hemorrágica (**Sh2**), pois pode contrair dengue novamente. A mesma lógica se aplica ao segundo tipo de dengue, descrito no diagrama da Figura 7.

O modelo matemático proposto é composto por 14 compartimentos: os compartimentos de 1 a 9 são referentes aos humanos; os de 10 a 14, aos mosquitos. As equações descrevem os diferentes estágios da doença, cujas magnitudes variam ao longo do tempo:

$$\begin{aligned}
\frac{dSh}{dt} &= \delta(Ih_1 + Ih_2) + \frac{N_h}{T_{lh}} - \left(\frac{ShIv_1c_{vh}}{N_h} \right) - \left(\frac{ShIv_2c_{vh}}{N_h} \right) - \frac{Sh}{T_{lh}} \\
\frac{dEh_1}{dt} &= \left(\frac{(Sh + Sh_2)Iv_1c_{vh}}{N_h} \right) - Eh_1 \left(\frac{1}{T_{iit}} + \frac{1}{T_{lh}} \right) \\
\frac{dIh_1}{dt} &= \frac{Eh_1}{T_{iit}} - Ih_1 \left(\frac{1}{T_{id}} + \frac{1}{T_{lh}} + \delta \right) \\
\frac{dRh_1}{dt} &= \frac{Ih_1}{T_{id}} - \frac{Rh_1}{T_{lh}} - \alpha Rh_1 \\
\frac{dEh_2}{dt} &= \left(\frac{(Sh + Sh_1)Iv_2c_{vh}}{N_h} \right) - Eh_2 \left(\frac{1}{T_{iit}} + \frac{1}{T_{lh}} \right) \\
\frac{dIh_2}{dt} &= \frac{Eh_2}{T_{iit}} - Ih_2 \left(\frac{1}{T_{id}} + \frac{1}{T_{lh}} + \delta \right) \\
\frac{dRh_2}{dt} &= \frac{Ih_2}{T_{id}} - \frac{Rh_2}{T_{lh}} - \alpha Rh_2 \\
\frac{dSh_1}{dt} &= \alpha Rh_2 - \frac{Sh_1Iv_2c_{vh}}{N_h} - \frac{Sh_1}{T_{lh}} \\
\frac{dSh_2}{dt} &= \alpha Rh_1 - \frac{Sh_2Iv_1c_{vh}}{N_h} - \frac{Sh_2}{T_{lh}} \\
\frac{dSv}{dt} &= \frac{k}{T_{lv}} - \frac{Sv(Ih_1 + Ih_2)c_{hv}}{N_v} - \frac{Sv}{T_{lv}} \\
\frac{dEv_1}{dt} &= \frac{SvIh_1c_{hv}}{N_v} - Ev_1 \left(\frac{1}{T_{eit}} + \frac{1}{T_{lv}} \right) \\
\frac{dIv_1}{dt} &= \frac{Ev_1}{T_{eit}} - \frac{Iv_1}{T_{lv}} \\
\frac{dEv_2}{dt} &= \frac{SvIh_2c_{hv}}{N_v} - Ev_2 \left(\frac{1}{T_{eit}} + \frac{1}{T_{lv}} \right) \\
\frac{dIv_2}{dt} &= \frac{Ev_2}{T_{eit}} - \frac{Iv_2}{T_{lv}}
\end{aligned}$$

em que $N_h = Sh + Eh_1 + Ih_1 + Rh_1 + Sh_1 + Ih_2 + Rh_2 + Sh_2 + Eh_2 + Ih_2 + Rh_2$ é a população total de humanos, mantida constante no tempo t .

As variáveis de estado do modelo no tempo t estão nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Variáveis de estado do modelo para humanos

Variável	Descrição
Sh	Suscetíveis a todos os sorotipos
Sh_1	Expostos à dengue clássica
Ih_1	Infectados pela dengue clássica
Rh_1	Recuperados da dengue clássica
Sh_2	Suscetíveis à dengue clássica já afetados pela dengue grave
Sh_2	Expostos à dengue grave
Ih_2	Infectados pela dengue grave
Rh_2	Recuperados da dengue grave
Sh_2	Suscetíveis à dengue grave e já afetados pela dengue clássica
Sh_2	Expostos à dengue clássica
Ih_2	Infectados pela dengue clássica
Rh_2	Recuperados da dengue clássica

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 2 – Variáveis de estado do modelo para mosquitos

Variável	Descrição
Sv	Vetores suscetíveis
Ev_1	Vetores expostos à dengue clássica
Iv_1	Vetores infectados pela dengue clássica
Ev_2	Vetores expostos à dengue grave
Iv_2	Vetores infectados pela dengue grave

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para os humanos, a variável T_{lh} indica a expectativa de vida, e $\frac{1}{T_{lh}}$ corresponde às taxas de natalidade e mortalidade natural. T_{iit} representa o período latente intrínseco, e $\frac{1}{T_{iit}}$ denota a taxa de transição dos indivíduos da classe exposta para a classe infectada. A variável T_{id} expressa a duração da infecção, com $\frac{1}{T_{id}}$ associada à taxa de recuperação da doença. T_{im} refere-se à duração da imunidade cruzada, enquanto $\frac{1}{T_{im}}$ é a taxa de perda dessa imunidade. Além disso, 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. T_{lv} é o tempo médio de vida do vetor, e $\frac{1}{T_{lv}}$ representa a taxa de mortalidade dos vetores. ps é o número médio de picadas por vetor suscetível por unidade de tempo, enquanto pi é o número médio de picadas por vetor infectado por unidade de tempo, por fim α é a taxa de migração dos vetores.

Para iniciar a definição dos valores relacionados às proporções das taxas na ecologia do vetor, vamos estabelecer que α_1 , α_2 e α_3 são parâmetros de ajuste que refletem os efeitos de variáveis ambientais, como temperatura, umidade e precipitação, sobre o vetor. Esses parâmetros são ajustados de acordo com as condições físicas do ambiente, mas, como não há uma referência exata para comparação, é necessário estabelecer uma proporção que seja fisicamente explicável.

O parâmetro k_{base} representa a capacidade de suporte ambiental, T_{lv_base} representa a expectativa de vida do mosquito e 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 $c_{vh_base} = avh \times pi$. Os parâmetros 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, definidos da forma:

$$\begin{aligned} c_{vh} &= c_{vh_base} \cdot (1 + \alpha_1 \cdot (Temp - \overline{Temp})) \\ c_{hv} &= c_{hv_base} \cdot (1 + \alpha_2 \cdot (Um - \overline{Um})) \\ T_{lv} &= T_{lv_base} \cdot (1 + \alpha_2 \cdot (Um - \overline{Um})) \\ T_{eit} &= T_{eit_base} \cdot (1 + \alpha_1 \cdot (Temp - \overline{Temp})) \\ k &= k_{base} \cdot (1 + \alpha_3 \cdot (Prec - \overline{Prec})) \end{aligned} \tag{9}$$

onde \overline{Temp} , \overline{Um} e \overline{Prec} são as médias da temperatura, umidade e precipitação, respectivamente. Os parâmetros mencionados acima no sistema 9 são constantes dependentes do tempo.

Essas equações mostram como os elementos climáticos afetam as taxas da ecologia do vetor, tais como a transmissão, a longevidade dos vetores e o tempo de incubação viral. Cada uma delas inclui um termo que indica o impacto proporcional de variações climáticas em relação a um valor de referência, juntamente com a análise dos gráficos das médias obtidos nos resultados. Para a temperatura, toma-se como base os valores de BESERRA et al. 2009 e, para umidade, os de LEITE 2023, sendo $22^\circ C$ e 77%, respectivamente. E para a precipitação, fundamentamos somente pela média dos gráficos. Além disso, integramos informações da literatura sobre os efeitos desses fatores climáticos na ecologia dos vetores (OLIVEIRA et al., 2008; ARAÚJO; UCHÔA; ALVES, 2019; MICROBIOLOGY, 2022).

Sendo assim as taxas serão definidas como por exemplo, a taxa de transmissão do vetor para o humano (c_{vh}) é dada por $c_{vh} = c_{vh_base} \cdot (1 + \alpha_1 \cdot (Temp - \overline{Temp}))$. Isso significa que, para cada $1^\circ C$ acima da temperatura média do ENOS, a taxa de transmissão aumenta $\alpha_1\%$ em relação ao valor base, e para cada $1^\circ C$ abaixo, a taxa

diminui α_1 . Esse comportamento reflete o fato de que vetores, como mosquitos, são mais ativos em temperaturas elevadas, aumentando a probabilidade de transmissão (MENDONÇA, 2015). Para os demais parâmetros, é análogo.

Dessa forma, os elementos climáticos como temperatura, umidade e precipitação impactam diretamente a ecologia do vetor, influenciando as taxas de transmissão humano-vetor e vetor-humano, a longevidade dos vetores, o tempo de incubação viral e o compartimento dos suscetíveis (Fiocruz - Instituto de Comunicação e Informação Científica e Tecnológica em Saúde (ICICT), 2024).

Para resolver as equações diferenciais do modelo SEIRS, foi adotado o método de Runge-Kutta de quarta ordem (RK4) (BARROSO et al., 1987). Este método numérico foi selecionado devido à sua eficácia na resolução de sistemas de equações diferenciais não lineares, proporcionando precisão e estabilidade computacional na simulação da dinâmica de transmissão da dengue. Ao aplicar este método, é possível obter soluções numéricas confiáveis e precisas para sistemas de equações diferenciais não lineares que descrevem modelos compartimentados complexos (ALMEIDA; SANTOS, 2016).

3.2 Análise temporal da intensidade do ENOS

Foi realizado um recorte temporal com as anomalias da TSM com base nas informações da Climate Prediction Center (Tabela 3) devido aos dados contidos nos boletins epidemiológicos do RS serem referentes a partir de 2009. Para interpretar a tabela, utilizam-se as informações apresentadas nas Tabelas 4 e 6.

A intensidade dos fenômenos, presente na Tabela 4 foi realizada a partir do IOS, índice este, como mencionado na seção 2.5 o padrão do Climate Prediction Center:

Como o índice é calculado a partir das médias móveis do trimestre, foram consideradas as abreviações da Tabela 6:

Para analisar melhor o início e o fim de cada evento, adaptou-se a Tabela 6, destacando o semestre em que inicia e finaliza cada fenômeno. Neste estudo, considerou-se o primeiro mês de cada semestre como o início, e o último mês como o final. Por exemplo: o período do El Niño muito forte começou no dia 1º de maio de 2015 e finalizou no dia 31 de maio de 2016.

Com isso, foram analisados os fenômenos climáticos de diferentes intensidades, utilizando estações meteorológicas, visto que esses fenômenos influenciam diretamente os elementos climáticos em todo o mundo e, conseqüentemente, no estado do RS.

Tabela 3 – Anomalias da TSM relacionadas ao fenômeno ENOS por meio do ONI

Tipo	Anos	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ
ME	09/10	0.5	0.5	0.7	1.0	1.3	1.6	1.5	1.3	0.9	0.4	-0.1	-0.6
SL	10/11	-1.0	-1.4	-1.6	-1.7	-1.7	-1.6	-1.4	-1.1	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4
ML	11/12	-0.5	-0.7	-0.9	-1.1	-1.1	-1.0	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	0.1
N	12/13	0.3	0.3	0.3	0.2	0.0	-0.2	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3
N	13/14	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	-0.4	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.2
WE	14/15	0.1	0.0	0.2	0.4	0.6	0.7	0.6	0.6	0.6	0.8	1.0	1.2
VSE	15/16	1.5	1.9	2.2	2.4	2.6	2.6	2.5	2.1	1.6	0.9	0.4	-0.1
WL	16/17	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	-0.6	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3
WL	17/18	0.1	-0.1	-0.4	-0.7	-0.8	-1.0	-0.9	-0.9	-0.7	-0.5	-0.2	0.0
WE	18/19	0.1	0.2	0.5	0.8	0.9	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.5	0.5
N	19/20	0.3	0.1	0.2	0.4	0.5	0.6	0.5	0.5	0.4	0.2	-0.1	-0.3
ML	20/21	-0.4	-0.6	-0.9	-1.2	-1.3	-1.2	-1.1	-0.9	-0.8	-0.7	-0.5	-0.4
ML	21/22	-0.4	-0.5	-0.7	-0.8	-1.0	-1.0	-1.0	-0.9	-1.0	-1.1	-1.0	-0.9
WL	22/23	-0.8	-0.9	-1.0	-1.0	-0.9	-0.8	-0.7	-0.4	-0.2	0.1	0.5	0.8
SE	23/24	1.1	1.3	1.6	1.8	1.9	2.0	1.8	1.5	1.1	0.7	0.4	0.2
N	24/25	0.1											

Fonte: (Climate Prediction Center, 2024).

3.3 Análise de dados climáticos

Além do modelo epidemiológico, a análise dos dados climáticos faz-se necessária para compreender a influência dos fatores ambientais na incidência da dengue.

Os resultados do modelo epidemiológico, incluindo os valores dos parâmetros utilizados e suas implicações, são apresentados e discutidos em conjunto com os resultados da análise climática. As médias de temperatura, umidade e precipitação são comparadas em relação à incidência de dengue observada, destacando-se as diferenças e semelhanças entre os períodos de La Niña e de El Niño.

3.3.1 Coleta de dados

Os dados climáticos dos eventos analisados são compreendidos nos anos de 2009 a 2024. Foi utilizado o intervalo referente aos meses em que a anomalia ocorreu, como por exemplo, para o El Niño moderado, ocorrido de junho de 2009 a abril de 2010, um total de 11 meses, já para o La Niña forte, visto de junho de 2010 a junho de 2011, totalizando 12 meses e assim até chegarmos ao presente ano. Foram coletados de 33 estações meteorológicas fornecidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), sendo elas: Alegrete, Bagé, Bento, Camaquã, Canela, Canguçu, Caçapava, Cruz Alta,

Tabela 4 – Tipos de fenômeno ENOS: significados e traduções

Tipo	Inglês	Tradução
VSE	<i>Very Strong El Niño</i>	El Niño Muito Forte
WL	<i>Weak La Niña</i>	La Niña Fraca
WE	<i>Weak El Niño</i>	El Niño Fraco
ML	<i>Moderate La Niña</i>	La Niña Moderada
SE	<i>Strong El Niño</i>	El Niño Forte
SL	<i>Strong La Niña</i>	La Niña Forte
N	<i>Neutrality</i>	Neutralidade

Fonte: Do autor.

Tabela 5 – Definição dos Trimestres

Abreviação	Meses Correspondentes
JJA	Junho, Julho, Agosto
JAS	Julho, Agosto, Setembro
ASO	Agosto, Setembro, Outubro
SON	Setembro, Outubro, Novembro
OND	Outubro, Novembro, Dezembro
NDJ	Novembro, Dezembro, Janeiro
DJF	Dezembro, Janeiro, Fevereiro
JFM	Janeiro, Fevereiro, Março
FMA	Fevereiro, Março, Abril
MAM	Março, Abril, Maio
AMJ	Abril, Maio, Junho
MJJ	Maio, Junho, Julho

Fonte: Do autor.

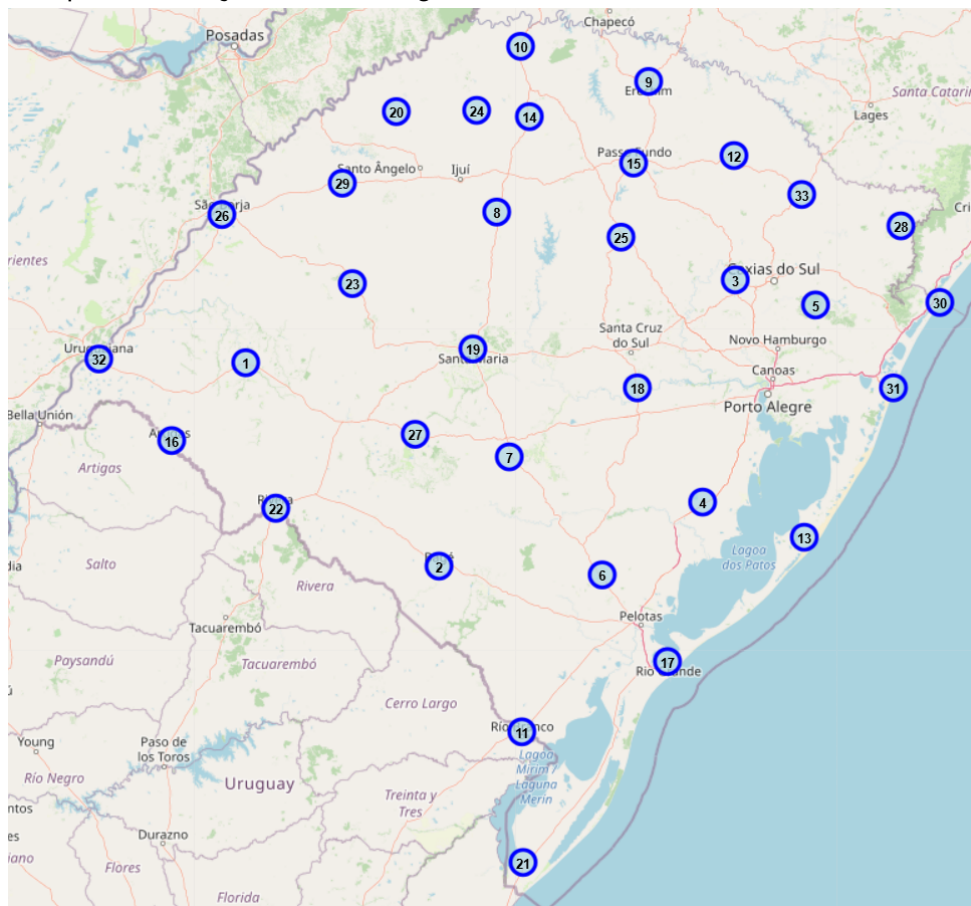
Erechim, Frederico Westphalen, Jaguarão, Lagoa Vermelha, Mostardas, Palmeira das Missões, Passo Fundo, Quaraí, Rio Grande, Rio Pardo, Santa Maria, Santa Rosa, Santa Vitória do Palmar, Santana do Livramento, Santiago, Santo Augusto, São Borja, São Gabriel, São José, São Luiz, Soledade, Torres, Tramandaí, Uruguaiana e Vacaria. O mapa das estações meteorológicas está exposto na Figura 8 com auxílio da Tabela 7.

Tabela 6 – Início e Fim dos Fenômenos ENOS

Intensidade	Período	Início	Fim
El Niño Moderado	2009-2010	JJA 2009 (0.5)	FMA 2010 (0.9)
La Niña Forte	2010-2011	JJA 2010 (-1.0)	AMJ 2011 (-0.5)
La Niña Moderada	2011-2012	JJA 2011 (-0.5)	MAM 2012 (-0.2)
Neutro	2012-2013	AMJ 2012 (-0.3)	OND 2013 (0.4)
Neutro	2013-2014	MAM 2013 (0.3)	OND 2014 (0.4)
El Niño Fraco	2014-2015	OND 2014 (0.6)	MAM 2015 (0.1)
El Niño Muito Forte	2015-2016	MJJ 2015 (1.2)	MAM 2016 (0.2)
La Niña Fraca	2016-2017	JAS 2016 (-0.5)	MAM 2017 (-0.3)
La Niña Fraca	2017-2018	SON 2017 (-0.7)	MAM 2018 (-0.1)
El Niño Fraco	2018-2019	SON 2018 (0.8)	MAM 2019 (0.3)
Neutro	2019-2020	MAM 2019 (0.3)	MAM 2020 (0.4)
La Niña Moderada	2020-2021	JJA 2020 (-0.6)	AMJ 2021 (-0.6)
La Niña Moderada	2021-2022	JJA 2021 (-0.7)	AMJ 2022 (-0.4)
La Niña Fraca	2022-2023	JJA 2022 (-0.6)	FMA 2023 (-0.1)
El Niño Forte	2023-2024	JJA 2023 (1.1)	AMJ 2024 (0.2)
Neutro	2024	JJA 2024 (0.1)	

Fonte: Do autor.

Figura 8 – Mapa das estações meteorológicas.



Fonte: Do autor.

A pesquisa envolveu estações meteorológicas em todas as partes do estado, desde a fronteira oeste até a costa. Com essa abrangência geográfica, foi possível obter uma média representativa dos elementos climáticos do RS. Esse arranjo fornece dados consistentes e úteis para análise e planejamento, com uma visão abrangente e precisa das variações climáticas ao longo do território.

Os dados acerca da dengue foram obtidos da página oficial da Secretaria Estadual de Saúde do Rio Grande do Sul (SES/RS): Painel de Casos de Dengue¹, alimentado pelo Sistema de Informação de Agravos de Notificação (SINAN)². Nesse painel, há diversas informações acerca dos casos, sendo os confirmados, inconclusivos, em investigação, descartados, óbitos e também são considerados os casos autóctones, que se referem a pessoas ou animais que contraíram a doença em sua própria área de residência, sem terem viajado para outras regiões que poderiam ter contribuído para a propagação da doença (eDisciplinas USP, 2016).

3.3.2 Cálculo das médias diárias e ajuste de curvas

Para a realização das médias e ajustes de curva, utilizou-se a linguagem de programação Python. Os dados climáticos foram lidos de arquivos em formato *.csv e processados os valores nulos realizando a média móvel. Em seguida, foram recortados para os períodos de interesse. Este pré-processamento foi essencial para garantir a qualidade dos dados analisados.

Após o pré-processamento, foram calculadas as médias diárias de temperatura, precipitação e umidade para cada cidade no período analisado. Em seguida, foi realizada a média das médias, sendo essencial para entender as variações climáticas sazonais e sua possível correlação com a incidência de dengue.

Para modelar as variações de temperatura e umidade ao longo dos períodos de estudo, utilizou-se um ajuste de curva polinomial de grau três. Este ajuste foi importante na análise de dados de séries temporais, pois fornece uma abordagem flexível, permitindo uma visualização clara das tendências sazonais, facilitando a comparação entre os períodos de La Niña e de El Niño.

3.4 Normalização

A normalização de dados foi aplicada neste trabalho para lidar com variáveis apresentadas em escalas e unidades distintas, como temperatura, umidade e precipitação. Esse processo foi fundamental para permitir a comparação adequada e identificar padrões ou correlações entre as variáveis ao longo do tempo. Ela foi particularmente importante para garantir uma interpretação consistente dos dados, principalmente ao

¹Disponível em: <https://ti.saude.rs.gov.br/dengue/painel_de_casos.html>. Acesso em: 10 set 2024

²Disponível em <<https://portalsinan.saude.gov.br/doencas-e-agravos>>. Acesso em: 10 set 2024

explorar a relação entre fatores ambientais, como temperatura e umidade, e a propagação de doenças transmitidas por vetores, como mosquitos (KOFIDOU et al., 2021). Por meio dessa técnica, as variáveis foram analisadas em igualdade de condições, evitando vieses devido às diferenças de escala.

Os resultados obtidos após a normalização são apresentados na Seção 4.2, destacando a influência dos fatores climáticos sobre as dinâmicas epidemiológicas.

Tabela 7 – Coordenadas geográficas e altitudes das cidades do Rio Grande do Sul

	Cidade	Latitude	Longitude	Altitude (m)
1	Alegrete	-29.7833	-55.7919	102
2	Bagé	-31.3297	-54.0999	212
3	Bento Gonçalves	-29.1667	-51.5167	690
4	Caçapava do Sul	-30.5144	-53.4914	444
5	Camaquã	-30.8511	-51.8128	23
6	Canela	-29.356	-50.8119	837
7	Canguçu	-31.3967	-52.675	386
8	Cruz Alta	-28.6389	-53.6069	452
9	Erechim	-27.6346	-52.275	783
10	Frederico Westphalen	-27.3586	-53.3944	480
11	Jaguarão	-32.5667	-53.375	26
12	Lagoa Vermelha	-28.2092	-51.5247	844
13	Mostardas	-31.105	-50.9164	17
14	Palmeira das Missões	-27.9008	-53.3131	634
15	Passo Fundo	-28.2572	-52.4091	687
16	Quaraí	-30.3842	-56.4489	112
17	Rio Grande	-32.0332	-52.0986	6
18	Rio Pardo	-29.9889	-52.3781	41
19	Santa Maria	-29.6842	-53.8069	113
20	Santa Rosa	-27.8708	-54.4794	277
21	Santa Vitória do Palmar	-33.525	-53.3689	21
22	Santana do Livramento	-30.8903	-55.5328	208
23	Santiago	-29.1919	-54.8669	409
24	Santo Augusto	-27.8528	-53.7775	522
25	São Borja	-28.6603	-56.0036	62
26	São Gabriel	-30.3336	-54.3211	113
27	São José do Norte	-32.015	-52.0336	5
28	São Luiz Gonzaga	-28.4081	-54.9558	241
29	Soledade	-28.8306	-52.5139	726
30	Torres	-29.3339	-49.7339	3
31	Tramandaí	-29.9842	-50.1328	2
32	Uruguaiana	-29.7614	-57.0853	66
33	Vacaria	-28.5078	-50.9417	971

Fonte: Do autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo será realizada a validação do modelo aprimorado, com base nos critérios de GEMAQUE; ARAUJO, 2011, juntamente com a apresentação dos gráficos das médias de temperatura, umidade e precipitação no RS durante os eventos analisados, conforme descrito na Tabela 6. Esses gráficos foram gerados por meio de um algoritmo desenvolvido em linguagem Python e estão separados de acordo com a intensidade dos eventos, bem como pelos períodos de neutralidade. Além disso, são apresentadas as simulações do modelo compartimental aprimorado, levando em consideração a influência dos elementos climáticos.

4.1 Validação do modelo

Para validar o modelo, utiliza-se GEMAQUE; ARAUJO, 2011, na qual plota-se os gráficos sem a influência dos elementos climáticos. Neste caso, os parâmetros utilizados pelo autor na primeira simulação, estão dispostos na Tabela 8 e as condições iniciais são apresentadas na Tabela 9. O gráfico é apresentado na Figura 9. O prefixo "Neutral" na legenda, corresponde a não utilização dos dados climáticos (temperatura, umidade e precipitação)

Tabela 8 – Parâmetros utilizados nas simulações (em dias).

T_{lh}	T_{iit}	T_{id}	cvh	T_{im}	δ	T_{lv}	chv	T_{eit}	α	α_1	α_2	α_3
25.000	5	3	0.375	8.000	0.05	4	0.375	10	0.001	0.005	0.005	1.2

Fonte: Do autor.

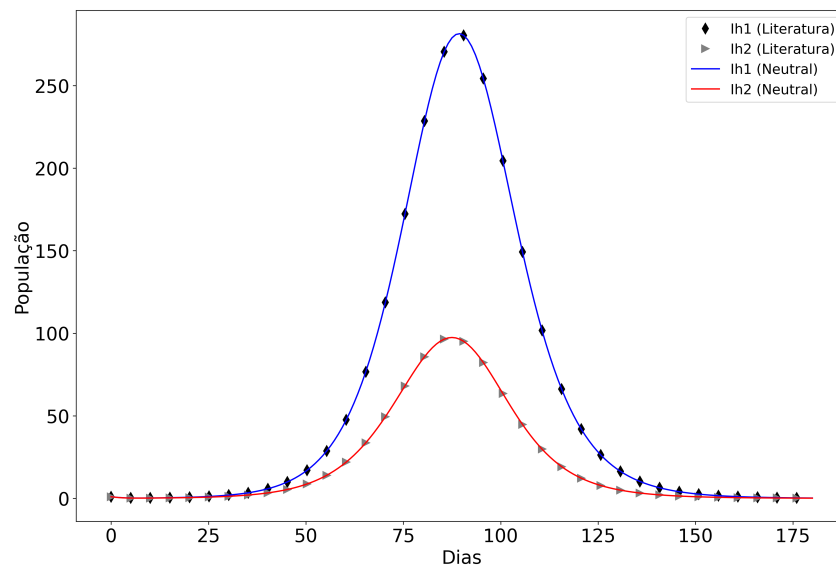
Tabela 9 – Condições iniciais.

$Sh(0)$	$Sh_1(0)$	$Sh_2(0)$	$ Eh_1(0)$	$ Eh_2(0)$	$ Ih_1(0)$	$ Ih_2(0)$
5.000	0	0	0	0	1	1

$Rh_1(0)$	$Rh_2(0)$	$Sv(0)$	$ Ev_1(0)$	$ Ev_2(0)$	$ Iv_1(0)$	$ Iv_2(0)$
0	0	200	0	0	0	0

Fonte: Do autor.

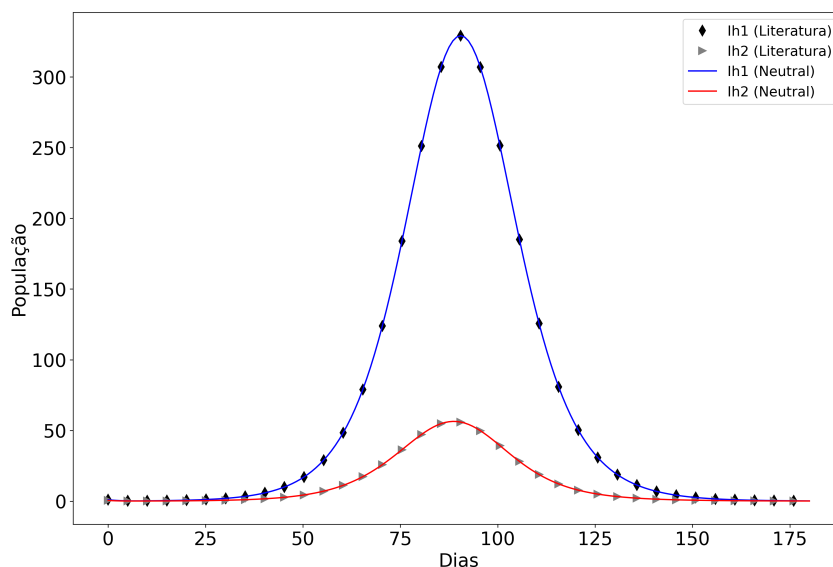
Figura 9 – Caso teste 1



Fonte: Do autor.

Para o segundo caso abordado, utilizam-se os mesmos parâmetros da Tabela 8, na qual as condições iniciais foram as mesmas contidas na Tabela 9, exceto para $Ih_2(0) = 0.5$, resultando nos gráficos da Figura 10.

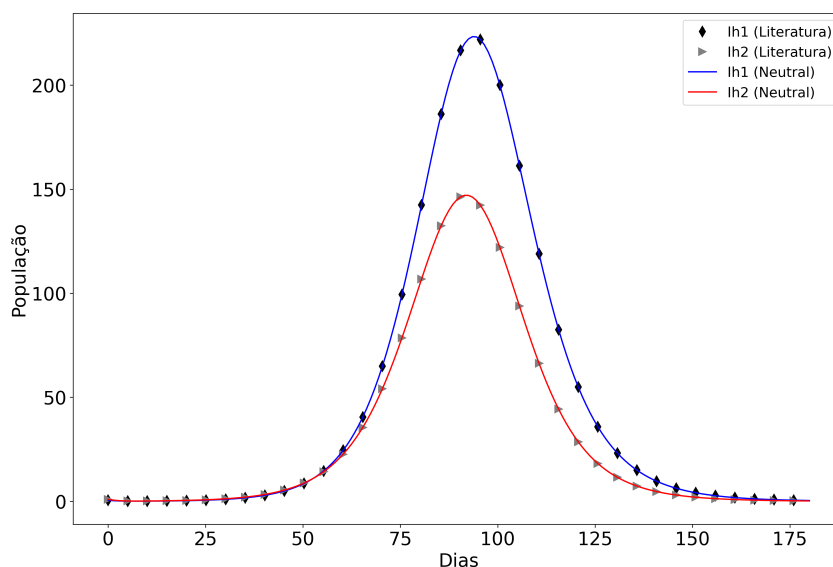
Figura 10 – Caso teste 2



Fonte: Do autor.

Para finalizar a validação, utiliza-se no código desenvolvido, os mesmos parâmetros e condições iniciais da literatura, exceto para $Ih_1(0) = 0.5$, na qual obtêm-se os gráficos da Figura 11:

Figura 11 – Caso teste 3



Fonte: Do autor.

A validação do modelo foi realizada comparando os resultados obtidos com as previsões do modelo epidemiológico desenvolvido pelo autor com os dados disponíveis na literatura (GEMAQUE; ARAUJO, 2011). Com isso, observa-se que os gráficos gerados pelo modelo coincidem com as tendências esperadas. Isso valida o modelo,

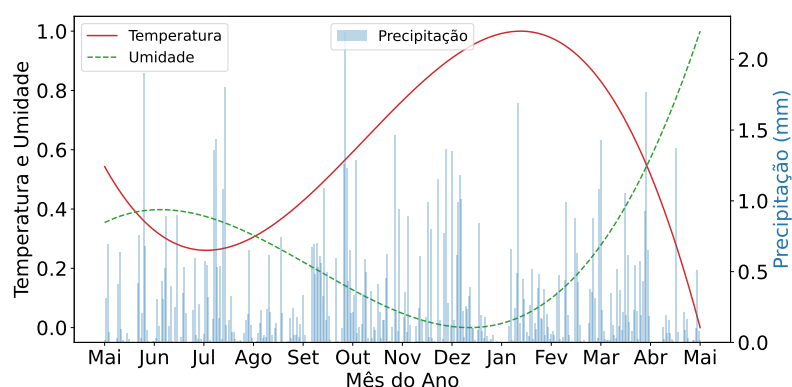
demonstrando que ele está de acordo com os resultados previamente descritos na literatura. Dessa forma, afirma-se que o modelo é adequado para simular as dinâmicas epidemiológicas, fornecendo uma base confiável para tal análise.

4.2 Caracterização das variáveis ENOS

Nesta seção, caracterizam-se as variáveis climáticas apresentadas no presente trabalho, descrevendo-as segundo suas características principais.

- **ENOS muito forte**

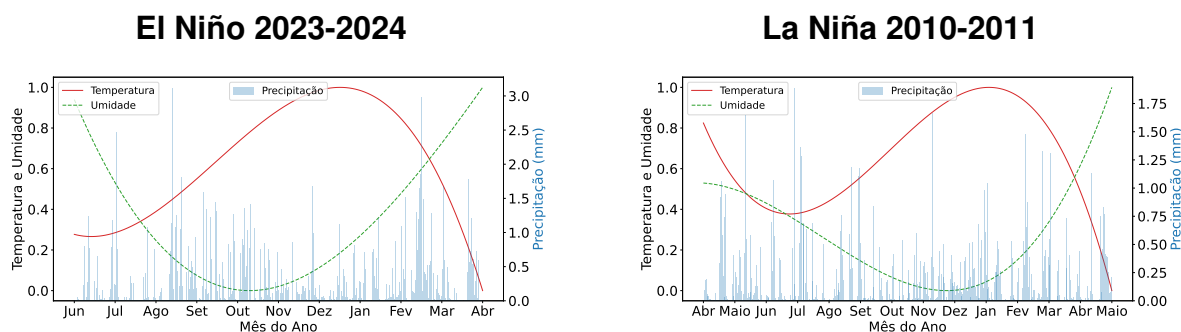
Figura 12 – Médias dos elementos climáticos durante o El Niño 2015-2016



Fonte: Do autor.

- **ENOS forte**

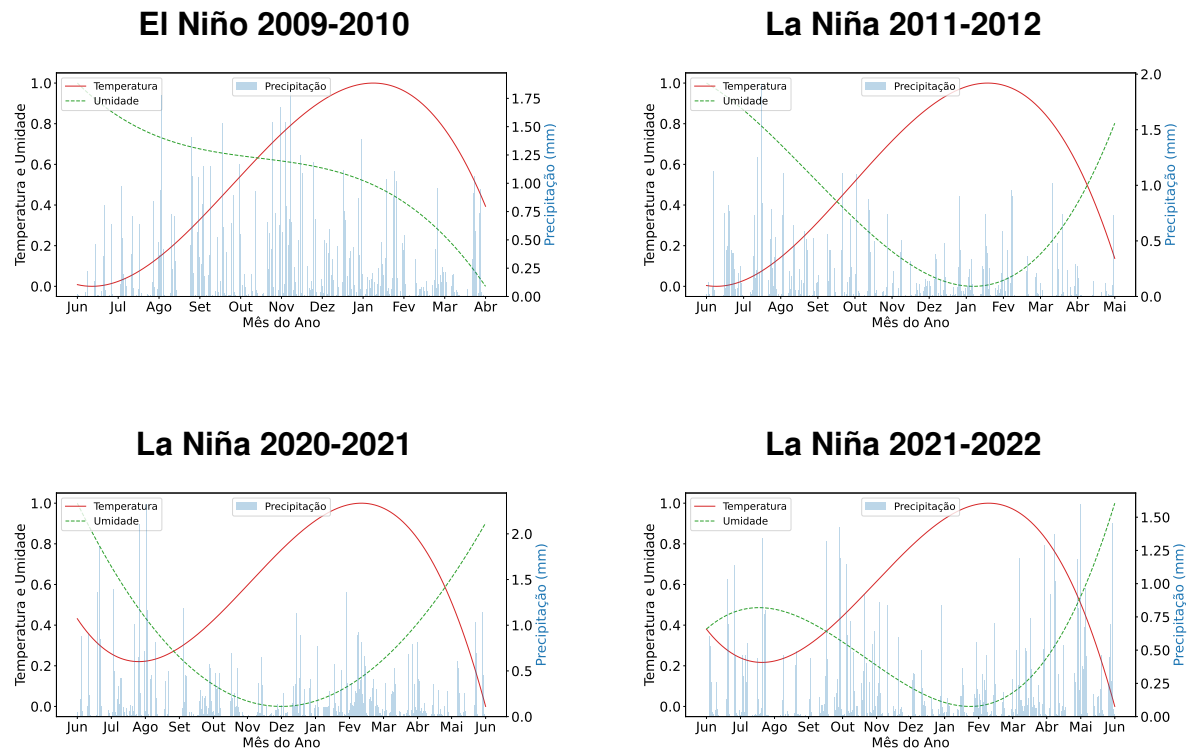
Figura 13 – Médias dos elementos climáticos



Fonte: Do autor.

- **ENOS moderado**

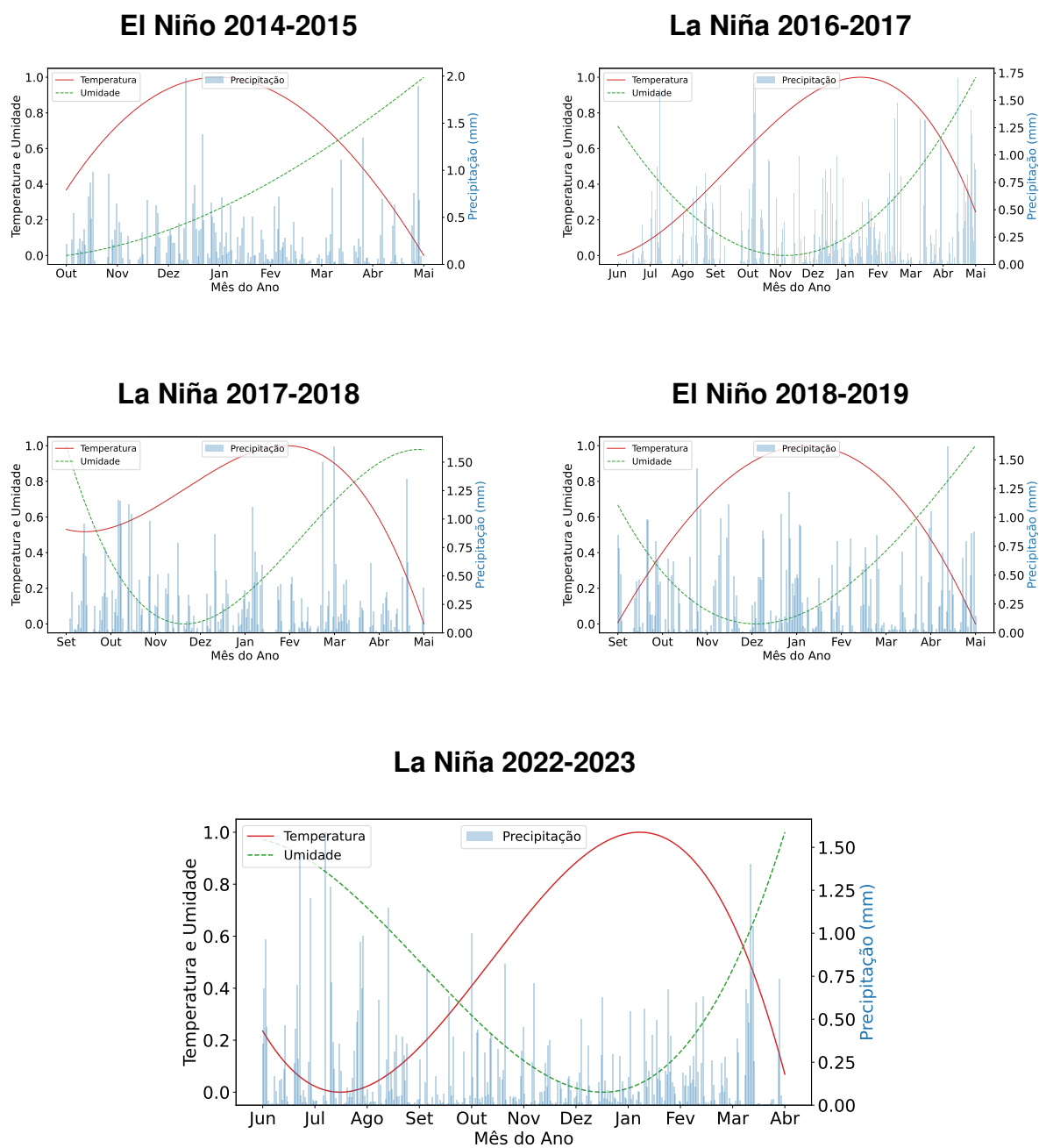
Figura 14 – Médias dos elementos climáticos



Fonte: Do autor.

- **ENOS fraco**

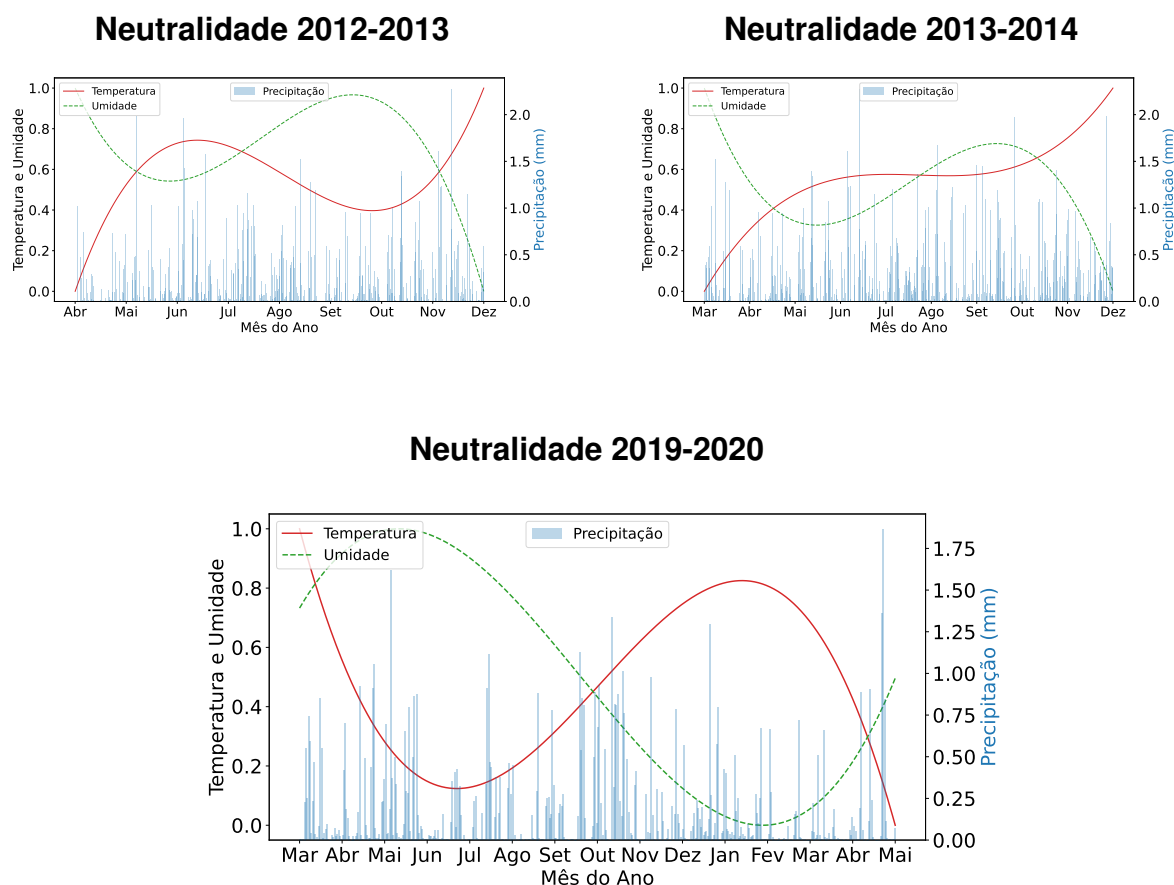
Figura 15 – Médias dos elementos climáticos



Fonte: Do autor.

- **Neutralidade**

Figura 16 – Médias dos elementos climáticos



Fonte: Do autor.

Em ambos os fenômenos de todas as intensidades, bem como o período de neutralidade, há uma relação inversa entre a temperatura e a umidade relativa do ar. Nos períodos em que a temperatura aumenta, a umidade tende a diminuir, e vice-versa. Essa relação pode ser observada claramente nos gráficos, em que os picos de temperatura coincidem com os valores de umidade. No caso de El Niño, a variação da umidade é um pouco mais acentuada, enquanto em La Niña, a variação é mais gradual. Com isso, é evidenciada a dinâmica complexa de como cada fenômeno climático afeta as condições atmosféricas de forma distinta, apesar de seguirem um padrão semelhante de interação entre temperatura e umidade.

De modo geral, o ENOS fase positiva no RS, tem maior pluviosidade, além de uma temperatura mais elevada durante todo o período, conforme a literatura; por outro lado, a fase negativa, ocorre o contrário: temperaturas mais amenas. Embora não haja uma regra clara acerca da definição do ciclo, SILVA et al., 2012; Climate Prediction Center, 2024 destacam que o seu pico de intensidade ocorre durante os meses de dezembro

a abril.

• Comparação ENOS

Para uma análise mais detalhada, considera-se o intervalo de 1° de dezembro a 30 de abril e compara-se, em relação à temperatura e umidade, de acordo com a sua magnitude. Sendo assim, a tabela 10 mostra quais foram os fenômenos de análise.

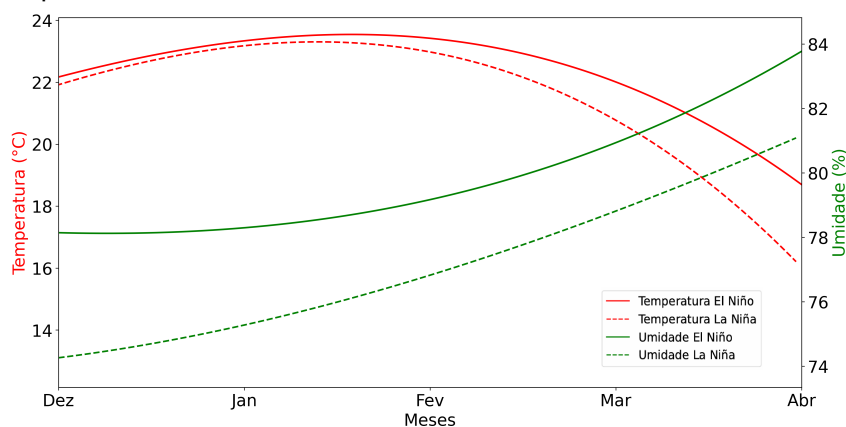
Tabela 10 – Intensidade dos eventos de El Niño e La Niña

Intensidade	El Niño	La Niña
Forte	2023–2024	2010–2011
Moderado	2009–2010	2011–2012
Fraco	2014–2015	2016–2017

Fonte: Do autor.

Após a execução do código, obteve-se os gráficos dispostos na Figuras 17, 18 e 19

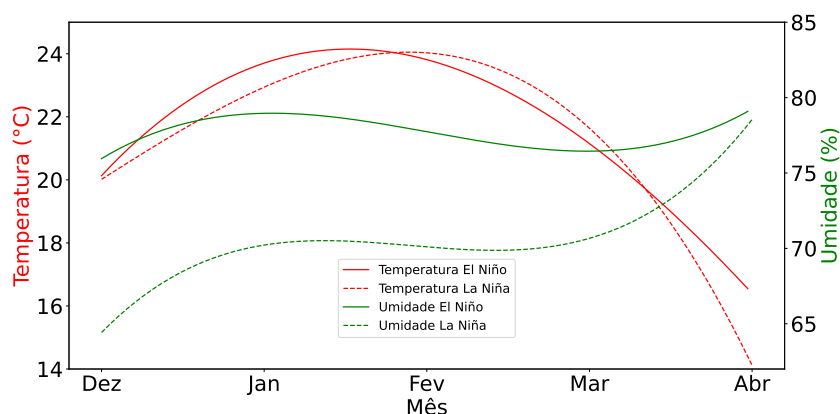
Figura 17 – Comparativo ENOS forte



Fonte: Do autor.

Observa-se que a temperatura e umidade em El Niño se mantiveram acima do La Niña em todo o período de análise. A maior diferença é observada na umidade no início de dezembro, respectivamente.

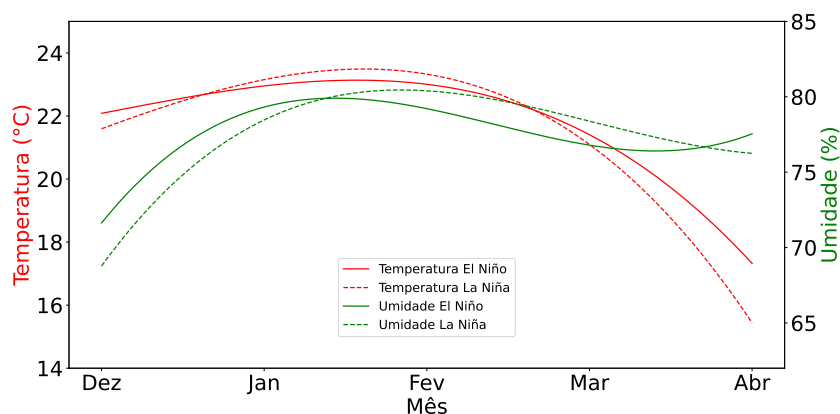
Figura 18 – Comparativo ENOS moderado



Fonte: Do autor.

Referente ao ENOS de magnitude moderada, a temperatura em ambas fases teve pouca variação quando comparada. Por outro lado, a umidade teve uma diferença de aproximadamente 15%, com o El Niño, mantendo-se sempre acima de La Niña.

Figura 19 – Comparativo ENOS fraco



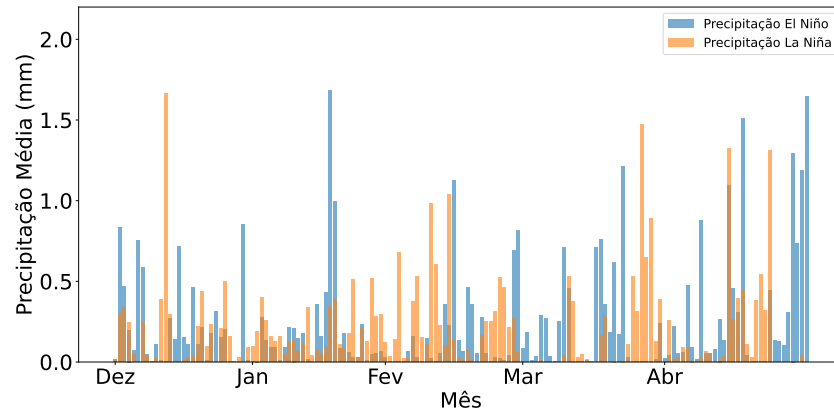
Fonte: Do autor.

No fenômeno de intensidade fraca, a variância de temperatura e umidade foi inferior aos outros fenômenos (forte e moderado), mostrando que a influência dos fenômenos não diferenciam-se muito nesta intensidade.

Desta forma, as médias obtidas acerca da temperatura e umidade estão de acordo com SUL, 2020, 2024, quando trazem que a temperatura média anual do estado é de 14° a 22° e a umidade variando de 61% a 91%.

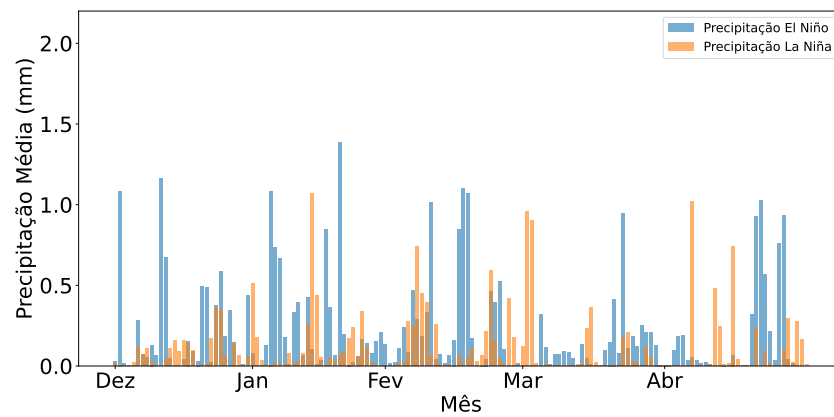
Para uma melhor visualização, foi executado o código apenas para precipitação, tanto diária, como mensal, destacando os períodos com maior precipitação.

Figura 20 – Precipitação diária ENOS forte



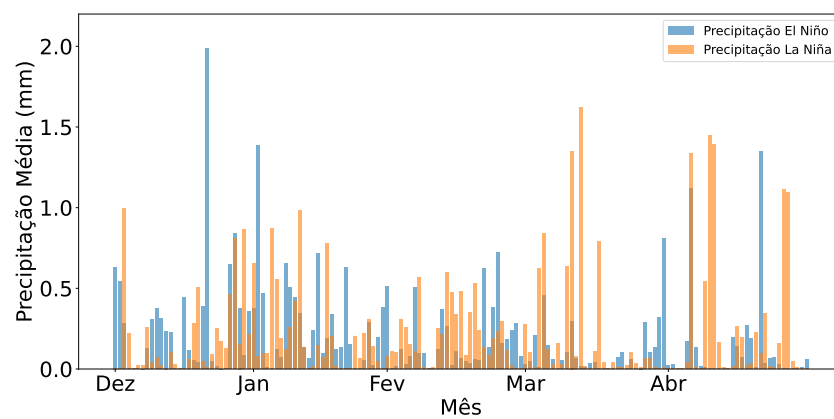
Fonte: Do autor.

Figura 21 – Precipitação diária ENOS moderado



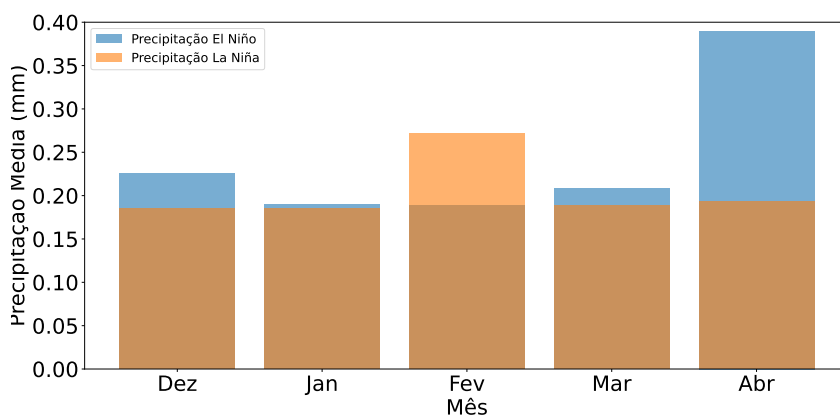
Fonte: Do autor.

Figura 22 – Precipitação diária ENOS fraco



Fonte: Do autor.

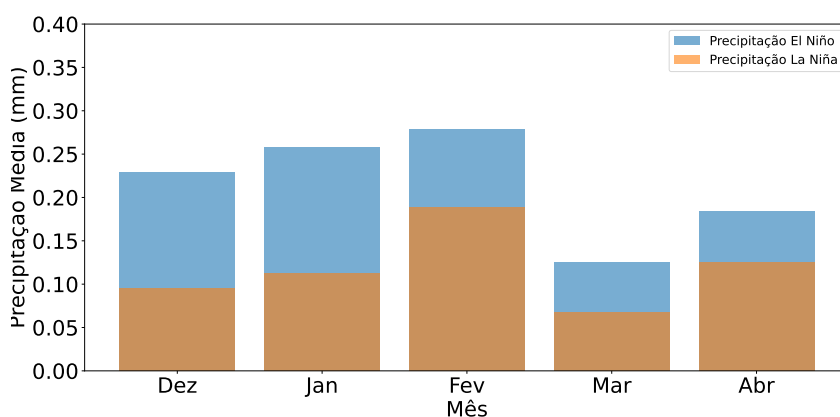
Figura 23 – Precipitação média mensal ENOS forte



Fonte: Do autor.

A média de precipitação durante o El Niño de magnitude forte foi maior em 80% dos meses estudados, exceto no mês de fevereiro, quando a precipitação média do La Niña foi maior.

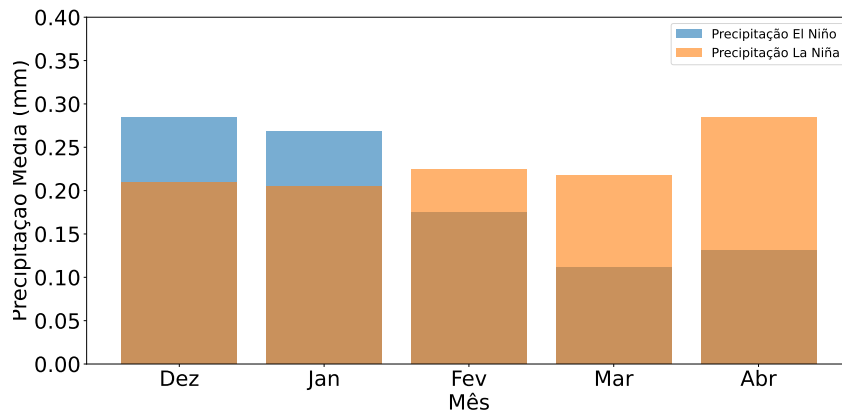
Figura 24 – Precipitação média mensal ENOS moderado



Fonte: Do autor.

No ENOS de intensidade moderada, a média de precipitação para a fase positiva, foi superior em todos os meses, corroborando a literatura.

Figura 25 – Precipitação média mensal ENOS fraco



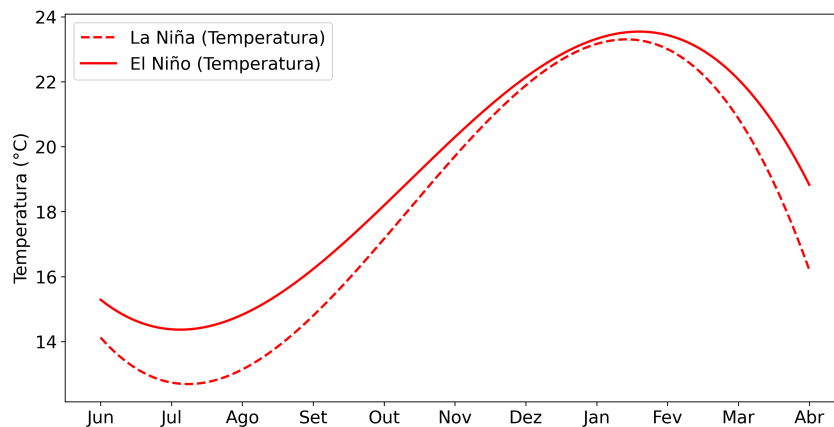
Fonte: Do autor.

Por fim, para o ENOS de força menor, a precipitação durante a fase negativa foi superior de fevereiro a abril.

4.3 Percepções do modelo proposto

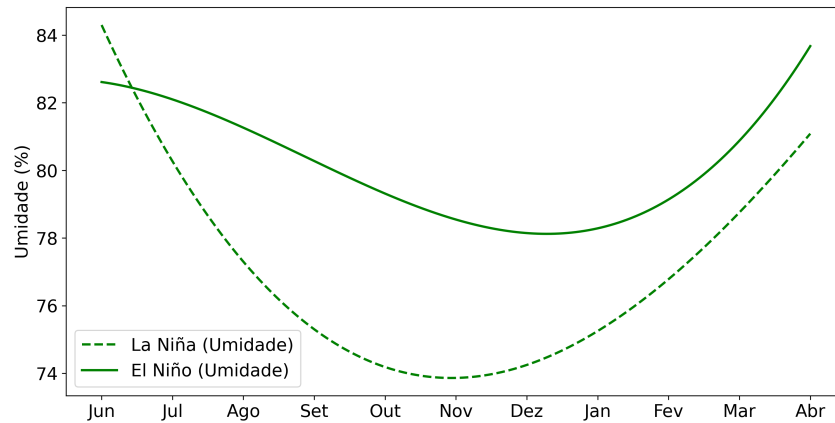
As funções $Temp(t)$, $Um(t)$ e $Prec(t)$, ajustadas a partir das curvas, foram utilizadas para o período de 1º de junho de 2010 a 30 de abril de 2011 e de 1º de junho de 2023 a 30 de abril de 2024, correspondendo às fases fortes do ENOS, La Niña e El Niño, respectivamente, obtendo os gráficos das Figuras 26, 27 e 28.

Figura 26 – Temperatura média ao longo do ano.



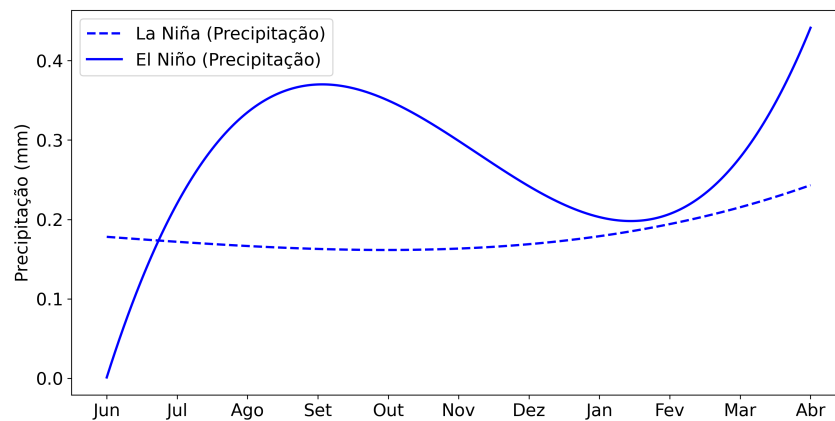
Fonte: Do autor.

Figura 27 – Umidade média ao longo do ano.



Fonte: Do autor.

Figura 28 – Precipitação média ao longo do ano.



Fonte: Do autor.

As funções polinomiais ajustadas para as curvas das variáveis climáticas utilizadas no estudo são apresentadas a seguir:

- Para El Niño

$$Temp(t) = -1.82876360 \cdot 10^{-6} \cdot t^3 + 8.02123609 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 5.34619482 \cdot 10^{-2} \cdot t + 15.3396611$$

$$Um(t) = 7.78861586 \cdot 10^{-7} \cdot t^3 - 2.25551012 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 8.39859589 \cdot 10^{-3} \cdot t + 82.6215852$$

$$Prec(t) = 1.10683920 \cdot 10^{-7} \cdot t^3 - 5.84225494 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 8.50996199 \cdot 10^{-3} \cdot t - 0.0750726291$$

- Para La Niña

$$Prec(t) = -2.42915525 \cdot 10^{-6} \cdot t^3 + 1.05682935 \cdot 10^{-3} \cdot t^2 - 7.59764311 \cdot 10^{-2} \cdot t + 14.1973456$$

$$Um(t) = -3.97559771 \cdot 10^{-7} \cdot t^3 + 5.18243282 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 1.38776580 \cdot 10^{-1} \cdot t + 84.4375002$$

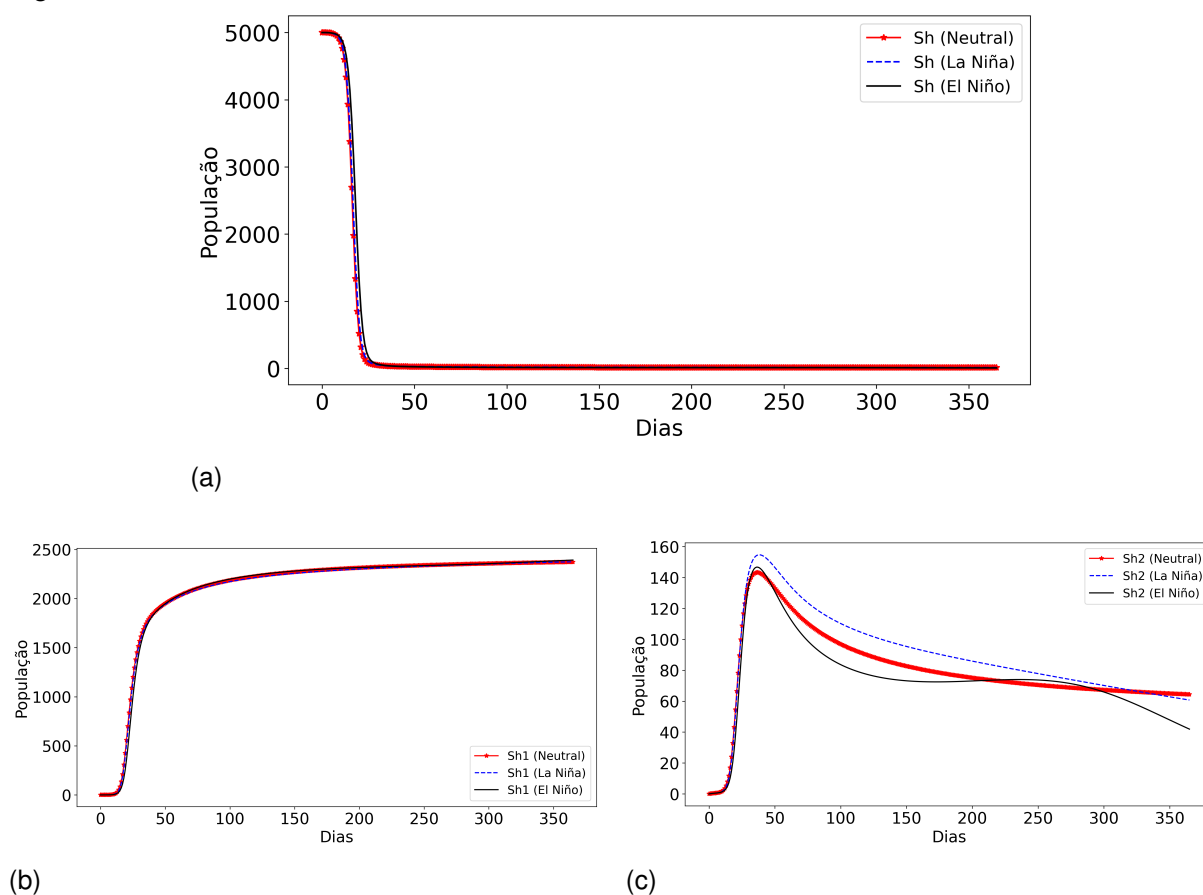
$$Prec(t) = 3.22507079 \cdot 10^{-9} \cdot t^3 + 8.77388043 \cdot 10^{-8} \cdot t^2 - 1.94721236 \cdot 10^{-4} \cdot t + 0.178289191$$

Os parâmetros utilizados nas simulações foram os mesmos utilizados para a validação, contidos na Tabela 8, bem como as condições iniciais, dispostas na Tabela 9.

4.4 Simulação do modelo

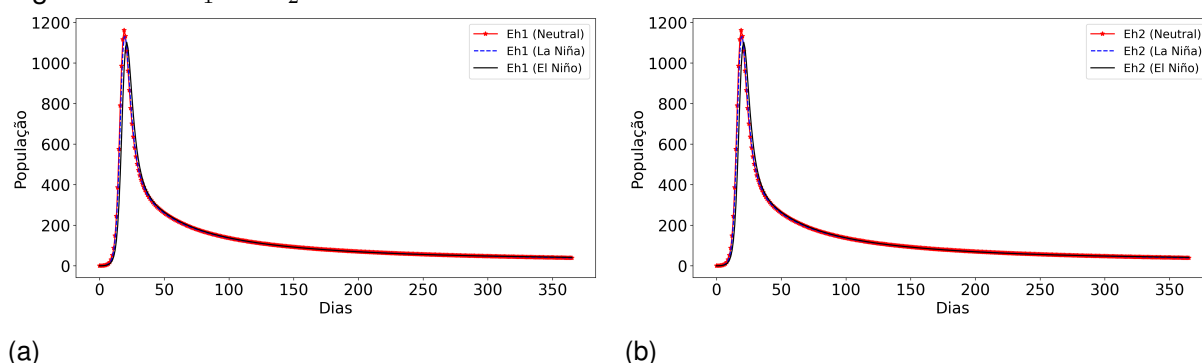
A seguir, são dispostas as imagens que contêm os gráficos sob a influência dos elementos climáticos em ambas as populações.

Figura 29 – Sh , Sh_1 e Sh_2 .



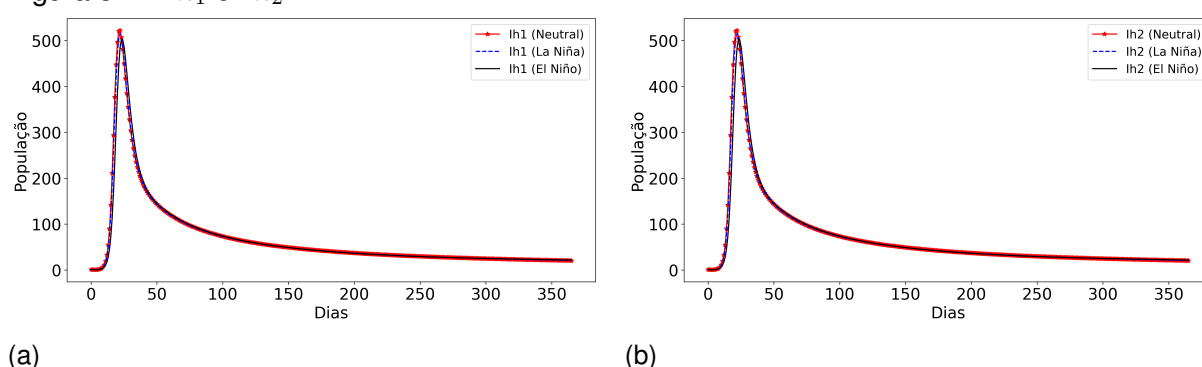
Fonte: Do autor.

A população suscetível (Sh), representada na Figura 29a, apresenta uma queda abrupta no início do período, indicando um rápido processo de infecção. Concomitantemente, observa-se na Figura 29b um aumento na população suscetível à dengue clássica (Sh_1), que atinge um pico em torno de 2500 indivíduos. Já os suscetíveis à forma grave da doença (Sh_2), mostrados na Figura 29c, atingem um pico em aproximadamente 50 dias em todos os cenários climáticos (Neutralidade, El Niño e La Niña), seguido por um declínio gradual da população, refletindo a dinâmica da progressão da doença.

Figura 30 – Eh_1 e Eh_2 

Fonte: Do autor.

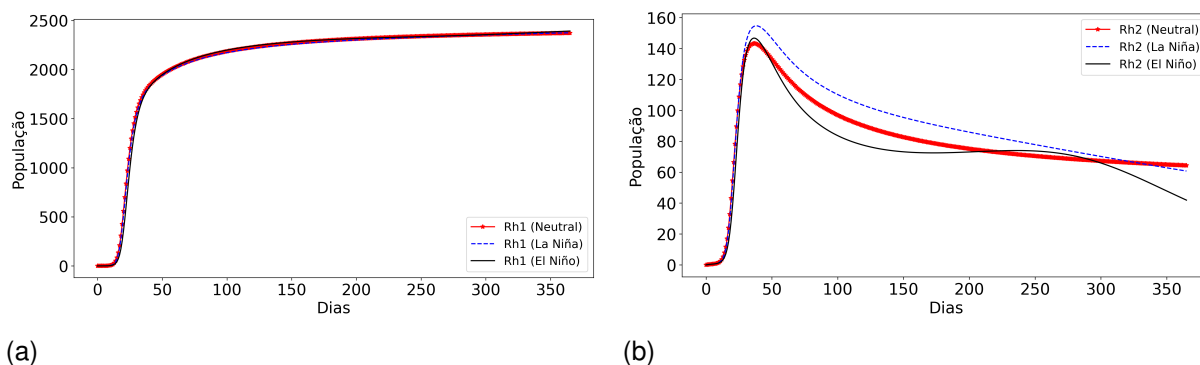
A Figura 30 apresenta a evolução dos indivíduos expostos (Eh) às duas formas da doença, sendo a dengue clássica (Eh_1) representada na Figura 30a e a dengue grave (Eh_2), Figura 30b. Em ambos os casos, observa-se que a fase inicial é a mais crítica, com um pico de aproximadamente 500 indivíduos expostos. Esse comportamento sugere uma rápida disseminação da infecção logo no início do período analisado.

Figura 31 – Ih_1 e Ih_2 

Fonte: Do autor.

De maneira semelhante, na Figura 31, os picos de Ih_1 e Ih_2 , contidos nas Figuras 31a e Figura 31b, respectivamente, indicam momentos críticos da infecção, reforçando que a fase inicial é a mais preocupante. O comportamento das curvas sugere que, após esse pico inicial, há uma redução progressiva no número de indivíduos infectados, acompanhando o declínio dos expostos. Esse padrão indica uma rápida progressão da doença, possivelmente influenciada pela dinâmica de transmissão e resposta imunológica da população.

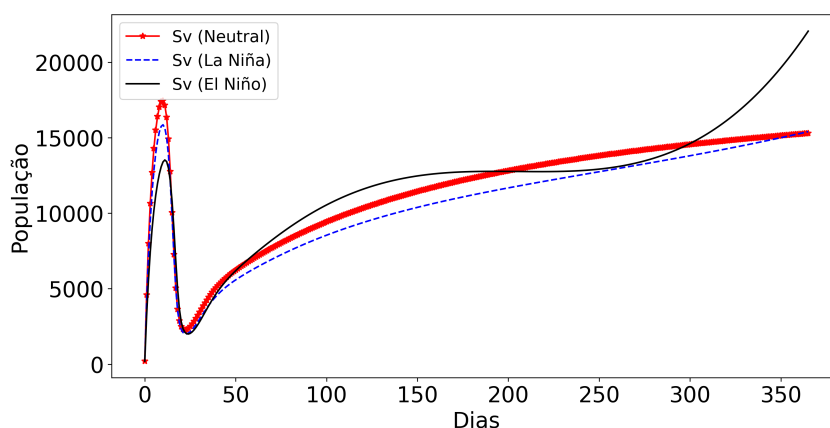
A Figura 32 apresenta a dinâmica dos indivíduos recuperados da dengue clássica (Figura 32a) e da forma grave da doença (Figura 32b). Observa-se que a recuperação ocorre em diferentes velocidades, dependendo da condição climática. Na Figura 32a, a estabilização dos recuperados ocorre em torno dos 200 dias, indicando que pratica-

Figura 32 – Rh_1 e Rh_2 

Fonte: Do autor.

mente toda a população suscetível a essa modalidade da doença se recuperou.

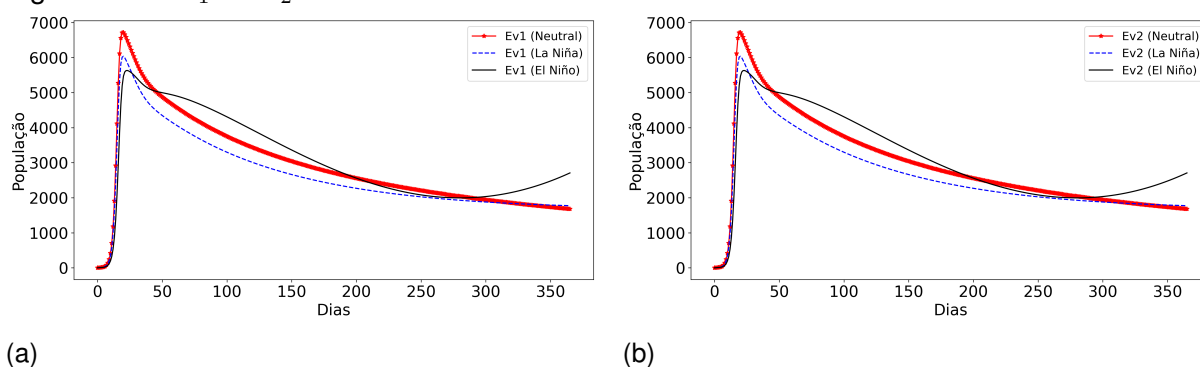
Já na Figura 32b, a recuperação segue um padrão distinto: em vez de uma estabilização clara, há um comportamento oscilatório, com crescimento e declínio ao longo do período analisado. Esse padrão pode estar relacionado a fatores como reinfecções, imunidade temporária ou variações na transmissão da doença ao longo do tempo.

Figura 33 – S_v 

Fonte: Do autor.

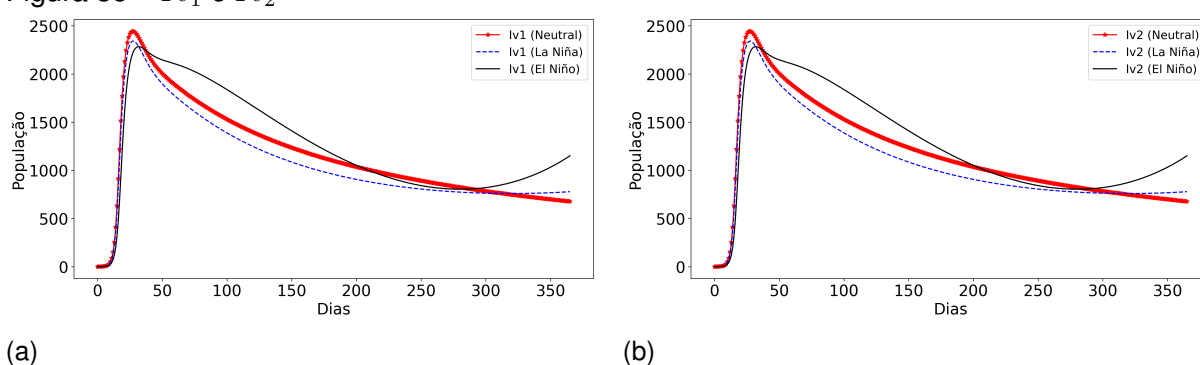
Na Figura 33, nota-se uma queda inicial abrupta na população suscetível de vetores logo nos primeiros dias, após essa queda, observa-se um crescimento gradual da população ao longo do tempo. O cenário de El Niño mostra um crescimento mais acelerado dos suscetíveis após a queda inicial em comparação aos outros cenários. A condição de La Niña apresenta valores ligeiramente inferiores ao longo do período, enquanto a condição neutra fica em posição intermediária.

Em relação à população exposta, Figura 34, constata-se um padrão semelhante para DC (Figura 34a) e DG (Figura 34b): um rápido crescimento inicial seguido por uma queda gradual. O pico ocorre logo nos primeiros dias e atinge valores próximos

Figura 34 – Ev_1 e Ev_2 

Fonte: Do autor.

de 7000 indivíduos. O cenário de El Niño mantém uma população de expostos maior por mais tempo em comparação aos outros cenários. A condição de La Niña resulta em uma queda mais acentuada na população exposta ao longo do tempo. A condição Neutra novamente aparece como um caso intermediário entre os dois extremos.

Figura 35 – Iv_1 e Iv_2 

Fonte: Do autor.

O comportamento dos vetores infectados, contidos na Figura 35, segue um padrão semelhante ao dos expostos: crescimento inicial seguido por um declínio gradual. O pico da infecção ocorre cedo no processo epidemiológico, com valores próximos de 2500 indivíduos. O cenário de El Niño mantém uma maior quantidade de vetores infectados por um período mais prolongado. O cenário de La Niña apresenta uma queda mais rápida da população infectada. Assim como nos gráficos anteriores, a condição Neutra se mantém em um comportamento intermediário.

4.5 Análise

No compartimento dos humanos, há uma fase inicial de variação brusca nas populações, seguida de uma estabilização ao longo do tempo. Embora as diferenças entre

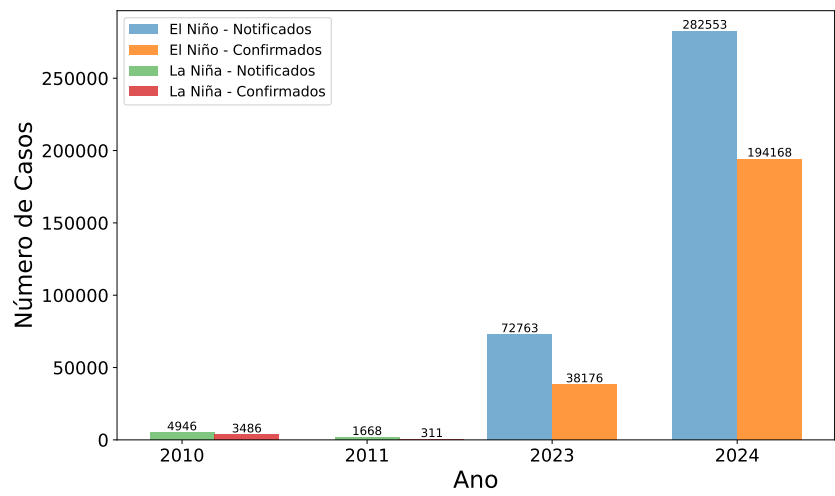
as condições Neutra, La Niña e El Niño sejam visíveis, elas parecem relativamente pequenas na maioria dos compartimentos do modelo. No entanto, essas pequenas variações podem ter impactos epidemiológicos significativos, especialmente na dinâmica da transmissão da doença.

A expectativa era de que a condição Neutra, representando o modelo sem a influência climática, correspondesse aproximadamente à média dos cenários climáticos, com o El Niño resultando em valores superiores e La Niña, inferiores. No entanto, essa relação não se mantém em todos os compartimentos do modelo. Isso se deve à não linearidade da dinâmica populacional, onde a interação entre os diferentes fatores climáticos gera comportamentos emergentes que nem sempre seguem um padrão linear esperado.

No compartimento dos vetores, identifica-se um padrão consistente: uma fase inicial de variação intensa seguida de estabilização ao longo do tempo. A influência do clima sobre a dinâmica vetorial é evidente, especialmente no tempo de permanência das populações expostas e infectadas. O El Niño parece favorecer um aumento na quantidade de vetores suscetíveis, expostos e infectados ao longo do tempo, enquanto La Niña resulta em uma redução mais acentuada dessas populações. Esse comportamento sugere que o El Niño pode estar associado a um aumento na transmissão da doença, enquanto La Niña pode ter um efeito oposto, reduzindo a propagação.

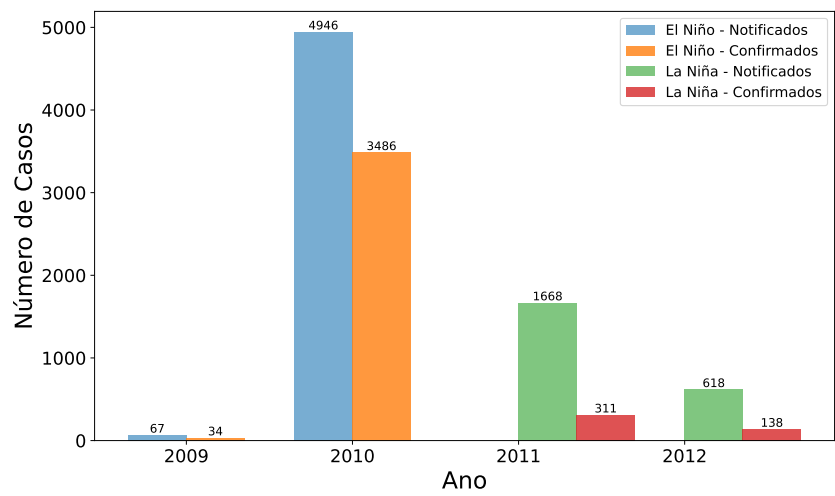
A próxima etapa da análise envolve associar a incidência da dengue às fases do ENOS. Como não há disponibilidade de dados epidemiológicos semanais antes de 2015, a análise foi realizada com os casos confirmados e notificados anualmente, de 2015 até o presente momento. Esses dados foram obtidos no Painel de Casos de Dengue no Rio Grande do Sul. Para os anos anteriores a 2015, a fonte utilizada foi o Informativo Epidemiológico de Arboviroses de 2023, abrangendo as semanas epidemiológicas 01 a 52.

Figura 36 – Casos confirmados e notificados: ENOS forte



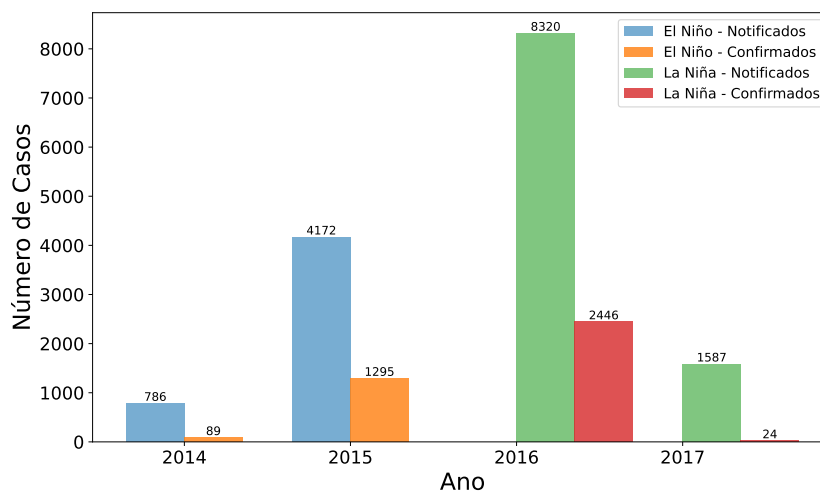
Fonte: Do autor.

Figura 37 – Casos confirmados e notificados: ENOS moderado



Fonte: Do autor.

Figura 38 – Casos confirmados e notificados: ENOS fraco



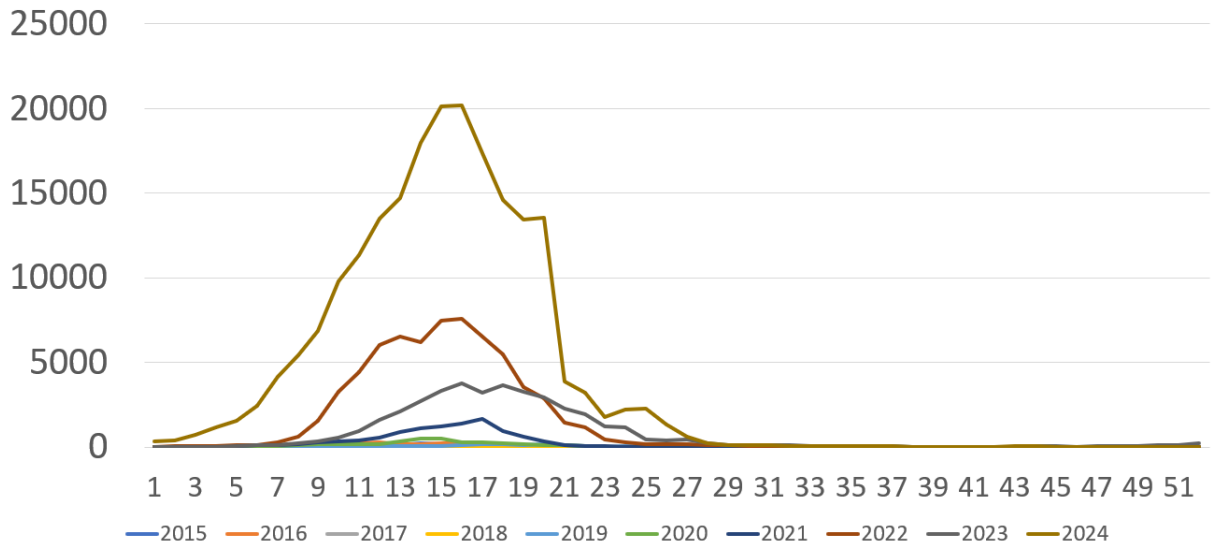
Fonte: Do autor.

O maior número de casos ocorre durante a fase positiva do ENOS, porém, o de intensidade fraca, a fase negativa ocorreu mais casos, ao que tudo indica, é devido a precipitação ter sido mais elevada durante este fenômeno, conforme a Figura 25. Além disso, 2016 foi considerado um dos anos mais quentes registrados desde 1961 (Instituto Nacional de Meteorologia, 2023).

Analisando os casos confirmados por semana epidemiológica, é possível afirmar, que nos anos de 2015 a 2024, o aumento dos casos se inicia no final de cada ano, aproximadamente na semana 49, atingindo seu pico entre a semana 15 e 17, do ano seguinte. Após isso, há um decaimento nos casos. O intervalo entre a semana 49 até a semana 17, coincide com os meses de dezembro até abril na qual foi realizada a análise, seguindo o Climate Prediction Center.

Com isso, tem-se as médias e a análise subsequente, coerentes com os dados reais da dengue, como mostra a Figura 39.

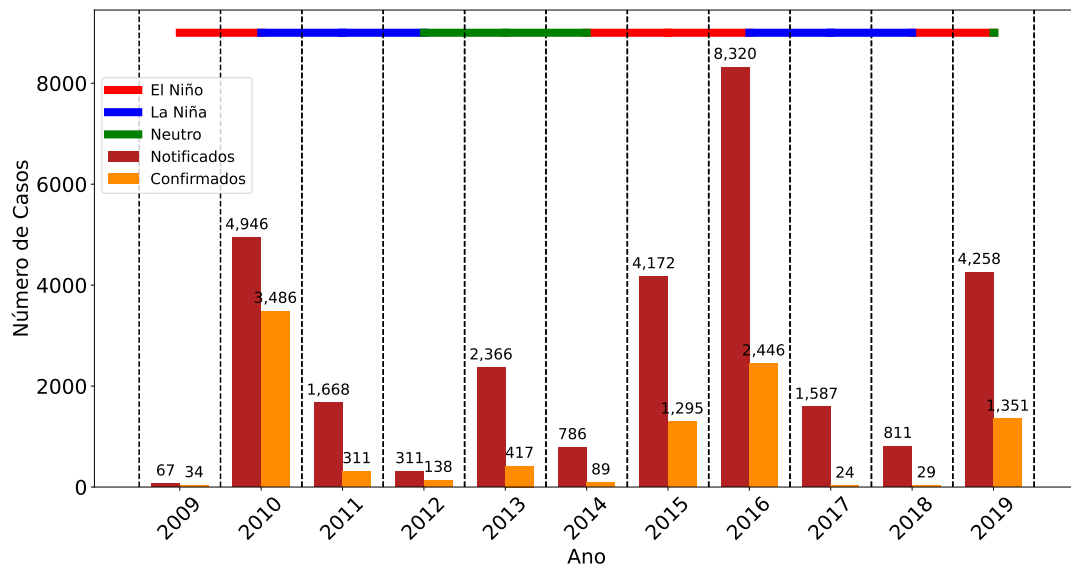
Figura 39 – Casos confirmados por semana epidemiológica



Fonte: SES/RS.

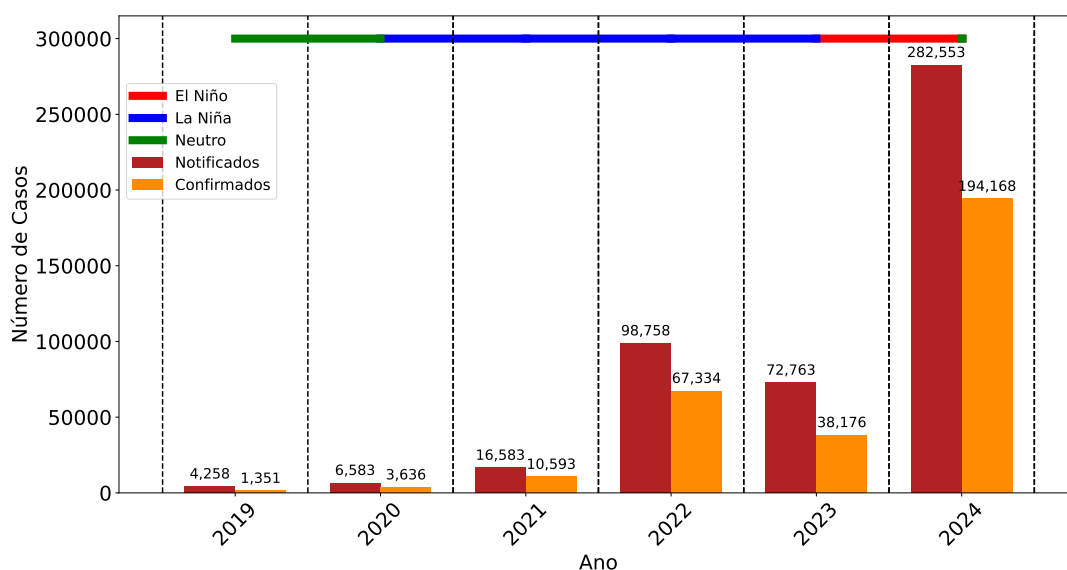
Finalizando a análise dos dados reais, examinou-se a janela temporal 2009-2024, destacando os períodos de ocorrência do ENOS. Optou-se por separar, pois, ao considerar o conjunto total, os anos com menor número de casos não seriam facilmente visíveis.

Figura 40 – Janela temporal 2009-2019.



Fonte: Do Autor.

Figura 41 – Janela temporal 2019-2024.



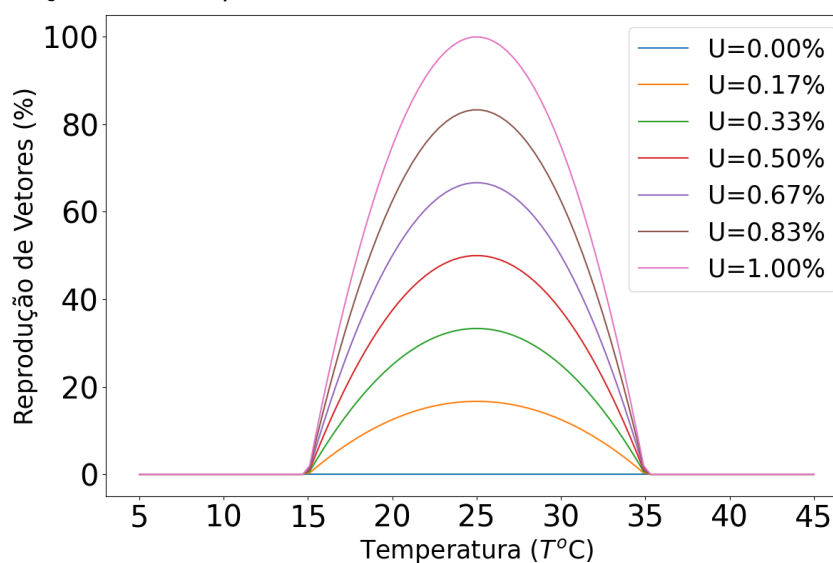
Fonte: Do Autor.

Na Figura 40, fica visível que há um padrão, em anos de El Niño, com um aumento no número de casos notificados e confirmados, enquanto que, em La Niña, há uma redução. Por outro lado, na Figura 41, esse padrão não é mais visível até 2022, visto que neste ano foi o segundo maior ano em casos confirmados, mesmo sendo um período de La Niña.

Ainda que os intervalos de temperatura não sejam os ideais para o desenvolvimento dos vetores, que preferem temperaturas entre 22°C e 32°C, e para a longevidade e fecundidade dos adultos, que é mais favorável entre 22°C e 28°C (BESERRA et al., 2009), as condições durante El Niño foram mais favoráveis ao desenvolvimento da dengue em comparação com La Niña.

A Figura 42 ilustra a relação entre umidade e temperatura na reprodução do vetor, destacando a associação bem documentada entre esses dois fatores.

Figura 42 – Relação entre temperatura e umidade



Fonte: Do Autor.

Isto reforça ainda mais essa correlação entre umidade e temperatura, destacando que, embora a faixa de temperatura ótima para a proliferação dos mosquitos esteja entre 15°C e 35°C, é o aumento da umidade que acelera consideravelmente esse processo, atingindo seu pico com 25°C e 100% de umidade.

O paralelo entre ambas as metodologias demonstra uma forte concordância, pois ao serem analisados os gráficos das médias reais de temperatura, umidade e precipitação do ENOS de intensidade forte, juntamente do modelo epidemiológico, constatata-se que para esse fenômeno (EL), há de fato um aumento na presença dos vetores e humanos infectados.

Observou-se que um aumento ou um declínio nos registros reais de casos de dengue durante os eventos do ENOS, ao relizar a comparação das metodologias com os registros reais de casos de dengue foram consistente e coerente, em conformidade tanto com a literatura científica quanto com os dados fornecidos pelo INMET e pela SES/RS.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Este trabalho investigou a relação entre o surto de dengue no Rio Grande do Sul e os eventos climáticos associados ao ENOS, por meio de um modelo epidemiológico SEIRS aprimorado. O modelo proposto incorpora elementos climáticos específicos da região, permitindo uma análise mais realista da dinâmica da doença.

Os resultados indicam que o modelo proposto é consistente com os dados do INMET, sendo uma inovação ao incorporar os elementos climáticos específicos do RS. Os mesmos corroboram com estudos anteriores ao mostrar a associação da temperatura, precipitação e umidade ao crescimento nos casos de dengue, fornecendo informações específicas que contribuem para a pesquisa epidemiológica na região.

Além de contribuir para a literatura científica, este estudo tem implicações práticas para a gestão de saúde pública. A aplicação do modelo permite que gestores antecipem surtos e implementem medidas preventivas, como campanhas de controle vetorial e promoção da vacinação. A continuidade e ampliação da cobertura vacinal, já disponível no Brasil, são fundamentais para reduzir o impacto da dengue na população. Embora o modelo tenha mostrado bom desempenho, ele não incorporou outros fatores relevantes, como o comportamento humano, urbanização e mutações virais, que também podem influenciar a disseminação da doença. Além disso, as análises foram realizadas com base em dados históricos. Estudos futuros poderiam incluir projeções climáticas para avaliar os impactos da mudança climática a longo prazo.

Recomendam-se que em pesquisas, bem como em trabalhos futuros, a exploração da aplicação do modelo em outras regiões e em outros contextos epidemiológicos, venham estabelecer em nosso modelo aprimorado o balanço das equações do nosso sistema. Também sugere-se realizar simulações com dados reais de cidades de pequeno, médio e grande porte, além de adicionar outros parâmetros climatológicos que possam influenciar a ecologia do vetor ou sua disseminação para diferentes áreas, como por meio dos ventos.

REFERÊNCIAS

Agência Brasil. **Entenda como funciona a vacina contra dengue ofertada pelo SUS**. Acesso em: 27 set. 2024.

Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). **Vacina da Dengue terá alteração de bula**. Acesso em: 27 set. 2024.

ALHAJ, M. Mathematical model for dengue fever with vertical transmission and control measures. **Journal of Mathematical Analysis and Modeling**, v.4, p.44–58, 2023.

ALMEIDA, F. L.; TEIXEIRA, E. Modelagem epidemiológica determinística sobre dados de hiv/aids no município de castanhal-pa entre os anos de 2000 e 2013. **Revista Tecnologia**, v.43, p.10, 2023.

ALMEIDA, G.; SANTOS, F. Modelo matemático espaço-discreto para análise de propagação da dengue. **C Q D - Revista Eletrônica Paulista De Matemática**, v.7, p.78–87, 2016.

ALQAHTANI, R. Dynamics of a model of coronavirus disease with fear effect, treatment function, and variable recovery rate. **Mathematics**, v.12, n.11, p.1678, 2024.

AMORIM, M. P. **Modelos Matemáticos e Computacionais da Dengue via Equações Diferenciais Ordinárias com Estratégias de Controle**. 2020. 123p. Dissertação (mestrado) — Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda. Acesso em: 27 set. 2024.

ARAÚJO, R. A. F.; UCHÔA, N. M.; ALVES, J. M. B. Influência de variáveis meteorológicas na prevalência das doenças transmitidas pelo mosquito aedes aegypti. **Revista Brasileira De Meteorologia**, v.34, p.439–447, 2019.

BAI, L.; MORTON, L.; LIU, Q. Climate change and mosquito-borne diseases in china: a review. **Globalization and Health**, v.9, 2013.

BARROSO, L. C.; ARAÚJO BARROSO, M. M. de; FILHO, F. F. C.; CARVALHO, M. L. B. de; MAIA, M. L. **Cálculo Numérico com Aplicações**. Professores-Assistentes

do Departamento de Ciência da Computação da Universidade Federal de Minas Gerais, <https://brogdomonzao.wordpress.com/wp-content/uploads/2011/10/cc3a11culo-numc3a9rico-com-aplicac3a7c3b5es-lec3b4nidas-barroso-2ed.pdf>.

BERMANN, T.; BAETHGEN, L. F.; GREGIANINI, T. S.; GODINHO, F.; BARCELLOS, R. B.; RUIVO, A. P.; BAUERMAN, M.; SELAYARAN, T. M.; SANTOS, F. M. dos; SCHÖNERER, J. A.; MÖLLMANN, B.; MARTINY, F. L.; LAGRANHA, V. L.; OLIVEIRA, L. F. V. de; VEIGA, A. G. da; ZOLET, A. C. T.; WALLAU, G. L.; SALVATO, R. S. Simultaneous circulation and coinfection of dengue clades and serotypes in southern brazil. , 2024.

BESERRA, E. B.; FERNANDES, C.; SILVA, S. A. d. O.; SILVA, L. A. d.; SANTOS, J. W. d. Efeitos da temperatura no ciclo de vida, exigências térmicas e estimativas do número de gerações anuais de *Aedes aegypti** (Diptera, Culicidae). **Iheringia. Série Zoologia**, Porto Alegre, v.99, p.142–148, 2009. Acesso em: 8 ago. 2024.

CAI, W.; MCPHADEN, M. J.; GRIMM, A. M.; RODRIGUES, R. R.; TASCHETTO, A. S.; GARREAUD, R.; DEWITTE, B.; POVEDA, G.; HAM, Y.; SANTOSO, A.; NG, B.; ANDERSON, W.; WANG, G.; GENG, T.; JO, H.; MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; OSMAN, M.; LI, S.; WU, L.; KARAMPERIDOU, C.; TAKAHASHI, K.; VERA, C. Climate impacts of the el niño–southern oscillation on south america. **Nature Reviews Earth Amp; Environment**, v.1, p.215–231, 2020.

CALDWELL, J.; LABEAUD, A.; LAMBIN, ; STEWART-IBARRA, A.; NDENGA, B.; MUTUKU, F.; KRYSTOSIK, A.; AYALA, E.; BORBOR-CÓRDOVA, M.; DAMOAH, R.; GROSSI-SOYSTER, E.; HERAS, F.; NGUGI, H.; RYAN, S.; SHAH, M.; SIPPY, R.; MORDECAI, E. **Climate predicts geographic and temporal variation in mosquito-borne disease dynamics on two continents.**

CATÃO, R. d. C.; GUIMARÃES, R. B. Mapeamento da reemergência do dengue no brasil - 1981/82-2008. **Hygeia - Revista Brasileira De Geografia Médica E Da Saúde**, v.7, p.173–185, 2011.

CAVALCANTE, E. M. C. Aplicação do Modelo SIS: Estudo de um Surto de Meningite Meningocócica na Cidade de Caruaru. , 2020. A Engenharia de Produção e as novas tecnologias produtivas: indústria 4.0, manufatura aditiva e outras abordagens avançadas de produção.

Centers for Disease Control and Prevention (CDC). **Dengue**. Acessado em 08/04/23, <https://www.cdc.gov/dengue/index.html>.

Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. **Portal ENOS**. Acessado em: 29 dez. 2024.

Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. **El Niño-Oscilação Sul (ENOS)**. Accessed: 21-09-2024.

CIRINO, S. **Modelo epidemiológico SEIR de transmissão do dengue em redes de populações acopladas**. 2003. Dissertação de Mestrado — Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre. Programa de Pós-Graduação em Matemática Aplicada.

CLAAR, D. et al. Global patterns and impacts of El Niño events on coral reefs: a meta-analysis. **Plos One**, v.13, n.2, p.e0190957, 2018.

Climate Prediction Center. **El Niño-Southern Oscillation (ENSO) FAQ**. Accessed: 21-09-2024.

COLLISCHONN, E.; MAIO, B. M.; BRANDOLT, R. Variabilidade da dengue e do clima em porto alegre/rs de 2012 a 2017. **Revista Brasileira De Geografia Física**, v.12, p.2080, 2019.

Confederação Nacional de Municípios. **Brasil tem 2,2 mil mortes por dengue e o cenário pode piorar por conta do desastre ocorrido no RS**. Acesso em: 27 set. 2024.

CONITEC. **Ministério da Saúde incorpora vacina contra a dengue no SUS**. Acesso em: 27 set. 2024.

DOLBEAULT, J.; TURINICI, G. Heterogeneous social interactions and the COVID-19 lockdown outcome in a multi-group seir model. **Mathematical Modelling of Natural Phenomena**, v.15, p.36, 2020.

eDisciplinas USP. **Glossário de Termos Epidemiológicos**. Acessado em 16 de junho de 2024.

FERREIRA, H.; NÓBREGA, R.; BRITO, P.; FARIAS, J.; AMORIM, J.; MOREIRA, E.; LUIZ, W. Impacts of el niño southern oscillation on the dengue transmission dynamics in the metropolitan region of recife, brazil. **Revista Da Sociedade Brasileira De Medicina Tropical**, v.55, 2022.

FERREIRA, L. A. F.; PRATES, D. B.; SILVA, J. M.; C, J. Estudo da influenza a(h1n1) aplicada ao modelo sirs. **Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics**, 2014.

Fiocruz - Instituto de Comunicação e Informação Científica e Tecnológica em Saúde (ICICT). Vetores e Clima. **Clima e Saúde**, 2024. Acessado em: 14 de novembro de 2024.

FIOCRUZ. **Como é o ciclo de vida do mosquito *Aedes aegypti*?** Disponível em <https://portal.fiocruz.br/pergunta/como-e-o-ciclo-de-vida-do-mosquito-aedes-aegypti>. Acesso em 08/04/2023.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A. Influência do El Niño Oscilação Sul Sobre a Precipitação Pluvial no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.1, p.127–132, 1997.

GABRIEL, A.; ABE, K.; GUIMARÃES, M.; MIRAGLIA, S. Avaliação de impacto à saúde da incidência de dengue associada à pluviosidade no município de Ribeirão Preto, São Paulo. **Cadernos Saúde Coletiva**, v.26, n.4, p.446–452, 2018.

GEMAQUE, A. O.; ARAUJO, P. M. **Modelo Matemático da Transmissão de Dengue**. 2011. Curso de Licenciatura Plena em Matemática — Universidade Federal do Amapá, Macapá-AP.

GRIMM, A. M.; SANT'ANNA, C. L. d. S. **Influência de Fases Extremas da Oscilação Sul Sobre a Intensidade e Frequência das Chuvas no Sul do Brasil**. Rio de Janeiro: SBMet, 2000. 1 CD-ROM.

HAAFIDHOH, E. A.; ADI, Y. A.; IRSALINDA, N. Optimal control on education, vaccination, and treatment in the model of dengue hemorrhagic fever. **Bulletin of Applied Mathematics and Mathematics Education**, v.2, p.65–78, 2023.

HAKIZIMANA, E.; NTAGANDA, J. Control measures of malaria transmission in rwanda based on seir sei mathematical model. **Rwanda Journal of Engineering Science Technology and Environment**, v.4, 2021.

HAN, Z.; WANG, Y.; JIN, Z. Final and peak epidemic sizes of immuno-epidemiological sir models. **Discrete and Continuous Dynamical Systems - B**, v.29, p.4432–4462, 2024.

HASAN, S.; JAMDAR, S. F.; ALALOWI, M.; BEAJI, S. A. A. M. Dengue virus: a global human threat: review of literature. **Journal of International Society of Preventive and Community Dentistry**, v.6, p.1, 2016.

Instituto Butantan. **Entenda por que o risco de desenvolver dengue grave aumenta quando você é infectado pela segunda vez**. Acesso em: 03 out. 2024, <https://surl.li/rfgwlp>.

Instituto Butantan. **Após registro da Anvisa, vacina da dengue do Butantan poderá ser oferecida gratuitamente pelo SUS**. Acesso em: 27 set. 2024.

Instituto Nacional de Meteorologia. **Ano de 2023 é o mais quente da história do Brasil**. Acesso em: 14 out. 2024.

JÚNIOR, A. C. O.; MENDONÇA, F. Climate change and risk of arboviral diseases in the state of rio de janeiro (brazil). **Theoretical and Applied Climatology**, v.145, p.731–745, 2021.

JÚNIOR, C.; SILVA, J. Epidemiologia, fatores climáticos e distribuição espacial da dengue em uma capital do nordeste do Brasil. **Revista Brasileira De Climatologia**, v.25, 2019.

KAKARLA, S. et al. Lag effect of climatic variables on dengue burden in India. **Epidemiology and Infection**, v.147, 2019.

KEMARAU, R.; EBOY. The influence of El Niño Southern Oscillation on urban heat island formation at tropical city: case of Kuching city, Sarawak. **Malaysian Journal of Society and Space**, v.17, n.4, 2021.

KHAN, M. B.; YANG, Z.; LIN, C. C.; HSU, M.; URBINA, A. N.; ASSAVALAPSAKUL, W.; WANG, W.; CHEN, Y.; WANG, S. Dengue overview: an updated systemic review. **Journal of Infection and Public Health**, v.16, p.1625–1642, 2023.

KOFIDOU, M.; WILLIAMS, M.; NEARCHOU, A.; VELETZA, S.; GEMITZI, A.; KARAKASILLOTIS, I. Applying remotely sensed environmental information to model mosquito populations. **Sustainability**, v.13, p.7655, 2021.

KOUSKY, V. E.; CAVALCANTI, I. F. A. Eventos Oscilação Sul-El Niño: Características, Evolução e Anomalias de Precipitação. **Revista Ciência e Cultura**, v.36, n.11, 1984.

KULARATNE, S.; DALUGAMA, C. Dengue infection: global importance, immunopathology and management. **Clinical Medicine**, v.22, p.9–13, 2022.

LATIF, M.; KEENLYSIDE, N. El niño/southern oscillation response to global warming. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v.106, p.20578–20583, 2009.

LEITE, E. S. **Análise temporal da relação entre dengue e variáveis climáticas na cidade de Uberlândia - MG [recurso eletrônico]**. 2023. Tese (Doutorado em Geografia) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. Modo de acesso: Internet.

LIMA, L. S. G. A. **Um estudo da dinâmica de transmissão do sarampo e a estimativa do Número Básico de Reprodução**. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife. Dissertação (Mestrado em Matemática) - Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Programa de Pós-Graduação em Matemática.

LOWE, R. et al. Quantifying the added value of climate information in a spatio-temporal dengue model. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v.30, n.8, p.2067–2078, 2015.

Magalhães, Rodrigo Cesar da S. **Entrevista concedida ao jornal *Estado***. Página 14.

MALKOV, E. Simulation of coronavirus disease 2019 (COVID-19) scenarios with possibility of reinfection. **Chaos Solitons & Fractals**, v.139, p.110296, 2020.

MARINHO, R. d. S. S.; DURO, R. L. S.; MOTA, M. T. d. O.; HUNTER, J. R.; DIAZ, R. S.; KAWAKUBO, F. S.; KOMNINAKIS, S. V. Environmental changes and the impact on the human infections by dengue, chikungunya and zika viruses in northern brazil, 2010–2019. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v.19, p.12665, 2022.

MENDONÇA, F. Aquecimento global e saúde: uma perspectiva geográfica – notas introdutórias. **Terra Livre**, p.205–221, 2015.

MICROBIOLOGY, A. S. for. **Aviso dos Cientistas à Humanidade: Microrganismos e Mudanças Climáticas**. Acessado em: 14 de novembro de 2024.

MIELKE, L. L. **Um Modelo Epidemiológico para o Estudo da Dengue Considerando o Controle do Vetor**. 2024. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) — Universidade Federal de Pelotas, Pelotas. Acesso em: 27 set. 2024.

Ministério da Saúde. **Dengue**. Acesso em: 30 set. 2024, <https://bvsmms.saude.gov.br/dengue-16/>.

Ministério da Saúde. **Ministério da Saúde incorpora vacina contra a dengue no SUS**. Acesso em: 27 set. 2024.

Ministério da Saúde. **Dengue**.

Ministério da Saúde. **Série histórica: Casos prováveis de dengue (2000-2023)**. Acesso em: 03 out. 2024, <https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/saude-de-a-a-z/d/dengue/situacao-epidemiologica/serie-historica-casos-provaveis-de-dengue-2000-2023/view>.

Ministério da Saúde. **Série histórica: Casos de óbitos por dengue (2000-2023)**. Acesso em: 03 out. 2024, <https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/saude-de-a-a-z/d/dengue/situacao-epidemiologica/serie-historica-casos-de-obitos-dengue-2000-2023/view>.

Ministério da Saúde. **Ministério da Saúde anuncia estratégia de vacinação contra a dengue**. Acesso em: 27 set. 2024.

Ministério da Saúde. Biblioteca Virtual em Saúde. **Glossário de doenças: tópicos de A a Z**. Disponível em: <https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/dicas/33dengue.html>.

Ministério da Saúde, CONITEC. **Relatório 871**: Vacina contra dengue. Acesso em: 27 set. 2024.

Ministério da Saúde, Controle de Endemias. **Epidemiologia - Sistema Único de Saúde - SUS**. Brasília: Ministério da Saúde, 2011.

Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de Dengue - Vigilância Epidemiológica e Atenção ao Doente**. Brasília: DEOPE, 1996.

MIORELLI, A. **Modelos Epidemiológicos do Dengue e o Controle do Vetor Transmissor**. 1999. 139p. Dissertação (mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Acesso em: 27 set. 2024.

MOLTER, A.; PIOVESAN, L. R.; PERGHER, R.; VARRIALE, M. C. Controle ótimo em epidemias de dengue. **TEMA (São Carlos)**, v.17, p.129, 2016.

MONITORAMENTO das Arboviroses. Acessado em: 2024-06-30, <https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/saude-de-a-a-z/a/aedes-aegypti/monitoramento-das-arboviroses>.

MORAES, B. et al. Sazonalidade nas notificações de dengue das capitais da Amazônia e os impactos do El Niño/La Niña. **Cadernos De Saúde Pública**, v.35, n.9, 2019.

OLIVEIRA, C. L. d.; BIER, V. A.; MAIER, C. R.; RORATO, G. M.; FROST, K. F.; BARBOSA, M. A.; SCHNORRENBERGE, S. C. W.; LANDO, T. T. Incidência da dengue relacionada às condições climáticas no município de Toledo – PR. **Arquivos de Ciências da Saúde da UNIPAR**, v.11, n.3, 2008. Acessado em: 14 nov. 2024.

OLIVEIRA, L.; ITRIA, A.; LIMA, E. Custo da doença e programa de dengue: Uma revisão sistemática. **PLoS ONE**, v.14, n.2, p.e0211401, 2019.

ORFANÓ, A. **Abordagens distintas à Interação entre Anopheles spp. e Plasmodium spp.**: Estabelecendo um modelo murino de laboratório, estudando o escape dos esporozoítos e a microbiota. 2016. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) — Ministério da Saúde, Fundação Oswaldo Cruz, Centro de Pesquisas René Rachou, Programa de Pós-graduação em Ciências da Saúde, Belo Horizonte.

Organização Pan-Americana da Saúde. OPAS pede ação coletiva diante do aumento recorde de casos de dengue nas Américas. **OPAS/OMS**, 2024. Acesso em: 27 jun. 2024.

PADMANABHAN, R.; ABED, H.; MESKIN, N.; KHATTAB, T.; SHRAIM, M.; AL-HITMI, M. A review of mathematical model-based scenario analysis and interventions for COVID-19. **Computer Methods and Programs in Biomedicine**, v.209, p.106301, 2021.

PEREIRA, H. R.; REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T. Características da atmosfera na primavera austral durante o el niño de 2015/2016. **Revista Brasileira De Meteorologia**, v.32, p.293–310, 2017.

PETROVA, D. et al. The 2018–2019 weak El Niño: predicting the risk of a dengue outbreak in Machala, Ecuador. **International Journal of Climatology**, v.41, n.7, p.3813–3823, 2020.

PIOVESAN, L. R. **Modelo SEIR Discreto Espacialmente Estruturado para a Dispersão da Dengue**. 2009. 114p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Matemática Aplicada, Porto Alegre.

PONTES, R. J. S.; RUFFINO-NETTO, A. Dengue em localidade urbana da região sudeste do brasil: aspectos epidemiológicos. **Revista De Saúde Pública**, v.28, p.218–227, 1994.

PUCHALSKI, L. A. **Efeitos Associados ao El Niño e La Niña na Temperatura Média, Precipitação Pluvial e no Déficit Hídrico no Estado do Rio Grande do Sul**. 2000. 83p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia, Área de Concentração em Agrometeorologia) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Curso de Pós-graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia.

RAMASAMY, R.; SURENDRAN, S. N. Global climate change and its potential impact on disease transmission by salinity-tolerant mosquito vectors in coastal zones. **Frontiers in Physiology**, v.3, 2012.

Reef Resilience Network. **El Niño-Southern Oscillation (ENSO)**. Accessed: 21-09-2024.

RESMAWAN, R.; NURWAN, N. Konstruksi bilangan reproduksi dasar pada model epidemik seirs-sei penyebaran malaria dengan vaksinasi dan pengobatan. **Jurnal Matematika Integratif**, v.13, p.105, 2017.

RESMAWAN, R.; SIANTURI, P.; NUGRAHANI, E. The analysis of seirs-sei epidemic models on malaria with regard to human recovery rate. **Aceh International Journal of Science and Technology**, v.6, p.132–140, 2017.

ROCHA, D. **Modelos Matemáticos Aplicados à Epidemiologia**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) — Faculdade de Economia da Universidade do Porto. Dissertação submetida para obtenção do grau de mestre em Métodos Quantitativos em Economia e Gestão. Orientação de: Doutora Carla Manuela Alves Pinto.

ROCKLÖV, J.; DUBROW, R. Climate change: an enduring challenge for vector-borne disease prevention and control. **Nature Immunology**, v.21, p.479–483, 2020.

ROUQUAYROL, M. Z.; GOLDBAUM, M. **Epidemiologia, História Natural e Prevenção de Doenças**. 6.ed. Rio de Janeiro: MEDSI, 2003.

RUA-URIBE, G. a. et al. Modelización del efecto de la variabilidad climática local sobre la transmisión de dengue en Medellín (Colombia) mediante análisis de series temporales. **Biomédica**, v.33, n.0, 2012.

SABRAN, L.; JANNAH, M. Model matematika seirs-sei pada penyebaran penyakit demam berdarah dengue dengan pengaruh suhu. **Map (Mathematics and Applications) Journal**, v.2, p.66–78, 2020.

SALLES, T. S.; Sá-GUIMARÃES, T. d. E.; ALVARENGA, E. S.; GUIMARÃES-RIBEIRO, V.; MENESES, M. D. F. d.; CASTRO-SALLES, P. F. d.; SANTOS, C. R. d.; MELO, A. C. d. A.; SOARES, M. R.; FERREIRA, D. F.; MOREIRA, M. F. History, epidemiology and diagnostics of dengue in the american and brazilian contexts: a review. **Parasites Amp; Vectors**, v.11, 2018.

Secretaria da Saúde do Rio Grande do Sul. **Painel de Casos de Dengue**. Accessed: 2024-06-13.

Secretaria da Saúde do Rio Grande do Sul. **Levantamento alerta para infestação do Aedes em 93 cidades gaúchas**. Accessed: 2024-06-13.

SENGE-RS. **Aquecimento Global cria clima de extremos no RS**. Acesso em: 24 set. 2024, <https://senge.org.br/noticias/aquecimento-global-cria-clima-de-extremos-no-rs/>.

SILVA-CASO, W. et al. Geographical distribution, evaluation of risk of dengue and its relationship with the El Niño Southern Oscillation in an endemic region of Peru between 2004 and 2015. **BMC Research Notes**, v.12, n.1, 2019.

SILVA, D. F. da; SOUSA, A. B. de; MAIA, L. M.; RUFINO, L. L. Efeitos da associação de eventos de ENOS e ODP sobre o estado do Ceará. **Revista de Geografia (UFPE)**, v.29, n.2, p.114, 2012. Acesso em: 12 out. 2024.

SILVA, N. R. **Modelos Epidemiológicos SIR, Contínuo com Estratégias de Vacinação como Método de Controle Epidêmico**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) — Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, Brasil. Trabalho de Conclusão de Curso.

Sociedade Brasileira de Medicina Tropical (SBMT). **Mathematical models will be strategic in combating coronavirus**. Acesso em: 27 set. 2024.

SOUZA, C. A. d.; REBOITA, M. S. Ferramenta para o Monitoramento dos Padrões de Teleconexão na América do Sul. **Terrae Didatica**, v.17, n.00, p.e02109, 2021.

STOLERMAN, L. M.; MAIA, P. D.; KUTZ, J. N. Forecasting dengue fever in brazil: an assessment of climate conditions. **Plos One**, v.14, p.e0220106, 2019.

SUL, G. do Estado do Rio Grande do. **Atlas Climático do Rio Grande do Sul**. Acesso em: 14 out. 2024.

SUL, G. do Estado do Rio Grande do. **Geografia do Rio Grande do Sul**. Acesso em: 14 out. 2024.

TAVARES, J. N. Modelo sir em epidemiologia. **Revista De Ciência Elementar**, v.5, 2017.

TIPAYAMONGKHOLGUL, M. et al. Effects of the El Niño-Southern Oscillation on dengue epidemics in Thailand, 1996-2005. **BMC Public Health**, v.9, n.1, 2009.

UNA-SUS. **Vacinas para dengue: aspectos relevantes**. Acesso em: 27 set. 2024.

UNEP. **O aumento alarmante da temperatura global**. Acesso em: 24 set. 2024, <https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/reportagem/o-aumento-alarmante-da-temperatura-global>.

Universidade Estadual de Campinas. **De que forma modelos matemáticos ajudam na compreensão da pandemia**. Acesso em: 27 set. 2024.

Universidade Federal de Pelotas (UFPel). **Modelagem Matemática da evolução do COVID-19**. Acesso em: 27 set. 2024.

Universidade Federal Fluminense. **UFF Responde: Dengue**. Acessado em: 10 de dezembro de 2024.

WREGE, M.; FRITZSON, E.; SOARES, M.; PRELA-PÂNTANO, A.; STEINMETZ, S.; CARAMORI, P.; PANDOLFO, C. Risco de ocorrência de geadas na região centro-sul do brasil. **Revista Brasileira De Climatologia**, v.22, 2018.

WU, T.; WU, Z.; LI, Y. Dengue fever and dengue virus in the people's republic of china. **Reviews in Medical Virology**, v.32, 2021.

XU, L. et al. Climate variation drives dengue dynamics. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v.114, n.1, p.113–118, 2016.

ZANOTTO, P.; LEITE, L. C. d. S. The challenges imposed by dengue, zika, and chikungunya to brazil. **Frontiers in Immunology**, v.9, 2018.

ZHANG, Q. et al. Epidemiology of dengue and the effect of seasonal climate variation on its dynamics: a spatio-temporal descriptive analysis in the chao-shan area on china's southeastern coast. **BMJ Open**, v.9, n.5, p.e024197, 2019.