

## XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

### PROJEÇÃO DE ELEVADO CRESCIMENTO DE CASOS DE DENGUE DURANTE OS MESES DE BAIXA INCIDÊNCIA EM FORTALEZA-CE

*Alexandre Cunha Costa<sup>1</sup>; José Micael Ferreira da Costa<sup>2</sup>; Rafaella Pessoa Moreira<sup>3</sup>; Tahissa Frota Cavalcante<sup>3</sup>; Luiz Martins de Araújo Júnior<sup>1</sup>; Thamara Kely de Sousa Fernandes<sup>1</sup>;  
Cleiton da Silva Silveira<sup>2</sup> & Luciano Pamplona de Góes Cavalcanti<sup>4</sup>*

**Abstract:** Climate change projections impact dengue transmission in tropical regions, creating diverse and complex public health challenges. The aim of this study was to project future seasonal dengue incidence in a large tropical urban area of Brazil, where dengue is endemic, by systematically analyzing climatic and dengue case time series. An epidemiological dengue model was developed using time series analysis techniques and forced with statistical downscaling from various Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) climate models based on Shared Socioeconomic Pathway (SSP) scenarios for the late twenty-first century (2071–2100). The ecological time-series investigation analyzed 193 618 dengue cases from January 2008 to December 2018. Statistical downscaling transformed low-resolution Global Climate Models' outputs into high-resolution data, based on a 30-y climate baseline. The results indicated significant climate changes in seasonal temperature and precipitation by the end of the century. Under both SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios, substantial increases in dengue cases are projected during current low-incidence months, resulting in a reduced seasonality of dengue. The findings represent considerable challenges for future public health systems, which may face sustained high levels of dengue incidence throughout the year.

**Resumo:** Projeções de mudanças climáticas impactam a transmissão da dengue em regiões tropicais, criando desafios diversos e complexos para a saúde pública. O objetivo deste estudo foi projetar a incidência sazonal futura de dengue em uma grande área urbana tropical do Brasil, onde a dengue é endêmica, analisando sistematicamente séries temporais climáticas e de casos de dengue. Um modelo epidemiológico de dengue foi desenvolvido usando técnicas de análise de séries temporais e forçado com downscaling estatístico de vários modelos climáticos do Coupled Model Intercomparison Project Fase 6 (CMIP6) baseados em cenários do Shared Socioeconomic Pathway (SSP) para o final do século XXI (2071-2100). A investigação ecológica de séries temporais analisou 193.618 casos de dengue de janeiro de 2008 a dezembro de 2018. O downscaling estatístico transformou os resultados dos Modelos Climáticos Globais de baixa resolução em dados de alta resolução, com base em uma linha de base climática de 30 anos. Os resultados indicaram mudanças climáticas significativas na temperatura sazonal e na precipitação até o final do século. Nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, projetam-se aumentos substanciais nos casos de dengue durante os meses atuais de baixa incidência,

1) Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB), Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável (IEDS), Redenção, CE: cunhacos@unilab.edu.br; luiz\_m\_jr@unilab.edu.br; thamarakely15@gmail.com.

2) Universidade Federal do Ceará (UFC), Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA), Fortaleza, CE: jmicaelcosta@alu.ufc.br; cleitonsilveira@ufc.br.

3) Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB), Instituto de Ciências da Saúde (ICS), Redenção, CE: rafaellapessoa@unilab.edu.br; tahissa@unilab.edu.br.

4) Universidade Federal do Ceará (UFC), Departamento de Saúde Comunitária (DSC), Fortaleza, CE: pamplona.luciano@gmail.com.

resultando em uma menor sazonalidade da doença. Os resultados representam desafios consideráveis para os futuros sistemas de saúde pública, que podem enfrentar níveis elevados e sustentados de incidência de dengue ao longo do ano.

**Palavras-Chave** – Modelos climáticos; Estudo epidemiológico; Doenças transmitidas por vetores.

## 1. INTRODUÇÃO

A dengue é a arbovirose mais prevalente em todo o mundo. A infecção pelo vírus da dengue pode levar a uma gama de apresentações clínicas, desde casos assintomáticos até manifestações graves. Essa classificação inclui casos de dengue sem sinais de alerta, dengue com sinais de alerta e dengue grave. Este último pode resultar em fatalidades (WHO, 2009).

De acordo com a OMS, aproximadamente metade da população global corre o risco de infecção pelo vírus da dengue. Apesar de terem sido relatados 6,5 milhões de casos e mais de 7.300 mortes relacionadas em 2023, estima-se que ocorram de 100 a 400 milhões de infecções anualmente. Desde 2021, a dengue é endêmica em mais de 120 países, afetando principalmente Brasil, Colômbia, México, Peru, Bolívia, Ilhas Cook, Fiji, Índia, Quênia, Paraguai, Filipinas e Vietnã (WHO, 2024). Fatores climáticos e sociodemográficos influenciam significativamente a transmissão da dengue. Os principais fatores incluem precipitação, temperatura, umidade, urbanização, redução da vegetação e crescimento populacional, levando a taxas mais altas de dengue em áreas urbanas (Roy et al., 2024). Modelos epidemiológicos específicos para áreas urbanas são essenciais para prever surtos e avaliar os impactos das mudanças climáticas (Bhatia et al., 2022; Paul et al., 2021).

As projeções de mudanças climáticas para a dengue em regiões tropicais variam, indicando aumento e diminuição da incidência, com potenciais mudanças na sazonalidade (Colón-González et al., 2023; Li et al., 2023; Malavige et al., 2023; Bhatia et al., 2022). Apesar da extensa pesquisa sobre as relações clima-dengue, as áreas tropicais urbanizadas permanecem pouco exploradas. Estudos locais são essenciais para identificar os fatores climáticos e orientar estratégias de adaptação personalizadas para o manejo eficaz da dengue (Xu et al., 2020). Assim, muitos estudos mostram expansões ou intensificações futuras da dengue sob mudanças climáticas. No entanto, aplicar essas análises especificamente a uma grande cidade tropical no Brasil pode ser bastante relevante para a tomada de decisões locais e o planejamento da saúde pública.

Portanto, este estudo visa projetar a futura incidência sazonal de dengue devido às mudanças climáticas em uma grande área urbana tropical onde a dengue é endêmica. Este estudo foi realizado em Fortaleza, capital do Ceará, no Nordeste do Brasil, com uma população de 2,429 milhões de habitantes em 2022 e uma densidade de 7.785 habitantes/km<sup>2</sup>, a mais alta entre as capitais brasileiras (IBGE, 2023). Para atingir o objetivo da pesquisa, séries temporais climáticas e de casos de dengue foram analisadas sistematicamente em escala municipal. Posteriormente, um modelo epidemiológico de dengue foi desenvolvido utilizando técnicas de análise de séries temporais. Finalmente, o modelo epidemiológico foi forçado com redução estatística de escala a partir de diferentes modelos climáticos do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados Fase 6 (CMIP6) com base em cenários de Caminho Socioeconômico Compartilhado (SSP) do final do século XXI (IPCC, 2023).

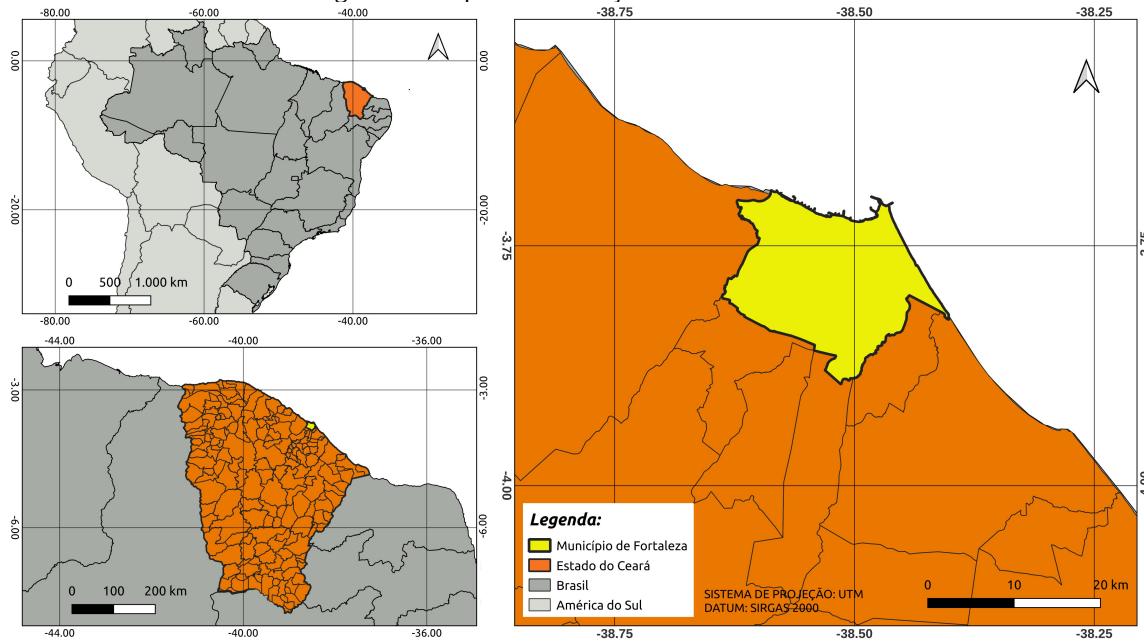
## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Área de estudo

Fortaleza (Figura 1) é uma cidade costeira de baixa altitude (16 m) com um clima tropical quente e subúmido, caracterizado por estações chuvosa e seca distintas. O principal sistema indutor de chuvas é a Zona de Convergência Intertropical, que é mais ativa de fevereiro a maio, coincidindo com o período de maior umidade relativa. As temperaturas mais altas são observadas durante o período seco, de setembro a dezembro, e as temperaturas mais baixas, de junho a agosto, durante o período de ventos fortes. Considerando o período de 1991 a 2020, a precipitação média anual em Fortaleza foi de 1.400 mm, com coeficiente de variação de 0,32, e a umidade relativa média anual foi de 76%. A temperatura média anual foi de 27,5 °C, com temperatura máxima anual de 31,2 °C e temperatura mínima anual de 23,8 °C. A temperatura média anual aumentou nas últimas décadas, aumentando +0,48°C entre 1961-1990 e 1991-2020 (Xavier et al., 2022).

Em Fortaleza, o aumento populacional e a falta de saneamento básico podem estar relacionados à ocorrência de casos locais de dengue e ao aumento de locais de oviposição, respectivamente, devido ao acúmulo de lixo, à presença de esgoto sem tratamento e ao acúmulo de água em diversos espaços urbanos. No entanto, durante anos epidêmicos e de alta precipitação, a incidência de dengue é mais amplamente dispersa por Fortaleza. Durante o período de 2011 a 2015, indicadores socioecológicos de pobreza e privação foram correlacionados com maiores taxas de incidência de dengue em nível de bairro durante os meses sazonais e não sazonais — mais altas durante anos não epidêmicos —, mas não durante anos epidêmicos e de alta precipitação (MacCormack-Gelles et al., 2018).

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo.



### 2.2 Dados

#### Saúde

Foi realizado um estudo ecológico de séries temporais com o conjunto completo de 193.618 casos confirmados em indivíduos de todos os性os no município de Fortaleza, no período de janeiro de 2008 a dezembro de 2018 (11 anos). Por um lado, o conjunto de dados de dengue passou a ser disponibilizado publicamente a partir de 2008. Por outro lado, a análise dos casos de hospitalização

por dengue a partir do final de 2019 foi excluída para evitar qualquer impacto da pandemia de COVID-19, que pode ter levado à subnotificação da doença.

Os dados de hospitalização por dengue foram coletados do Sistema Integrado de Informação de Agravos de Notificação (SINAN). O principal objetivo do SINAN é registrar e disseminar informações relacionadas a doenças de notificação compulsória para órgãos governamentais no Brasil (MINISTÉRIO DA SAÚDE DO BRASIL, 2023).<sup>16</sup> Os dados sobre dengue foram obtidos diretamente do Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde (DATASUS) do Ministério da Saúde, especificamente no site do SINAN (<https://datasus.saude.gov.br/>). Esse sistema de informações foi acessado por meio do tabulador genérico de domínio público (TABNET), na seção "Epidemiológicos e Morbidade" e na categoria "Doenças e Agravos de Notificação - 2007 em diante", selecionando-se os dados correspondentes ao Estado do Ceará, por município de residência.

Os dados sobre dengue são reportados por data de início; em seguida, os dados mensais de dengue foram calculados, acumulando o número de casos diários e alinhando-os com os dados climáticos mensais. Como nosso objetivo era avaliar as mudanças sazonais projetadas na incidência de dengue, para simplificar, escolhemos a resolução temporal mensal.

## Modelagem climática global

Os Modelos Climáticos Globais (MCGs) projetam mudanças climáticas em cenários de emissão de gases de efeito estufa (GEE) por meio da sexta fase do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP6, em inglês), que compara os resultados dos MCGs globalmente e é coordenado pelo Programa Mundial de Pesquisa Climática. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, em inglês) sintetiza o conhecimento sobre as mudanças climáticas e seus impactos em relatórios regulares de avaliação, o sexto e último publicado em 2021-2022.<sup>10</sup> As projeções do CMIP6 diferem das do CMIP5 com GCMs atualizados e novos cenários, integrando tendências socioeconômicas e tecnológicas e forçamento radiativo em uma estrutura de matriz de cenários (Gidden et al. 2019; O'Neill et al., 2016).

No CMIP6, alguns cenários projetam o fim das emissões (como os cenários de baixa emissão: SSP1-1.9 e SSP1-2.6), enquanto outros projetam uma redução (cenário de emissão intermediária: SSP2-4.5), e alguns projetam apenas o crescimento contínuo (cenários de alta emissão: SSP3-7.0 e SSP5-8.5).<sup>10</sup> As projeções do SSP1-1.9 e do SSP1-2.6 contradizem as tendências atuais de aumento das emissões, apesar dos compromissos dos países com reduções, tornando esses cenários menos realistas.<sup>10</sup> Portanto, este estudo avalia o SSP2-4.5 e o SSP5-8.5 usando 11 GCMs, aplicando downscaling estatístico e correção de viés para refinar as projeções para Fortaleza.

O período de 2071 a 2100 foi definido como um período de projeção climática de longo prazo, já adotado em diferentes estudos sobre mudanças climáticas (por exemplo, Fallah et al., 2024). Esse período permite uma observação mais longa dos efeitos das mudanças climáticas, que tendem a ser lentos, mas duradouros.

## Climáticos históricos

Os dados climáticos históricos mensais para Fortaleza, usados para redução estatística e correção de viés de projeções globais (1985–2014) e para a modelagem epidemiológica da dengue (2008–2018), compreenderam temperaturas mínimas, médias e máximas do ar, bem como precipitação. Esses dados foram derivados da interpolação de dados meteorológicos diários do Brazilian Daily Weather Gridded Data (BR-DWGD) compilado por Xavier et al. (2022). O banco de dados de Xavier et al. (2022) é uma grade georreferenciada de 0,1° x 0,1°, contendo valores diários

de precipitação, temperaturas máximas e mínimas do ar e outras variáveis climáticas. Essa grade de dados é o resultado da interpolação de milhares de pluviômetros e estações meteorológicas.

### 2.3 Redução de escala estatística e correção de viés

A redução de escala estatística transforma as saídas de baixa resolução do Modelo Climático Global (GCM) em dados de alta resolução para estudos regionais, abordando as limitações dos GCMs na captura de padrões climáticos locais (Maurer et al., 2016). Este processo usa conjuntos de dados históricos de alta resolução (por exemplo, BR-DWGD) para desenvolver relações estatísticas entre variáveis de grande escala (saídas do GCM) e observações locais por meio de técnicas como regressão, redes neurais e árvores de decisão. Este estudo empregou a metodologia de Ahmed et al. (2013) para o downscaling dos dados do CMIP6, também utilizada em outros estudos de impacto climático (Anggraeni et al., 2017; Maurer et al., 2016). A linha de base para o downscaling e correção de viés foi de 1985 a 2014.

Tabela 1 - Modelos CMIP6 usados no estudo.

MODELO	ANO DE LANÇAMENTO	PAÍS	RESOLUÇÃO
1) AWI-CM-1-1-MR	2018	Alemanha	100km
2) BCC-CSM2-MR	2017	China	100km
3) CanESM5	2019	Canadá	500km
4) CAS-ESM2-0	2019	China	100km
5) CMCC-ESM2	2017	Itália	100km
6) EC-Earth3	2019	Suécia	100km
7) EC-Earth3-Veg-LR	2019	Suécia	250km
8) FIO-ESM-2-0	2018	China	100km
9) INM-CM4-8	2016	Rússia	100km
10) INM-CM5-0	2016	Rússia	100km
11) MPI-ESM1-2-LR	2017	Alemanha	250km

### 2.4 Modelagem de séries temporais de dengue

Um modelo epidemiológico para dengue foi ajustado considerando o logaritmo natural do número de casos de dengue ( $Y_t$ ) como variável alvo e as variáveis climáticas selecionadas ( $x_{t1}, \dots, x_{tp}$ ), como precipitação (defasada) (mm) e temperatura do ar (mínima, média e máxima, °C), como potenciais variáveis explicativas. Inicialmente, o modelo adotado foi uma regressão linear múltipla (MLR, em inglês) (Equação 1):

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 x_{t1} + \dots + \beta_p x_{tp} + E_t \quad (1)$$

Utilizando o algoritmo dos mínimos quadrados ordinários (OLS, em inglês), os parâmetros  $\beta_1, \dots, \beta_p$  foram estimados assumindo o termo de erro  $\epsilon_t$  com média zero, variância constante e nenhuma correlação. Aplicando OLS, o método *backward stepwise* produziu preditores com defasagem variando de 0 a 3. Também foi aplicado um modelo aditivo generalizado (GAM, em inglês), onde apenas as covariáveis estatisticamente significativas na MLR foram selecionadas para a aplicação subsequente do GAM, com o objetivo de obter um modelo aditivo parcimonioso.

O critério de desempenho da modelagem foi o coeficiente de determinação ajustado e a estatística do erro quadrático médio padronizado (SRMSE, em inglês), definida como o erro quadrático médio padronizado (RMSE, em inglês) dividido pelo desvio padrão (SD, em inglês) da série observada. Um  $SRMSE > 1$ : o resultado do modelo é menos preciso do que a média da série observada; um  $SRMSE \approx 0$ : correspondência perfeita entre o modelo e as observações (Perretti et al., 2013). Além disso, os resíduos do modelo foram avaliados aplicando o teste de Shapiro-Wilk para normalidade e o teste de Durbin-Watson para a presença de autocorrelação. A autocorrelação parcial dos resíduos foi avaliada simplesmente pela aplicação da função de autocorrelação parcial.

Para análise de treinamento e validação, foi utilizado a Validação Cruzada Leave-One-Out (LOOCV, em inglês) (Lowe et al., 2021). A LOOCV envolve a divisão dos dados em um conjunto de treinamento e um conjunto de validação de forma que o conjunto de validação consista em uma única observação, enquanto o conjunto de treinamento compreende as  $n-1$  observações restantes, onde  $n$  é o comprimento da série temporal. Esse processo é repetido para todas as observações, resultando em  $n$  modelos e erros correspondentes. O RMSE é então calculado a partir desses erros. A análise foi conduzida usando o software estatístico R (R Foundation for Statistical Computing, Viena, Áustria, <https://www.r-project.org/>).

## 2.5 Cálculo de anomalia climática e dengue

As anomalias climáticas entre as projeções (SSP2-4.5 e SSP5-8.5: 2071–2100) e o baseline (1985–2014) foram calculadas para precipitação (Equação 2) e temperaturas (Equação 3) da seguinte forma:

$$A_{Pr,i} = \frac{(Pr_{p,i} - \bar{Pr}_{b,i})}{\bar{Pr}_{b,i}} \cdot 100 \quad (2)$$

em que,  $A_{Pr,i}$  é a anomalia da precipitação (%) no mês  $i$ , que varia de 1 a 12;  $Pr_{p,i}$  a precipitação modelada na projeção, no mês  $i$ ; e  $\bar{Pr}_{b,i}$  a precipitação média modelada no baseline, no mês  $i$ .

$$A_{Temp,i} = Temp_{p,i} - \bar{Temp}_{b,i} \quad (3)$$

em que,  $A_{Temp,i}$  é a anomalia da temperatura (mínima ou máxima) ( $^{\circ}\text{C}$ ) no mês  $i$ ;  $Temp_{p,i}$  a temperatura modelada na projeção, no mês  $i$ ; e  $\bar{Temp}_{b,i}$  a temperatura média modelada no baseline, no mês  $i$ .

A anomalia da dengue entre as projeções e o baseline de 2008-2018 foi calculada da seguinte forma:

$$A_{Dengue,i} = [\ln(Dengue_{p,i}) - \bar{\ln}(Dengue_{b,i})] \cdot 100 \simeq \frac{(Dengue_{p,i} - \bar{Dengue}_{b,i})}{\bar{Dengue}_{b,i}} \cdot 100 \quad (4)$$

em que,  $A_{Dengue,i}$  é a anomalia da dengue (%) no mês  $i$ ;  $\ln(Dengue_{p,i})$  o logaritmo natural da dengue modelada na projeção, no mês  $i$ ; e  $\bar{\ln}(Dengue_{b,i})$  a média do logaritmo natural da dengue modelada no baseline, no mês  $i$ .

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Modelagem de séries temporais de dengue

O modelo MLR superou a média observada (MO) no desempenho do LOOCV, alcançando um SRMSE de 0,80, refletindo uma melhoria de 20% em relação à MO. O modelo MLR (Equação 5), com  $R^2$  ajustado igual a 0,38, capturou efetivamente a variabilidade sazonal e interanual da incidência de dengue, embora tenha subestimado os valores de pico (Figura 2).

$$Y_t = -5,626 + 0,003.P_{t-1} + 0,002.P_{t-2} + 0,500.Tmin_{t-3} \quad (5)$$

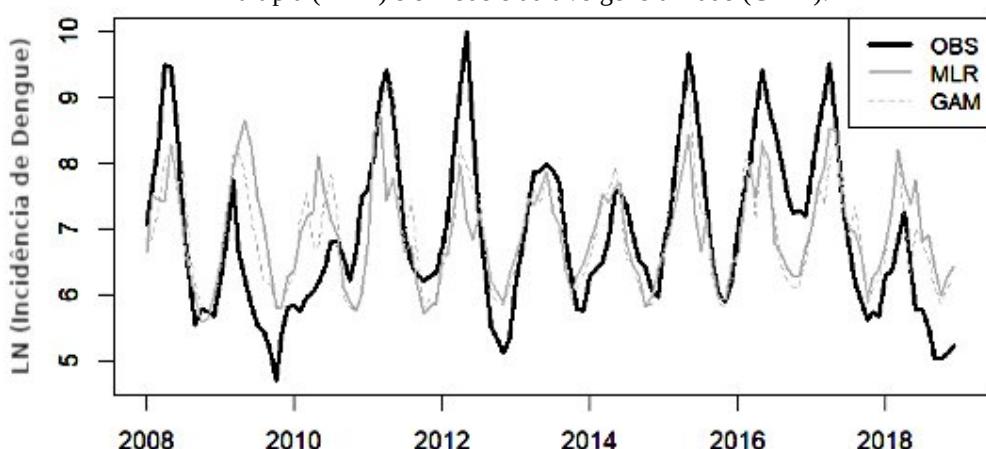
Os principais preditores climáticos significativos incluíram precipitação com defasagens de 1 e 2 meses [ $P_{t-1}$  ( $p<0,001$ ) e  $P_{t-2}$  ( $p<0,01$ ), respectivamente] e temperatura mínima com defasagem de 3 meses [ $Tmin_{t-3}$  ( $p<0,0001$ )], todos apresentando estimativas de parâmetros positivas. O intercepto ( $p<0,01$ ) foi negativo. Os resíduos da MLR apresentaram distribuição normal (teste de Shapiro-Wilk com  $p>0,98$ ). A autocorrelação parcial dos resíduos foi insignificante após a aplicação da função de autocorrelação parcial (não mostrada). No entanto, de acordo com o teste de Durbin-Watson ( $p<0,001$ ), os resíduos da MLR apresentaram autocorrelação significativa.

A MLR impediu a modelagem de relações não lineares, apesar dos dados históricos revelarem não linearidade entre a incidência de dengue e a precipitação, mas não com a temperatura mínima. Portanto, optou-se pelo GAM (Equação 6) utilizando as mesmas covariáveis climáticas para projetar a incidência de dengue sob mudanças climáticas [ $s(P_{t-1})$ ,  $p<0,0001$ ;  $s(P_{t-2})$ ,  $p<0,001$ ; e  $s(Tmin_{t-3})$ ,  $p<0,0001$ ].

$$Y_t = 6,934 + s(P_{t-1}) + s(P_{t-2}) + s(Tmin_{t-3}) \quad (6)$$

Este GAM tem um  $R^2$  ajustado de 0,51. O termo de intercepto ( $p<0,0001$ ) é positivo. Apesar de ser um modelo mais complexo, o GAM apresentou desempenho comparável ao modelo MLR (ver Figura 2; SRMSE igual a 0,81) e modelou efetivamente as relações não lineares entre a incidência de dengue e as covariáveis climáticas, ajustando uma spline de regressão de placa fina  $s(\cdot)$  em vez de uma regressão linear estritamente positiva. Os resíduos do GAM apresentaram distribuição normal (teste de Shapiro-Wilk com  $p>0,24$ ). A autocorrelação parcial dos resíduos não foi significativa após a aplicação da função de autocorrelação parcial (não mostrada). No entanto, de acordo com o teste de Durbin-Watson ( $p<0,001$ ), os resíduos do GAM ainda apresentaram autocorrelação significativa.

Figura 2 - Comparação mensal entre a incidência de dengue (em LN): observado (OBS), o modelo de regressão linear múltipla (MLR) e o modelo aditivo generalizado (GAM).



### 3.2 Projeção de mudanças climáticas

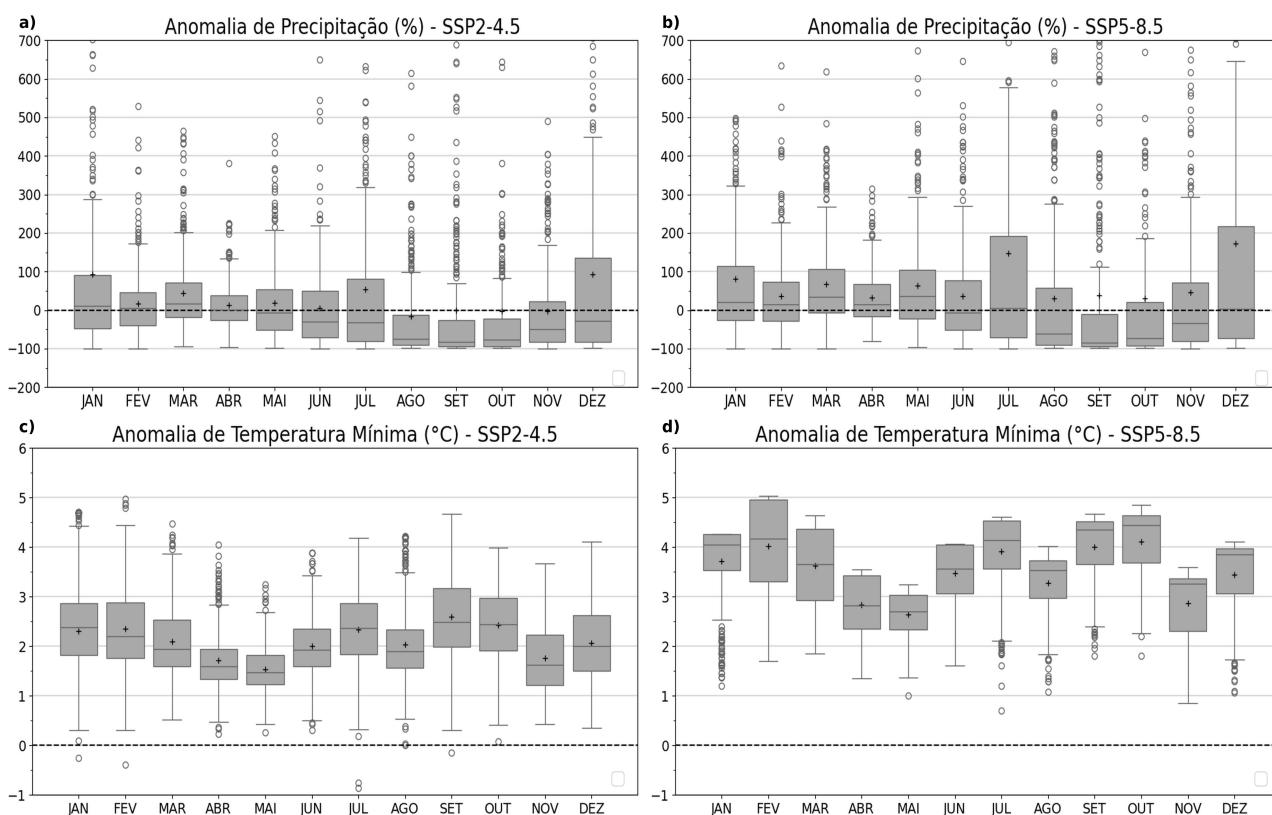
A anomalia entre a precipitação histórica e a projetada no cenário SSP2-4.5 para Fortaleza é apresentada na Figura 3a, demonstrando uma alta dispersão dos valores mensais entre os modelos, com vários outliers acima dos quartis, indicando tendências tanto positivas quanto negativas. No entanto, ao considerar as medianas, anomalias próximas a 20% são observadas para janeiro e março, e próximas a 0% para fevereiro, abril e maio. De junho a dezembro, as anomalias tornam-se negativas, principalmente de agosto a outubro, com valores chegando a -90%.

Enquanto isso, o cenário SSP5-8.5 mostrado na Figura 3b indica valores de anomalia positivos de janeiro a maio, anomalias nulas em junho, julho e dezembro e anomalias negativas de agosto a novembro. Vale ressaltar que, como a precipitação no segundo semestre do ano em Fortaleza é baixa, visto que o período chuvoso ocorre predominantemente no primeiro semestre, qualquer variação negativa durante esse período não representa um impacto significativo no total anual.

As anomalias das projeções do modelo CMIP6 para a temperatura mínima em Fortaleza indicam um aumento geral ao longo do ano em ambos os cenários. As anomalias mostradas na Figura 3c para o cenário SSP2-4.5 demonstram valores positivos em todos os meses do ano, com temperaturas mínimas variando de 0,25°C a 4,7°C entre os quartis, e maior dispersão entre os dados do modelo para janeiro, fevereiro e setembro. No entanto, as medianas variam consistentemente entre 1,5°C e 2,5°C, com um aumento maior observado em setembro.

Em contraste, para o cenário SSP5-8.5 (Figura 3d), os modelos apresentam menor divergência, com menor dispersão de dados e quartis mais próximos entre si, especialmente perceptível em janeiro e maio. A amplitude das anomalias entre os quartis varia aproximadamente de 1°C a pouco mais de 5°C, com medianas entre 2,8°C e 4,6°C, e um aumento maior na temperatura mínima observado em outubro.

Figura 3 - Anomalias climáticas em Fortaleza, para o final do século (2071-2100), com base em 11 modelos CMIP6:  
Precipitação, cenários a) SSP2-4.5; b) SSP5-8.5; Temperatura Mínima, cenários c) SSP2-4.5; d) SSP5-8.5.



### 3.2 Projeção de incidência de dengue

A estação média de incidência de dengue desde a linha de base (2008-2018) é apresentada na Figura 4. A estação de alta incidência de dengue ocorreu de março a junho, com pico em maio, com uma média de 7.426 casos de dengue. A estação de baixa incidência de dengue foi observada de setembro a dezembro, com uma média de aproximadamente 515 casos por mês. Janeiro-fevereiro (média de 1.334 casos de dengue) e julho-agosto (média de 1.354 casos de dengue) representam períodos de transição entre as estações de alta e baixa incidência de dengue.

Considerando o cenário de mudanças climáticas no final do século (2071-2100) sob o cenário SSP2-4.5, mudanças significativas foram observadas na estação de dengue (Figura 5a). A estação de baixa incidência de dengue de setembro a dezembro aumentou em média 59%. A alta temporada de dengue apresentou variações mistas: março (-6%) e maio (-4%) apresentaram anomalias médias quase nulas, enquanto abril apresentou uma redução substancial (-37%). Por outro lado, o final da alta temporada de dengue apresentou um aumento notável em junho (27%).

No cenário SSP5-8.5 (Figura 5b), o aumento na baixa temporada de dengue de setembro a dezembro foi mais pronunciado, com uma anomalia positiva média de 89%. Semelhante ao cenário SSP2-4.5, as variações na alta temporada de dengue foram mistas: pequenas anomalias médias em março (6%) e maio (-11%), uma redução significativa em abril (-56%) e um aumento substancial em junho (37%). Em ambos os cenários, a incidência de dengue aumentou significativamente durante os períodos de transição entre as temporadas de alta e baixa dengue: em 20% (SSP2-4,5) e 38% (SSP5-8,5) em janeiro-fevereiro, e em 52% (SSP2-4,5) e 74% (SSP5-8,5) em julho-agosto.

Figura 4 - Temporada média de incidência de dengue em Fortaleza, desde a linha de base (2008–2018).

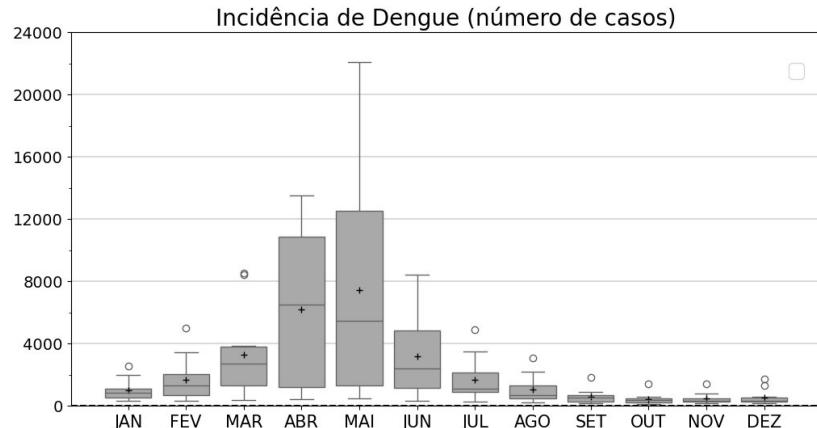
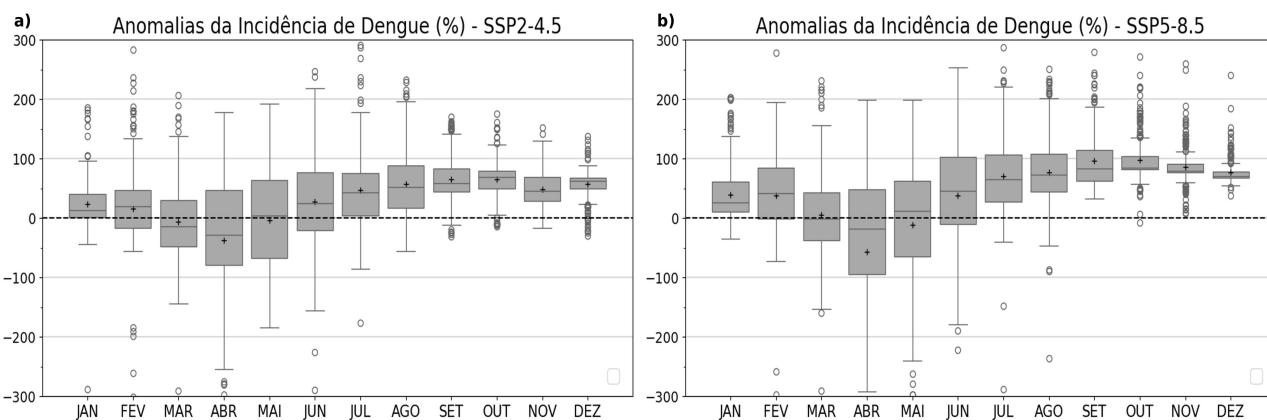


Figura 5 - Anomalias da incidência de Dengue em Fortaleza, para o final do século (2071-2100), com base em 11 modelos CMIP6, cenários: a) SSP2-4.5; b) SSP5-8.5.



## 4. CONCLUSÃO

Este estudo mostra como a integração de 11 modelos baseados no CMIP6 com um modelo de séries temporais, que captura a relação não linear entre a incidência de dengue e o clima, projeta tendências sazonais da dengue em uma grande cidade tropical seca da América do Sul até o final do século (2071-2100). Cenários de mudanças climáticas preveem um aumento significativo nos casos de dengue durante os meses de baixa incidência, reduzindo a sazonalidade e criando desafios para os futuros sistemas de saúde pública. Isso destaca a necessidade de uma estratégia integrada, incluindo controle de vetores, imunização e tratamentos direcionados, especialmente para populações marginalizadas.

## AGRADECIMENTOS

Este estudo foi apoiado por uma bolsa do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico — CNPq/Brasil, CNPq/MCTI/FNDCT nº 18/2021—Banda A—Grupos Emergentes [número de referência 402514/2021-1], Chamada CNPq nº 09/2023—Bolsas de Produtividade em Pesquisa [número de referência 306380/2023-4] e do Conselho Holandês de Pesquisa NWO/Holanda [número de referência W07.30323.007].

## REFERÊNCIAS

- AHMED, K.F.; WANG, G.; SILANDER, J. et al. (2017). “Statistical downscaling and bias correction of climate model outputs for climate change impact assessment in the US northeast”. *Glob Planet Change*, 100, pp. 320–332.
- ANGGRAENI, W.; NURMASARI, R.; RIKSAKOMARA, E. et al. (2017). “Modified regression approach for predicting number of dengue fever incidents in Malang Indonesia”. *Procedia Computer Science*, 124, pp. 142-150.
- BHATIA, S.; BANSAL, D.; PATIL, S. et al. (2022). “A retrospective study of climate change affecting dengue: evidences, challenges and future directions”. *Frontiers in public health*, 10, pp. 884645.
- COLÓN-GONZÁLEZ F.J.; GIBB, R.; KHAN, K. et al. (2023). “Projecting the future incidence and burden of dengue in Southeast Asia”. *Nat Commun*, 14(1), pp. 5439.
- FALLAH, B.; DIDOVETS, I.; ROSTAMI, M. et al. (2024). “Climate change impacts on Central Asia: trends, extremes and future projections”. *Int J Climatol*, 44(10), pp. 3191–3213.
- GIDDEN, M.J.; RIAHI, K.; SMITH, S.J. et al. (2019). “Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: a dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century”. *Geosci Model Dev*, 12(4), pp. 1443–1475.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE (2023). *Censo Demográfico 2022: população e domicílios: primeiros resultados*. Disp. em: [\[https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2102011\]](https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2102011). Acesso em: 8 jul. 2024.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC (2023). “Climate change 2023: synthesis report. A report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change”. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- LI, C.; LIU, Z.; LI, W. et al. (2023). “Projecting future risk of dengue related to hydrometeorological conditions in mainland China under climate change scenarios: a modelling study”. *Lancet Planet Health*, 7(5), e397–e406.
- LOWE, R.; LEE, S.A.; O'REILLY, K.M. et al. (2021). “Combined effects of hydrometeorological hazards and urbanisation on dengue risk in Brazil: a spatiotemporal modelling study”. *Lancet Planet Health*, 5(4), pp. e209–e219.
- MACCORMACK-GELLES, B.; LIMA NETO, A.S.; SOUSA, G.S. et al. (2018). “Epidemiological characteristics and determinants of dengue transmission during epidemic and non-epidemic years in Fortaleza, Brazil: 2011–2015”. *PLoS Negl Trop Dis*, 12(12), pp. e0006990.
- MALAVIGE, G.N.; SJÖ, P.; SINGH, K. et al. (2023). “Facing the escalating burden of dengue: challenges and perspectives”. *PLOS Glob Public Health*, 3(12), pp. e0002598.
- MAURER, E.P.; FICKLIN, D.L.; WANG, W. “The impact of spatial scale in bias correction of climate model output for hydrologic impact studies”. *Hydrol Earth Syst Sci*, 20(2), pp. 685–96.
- MÍNISTÉRIO DA SAÚDE DO BRASIL (2023). Brasília: Ministério da Saúde do Brasil. Sistema de Informação de Agravos de Notificação (SINAN). Disponível em: [\[https://portalsinan.saude.gov.br/\]](https://portalsinan.saude.gov.br/). Acesso em: 29 mai. 2024.
- O'NEILL, B.C.; TEBALDI, C.; VAN VUUREN, D.P. et al. (2016). “The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6”. *Geosci Model Dev*, 9(9), pp. 3461–3482.
- PAUL, K.K.; MACADAM, I.; GREEN, D. et al. (2021). “Dengue transmission risk in a changing climate: Bangladesh is likely to experience a longer dengue fever season in the future”. *Environ Res Lett*, 16(11), pp. 114003.
- PERRETTI, C.T.; MUNCH, S.B.; SUGIHARA, G. (2013). “Model-free forecasting outperforms the correct mechanistic model for simulated and experimental data”. *Proc Natl Acad Sci USA*, 110(13), 5253–5257.
- ROY, S.; BISWAS, A.; SHAWON, M.T.A. et al. (2024). “Land use and meteorological influences on dengue transmission dynamics in Dhaka city”. *Bull Natl Res Cent*, 48, pp. 1–16.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO (2024). “WHO Fact sheet: Dengue and severe dengue”. Geneva, Switzerland: World Health Organization. Disponível em: [\[https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/dengue-and-severe-dengue\]](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/dengue-and-severe-dengue). Acesso em: 22 mai. 2024.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO (2009). “Dengue, Guidelines for Diagnosis, Treatment, Prevention and Control”. Geneva, Switzerland: WHO.
- XAVIER, A.C.; SCANLON, B.R.; KING, C.W. et al. (2022). “New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020)”. *Int J Climatol*, 42(16), pp. 8390–8404.
- XU, Z.; BAMBRICK, H.; FRENTIU, F.D. et al. (2020). “Projecting the future of dengue under climate change scenarios: progress, uncertainties and research needs”. *PLoS Negl Trop Dis*, 14(3), pp. e0008118.