

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO - UENF
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CLIMA E ENERGIA - PPGC&E

ALEX SANDRO DE PAULA SILVA

**MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SEUS IMPACTOS NO REGIME PLUVIOMÉTRICO E
NA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA EM CAMPOS DOS GOYTACAZES (RJ)**

MACAÉ-RJ, 2025

ALEX SANDRO DE PAULA SILVA

**MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SEUS IMPACTOS NO REGIME
PLUVIOMÉTRICO E NA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA EM CAMPOS
DOS GOYTACAZES (RJ)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Clima e Energia, do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Clima e Energia.

Orientador: Prof. Diego Cunha Malagueta, D.Sc.

MACAÉ-RJ, 2025

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pelo autor.

S586

Silva, Alex Sandro de Paula.

"MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SEUS IMPACTOS NO REGIME PLUVIOMÉTRICO E NA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA EM CAMPOS DOS GOYTACAZES (RJ)" / Alex Sandro de Paula Silva. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2026.

140 f. : il.

Bibliografia: 97 - 104.

Dissertação (Mestrado em Clima e Energia) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, 2026.

Orientador: Diego Cunha Malagueta.

1. chuva. 2. recurso solar. 3. cenários de emissões. 4. reanálise . 5. ERA5. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 123

ALEX SANDRO DE PAULA SILVA

**MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SEUS IMPACTOS NO REGIME
PLUVIOMÉTRICO E NA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA EM CAMPOS
DOS GOYTACAZES (RJ)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Clima e Energia, do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Clima e Energia.

Aprovado em 02/03/2026

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Diego Cunha Malagueta - UFRJ

Profa. Dra. Eliane Barbosa Santos - UENF

Prof. Dr. Wanderson Luiz Silva - UFRJ

Prof. Dr. Fábio Teixeira Ferreira da Silva - COPPE/UFR

MACAÉ-RJ, 2025

RESUMO

O presente estudo buscou compreender os impactos das mudanças climáticas sobre o regime de chuvas e sobre o potencial de geração de energia fotovoltaica em Campos dos Goytacazes (RJ). Foram combinadas observações da estação INMET 83698 e a reanálise ERA5 no período 1994–2024, simulações do ETA-BESM para previsões sob RCP4.5 e RCP8.5, e dados CMIP6/NEX-GDDP para a modelagem energética sob SSP2-4.5 e SSP5-8.5, com simulações de geração no PVWatts v8 (SAM/PySAM) para um sistema FV fixo de 1 MWp. No período analisado (1994–2024), os totais anuais de previsões continham forte variabilidade interanual, com anos secos abaixo de 700 mm e anos muito úmidos acima de 1500 mm, além de sazonalidade bem definida (máximos entre novembro e março e mínimos entre junho e agosto), sem tendência monotônica estatisticamente significativa no observado (Mann–Kendall: $p = 0,1101$; Sen = +7,11 mm/ano). O ERA5 reproduziu parte do sinal interanual dos totais anuais (correlação $\sim 0,5$ – $0,6$; RMSE centrado ~ 200 mm/ano), porém com deslocamento sistemático de magnitude. Devido às viés úmidos no histórico da ETA-BESM, suas projeções de alterações foram interpretadas prioritariamente como mudanças relativas (Δ). As simulações FV indicaram geração anual elevada e praticamente estável: no período de referência (1994–2014), a produção variou de 1202,4 a 1300,1 MWh (média $1249,9 \pm 23,5$ MWh; fator de capacidade 0,142) e, nos cenários futuros, as médias muito próximas (SSP2-4.5: $1248,2 \pm 21,6$ MWh; SSP5-8.5: $1250,3 \pm 23,4$ MWh), com maior dispersão interanual no SSP5-8.5. Em conjunto, os resultados sugerem que, até meados do século, o principal desafio para a gestão local está mais associado à variabilidade ano a ano das condições hidrometeorológicas e ao recurso solar do que a uma mudança monotônica forte no desempenho médio do sistema FV, reforçando a utilidade de integrar diagnósticos climáticos e simulações energéticas em estratégias municipais de adaptação.

Palavras-chave: chuva; recurso solar; cenários de emissões; reanálise ERA5; PVWatts.

ABSTRACT

This study aims to understand the impacts of climate change on rainfall patterns and the potential for photovoltaic energy generation in Campos dos Goytacazes (RJ). Observations from the INMET 83698 station and ERA5 reanalysis for the period 1994–2024 were combined, along with ETA-BESM simulations for predictions under RCP4.5 and RCP8.5, and CMIP6/NEX-GDDP data for energy modeling under SSP2-4.5 and SSP5-8.5, with generation simulations in PVWatts v8 (SAM/PySAM) for a fixed 1 MWp PV system. In the particular period (1994–2024), the annual forecast totals showed strong interannual variability, with dry years below 700 mm and very wet years above 1500 mm, in addition to a well-defined seasonality (maximums between November and March and minimums between June and August), without a statistically significant monotonic trend in the observed data (Mann–Kendall: $p = 0.1101$; Sen = +7.11 mm/year). The ERA5 reproduced part of the interannual signal of the annual totals (correlation ~ 0.5 – 0.6 ; RMSE centered ~ 200 mm/year), but with a systematic magnitude shift. Due to the wet bias in the ETA-BESM history, its projections of changes were primarily interpreted as relative changes (Δ). PV simulations indicated high and practically stable annual generation: in the reference period (1994–2014), production ranged from 1202.4 to 1300.1 MWh (average 1249.9 ± 23.5 MWh; capacity factor 0.142), and in future scenarios, the averages were very close (SSP2-4.5: 1248.2 ± 21.6 MWh; SSP5-8.5: 1250.3 ± 23.4 MWh), with greater interannual dispersion in SSP5-8.5. Taken together, the results suggest that, until the middle of the century, the main challenge for local management is more associated with the year-to-year variability of hydrometeorological conditions and solar resources than with a strong monotonic change in the average performance of the PV system, reinforcing the usefulness of integrating climate diagnoses and energy simulations into municipal adaptation strategies.

Keywords: rainfall; solar resource; emissions scenarios; ERA5 reanalysis; PVWatts.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica, composto por painel solar, inversor, medidor e integração à rede de distribuição.	24
Figura 2 – Esquema do princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica com junção p-n.....	24
Figura 3 – Estrutura interna de um módulo fotovoltaico monocristalino.	25

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Dispersão anual entre os totais de precipitação do ERA5 e da Estação Meteorológica (anos pareados).....	47
Gráfico 2 – Dispersão anual entre os totais de precipitação do modelo ETA-BESM (Histórico) e da Estação Meteorológica (anos pareados).....	48
Gráfico 3 – QQ-plot empírico entre os quantis anuais de precipitação do ERA5 e da Estação Meteorológica.....	49
Gráfico 4 – Diagrama de Taylor entre os totais anuais de precipitação do ERA5 e da Estação Meteorológica (anos pareados).....	50
Gráfico 5 – Climatologia mensal de precipitação do conjunto ERA5 (mm/mês).....	51
Gráfico 6 – Climatologia mensal de precipitação da Estação Meteorológica 83698 (mm/mês).....	52
Gráfico 7 – Climatologia mensal de precipitação da ETA-BESM.....	53
Gráfico 8 – Mapa de calor (heatmap) mensal da precipitação do conjunto ERA5 no período de 1994–2024 (mm/mês).....	55
Gráfico 9 – Mapa de calor (heatmap) mensal da precipitação da Estação Meteorológica 83698 no período de 1994–2024 (mm/mês).....	56
Gráfico 10 – Densidade das somas anuais de precipitação do conjunto ETA-BESM no período de 1994–2024 (mm/ano).....	57
Gráfico 11 – Anomalias anuais de precipitação do conjunto ERA5 no período de 1994–2024 (%).....	59
Gráfico 12 – Anomalias anuais de precipitação observadas na Estação Meteorológica de Campos (83698) no período de 1994–2024 (%).....	59
Gráfico 13 – Distribuição anual de precipitação para as fontes ERA5, Estação e ETA_BESM (mm/ano).....	61
Gráfico 14 – Média móvel de cinco anos aplicada à série anual de precipitação do conjunto ERA5 (1994–2024).....	63
Gráfico 15 – Média móvel de cinco anos aplicada à série anual de precipitação observada na Estação Meteorológica de Campos (83698), no período de 1994–2024.....	64
Gráfico 16 – Média móvel de cinco anos aplicada à série anual de precipitação do modelo ETA_BESM (1994–2024).....	65

Gráfico 17 – Precipitação anual nas diferentes fontes de dados (ERA5, Estação e ETA-BESM) para o período de 1994 a 2024.....	67
Gráfico 18 – Distribuição mensal da precipitação por década com base nos dados da estação meteorológica (83698) para o período de 1994 a 2024.....	68
Gráfico 19 – Fator de capacidade (CF) comparativo entre os cenários histórico, SSP2-4.5 e SSP5-8.5 (anos em comum).	71
Gráfico 20 – Relação entre a produção anual de energia (MWh) e o fator de capacidade (CF) nos cenários histórico, SSP2-4.5 e SSP5-8.5.....	72
Gráfico 21 – Evolução da geração anual de energia (MWh) no período histórico de 1994 a 2014.	73
Gráfico 22 – Tendência da geração anual de energia (MWh) para o cenário SSP2-4.5, no período de 1994 a 2054.	74
Gráfico 23 – Tendência da geração anual de energia (MWh) para o cenário SSP5-8.5, no período de 2014 a 2054.	75
Gráfico 24 – Geração anual de energia (MWh) e média móvel de cinco anos no cenário histórico (1994–2014).....	75
Gráfico 25 – Geração anual de energia (MWh) e média móvel de cinco anos no cenário histórico (1994–2055).....	76
Gráfico 26 – Geração anual de energia (MWh) e média móvel de cinco anos para o cenário SSP5-8.5 (2014–2054).	77
Gráfico 27 – Geração anual de energia (MWh) no período histórico com marcação do ponto de mudança pelo teste de Pettitt.	78
Gráfico 28 – Geração anual de energia (MWh) no cenário SSP2-4.5 com marcação do ponto de mudança pelo teste de Pettitt.	79
Gráfico 29 – Geração anual de energia (MWh) no cenário SSP5-8.5 com marcação do ponto de mudança pelo teste de Pettitt.	80
Gráfico 30 – Heatmap – Anomalia (%) vs baseline – histórica.....	81
Gráfico 31 – Heatmap – Anomalia (%) vs baseline – ssp245.....	82
Gráfico 32 – Heatmap – Anomalia (%) vs baseline – ssp585.....	83
Gráfico 33 – Anomalia de Annual MWh em relação à baseline do cenário (%).	84
Gráfico 34 – Anomalia de Annual MWh em relação à baseline do cenário (%) (anos em comum).	85

Gráfico 35 – Anomalia de Annual MWh em relação à baseline do cenário (%) (anos em comum).	86
Gráfico 36 – Anomalia de Annual MWh em relação à baseline do cenário (%) (anos em comum).	87
Gráfico 37 – Distribuição de Annual MWh por década – histórico.....	88
Gráfico 38 – Distribuição de Annual MWh por década – ssp245.	89
Gráfico 39 – Distribuição de Annual MWh por década – ssp585.	90
Gráfico 40 – Distribuição de Annual MWh por cenário.....	91
Gráfico 41 – Annual MWh – comparação de cenários (histórico, SSP2-4.5 e SSP5-8.5).	92
Gráfico 42 – Fator de capacidade anual (CF) comparado entre os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, considerando anos em comum.	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros e padrões de configuração utilizados nas simulações do modelo PVWatts v8.....	38
Tabela 2 – Série anual ERA5 padronizada (1994–2024) (mm/ano).....	43
Tabela 3 – Série anual Estação (INMET) padronizada (1994–2024) (mm/ano).....	44
Tabela 4 – Estatísticas descritivas da precipitação anual (mm/ano) para as bases ERA5, Estação Meteorológica e ETA-BESM.	45
Tabela 5 – Validação (período de sobreposição) – ETA-BESM Histórico vs Estação.	58
Tabela 6 – Estatísticas unificadas de correlação, viés e testes de mudança de regime.	60
Tabela 7 – Testes de tendência e mudança de regime da precipitação (anual).	66
Tabela 8 – Estatísticas descritivas da geração anual simulada e fatores de capacidade para os cenários histórico, SSP2-4.5 e SSP5-8.5.....	70

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
AR6	Sexto Relatório de Avaliação (IPCC)
BDMEP	Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (INMET)
BESM	Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre (componente do ETA-BESM) (Brazilian Earth System Model)
CF	Fator de capacidade anual - Capacity Factor (Fator de capacidade)
CMIP6	Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados - Fase 6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6)
COPERNICUS	Repositório de Dados Climáticos Copernicus (Copernicus)
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
c	Corrente contínua (direct current)
DC/AC	Razão DC/AC (parâmetro da simulação)
DHI	Irradiação Difusa Horizontal (Diffuse Horizontal Irradiance)
DJF	Dezembro–Janeiro–Fevereiro (trimestre sazonal)
DNI	Irradiação Direta Normal (Direct Normal Irradiance)
ECMWF	Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)
ERA5	Reanálise do ECMWF (5ª geração)
ERA5-Land	Reanálise do ECMWF (versão Land)
ETA	Modelo regional Eta (componente do ETA-BESM)
ETA-BESM	Modelo Regional Eta acoplado ao Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre
GCR	Expert Team on Climate Change Detection and Indices (Razão de cobertura do terreno (Ground Coverage Ratio)
GHI	Irradiação Solar Global Horizontal (Global Horizontal

	Irradiance)
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change)
JJA	Junho–Julho–Agosto (trimestre sazonal)
MAE	Erro médio absoluto (Mean Absolute Error)
MAM	Março–Abril–Maio (trimestre sazonal)
MAPE	Erro percentual absoluto médio (Mean Absolute Percentage Error)
MK	Teste de Mann–Kendall
mm/ano	Milímetros por ano
MWp	Megawatt-pico (potência nominal fotovoltaica em STC)
NA	Valor ausente (Not Available)
NetCDF	Formato de dados climáticos (Network Common Data Form) Projeções globais diárias em escala reduzida do NASA
NEX-GDDP	Earth Exchange (NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections)
NREL	Laboratório Nacional de Energia Renovável (National Renewable Energy Laboratory)
P10	Percentil 10 (indicador de baixa geração)
P90	Percentil 90 (indicador de alta geração)
PVWatts	PVWatts (modelo de simulação fotovoltaica – NREL)
PySAM	Interface Python do System Advisor Model (SAM/NREL)
QA/QC	Rotinas de garantia/controle de qualidade (Quality Assurance / Quality Control)
R	Linguagem de programação R
RCP	Caminhos Representativos de Concentração (Representative Concentration Pathway)
RMSE	Raiz do erro quadrático médio (Root Mean Square Error)
SAM	Modelo de consultor de sistema (System Advisor Model (NREL))

SON	Setembro–Outubro–Novembro (trimestre sazonal)
SSP	Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (Shared Socioeconomic Pathways)
UENF	Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
°C	Graus Celsius

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. OBJETIVO.....	18
1.1.1. Objetivos Específicos.....	18
2. REVISÃO DA LITERATURA	19
2.1. EVENTOS EXTREMOS E MUDANÇAS NO REGIME DE PRECIPITAÇÃO	19
2.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-CLIMÁTICA DE CAMPOS DOS GOYTACAZES (RJ).....	21
2.3. TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA	23
2.4. POLÍTICAS PÚBLICAS E ESTRATÉGIAS DE ADAPTAÇÃO CLIMÁTICA	26
3. METODOLOGIA.....	29
3.1. ESTRUTURA GERAL DO ESTUDO	29
3.2. BASES DE DADOS CLIMÁTICOS.....	30
3.2.1. Observações: INMET/BDMEP (Estação Campos dos Goytacazes – código 83698)	30
3.2.2. Reanálise: ERA5/ERA5-Land (ECMWF)	30
3.2.3. Projeções globais em alta resolução: CMIP6 – NEX-GDDP	31
3.2.4. Projeções regionais: ETA-BESM (CPTEC/INPE).....	32
3.3. TRATAMENTO, PADRONIZAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS DADOS	33
3.3.1. Pré-processamento e harmonização	33
3.3.2. Controle de qualidade (QA/QC) e critérios de cobertura.....	33
3.3.3. Validação entre bases no período de sobreposição	34
3.3.4. Correção de viés e reporte de mudanças (Δ)	34
3.4. COMPARAÇÃO ENTRE PERÍODOS E CENÁRIOS CLIMÁTICOS	34
3.5. MÉTODOS ESTATÍSTICOS	35
3.5.1. Estatística descritiva	35
3.5.2. Tendência temporal: Mann–Kendall e inclinação de Sen	35
3.5.3. Mudança de regime: teste de Pettitt.....	36
3.5.4. Anomalias	36
3.6. MODELAGEM CLIMÁTICA: CENÁRIOS E COERÊNCIA ENTRE FAMÍLIAS (RCP E SSP)	37
3.7. MODELAGEM ENERGÉTICA: SAM/PYSAM E PARAMETRIZAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO	37
3.7.1. Ferramentas computacionais	37

3.7.2. Conversão de dados climáticos para arquivos SAM (8760 horas/ano).....	37
3.7.3. PVWatts v8: configuração do sistema.....	38
3.7.4. Simulações e indicadores de desempenho.....	39
3.8. INTEGRAÇÃO CLIMA–ENERGIA	40
3.9. REPRODUTIBILIDADE E DISPONIBILIDADE DE MATERIAIS	40
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
4.1. INTEGRAÇÃO ENTRE CLIMA E ENERGIA	42
4.1.1. Padronização e Qualidade dos Dados.....	42
4.1.2. Análise de Consistência e Correlação entre Fontes	45
4.1.3. Caracterização Histórica e Climatologia Mensal.....	50
4.1.4. Análise de Tendências e Anomalias da Precipitação.....	57
4.1.5. Síntese Integrada entre Fontes.....	66
4.2. AVALIAÇÃO DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA	69
4.2.1. Consolidação e Qualidade dos Resultados	69
4.2.2. Avaliação Comparativa dos Cenários	70
4.2.3. Análise Temporal e Tendências da Geração de Energia.....	72
4.2.4. Testes Estatísticos de Mudança de Regime na Geração Fotovoltaica	77
4.2.5. Distribuição e Estatística Descritiva	87
5. PRODUTO TECNOLÓGICO	93
6. CONCLUSÃO.....	95
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
ANEXO A – MAPA CLINOGRÁFICO DO MUNICÍPIO DE CAMPOS DOS GOYTACAZES.....	105
APÊNDICE A – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DE CAMPOS DOS GOYTACAZES. .	106
APÊNDICE B – RESULTADOS ANUAIS SIMULADOS DE GERAÇÃO ELÉTRICA E FATOR DE CAPACIDADE PARA OS CENÁRIOS HISTÓRICO, SSP2-4.5 E SSP5-8.5.....	107
APÊNDICE C – PRODUÇÃO ANUAL DE ENERGIA ELÉTRICA E FATOR DE CAPACIDADE PARA OS CENÁRIOS HISTÓRICO, SSP2-4.5 E SSP5-8.5 (1994–2054).	108
APÊNDICE D– RELATÓRIO TÉCNICO CONCLUSIVO	109

1. INTRODUÇÃO

A precipitação é um dos componentes mais sensíveis do sistema climático, pois resulta da interação entre processos locais (convecção, relevo e uso do solo) e a variabilidade natural em diferentes escalas (intra-sazonal, interanual e decadal) (IPCC, 2023a). Além dos impactos hidrológicos, essa variabilidade, juntamente com outros fatores meteorológicos, pode afetar diretamente a geração de energia solar fotovoltaica, ao influenciar a nebulosidade, a irradiância e a eficiência dos módulos (FERON et al., 2020).

Nas últimas décadas, o aquecimento global tem alterado o balanço energético da atmosfera e intensificado o ciclo hidrológico, afetando a distribuição das chuvas e a ocorrência de extremos hidrometeorológicos (IPCC, 2023a). No Brasil, a extensão territorial e a diversidade climática produzem contrastes marcantes no regime pluviométrico, o que demanda análises regionais para avaliar impactos e vulnerabilidades (IPCC, 2023b). Nesse contexto, Campos dos Goytacazes (Norte Fluminense, RJ) constitui um caso de interesse por reunir elevada exposição à variabilidade hidroclimática e demanda crescente por informação aplicada ao planejamento.

A vulnerabilidade climática do município é intensificada por fatores ambientais, socioeconômicos e geográficos. Para o estado do Rio de Janeiro, análises e diagnósticos baseados em índices de extremos apontam riscos associados a eventos de chuva intensa e impactos em áreas urbanas e costeiras (SEA/RJ, 2018).

Nesse cenário, mudanças na intensidade e na distribuição das chuvas podem repercutir sobre segurança hídrica, produção agrícola e infraestrutura urbana. Episódios de alagamentos e períodos de estiagem reforçam a necessidade de diagnósticos locais que apoiem políticas públicas (SEA/RJ, 2018).

A caracterização dessa variabilidade exige o uso conjunto de diferentes fontes de informação. Séries observacionais de qualidade são essenciais para descrever o comportamento histórico e avaliar sinais de mudança em escala local, enquanto produtos de reanálise e modelos climáticos regionais contribuem para uma visão espacialmente consistente e para a investigação de cenários futuros (IPCC, 2023a). No Brasil, bases observacionais como o Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa do Instituto Nacional de Meteorologia (BDMEP/INMET) são

amplamente utilizadas em estudos climáticos por fornecerem séries históricas padronizadas (INMET, s.d.). No âmbito da modelagem regional, o modelo Eta é empregado em aplicações de previsão e pesquisa, incluindo estudos climáticos e de mudanças do clima (INPE, [s. d.]).

O histórico de episódios de chuva intensa no município evidencia que acumulados elevados podem ocorrer em curtos períodos. Por exemplo, em janeiro de 2020, a Prefeitura de Campos reportou acumulado de 142,5 mm em alguns pontos do município e atuação de equipes de emergência para resposta a alagamentos (PREFEITURA DE CAMPOS, 2020). Em termos estatísticos e climatológicos, eventos extremos são raros na cauda da distribuição; ainda assim, quando ocorrem podem ultrapassar limiares críticos e desencadear impactos relevantes, como prejuízos materiais, desalojamento e comprometimento de serviços públicos (IPCC, 2023b).

Além dos impactos hidrológicos, essa variabilidade, junto a outros fatores meteorológicos, afeta diretamente a geração de energia solar fotovoltaica, pois alterações na nebulosidade, temperatura e distribuição das chuvas influenciam a irradiância e a eficiência dos módulos. Em períodos chuvosos, o aumento de nuvens tende a reduzir a radiação solar global incidente e, conseqüentemente, a potência gerada; por outro lado, períodos mais secos podem favorecer maior irradiância, embora possam intensificar efeitos como soiling (acúmulo de poeira, sujeira, detritos, excrementos de pássaros, pólen ou resíduos orgânicos sobre a superfície dos painéis fotovoltaicos), aerossóis e aquecimento dos módulos, reduzindo eficiência e aumentando a incerteza do desempenho (SCHILL et al., 2022). Nesse contexto, cenários SSP são utilizados para investigar como trajetórias socioeconômicas e de emissões podem influenciar variáveis climáticas relevantes à geração renovável, incluindo a fotovoltaica (IPCC, 2023a).

Diante disso, integrar diagnóstico climático e planejamento energético é essencial para ampliar a resiliência de infraestruturas críticas frente às mudanças climáticas (IPCC, 2023b). No Brasil, onde os impactos se manifestam de forma heterogênea, diagnósticos climáticos aplicados ao território tornam-se especialmente importantes para orientar estratégias locais de adaptação, em particular em municípios costeiros e de planícies como Campos dos Goytacazes (SEA/RJ, 2018).

1.1. Objetivo

Avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre o regime de chuvas e sobre o potencial de geração de energia fotovoltaica no município de Campos dos Goytacazes, a partir da aplicação de análises estatísticas e simulações em cenários prospectivos de emissões (RCP 4.5 e 8.5).

1.1.1. Objetivos Específicos

- Caracterizar e quantificar a variabilidade do regime de chuvas em Campos dos Goytacazes, identificando tendências e padrões sazonais no período histórico a partir de dados observacionais e produtos climáticos.
- Avaliar as projeções futuras de mudança na distribuição das chuvas (incluindo sinais de intensificação/alteração do regime), integrando dados observacionais e resultados de modelos climáticos sob cenários RCP 4.5 e RCP 8.5.
- Simular e comparar os impactos das mudanças climáticas no potencial de geração fotovoltaica no município, estimando métricas de desempenho (ex.: geração anual/fator de capacidade) e avaliando diferenças entre cenários (histórico vs. futuros) para apoiar interpretação dos impactos climáticos.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Eventos Extremos e Mudanças no Regime de Precipitação

O cenário climático global nas últimas décadas tem sido marcado por um aquecimento atmosférico sem precedentes na série instrumental, refletindo a intensificação das forçantes antrópicas sobre o sistema climático (GRAHAME, 2025).

O Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas indica, com elevado grau de confiança, que o aumento da temperatura média global tem provocado alterações significativas no ciclo hidrológico, resultando em maior variabilidade da precipitação e no aumento da frequência e da intensidade de eventos hidrometeorológicos extremos. Esse aquecimento também eleva a capacidade do ar de reter vapor d'água, favorecendo chuvas intensas em curtos períodos e, em certas regiões, a persistência de estiagens mais prolongadas, o que pode levar à coexistência de extremos úmidos e secos (IPCC, 2023b).

Esse diagnóstico é corroborado por sínteses recentes da Organização Meteorológica Mundial, que apontam 2024 como o ano mais quente já registrado, com a temperatura média global em torno de 1,55 °C acima de 1850–1900, indicando o provável primeiro ano-calendário acima de 1,5 °C (WMO, 2025).

No Brasil, análises com índices de extremos e séries históricas indicam mudanças detectáveis também no Sudeste, incluindo áreas do centro-norte da região, com registros de alteração e/ou aumento na ocorrência de chuvas intensas em escalas diárias e subdiárias, ainda que com forte heterogeneidade espacial (NATIVIDADE et al., 2017).

Em escala global, relatórios de síntese indicam aumento de impactos associados a eventos extremos, incluindo episódios de precipitação intensa, secas e ondas de calor em diferentes regiões, com efeitos socioeconômicos relevantes (WMO, 2024).

As projeções variam conforme o modelo climático, o cenário de emissões e a escala de análise. Além disso, a interação entre variabilidade natural e aquecimento global dificulta a atribuição de eventos extremos individuais, especialmente em escalas regionais e sub-regionais, reforçando a limitação de diagnósticos baseados apenas em médias globais para compreender impactos locais e eventos compostos

(CALVIN et al., 2023).

No âmbito socioambiental, a intensificação e maior frequência de extremos tem produzido efeitos sobre ecossistemas, infraestrutura urbana, agricultura e sistemas energéticos, ampliando vulnerabilidades e desigualdades em áreas com alta densidade populacional e infraestrutura sensível (IPCC, 2023b).

No setor energético, a variabilidade e as mudanças do clima afetam fontes dependentes de recursos hídricos e atmosféricos. Para a energia solar fotovoltaica, mudanças em nebulosidade e temperatura e a ocorrência de eventos severos podem alterar o perfil de geração e a confiabilidade operacional, reforçando a necessidade de serviços climáticos para o planejamento do setor (GUTIERREZ, 2024).

Em particular, a deposição de poeira e partículas (soiling) é reconhecida como um fator importante de perda de rendimento em sistemas fotovoltaicos, aumentando custos operacionais e incertezas de desempenho, especialmente quando combinada com estresse térmico e condições atmosféricas adversas (SCHILL et al., 2022).

Assim, embora haja consenso quanto à intensificação do ciclo hidrológico, persistem incertezas sobre sua expressão regional. No Sudeste (Rio de Janeiro - RJ, Espírito Santos - ES, Minas Gerais - MG e São Paulo - SP), essas incertezas tornam-se críticas para municípios costeiros e de planície, como Campos dos Goytacazes, onde sinais globais sugerem maior probabilidade de chuvas concentradas em curto período e de estiagens mais persistentes, com implicações para

Assim como ocorre globalmente, no Brasil, a mudança climática se expressa por alterações nas estatísticas da precipitação — isto é, mudanças na frequência e intensidade dos eventos e na distribuição intra-anual (não apenas na média), indicando a não estacionariedade em diversas séries históricas. Relatórios do IPCC e de sínteses nacionais recentes destacam que esses sinais são heterogêneos no território nacional e dependem de controles regionais como circulação atmosférica, relevo, distância do oceano e uso do solo (COELHO, 2025).

A literatura observacional tem apontado, em diferentes partes do país, aumento de extremos de chuva em curtos intervalos e, em paralelo, alongamento/intensificação de períodos secos (COELHO, 2025). Essa combinação não implica “variabilidade maior por si só”, mas sim uma mudança no regime que altera a probabilidade de ocorrência dos extremos.

No Sudeste, os resultados também não são uniformes: há evidências de mudanças em indicadores de precipitação extrema e de irregularidade sazonal em MG, RJ e na porção centro-leste de SP, com grande sensibilidade ao período analisado e à base de dados, o que limita generalizações e reforça investigações locais (VELASCO HOLENDER; BARBOSA SANTOS, 2023). Em paralelo, essa discussão se conecta ao setor hídrico-energético: análises em bacias associadas a usinas hidrelétricas mostram tendências observadas de mudanças em precipitação e vazão. Na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, por exemplo, observam-se contrastes expressivos: Volta Redonda (RJ) e Paraíba do Sul (RJ) registram as maiores disponibilidades hídricas, enquanto trechos paulistas e o norte da Paraíba apresentam valores bem inferiores, evidenciando tanto a influência climática quanto antrópica sobre a dinâmica hídrica regional (FERREIRA; SANTANA; SANTOS, 2025).

No estado do Rio de Janeiro, essas questões ganham relevância por envolverem municípios costeiros e de planície, onde a concentração de chuva em curto período pode amplificar alagamentos e onde estiagens pressionam a gestão hídrica. Esse enquadramento estadual permite, na sequência, discutir o Norte Fluminense e o caso de Campos dos Goytacazes em uma lógica “do regional ao municipal” (SEA/RJ, 2018).

2.2. Caracterização físico-climática de Campos dos Goytacazes (RJ)

Conforme a Equipe Técnica Consórcio Gestão de Resíduos (2024) o município de Campos dos Goytacazes localiza-se no norte do estado do Rio de Janeiro, inserido na planície costeira associada à Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul, uma das mais relevantes do Sudeste brasileiro em termos de abastecimento hídrico, atividade agrícola e suporte aos sistemas urbanos. Essa inserção territorial confere ao município elevada sensibilidade a alterações no regime de precipitação, uma vez que combina relevo predominantemente plano, baixa declividade e extensa rede hidrográfica natural e artificial, condicionando tanto o escoamento superficial quanto a recorrência de alagamentos durante eventos extremos.

Para Lazaretti et al. (2015) do ponto de vista morfológico, Campos dos Goytacazes apresenta amplas superfícies de várzea e planícies fluviais associadas

ao rio Paraíba do Sul e a seus canais de drenagem. Essa configuração geomorfológica favorece o acúmulo de água em episódios de precipitação intensa, sobretudo quando associada à impermeabilização do solo urbano e à capacidade limitada dos sistemas de drenagem existentes. O mapa presente no Anexo A (CANTANHEDE; AMORIM, 2016) ilustra a configuração clinográfica do município, evidenciando a predominância de baixas declividades e a concentração de áreas suscetíveis a alagamentos.

Segundo a classificação climática de Köppen, o tipo Aw corresponde a um clima tropical com estação seca no inverno, apresentando verões quentes e chuvosos e forte sazonalidade da precipitação (SOARES et al., 2025).

Segundo Oliveira e Ferreira (2025), séries observacionais e índices extremos de precipitação indicam, para o Sudeste brasileiro a sinais de mudança na distribuição intra-anual das chuvas e aumento de eventos intensos em curtos intervalos, com forte variabilidade espacial.

No estado do Rio de Janeiro, projeções climáticas regionais já apontam para alterações futuras na frequência e intensidade de extremos de precipitação, com tendência a eventos mais concentrados e intensos ao longo do século XXI (SILVA et al., 2014).

Apesar de evidências regionais consistentes, persistem incertezas quanto à magnitude do sinal e à sua distribuição espacial no Sudeste e no próprio estado do Rio de Janeiro (OLIVEIRA; FERREIRA, 2025). Em termos prospectivos, sínteses de projeções regionais para o Sudeste/RJ sugerem, em média, maior irregularidade sazonal e potencial intensificação de eventos de chuva intensa sob cenários de aquecimento, ainda que com variações entre modelos.

No caso específico de Campos dos Goytacazes, a discussão em escala municipal ainda é relativamente limitada, sendo comum recorrer a diagnósticos regionais como aproximação. Essa limitação é particularmente relevante, pois o município se desenvolveu sobre uma planície aluvial com histórico de cursos d'água, lagoas e drenagem naturalmente lenta, o que ajuda a explicar a persistência de problemas de drenagem urbana (SOFFIATI, 2019). Além disso, a dinâmica territorial é fortemente condicionada por obras hidráulicas e por uma extensa rede de canais artificiais implantada na Baixada Campista, que influencia tanto a drenagem em

períodos de cheia quanto a gestão hídrica local (ALVES et al., 2014). O Apêndice A apresenta a localização geográfica do município em escala nacional.

Além dos fatores físicos, aspectos socioespaciais intensificam a vulnerabilidade climática, uma vez que desigualdades urbanas e limitações estruturais condicionam a capacidade adaptativa das populações expostas. A ocupação irregular de áreas suscetíveis, associada a déficits de saneamento e infraestrutura, amplia os impactos sociais e econômicos de chuvas extremas e estiagens prolongadas, especialmente em contextos urbanos periféricos (MARENGO, 2024).

A intensificação da nebulosidade associada a chuvas concentradas, o aumento das temperaturas médias e a maior recorrência de eventos extremos introduzem desafios ao desempenho e à resiliência dos sistemas fotovoltaicos, especialmente em áreas urbanas (SHAKER et al., 2024).

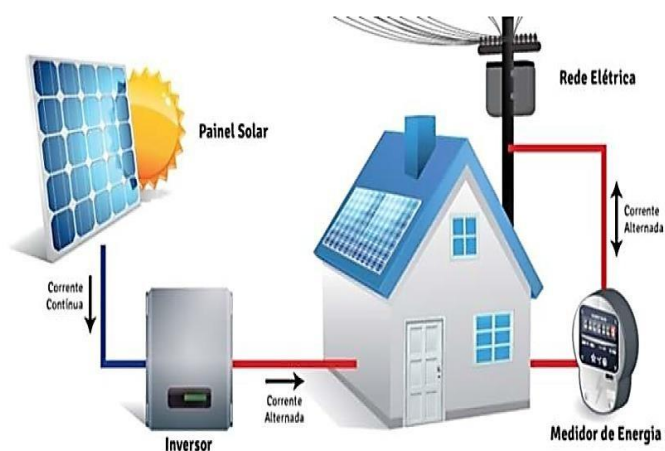
Ao adotar o município como unidade de análise, o trabalho contribui para reduzir a distância entre diagnósticos climáticos regionais amplos e a necessidade de informações aplicáveis ao planejamento local e às estratégias de adaptação às mudanças climáticas.

2.3. Tecnologias de Geração de Energia Fotovoltaica

A energia fotovoltaica consolidou-se, nas últimas décadas, como uma das principais alternativas para a diversificação da matriz elétrica e para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Para fins de revisão bibliográfica aplicada, torna-se necessário avançar além da descrição tecnológica, analisando criticamente a adequação dessas tecnologias às condições climáticas específicas do território em estudo

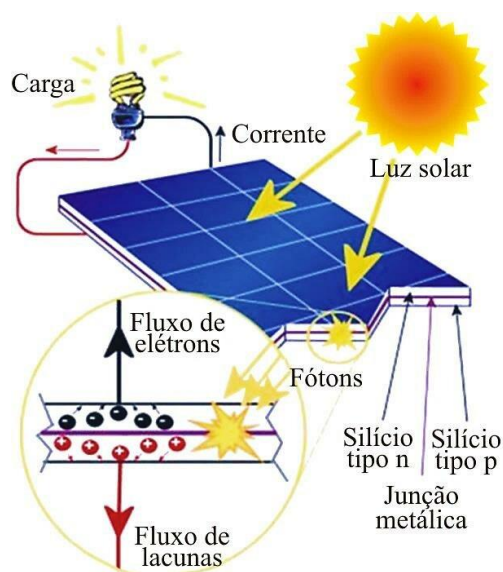
Segundo Victoria et al. (2021)) a conversão direta da radiação solar em eletricidade por semicondutores representa uma tecnologia já consolidada e com elevado potencial de crescimento no contexto da transição energética. A Figura 1 ilustra um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica, destacando seus principais componentes e o fluxo de energia, enquanto a Figura 2 apresenta o princípio de funcionamento da célula fotovoltaica com junção p-n, base física comum a todas as tecnologias analisadas.

Figura 1 – Sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica, composto por painel solar, inversor, medidor e integração à rede de distribuição.



Fonte: Mitrtech (2026).

Figura 2 – Esquema do princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica com junção p-n.



Fonte: Cavalcanti da Silva e Vigoderis (2022), adaptado de Voudoukis (2018).

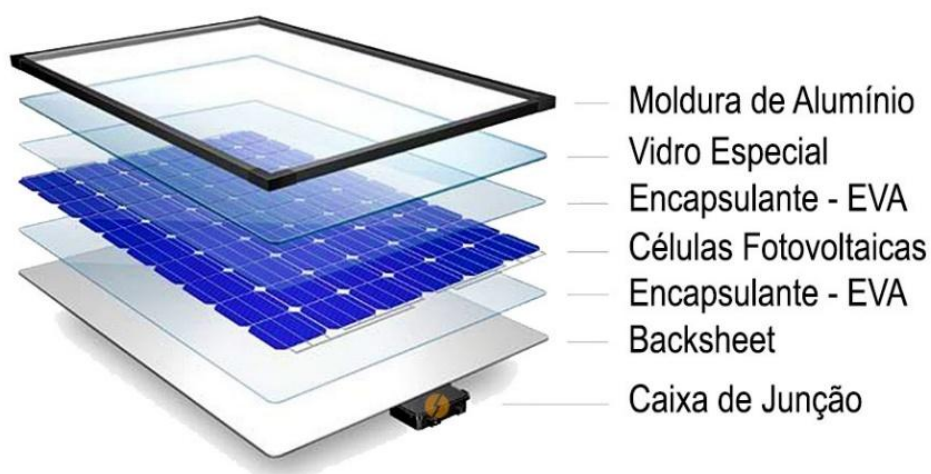
No entanto, a literatura também converge ao indicar que o desempenho real dos sistemas fotovoltaicos é fortemente condicionado pelas características ambientais locais, como temperatura, nebulosidade, umidade e ocorrência de eventos extremos, de modo que a simples disponibilidade de irradiância elevada não garante eficiência energética ótima ou resiliência operacional (TAKEUCHI et al.,

2022). Essa constatação é particularmente relevante para regiões tropicais úmidas, como o Norte Fluminense, onde elevadas temperaturas médias, alta umidade relativa do ar e chuvas concentradas podem afetar o rendimento e a durabilidade dos sistemas.

Diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicos, como silício monocristalino, policristalino e filmes finos, apresentam particularidades que condicionam seu desempenho em variados contextos climáticos.

Segundo Benghanem et al. (2023) os módulos monocristalinos, representados esquematicamente na Figura 3, apresentam maior eficiência de conversão e melhor desempenho sob baixa irradiância, o que os torna vantajosos em ambientes urbanos com limitações de espaço. Além disso, seu coeficiente térmico geralmente inferior favorece o desempenho em regiões quentes.

Figura 3 – Estrutura interna de um módulo fotovoltaico monocristalino.



Fonte: Khalil e Kamoona (2024).

Em regiões quentes e úmidas, o desempenho permanece tecnicamente viável, porém a elevação da temperatura de operação pode ampliar perdas e reduzir a eficiência ao longo de períodos prolongados de calor, reforçando a necessidade de considerar as condições ambientais locais na especificação (BENGHANEM et al., 2023).

Para Bühler et al. (2019) as tecnologias de filmes finos, diferenciam-se por utilizar camadas semicondutoras extremamente delgadas, apresentando vantagens

como menor consumo de matéria-prima e menor energia embebida no processo produtivo, além de possibilitar a fabricação de módulos mais leves e potencialmente flexíveis, com maior facilidade de integração em diferentes superfícies. Essas características tornam os filmes finos potencialmente interessantes para regiões com elevada nebulosidade e temperaturas elevadas.

Islam et al. (2024) aponta que apesar do avanço tecnológico e da diversidade de soluções disponíveis, a literatura apresenta divergências quanto à tecnologia mais adequada para regiões tropicais úmidas. Enquanto parte dos estudos enfatiza a superioridade dos módulos monocristalinos devido à eficiência e menor coeficiente térmico, outros destacam o potencial dos filmes finos em ambientes de alta temperatura e nebulosidade frequente (AYADI et al., 2022). Essas divergências decorrem, em grande medida, das diferentes métricas utilizadas para avaliação de desempenho, como eficiência nominal, produção anual específica, custo nivelado de energia e durabilidade em longo prazo.

Ao considerar as características físicas e climáticas do município, torna-se possível discutir não apenas o potencial teórico de geração solar, mas também os desafios operacionais associados às condições ambientais regionais. Essa abordagem permite subsidiar escolhas tecnológicas mais adequadas ao clima do Norte Fluminense, contribuindo para o planejamento energético local e para estratégias de adaptação às mudanças climáticas.

2.4. Políticas Públicas e Estratégias de Adaptação Climática

As políticas públicas de adaptação às mudanças climáticas constituem um dos principais instrumentos para reduzir vulnerabilidades socioambientais e garantir a resiliência de sistemas urbanos, hídricos e energéticos (MENDES et al., 2022). Embora o arcabouço internacional estabeleça diretrizes gerais para mitigação e adaptação, ele é geralmente enquadrado, na prática, como instrumento de mitigação — sobretudo por meio de metas e compromissos de redução de emissões —, sua relevância efetiva manifesta-se na forma como essas orientações são internalizadas em políticas nacionais e traduzidas em ações locais.

No contexto brasileiro, as diretrizes globais sobre mudanças climáticas foram incorporadas a instrumentos como o Plano Nacional de Mudança do Clima Plano

Clima 2024–2035) e, no eixo de adaptação, ao Plano Clima Adaptação , que libera a necessidade de abordagens territorializadas e multiescala (REZENDE MONTEIRO et al., 2025).

A dimensão energética assume papel estratégico nesse processo. A elevada dependência do sistema elétrico brasileiro de fontes sensíveis à variabilidade climática, aliada à crescente ocorrência de eventos extremos, amplia a vulnerabilidade do setor e reforça a necessidade de diversificação da matriz (CUARTAS et al., 2022). Nesse cenário, a energia solar fotovoltaica emerge não apenas como alternativa de mitigação das emissões, mas também como ferramenta de adaptação climática, ao reduzir a pressão sobre sistemas hidrelétricos em períodos de estiagem e aumentar a resiliência energética em escala local.

As políticas de incentivo à geração distribuída no Brasil estimularam a expansão da energia solar em áreas urbanas e rurais, criando oportunidades para a descentralização da produção energética (SILVA et al., 2024). Essa descentralização é particularmente relevante em municípios sujeitos a eventos hidrometeorológicos extremos, pois reduz a dependência de infraestruturas centralizadas e aumenta a capacidade de resposta a interrupções no fornecimento de energia.

No contexto de Campos dos Goytacazes, a articulação entre políticas climáticas e energéticas apresenta potencial estratégico. O município combina elevada exposição a extremos hidrológicos com condições favoráveis à geração solar, o que torna a energia fotovoltaica uma alternativa relevante para aumentar a segurança energética local. A adoção de sistemas fotovoltaicos em edifícios públicos, escolas, unidades de saúde e comunidades vulneráveis pode contribuir simultaneamente para a redução de custos operacionais, a mitigação de emissões e o fortalecimento da resiliência urbana (D'ADAMO et al., 2020).

Apesar do potencial de integração entre transição energética e adaptação, observar que, no nível municipal, as ações climáticas tendem a ocorrer de forma setorial e um pouco articulada, o que dificulta a transformação das diretrizes nacionais em estratégias coerentes de planejamento urbano e gestão de riscos, ainda que algumas capitais já tenham avançado com estratégias e planos locais de adaptação e ação climática (DI GIULIO et al., 2019). A literatura sobre adaptação destaca que a efetividade das respostas depende de políticas públicas capazes de

dialogar com a tomada de decisão e de se adequar às realidades sociais, econômicas e ambientais dos territórios, o que reforça a importância de incorporar conhecimento local e evidências nos processos decisórios.

3. METODOLOGIA

3.1. Estrutura geral do estudo

O estudo foi conduzido em etapas sequenciais para garantir coerência entre aquisição de dados, tratamento estatístico e simulações energéticas. O uso de Inteligência Artificial (IA) limitou-se a apoio operacional supervisionado (organização de texto, auxílio na elaboração/revisão de rotinas e scripts e checagens preliminares de consistência), enquanto os softwares científicos (R/Python e System Advisor Model (SAM/PySAM)) foram empregados como ferramentas centrais da metodologia para processamento, análise estatística e simulações energéticas. A interpretação, a metodologia, a análise, a discussão e as conclusões permaneceram integralmente sob responsabilidade do pesquisador.

Foram integradas quatro bases climáticas com escalas e funções complementares: séries observadas locais (referência empírica), reanálise global de alta qualidade e conjuntos de projeções futuras em alta resolução sob cenários distintos. O fluxo metodológico incluiu:

- (i) seleção e harmonização das bases;
- (ii) pré-processamento e controle de qualidade (QA/QC);
- (iii) validação e correção de viés em período de referência comum;
- (iv) análises estatísticas de variabilidade, tendências e mudanças de regime;
- (v) conversão dos dados meteorológicos em insumos energéticos para simulação da geração fotovoltaica. Os resultados foram apresentados, prioritariamente, como mudanças relativas (Δ) em relação ao baseline observado, permitindo avaliar conjuntamente alterações no regime de chuvas e seus efeitos no potencial fotovoltaico em Campos dos Goytacazes.

A integração clima–energia foi conduzida de forma mista: quantitativamente, por meio de correlações (Pearson e Spearman) entre precipitação e variáveis radiativas de Irradiância Horizontal Global e Irradiância Horizontal Difusa (GHI/DHI) no período histórico, e, prospectivamente, pela comparação de Δ entre cenários nas simulações fotovoltaicas; além disso, os mecanismos físicos (nebulosidade/umidade) foram discutidos de forma interpretativa.

3.2. Bases de dados climáticos

Esta seção descreve as bases utilizadas, seus papéis metodológicos, períodos, variáveis e critérios de seleção/uso.

3.2.1. Observações: INMET/BDMEP (Estação Campos dos Goytacazes – código 83698)

Foram utilizados registros observacionais do INMET para Campos dos Goytacazes (código 83698), obtidos no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP/INMET). A série considerada abrange 1994–2024, escolhida por representar a maior janela observacional contínua disponível e permitir comparação direta com o período histórico adotado nas demais bases. Os dados observacionais constituíram o referencial empírico do estudo para:

- (i) estatísticas descritivas e checagem de ordem de grandeza/unidades;
- (ii) validação e quantificação de vieses de produtos modelados no período de sobreposição;
- (iii) referência para calibração/correção sistemática quando aplicável, mantendo as análises ancoradas nas condições efetivamente observadas na área de estudo (INMET, [s. d.]).

3.2.2. Reanálise: ERA5/ERA5-Land (ECMWF)

O ERA5 é a quinta geração de reanálises atmosféricas produzida pelo European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) e disponibilizada pelo Copernicus Climate Change Service (C3S). Trata-se de um conjunto de dados climáticos globais que combina observações históricas com modelagem numérica por assimilação de dados, resultando em séries contínuas, fisicamente consistentes e espacialmente completas de variáveis atmosféricas e de superfície. O ERA5 fornece estimativas horárias em uma grade global com resolução horizontal de aproximadamente 31 km ($\sim 0,25^\circ$), sendo amplamente utilizado em estudos climáticos e hidrometeorológicos por permitir comparações consistentes no espaço e no tempo.

O recorte histórico 1994–2024 foi escolhido por reunir observações mais consistentes e boa cobertura instrumental, permitindo analisar tendências recentes e

eventos. Esse intervalo representa melhor o clima contemporâneo de Campos dos Goytacazes e captura tanto a sazonalidade quanto anomalias em diferentes escalas. Para o período futuro 2025–2054, adotou-se uma janela equivalente de 30 anos para comparabilidade estatística entre histórico e projeções (ARGUEZ *et al.*, 2019).

O ERA5 foi usado como complemento às observações locais, e não como substituto, por três motivos principais: (i) oferecer um campo espacial contínuo para contextualização regional; (ii) disponibilizar de forma homogênea e contínua variáveis essenciais à integração clima–energia, especialmente radiação (GHI), além de temperatura, vento e umidade; e (iii) apoiar a validação e a correção de viés das saídas do modelo regional no período histórico, reduzindo a dependência de uma única fonte observacional e aumentando a robustez da comparação histórico–projeção.

As variáveis extraídas do ERA5 incluíram precipitação total, GHI, temperatura do ar, velocidade do vento e umidade relativa, com padronização de unidades para compatibilização das fontes (precipitação em mm; temperatura em °C; vento em m s^{-1} ; umidade em %; radiação em formato/unidade compatível com o simulador energético). As séries foram trabalhadas principalmente em escala diária e posteriormente agregadas para mensal e anual, permitindo validação no histórico, construção de climatologias e análise de variabilidade interanual e tendências.

3.2.3. Projeções globais em alta resolução: CMIP6 – NEX-GDDP

As projeções climáticas foram obtidas na base CMIP6–NEX-GDDP, que disponibiliza séries diárias em alta resolução ($\sim 0,25^\circ \approx 25 \text{ km}$) por meio de downscaling estatístico e padronização de variáveis, cobrindo o período histórico e os cenários futuros (THRASHER *et al.*, 2022). Foram adotados os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 por representarem trajetórias contrastantes de aquecimento e manterem compatibilidade com aplicações recentes na literatura e com a etapa energia–clima do estudo.

Considerando que modelos CMIP6 podem apresentar vieses e variação de desempenho, especialmente na representação de precipitação em diferentes regiões do Brasil, foram incorporadas rotinas de seleção, controle de qualidade e verificação de consistência antes da interpretação dos resultados (FIRPO *et al.*, 2022). Essa

cautela é particularmente relevante no estado do Rio de Janeiro e entorno, onde a literatura aponta elevada sensibilidade a variabilidade e extremos de precipitação (LUIZ-SILVA; OSCAR-JÚNIOR, 2022).

Durante o pré-processamento, identificaram-se lacunas pontuais em variáveis do NEX-GDDP. Para preservar a continuidade das séries, aplicou-se procedimento de contingência no pipeline automatizado, com substituições controladas por variáveis equivalentes de base complementar e aplicação de fator de escala para atenuar picos não físicos de irradiância. Essas etapas foram registradas no fluxo de processamento, garantindo rastreabilidade das alterações.

3.2.4. Projeções regionais: ETA-BESM (CPTEC/INPE)

O ETA-BESM corresponde a projeções climáticas regionais geradas com o modelo Eta (CPTEC/INPE) utilizando condições de contorno do BESM, permitindo refinar espacialmente informações para a América do Sul e produzir campos mais detalhados de variáveis hidrometeorológicas (HOLBIG et al., 2018). Neste estudo, foram utilizados os arquivos diários de precipitação do ETA-BESM, disponibilizados em formato NetCDF com metadados padronizados.

Optou-se por utilizar saídas já existentes do ETA-BESM (sem execução de novas simulações). Operacionalmente, a validação do ETA-BESM foi concentrada no intervalo de sobreposição 1994–2005 (limitado pela disponibilidade do histórico). Para o histórico ampliado (1994–2024), a comparação principal foi conduzida entre bases com continuidade temporal nessa janela; o ETA-BESM foi analisado no futuro (a partir de 2006) sob RCP 4.5 e RCP 8.5, reportando resultados preferencialmente como mudança (Δ) em relação ao baseline observado, reduzindo a influência de vieses absolutos.

Com resolução espacial ~ 20 km, o downscaling dinâmico favorece a representação de heterogeneidades regionais relevantes para precipitação, especialmente em áreas costeiras e de planície (HOLBIG et al., 2018). O ETA-BESM foi empregado exclusivamente na componente pluviométrica, enquanto a componente fotovoltaica foi construída com variáveis atmosféricas e radiativas provenientes de outras fontes, mantendo coerência entre dados, variáveis e objetivos.

3.3. Tratamento, padronização e validação dos dados

Esta seção centraliza as rotinas de pré-processamento, QA/QC, validação, correção de viés e critérios de comparabilidade.

3.3.1. Pré-processamento e harmonização

As séries foram padronizadas quanto a formato, unidades, recortes espacial/temporal e harmonização temporal. Foram tratados valores ausentes e realizadas checagens de consistência (lacunas, duplicatas e intervalos inválidos). Para agregação temporal, precipitação (variável acumulativa) foi somada em escalas mensal e anual; variáveis contínuas (GHI, temperatura, vento, umidade) foram agregadas por médias.

Para a etapa fotovoltaica, as séries foram organizadas em resolução horária com 8.760 registros/ano. Em anos bissextos, removeu-se o dia 29/02 (24 h) para padronizar todos os anos em 8.760 horas, evitando desalinhamentos temporais e assegurando comparabilidade entre cenários, com efeito residual ($\sim 0,27\%$ do ano bissexto).

3.3.2. Controle de qualidade (QA/QC) e critérios de cobertura

Como é comum em séries observacionais e produtos derivados, identificaram-se lacunas e inconsistências pontuais. O QA/QC incluiu: checagens de plausibilidade física, inspeção de outliers, quantificação de ausências/zeros e qualificação por cobertura. Totais anuais foram considerados válidos apenas quando a fração de dias observados atingiu limiar mínimo (por exemplo, $\geq 90\%$). Anos que não atenderam ao critério foram marcados como NA, evitando vieses por subamostragem sem recorrer a preenchimentos artificiais.

Importante ressaltar que valores elevados de precipitação não foram automaticamente tratados como erro por regra única; quando detectadas inconsistências de ordem de grandeza, adotou-se abordagem conservadora baseada em verificação cruzada entre fontes e coerência temporal, evitando correções mecânicas que possam distorcer a série.

3.3.3. Validação entre bases no período de sobreposição

A coerência entre observação, reanálise e projeções foi verificada no período de sobreposição por métricas de associação e erro. Foram utilizadas correlações de Pearson e Spearman, além de viés médio (MBE/bias), Erro Absoluto Médio (MAE), Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) e, quando pertinente, MAPE, para quantificar aderência e discrepâncias sistemáticas entre séries observadas (INMET) e produtos modelados (ERA5 e ETA-BESM), subsidiando a interpretação da confiabilidade relativa das fontes.

3.3.4. Correção de viés e reporte de mudanças (Δ)

Para comparar de forma consistente histórico e projeções, as variáveis modeladas passaram por correção de viés em um período de referência comum, reduzindo discrepâncias sistemáticas entre fontes sem alterar o sinal de mudança projetado. Em seguida, o ajuste foi aplicado às projeções futuras. Os resultados foram reportados prioritariamente como Δ (mudança) em relação ao baseline observado ou ao histórico do próprio modelo ($\text{futuro_modelo} - \text{histórico_modelo}$), reduzindo a influência de vieses absolutos.

3.4. Comparação entre períodos e cenários climáticos

A comparação entre cenários foi realizada definindo períodos, variáveis e métricas padronizadas. O período histórico de referência foi estabelecido pela janela comum entre séries observadas e reanálises, adotando-se 1994–2024 como baseline operacional. A partir desse baseline, as projeções foram organizadas por cenário e por janelas futuras disponíveis (por exemplo, 2025–2054), para quantificar mudanças no regime climático e seus possíveis efeitos no potencial energético.

Na análise pluviométrica, os cenários foram comparados ao baseline por:

(a) estatísticas descritivas (média e variabilidade)

(b) mudança relativa (Δ) em relação ao período histórico

(c) comportamento temporal, com testes de tendência e de mudança de regime, permitindo avaliar significância, magnitude e possíveis quebras estruturais.

Na componente fotovoltaica, os cenários foram representados por séries de GHI processadas e usadas no simulador energético, mantendo parâmetros técnicos fixos

do sistema para garantir comparabilidade entre simulações. Os resultados foram interpretados como variações relativas ao baseline e à variabilidade climática, destacando a integração clima-energia: alterações no regime de chuvas e na dinâmica atmosférica (incluindo nebulosidade) podem afetar a radiação disponível e, conseqüentemente, a geração fotovoltaica.

3.5. Métodos estatísticos

3.5.1. Estatística descritiva

A estatística descritiva foi utilizada como etapa inicial de controle de qualidade e caracterização climática-energética, permitindo resumir comportamento das séries, identificar padrões, variabilidade e possíveis inconsistências antes das análises inferenciais. As métricas foram calculadas separadamente para cada fonte e em três escalas: diária, mensal e anual. Para precipitação, utilizaram-se somas diária→mensal/anual e avaliação de distribuição por ano/década. Para variáveis contínuas (GHI, temperatura, vento e umidade), utilizaram-se médias e quantis (quartis), além de mediana para reduzir sensibilidade a assimetrias.

A média aritmética foi aplicada para representar o valor típico:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad 4.1$$

O desvio padrão amostral:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad 4.2$$

E a amplitude interquartilica:

$$IQR = Q_3 - Q_1 \quad 4.3$$

Foram elaborados boxplots sazonais e decadais para comparar distribuição, dispersão e outliers entre fontes e períodos.

3.5.2. Tendência temporal: Mann-Kendall e inclinação de Sen

Para identificar tendências monotônicas, adotou-se o teste não paramétrico de Mann-Kendall (MK) (MANN, 1945; KENDALL, 1975), amplamente aplicado em climatologia e hidrologia por não exigir normalidade e ser robusto a outliers (GOMES

JUNIOR; ELY, 2021). A estatística do teste S é dada por:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad 4.4$$

com sgn definido por:

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & \text{se } x_j - x_i > 0 \\ 0 & \text{se } x_j - x_i = 0 \\ -1, & \text{se } x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad 4.5$$

A variância $\text{Var}(S)$, considerando a correção para grupos de valores iguais, obtida por (Kendall, 1975):

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^g t_p(t_p-1)(2t_p-5)}{18} \quad 4.6$$

E a estatística padronizada do teste (Z) obtida por:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad 4.7$$

A magnitude foi estimada pela inclinação de Sen (SEN, 1968):

$$Q = \text{mediana} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \forall j > i \quad 4.8$$

Adotou-se $\alpha = 0,05$. Os testes foram aplicados principalmente a séries anuais (totais anuais de precipitação e energia anual), reduzindo influência da sazonalidade.

3.5.3. Mudança de regime: teste de Pettitt

O teste de Pettitt (PETTITT, 1979), método não paramétrico utilizado para identificar pontos de mudança (change points) ao longo do período histórico, foi aplicado para detectar quebras estruturais em séries temporais.

3.5.4. Anomalias

As anomalias foram calculadas em relação a um período de referência definido pela maior sobreposição e completude entre bases, adotando-se 1994–2024 como janela trintenar histórica operacional. A anomalia percentual foi definida como:

$$A_t = \frac{X_t - \bar{X}_{ref}}{X_{ref}} \times 100 \quad 4.9$$

As anomalias foram aplicadas às variáveis climáticas (precipitação, radiação, temperatura, vento, umidade) e às variáveis energéticas derivadas (GHI/DNI/DHI), além de análises sazonais dos trimestres do ano (dezembro, janeiro, fevereiro (DJF), março, abril, maio (MAM), junho, julho, agosto (JJA), setembro, outubro, novembro (SON)).

3.6. Modelagem climática: cenários e coerência entre famílias (RCP e SSP)

As projeções futuras foram consideradas conforme a finalidade de cada etapa: na análise pluviométrica, utilizaram-se cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 (VAN VUUREN et al., 2011) associados ao ETA-BESM; na componente fotovoltaica, utilizaram-se SSP2-4.5 e SSP5-8.5 (RIAHI et al., 2017) provenientes do CMIP6–NEX-GDDP, mantendo coerência entre variáveis disponíveis e o escopo de cada etapa, sem misturar cenários distintos na mesma análise.

3.7. Modelagem energética: SAM/PySAM e parametrização do sistema fotovoltaico

3.7.1. Ferramentas computacionais

O processamento e a análise foram realizados com ferramentas selecionadas conforme sua função no fluxo de trabalho. As análises pluviométricas e estatísticas foram conduzidas em R (v. 4.3.2). O Python foi utilizado para automatizar pré-processamento, transformação e integração de dados (NetCDF/GRIB), verificação de consistência e geração de insumos. A simulação fotovoltaica foi realizada com o System Advisor Model (SAM), desenvolvido pelo NREL, e com sua interface PySAM, permitindo execução programática e reprodutível (NREL, 2022; PAULA et al., 2022).

3.7.2. Conversão de dados climáticos para arquivos SAM (8760 horas/ano)

As séries meteorológicas foram organizadas no formato exigido pelo SAM, com variáveis DateTime, GHI, DNI, DHI, TempC, WindSpeed e RelHum. Para garantir uniformidade temporal, anos bissextos foram harmonizados para 8.760 horas/ano conforme descrito na Seção 3.3.1.

3.7.3. PVWatts v8: configuração do sistema

O modelo PVWatts v8 foi implementado via PySAM. Optou-se por valores padrão recomendados pelo NREL/PVWatts sempre que possível, alterando apenas parâmetros necessários para representar condições típicas de implantação em Campos dos Goytacazes e garantir comparabilidade entre cenários. O sistema foi representado como usina fixa em solo (“open rack”), sem rastreamento, com capacidade de 1 MWp, inclinação de 21,5°, azimute 0°, DC/AC = 1,2, eficiência do inversor = 96% e perdas totais de 14%. O parâmetro GCR = 0,40 foi mantido como referência estrutural.

Quanto ao albedo, optou-se por não parametrizá-lo explicitamente no fluxo adotado (PVWatts v8 via PySAM), mantendo hipóteses padronizadas para comparação Inter cenários. Reconhece-se como limitação que o albedo pode influenciar a irradiância efetiva em sistemas em solo sob condições específicas, recomendando-se sua inclusão em estudos futuros com caracterização do entorno.

A Tabela 1 consolida os parâmetros efetivamente utilizados nas simulações do PVWatts v8 (via PySAM), garantindo transparência e reprodutibilidade.

Tabela 1 – Parâmetros e padrões de configuração utilizados nas simulações do modelo PVWatts v8.

Categoria	Parâmetro	Valor utilizado	Observação / Default oficial
Módulo	module_type	0 (Standard)	0=Standard, 1=Premium, 2=Thin-film. PySAM
Arranjo	array_type	0 (Fixed open rack)	Fixo (sem rastreamento); demais: 1=fixed roof, 2=1-eixo, 3=1-eixo backtracking, 4=2-eixos. PySAM
Geometria	tilt	21,5°	—
Orientação	azimuth	0° (Norte)	Convenção PVWatts: N=0, L=90, S=180, O=270. PySAM
Layout	gcr	0,4	Default de referência 0,40; ignorado para arranjos fixos. Climate Forward
Dimensionamento	system_capacity	1000 kW_DC	—
Sobredimensionamento	dc_ac_ratio	1,2	Default atualizado pela NREL (antes 1,10). PVWatts Calculator
Inversor	inv_eff	96%	Padrão do PySAM quando não especificado. PySAM
Perdas	losses	14%	Default PVWatts (perdas agregadas). ESIG+1
Albedo	albedo	não especificado	Entrada opcional no PVWatts API v8; sem default numérico automático. developer.nrel.gov
Resolução	Série horária	8760 h/ano	29/02 removido em bissextos (pré-processo). —

Fonte: Autor (2025).

3.7.4. Simulações e indicadores de desempenho

As simulações produziram séries horárias (8.760 valores/ano), a partir das quais foram obtidas energias mensais e anuais e o fator de capacidade. Os parâmetros técnicos do sistema foram mantidos constantes entre cenários, de modo que diferenças nos resultados fossem atribuídas predominantemente às mudanças climáticas. Os indicadores estatísticos (média, P10 e P90) foram calculados sobre a distribuição de valores anuais de geração (MWh/ano) ao longo do conjunto de anos de cada período/cenário, sintetizando a variabilidade interanual e condições desfavoráveis/favoráveis de recurso.

O estudo abordou a avaliação da produção energética anual simulada a partir do modelo SAM (PVWatts v8), considerando o efeito das projeções climáticas derivadas dos cenários do CMIP6 aplicadas por meio da técnica de morphing. Esse procedimento possibilitou a adaptação de dados históricos observados para condições climáticas futuras, permitindo examinar possíveis alterações na geração fotovoltaica em decorrência das mudanças projetadas nas variáveis atmosféricas. Assim, buscou-se identificar o comportamento médio anual da produção de energia elétrica (MWh) e do fator de capacidade (CF) em diferentes contextos temporais e cenários de emissões.

Os resultados consolidados foram submetidos a um conjunto de rotinas de pós-processamento responsáveis por calcular médias anuais, decenais e tendências relativas (em % por década), bem como a cobertura de dados de cada cenário. Foram produzidos quatro arquivos analíticos: `summary_by_year.csv` (médias anuais), `summary_decadal.csv` (médias por década), `trends.csv` (taxas de variação) e `coverage.csv` (número de anos válidos por cenário). Além disso, aplicou-se uma suavização temporal móvel de cinco anos (rolling mean) para destacar a variabilidade de longo prazo. Esses indicadores possibilitam avaliar a robustez dos cenários climáticos e a estabilidade do desempenho fotovoltaico projetado.

Cada simulação do SAM gerou arquivos de saída em três níveis:

- I. Arquivos horários morfados por cenário e ano;
- II. Registros de log contendo o tempo de execução e as configurações de entrada;
- III. Um arquivo consolidado (`resultado_sam_consolidado_morph.csv`) que

centraliza os indicadores energéticos de cada rodada, incluindo produção anual (MWh), fator de capacidade e estado da simulação;

O conjunto foi estruturado em diretórios datados, o que permite reprocessamento e auditoria das etapas de execução.

3.8. Integração clima–energia

A integração entre precipitação e geração fotovoltaica foi estruturada para conectar mudanças no regime de chuvas à dinâmica atmosférica (nebulosidade/transmitância) e, conseqüentemente, à disponibilidade de radiação solar na superfície. O pipeline pluviométrico consolidou séries comparáveis em escalas diária, mensal e anual (ERA5, INMET e ETA-BESM), com QA/QC, validação e métricas de erro, fornecendo base robusta para interpretação de sinais de mudança.

Na etapa clima–energia, as variáveis meteorológicas e radiativas (com foco em GHI) foram convertidas em insumos para o SAM/PVWatts. O sinal de mudança foi estimado como $\Delta = \text{Futuro} - \text{Histórico}$, utilizando a mesma cadeia de dados para ambos os períodos, evitando comparações diretas entre bases distintas. Quando necessária comparação com referência observacional, as séries projetadas foram previamente ajustadas por correção de viés no período de sobreposição, assegurando coerência estatística.

Como aprofundamento, exploraram-se relações estatísticas entre variáveis climáticas e energéticas por correlações (Pearson e Spearman), investigando em que medida variações de precipitação se associam a mudanças na GHI e no desempenho fotovoltaico simulado, incluindo padrões sazonais e anos extremos relevantes ao planejamento.

3.9. Reprodutibilidade e disponibilidade de materiais

Com o objetivo de garantir reprodutibilidade e transparência, scripts, rotinas e resultados foram organizados em repositórios públicos no GitHub:

- **Análises Pluviométricas:**
 - <https://github.com/Grmin01/Analise-Pluviometrica.git>
- **Análises Fotovoltaicas:**

- <https://github.com/Grmin01/Analise-Fotovoltaica.git>

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são apresentados de forma integrada, relacionando alterações no regime pluviométrico às respostas energéticas simuladas para Campos dos Goytacazes. Na componente climática, a precipitação foi analisada com base no histórico (1994–2024) e nas projeções do ETA-BESM sob RCP4.5 e RCP8.5, reportando-se mudanças como Δ em relação ao baseline, além de métricas de tendência e mudança de regime. Na componente fotovoltaica, o desempenho foi estimado no SAM/PVWatts a partir de séries horárias derivadas do ERA5 e ajustadas por morphing com CMIP6/NEX-GDDP sob SSP2-4.5 e SSP5-8.5.

4.1. Integração entre Clima e Energia

4.1.1. Padronização e Qualidade dos Dados

A etapa inicial deste estudo consistiu na padronização e verificação da qualidade das séries anuais de precipitação observadas no município de Campos dos Goytacazes, abrangendo o período de 1994 a 2024. Essa etapa é fundamental para garantir a consistência estatística e temporal dos dados que servem de base às análises climáticas subsequentes, incluindo o cálculo de anomalias, tendências e comparações entre diferentes fontes de informação.

Cabe destacar que, nos casos de ausência de séries anuais completas, as bases diárias do modelo ETA-BESM foram reamostradas e agregadas para reconstrução dos totais anuais, mantendo-se a coerência metodológica com o período histórico. Esse procedimento foi automatizado nos scripts de processamento em R e assegura consistência entre as comparações históricas e futuras.

A Tabela 2 apresenta os totais anuais de precipitação (ERA5) após a padronização, com valores entre 740,85 mm/ano (2014) e 1769,94 mm/ano (2008). Essa amplitude evidencia variabilidade interanual relevante no regime pluviométrico regional. Do ponto de vista operacional para geração fotovoltaica, anos com déficit pluviométrico tendem a estar associados a menor persistência de nebulosidade e, portanto, a maior disponibilidade de radiação incidente; assim, os anos mais secos constituem candidatos naturais a apresentar melhor desempenho anual médio, hipótese que é examinada na integração chuva–GHI e nas simulações de geração.

Tabela 2 – Série anual ERA5 padronizada (1994–2024) (mm/ano)

ANO	PRECIPITAÇÃO	ANO	PRECIPITAÇÃO
1994	1322,30	2010	1275,20
1995	1355,93	2011	1355,19
1996	1321,95	2012	1003,94
1997	1412,73	2013	1572,22
1998	1314,04	2014	740,85
1999	1172,43	2015	892,69
2000	1013,47	2016	1152,74
2001	1030,04	2017	846,37
2002	1206,76	2018	1364,83
2003	1387,20	2019	1005,27
2004	1460,44	2020	1532,20
2005	1666,52	2021	1233,79
2006	1261,08	2022	1229,81
2007	1155,19	2023	846,40
2008	1769,94	2024	1207,71
2009	1736,02		

Fonte: Autor (2025).

A análise dos valores apresentados na Tabela 3 indicou variação interanual expressiva da precipitação no município de Campos dos Goytacazes. Observam-se anos com totais inferiores a 700 mm, como 2014 (676,0 mm) e 2023 (567,8 mm), caracterizados por déficit pluviométrico, e anos com valores superiores a 1500 mm, como 2005 (1548,1 mm) e 2008 (1630,2 mm), associados a maior concentração de chuvas. Essa oscilação reflete a variabilidade natural do regime pluviométrico local e a combinação de controles em diferentes escalas, incluindo a modulação regional por condições oceânicas no Atlântico Tropical, além de processos atmosféricos de mesa escala e variabilidade mesa escala, que influenciam a ocorrência e a persistência de eventos chuvosos ao longo do ano.

Tabela 3 – Série anual Estação (INMET) padronizada (1994–2024) (mm/ano)

ANO	PRECIPITACAO	ANO	PRECIPITACAO
1994	629,6	2010	681,9
1995	812,6	2011	730,1
1996	621,8	2012	864,5
1997	725,2	2013	1177,1
1998	938,6	2014	676
1999	868,2	2015	809,4
2000	688,9	2016	860,2
2001	647,1	2017	859,3
2002	850,6	2018	1001
2003	892,7	2019	1055,2
2004	1128,2	2020	916,9
2005	1548,1	2021	986,4
2006	976,6	2022	928,4
2007	1191,6	2023	567,8
2008	1630,2	2024	1170,5
2009	1008,2		

Fonte: Autor (2025).

Verificou-se, no período recente, alternância de fases mais secas e mais úmidas em sequência relativamente curta, com sucessões de anomalias negativas e positivas no histórico — por exemplo, no ERA5 foram identificadas sequências de anomalias negativas entre 2014 e 2017 e positivas entre 2005 e 2009, evidenciando oscilações interanuais no regime pluviométrico.

Com o intuito de comparar as distribuições anuais de precipitação entre as diferentes fontes, realizou-se uma análise estatística descritiva para os conjuntos ERA5, Estação Meteorológica e ETA-BESM (histórico). Essa síntese permite caracterizar a amplitude e a posição relativa de cada série em termos de quartis e extremos (Tabela 4). Observa-se que ERA5 e Estação apresentam faixas e dispersões comparáveis (ERA5: mediana = 1261,08 mm/ano; Estação: mediana = 868,20 mm/ano), ainda que com deslocamento sistemático de magnitude entre as séries. Em contraste, o ETA-BESM (histórico) apresenta distribuição claramente deslocada para valores mais altos (mediana = 2520,18 mm/ano; Q25–Q75 = 2030,43–3040,28 mm/ano), indicando viés úmido no período de sobreposição — padrão consistente com o diagnóstico já discutido anteriormente a partir das métricas de comparação no histórico (superestimação no valor absoluto anual).

Dado que totais anuais próximos ou superiores a 2.000 mm podem ocorrer

regionalmente em áreas costeiras e, sobretudo, em setores orográficos do Sudeste, conforme indicado por climatologias e mapeamentos oficiais de precipitação anual (isoietas) e por estudos climatológicos na bacia do Paraíba do Sul, a interpretação desses valores em escala municipal/pontual é sensível à representatividade espacial do dado modelado (grade/pixel) em relação ao ponto de medição da estação.

Por esse motivo, verificou-se a consistência da extração do ETA-BESM quanto ao recorte espacial (pixel/região utilizada) e sua compatibilidade com a área de interesse. Ainda assim, os resultados reforçam que a leitura do ETA-BESM em termos de magnitude absoluta local requer cautela, sendo metodologicamente mais robusto utilizar essas séries para análises comparativas (entre períodos/cenários) e/ou adotar uma abordagem baseada em mudanças relativas (Δ), com correção de viés quando for necessária ancoragem na referência observacional (normais/séries do INMET).

Tabela 4 – Estatísticas descritivas da precipitação anual (mm/ano) para as bases ERA5, Estação Meteorológica e ETA-BESM.

FONTES	N	MIN	Q25	MED	Q75	MAX	MEAN	SD
ERA5	31,00	740,85	1091,39	1261,08	1376,02	1769,94	1253,07	256,24
Estação	31,00	567,80	727,65	868,20	1004,60	1630,20	917,51	247,86
ETA-BESM (Hist)	12,00	1667,82	2030,43	2520,18	3040,28	3573,88	2519,52	584,32

Fonte: Autor (2025).

4.1.2. Análise de Consistência e Correlação entre Fontes

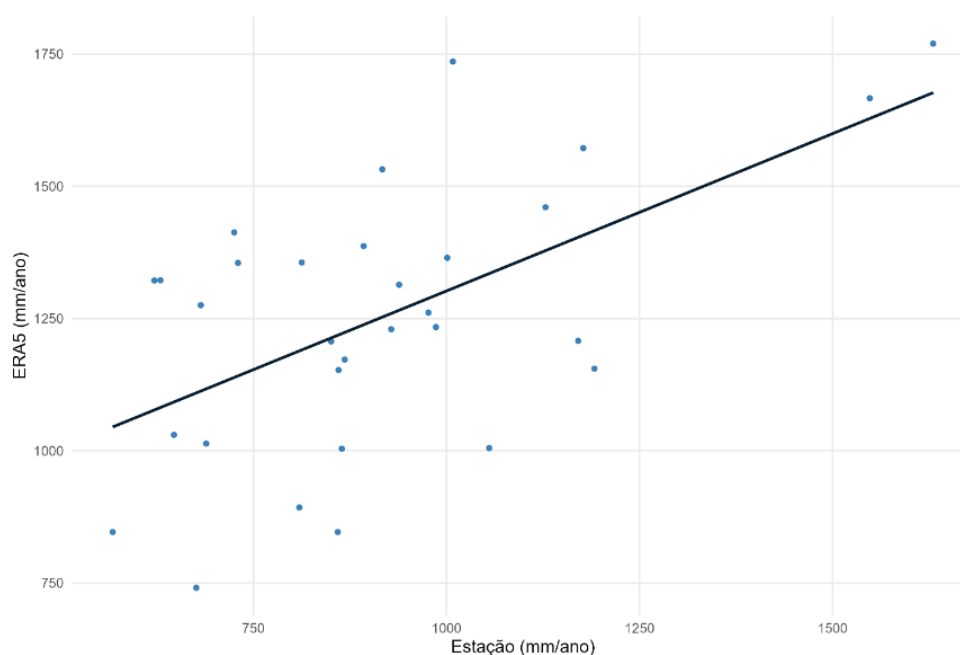
Na sequência da verificação de completude e consistência das séries, procedeu-se à avaliação da concordância estatística entre as fontes de precipitação utilizadas. Antes da interpretação das métricas, foi assegurada a integridade do processamento (unidades, agregação temporal por soma e extração espacial consistente com a área de interesse), de modo que diferenças entre séries não fossem atribuídas indevidamente a “sinal climático” quando pudessem decorrer de etapa de leitura/extração.

A comparação entre ERA5 e Estação Meteorológica (INMET) foi conduzida prioritariamente com base em valores mensais (totais mensais em mm/mês), considerando pares coincidentes no período de 1994 a 2024. Essa escolha segue a

prática comum em validações hidrometeorológicas, pois a escala mensal reduz a sensibilidade a desencontros de timing de eventos diários e permite avaliar de forma mais robusta a coerência do ciclo sazonal e da variabilidade intra-anual. Como análise complementar, avaliou-se também a escala anual (mm/ano), para descrever a variabilidade interanual e inspecionar possíveis vieses de magnitude em anos pareados. Assim, os Gráficos 1 e 2 apresentam dispersões anuais e devem ser interpretados como diagnóstico complementar, enquanto a quantificação de desempenho é reportada prioritariamente na escala mensal.

No Gráfico 1, apresenta-se a dispersão entre os totais anuais do ERA5 e da estação (anos pareados), evidenciando associação positiva entre as séries e a presença de discrepâncias de magnitude. Essa diferença é consistente com limitações esperadas na comparação ponto-grade: produtos de reanálise representam médias espaciais de uma célula de grade e tendem a suavizar extremos locais, podendo divergir do observado pontual, especialmente em anos com eventos intensos e alta variabilidade espacial. Assim, a leitura do espalhamento e da linha de tendência deve ser interpretada como indicativa de coerência geral do sinal (anos mais/menos chuvosos) e de possíveis vieses de magnitude, a serem quantificados após a validação do processamento.

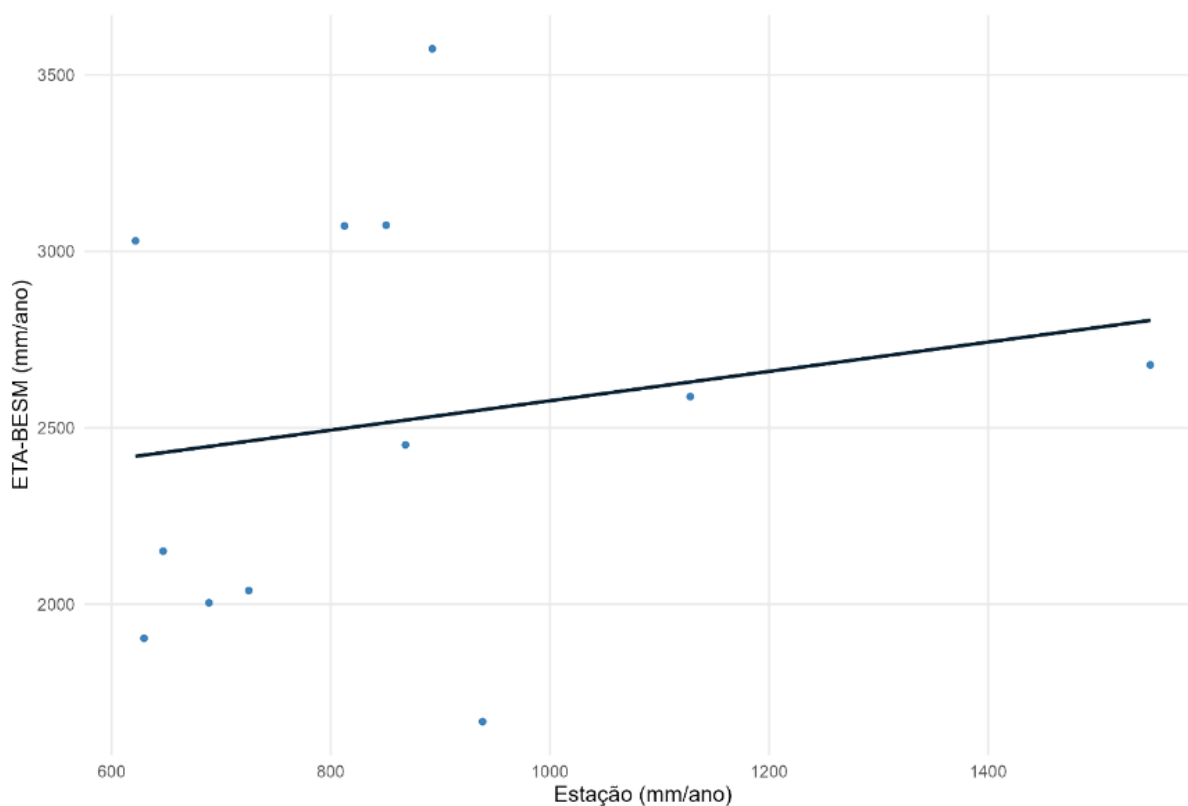
Gráfico 1 – Dispersão anual entre os totais de precipitação do ERA5 e da Estação Meteorológica (anos pareados).



Fonte: Autor (2025).

Examinou-se também a relação entre o ETA-BESM (histórico) e a estação meteorológica no período de sobreposição, igualmente priorizando a escala mensal. Como diagnóstico complementar, o Gráfico 2, apresenta a dispersão anual (anos pareados), na qual se observa deslocamento de magnitude e baixa correspondência linear. Essa evidência foi quantificada por meio dos coeficientes de correlação de Pearson (r) e de Spearman (ρ), além de métricas de erro (viés médio/Bias, MAE e RMSE) calculadas no período de sobreposição, corroborando a baixa aderência do modelo no valor absoluto anual. Considerando que modelos regionais podem apresentar vieses dependentes da parametrização e da representatividade espacial (incluindo efeitos de célula costeira e proximidade do oceano), os resultados do ETA-BESM foram interpretados com cautela quanto ao uso direto de valores absolutos locais, sendo mais adequados para análises comparativas entre períodos/cenários e/ou após correção de viés quando necessário.

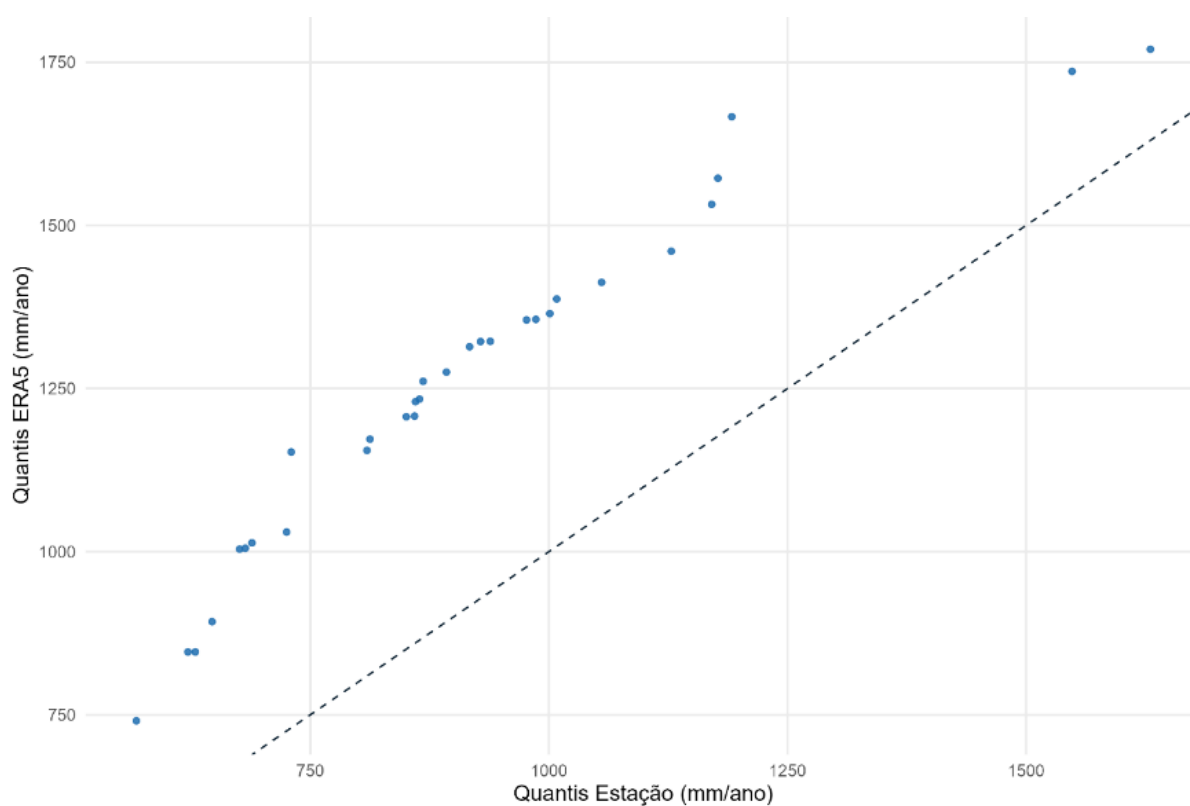
Gráfico 2 – Dispersão anual entre os totais de precipitação do modelo ETA-BESM (Histórico) e da Estação Meteorológica (anos pareados).



Fonte: Autor (2025).

Como complemento às métricas de associação e erro, foi construída uma comparação de quantis empíricos (Gráfico 3) entre o ERA5 e a estação. Para isso, os totais anuais de cada série no período comum foram ordenados e comparados por seus quantis amostrais correspondentes (isto é, cada ponto representa o quantil p do ERA5 versus o quantil p da estação), não se tratando de valores anuais pareados por ano-calendário. Assim, o gráfico avalia a aderência entre as distribuições empíricas das duas séries e evidencia discrepâncias sistemáticas ao longo da faixa de valores — com maior afastamento nos quantis superiores, onde efeitos de representatividade ponto–grade e suavização espacial tendem a ser mais pronunciados.

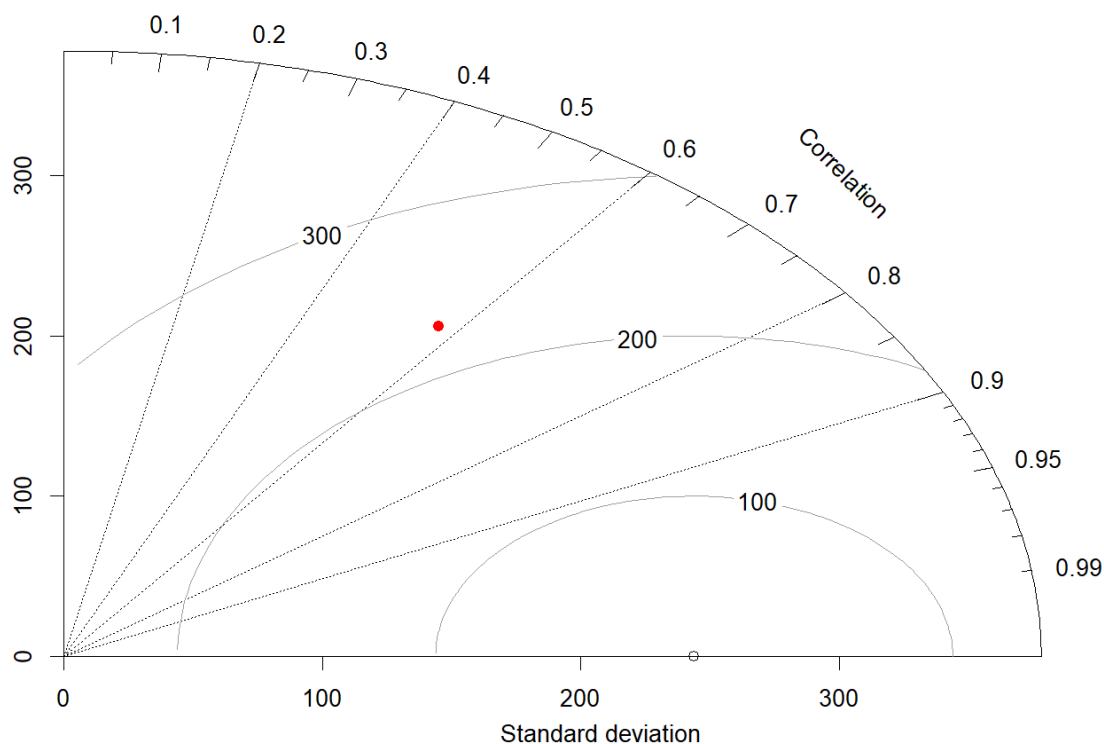
Gráfico 3 – QQ-plot empírico entre os quantis anuais de precipitação do ERA5 e da Estação Meteorológica.



Fonte: Autor (2025).

No diagrama de Taylor (Gráfico 4), o ponto correspondente ao ERA5 posiciona-se em região de correlação moderada com a série observacional (aproximadamente entre 0,5 e 0,6), indicando que parte da variabilidade interanual é reproduzida, porém sem forte aderência. Observa-se também que o desvio-padrão do ERA5 é inferior ao da estação (ponto do ERA5 mais próximo da origem do que a referência), sugerindo sub-representação da amplitude das oscilações anuais. Em termos de erro, o ponto situa-se próximo da isolinha de RMSE centrado da ordem de ~200 mm/ano, o que indica discrepância relevante mesmo após remover diferenças médias. Esses resultados reforçam que o ERA5 apresenta coerência parcial do sinal interanual, mas com variabilidade suavizada em relação ao observado, o que é consistente com limitações de representatividade ponto-grade e suavização típica de produtos em grade.

Gráfico 4 – Diagrama de Taylor entre os totais anuais de precipitação do ERA5 e da Estação Meteorológica (anos pareados).



Fonte: Autor (2025).

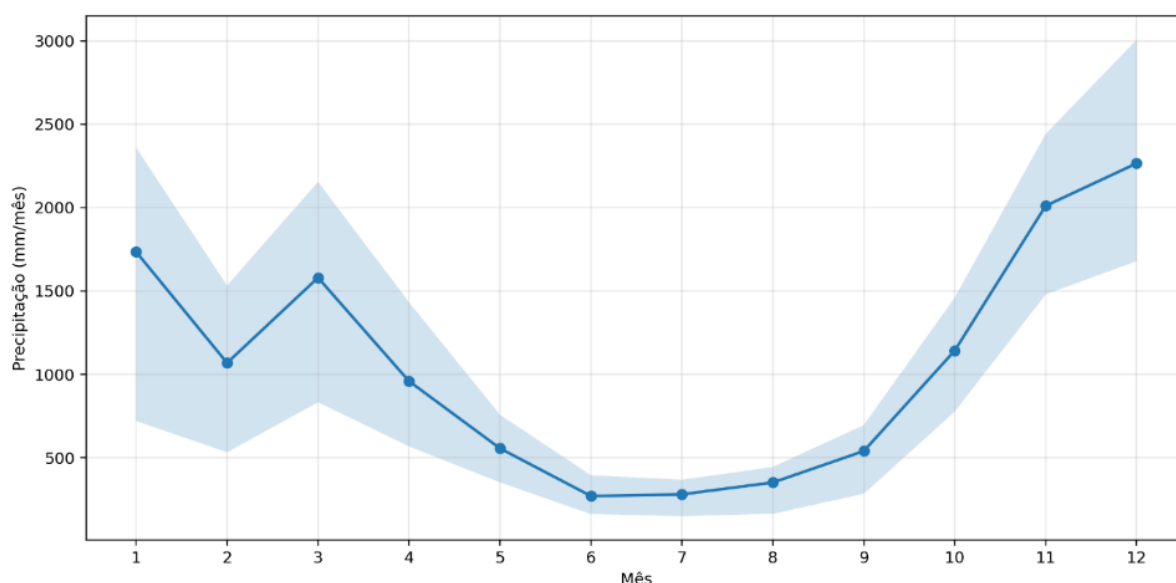
4.1.3. Caracterização Histórica e Climatologia Mensal

Com o propósito de caracterizar o comportamento sazonal da precipitação no município de Campos dos Goytacazes, foram construídas climatologias mensais para o período 1994–2024, após padronização e verificação de consistência das séries. Considerando a disponibilidade de registros observacionais, adotou-se a Estação Meteorológica INMET 83698 como referência principal para a caracterização do regime local, utilizando-se o conjunto de reanálise ERA5 de forma complementar. A inclusão do ERA5 se justifica por fornecer uma série contínua e espacialmente consistente, além de permitir integração com outras variáveis meteorológicas do mesmo sistema (por exemplo, radiação), o que é relevante nas análises posteriores de clima–energia.

No Gráfico 5, apresenta-se a climatologia mensal de precipitação do ERA5 (mm/mês), composta pela média mensal e por uma faixa sombreada de dispersão estatística calculada a partir da distribuição dos valores mensais ao longo dos anos

do período analisado. A área sombreada corresponde a [desvio-padrão ($\pm 1\sigma$) em torno da média / intervalo interquartilício (P25–P75) / intervalo de confiança de 95% da média], e, portanto, representa a dispersão dos totais mensais (variabilidade entre anos para cada mês), e não um envelope de tendência. Observa-se um ciclo sazonal marcado, com maiores totais concentrados no período novembro–março e mínimos no inverno, especialmente entre junho–agosto. A transição do período seco para o úmido ocorre de forma gradual, com incremento progressivo a partir de setembro. Nota-se ainda que a dispersão é mais ampla nos meses chuvosos, indicando maior irregularidade associada à ocorrência de eventos mais intensos e/ou à persistência de sistemas meteorológicos típicos do semestre úmido, enquanto os meses de inverno exibem menor amplitude e maior estabilidade relativa.

Gráfico 5 – Climatologia mensal de precipitação do conjunto ERA5 (mm/mês).

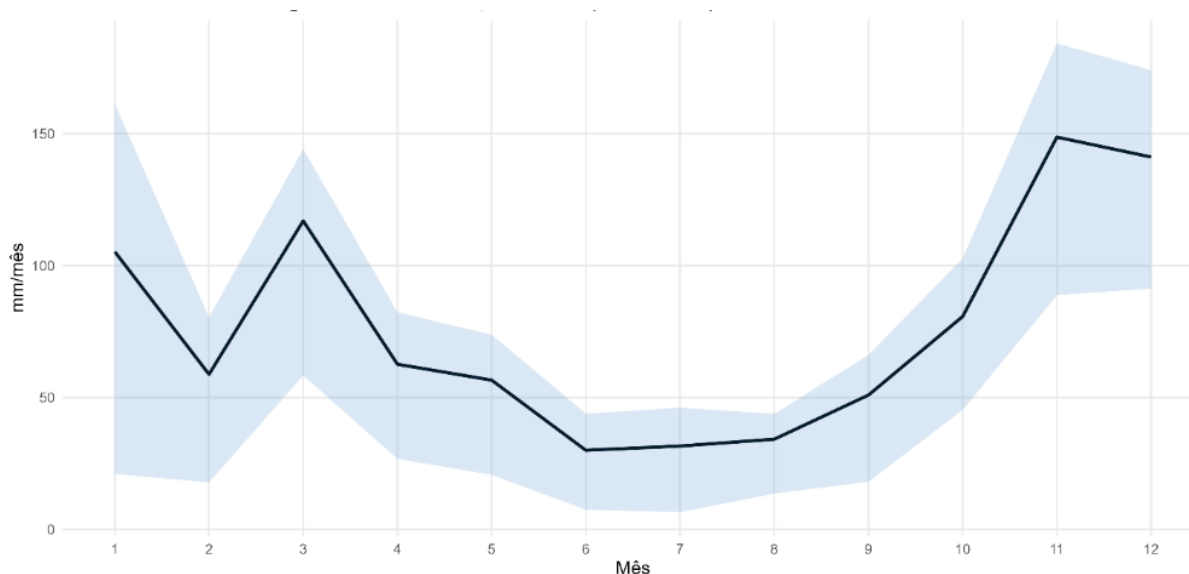


Fonte: Autor (2025).

Em complementação, o Gráfico 6 apresenta a climatologia mensal observada na Estação INMET 83698 (mm/mês), empregada como base de referência. O comportamento sazonal observado é coerente com o padrão descrito no ERA5, com máximos concentrados no período novembro–março e redução no trimestre seco (junho–agosto). Entretanto, a comparação direta das magnitudes deve considerar diferenças de representatividade: os dados da estação expressam uma medição pontual, mais sensível a eventos localizados e a extremos, enquanto o ERA5

representa médias espaciais de grade, podendo suavizar picos e redistribuir volumes mensais. Assim, nesta seção, a reanálise é utilizada para reforçar a consistência temporal e apoiar leituras integradas com variáveis atmosféricas complementares, sem substituir a estação como referência principal para o regime local.

Gráfico 6 – Climatologia mensal de precipitação da Estação Meteorológica 83698 (mm/mês).

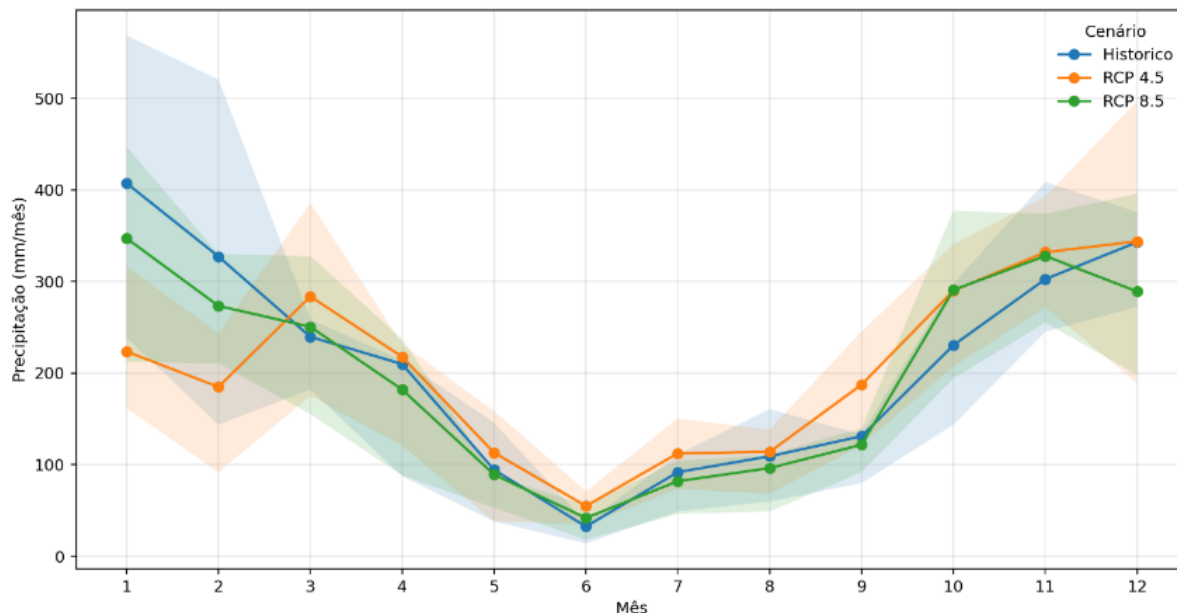


Fonte: Autor (2025).

No Gráfico 7, apresenta-se a climatologia mensal do ETA-BESM para o período histórico e para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, permitindo avaliar como o modelo distribui a precipitação ao longo do ano e como os cenários diferem do histórico em termos sazonais. Observa-se que o ETA-BESM preserva o formato geral do ciclo anual (mínimos no inverno e máximos no semestre úmido), porém as curvas por cenário sugerem alterações na distribuição intra-anual e diferenças mais perceptíveis em meses de transição (fim do inverno/início da primavera) e no fim do ano. As faixas de dispersão associadas aos cenários indicam que, em alguns meses, a dispersão pode ser comparável às diferenças entre cenários, o que reforça a necessidade de interpretar mudanças mensais como variações dentro de um envelope de incerteza do modelo. Adicionalmente, considerando o diagnóstico de viés do ETA-BESM no período histórico em relação ao observado, a leitura mais robusta nesta etapa concentra-se na forma do ciclo sazonal e em mudanças relativas entre

períodos/cenários, evitando o uso direto de magnitudes absolutas como equivalentes ao ponto da estação.

Gráfico 7 – Climatologia mensal de precipitação da ETA-BESM.



Fonte: Autor (2025).

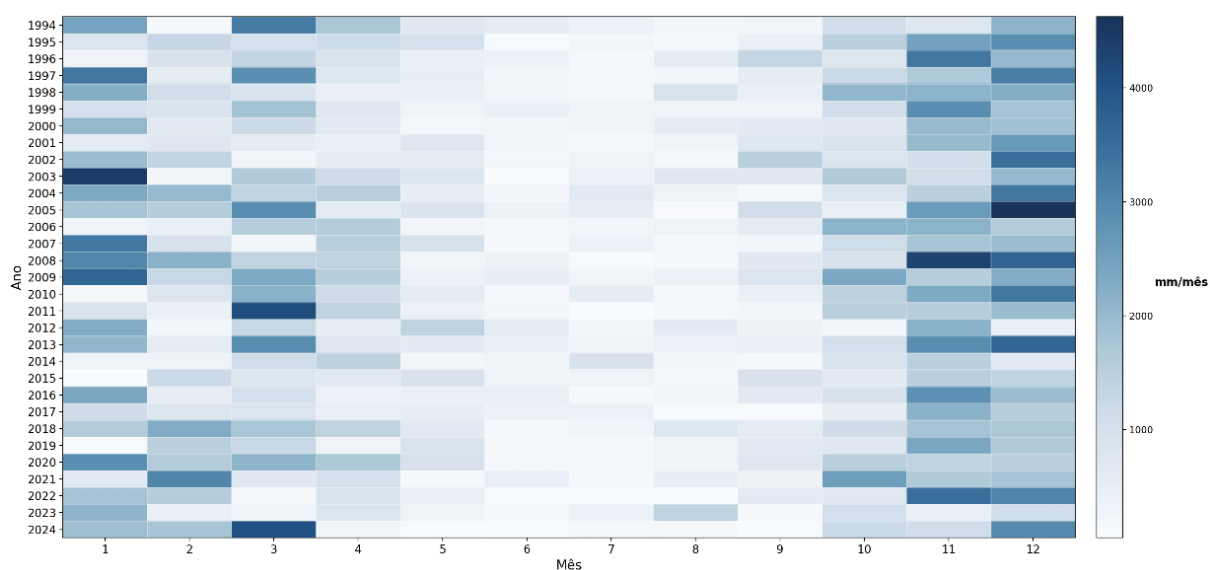
Do ponto de vista da aplicação em geração fotovoltaica, a sazonalidade pluviométrica descrita tem implicações práticas: meses mais chuvosos tendem a coincidir com maior nebulosidade e, conseqüentemente, com redução da irradiância global disponível para conversão fotovoltaica. Dessa forma, o período úmido (novembro–março) tende a estar associado a maior nebulosidade e maior fração difusa, o que, em média, reduz a irradiância global horizontal (GHI) disponível na superfície e aumenta a variabilidade intramensal do recurso solar; em contrapartida, meses do período seco (junho–agosto) costumam apresentar maior ocorrência de céu claro, favorecendo maior disponibilidade de radiação e maior previsibilidade da produção fotovoltaica (TZOUMANIKAS et al., 2016). Em termos de planejamento energético, essa relação sugere a necessidade de considerar estratégias de complementaridade e gestão operacional nos meses tipicamente mais úmidos (por exemplo, reserva, gestão de demanda ou integração com outras fontes), especialmente quando a dispersão dos dados é elevada. Essa hipótese de associação entre precipitação e disponibilidade de radiação é explorada de forma

direta nas análises integradas clima–energia, utilizando variáveis consistentes no mesmo referencial temporal.

Com o objetivo de inspecionar a distribuição temporal da precipitação ao longo da série mensal, elaborou-se um mapa de calor (heatmap) para o conjunto ERA5, no qual os meses são apresentados no eixo horizontal e os anos no eixo vertical, permitindo identificar variações sazonais e interanuais. No entanto, conforme indicado na etapa de validação cruzada com a estação observacional, os resultados do ERA5 devem ser interpretados com cautela nesta fase, pois podem refletir inconsistências de processamento e/ou limitações de representatividade espacial para as condições locais. Dessa forma, o Gráfico 8 é apresentado como uma ferramenta de inspeção exploratória, cuja interpretação depende da confirmação de que: (i) a base utilizada corresponde ao ERA5-Land quando aplicável, (ii) o pixel/região de extração é coerente com a localização da estação/município (evitando influência costeira/oceânica por seleção inadequada), e (iii) a conversão de unidades dos acumulados foi realizada corretamente (por exemplo, de m ou kg/m² para mm). Até a conclusão destas verificações, o padrão temporal indicado pelo ERA5 não é adotado como referência principal, mantendo-se os registros do INMET como base prioritária para a caracterização do regime pluviométrico local.

Observou-se, no Gráfico 8, a predominância de maiores totais de precipitação nos meses de verão, especialmente entre dezembro e março, enquanto os menores valores concentraram-se entre junho e agosto.

Gráfico 8 – Mapa de calor (heatmap) mensal da precipitação do conjunto ERA5 no período de 1994–2024 (mm/mês).

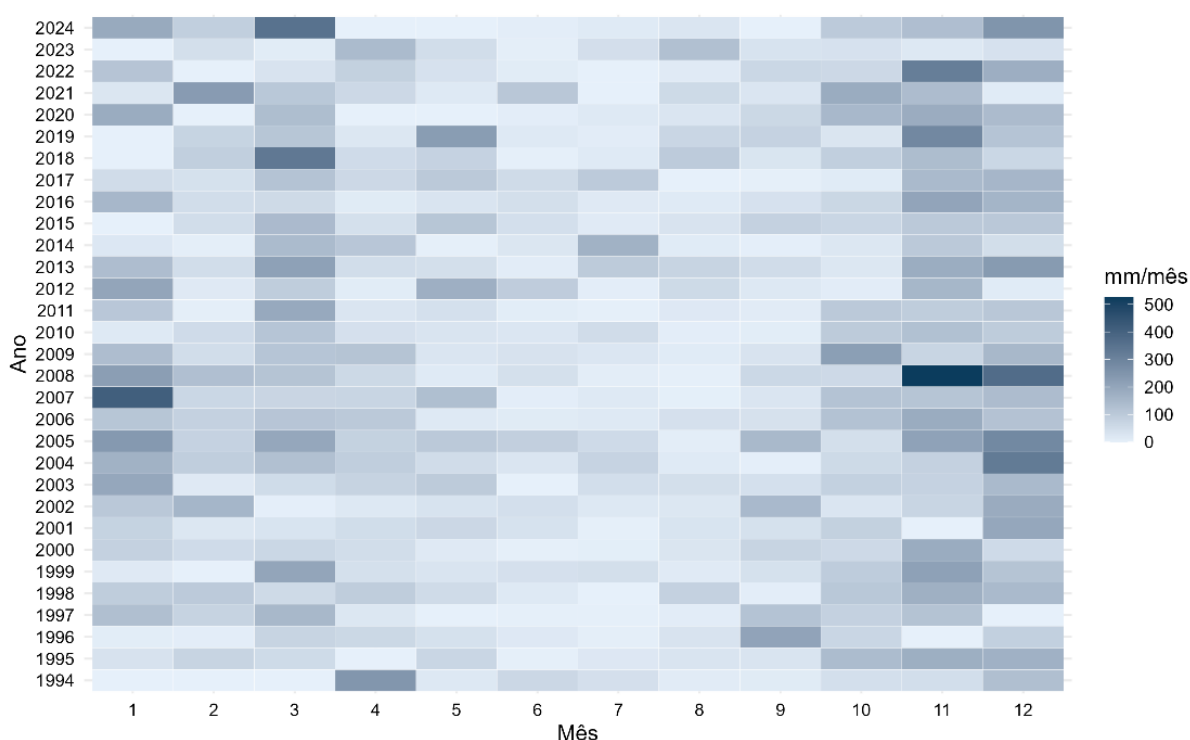


Fonte: Autor (2025).

Os dados coletados da Estação Meteorológica INMET 83698 foram analisados por meio de um mapa de calor elaborado a partir das médias mensais de precipitação acumulada (mm/mês). Nessa representação, cada célula correspondeu à intensidade média observada em determinado mês e ano, o que permitiu uma leitura contínua da distribuição temporal das chuvas no período de 1994 a 2024. No

Gráfico 9, evidenciaram-se os padrões sazonais do regime pluviométrico, possibilitando que fossem identificados períodos mais úmidos e mais secos ao longo da série observacional.

Gráfico 9 – Mapa de calor (heatmap) mensal da precipitação da Estação Meteorológica 83698 no período de 1994–2024 (mm/mês).



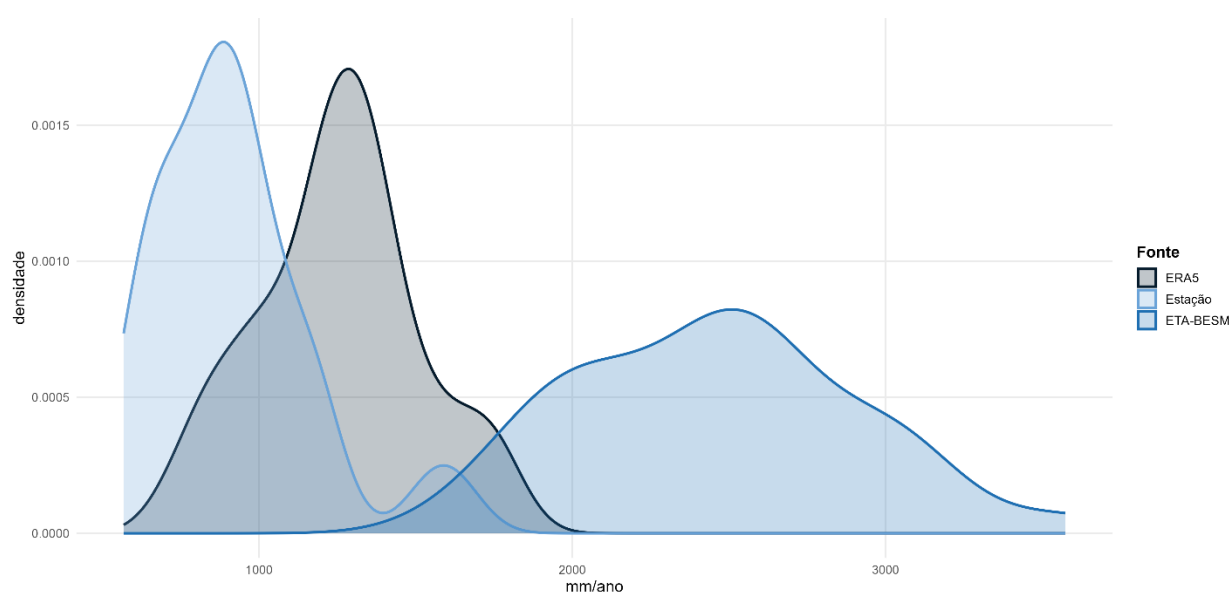
Fonte: Autor (2025).

Em continuidade à avaliação das anomalias anuais, procedeu-se à comparação da distribuição dos valores de precipitação obtidos pelas diferentes fontes de dados, com o propósito de observar a coerência entre as estimativas modeladas e os registros observacionais. A análise de densidade permitiu identificar como os volumes anuais se distribuíram ao longo do período histórico, destacando possíveis diferenças entre os conjuntos de dados provenientes do ERA5, da estação meteorológica e do modelo ETA_BESM.

No Gráfico 10, apresentam-se as distribuições de densidade das somas anuais de precipitação estimadas por cada fonte no período 1994–2024, o que permite comparar simultaneamente o posicionamento central e a dispersão de cada conjunto. Observa-se que a série da Estação concentra maior densidade em torno de valores próximos a 900–1200 mm/ano, com cauda moderada para valores mais altos, indicando dispersão relevante, porém dentro de uma faixa típica do regime local. O conjunto ERA5, por sua vez, apresenta distribuição relativamente mais estreita, com maior concentração em torno de aproximadamente 1100–1600 mm/ano, sugerindo

menor dispersão anual quando comparado à estação e deslocamento do centro da distribuição para valores mais elevados. Em contraste, o ETA-BESM exibe a distribuição mais ampla e deslocada para a direita, com maior densidade entre aproximadamente 2000 e 3000 mm/ano e extensão até valores ainda superiores, evidenciando uma representação mais úmida no acumulado anual e maior dispersão relativa. A separação entre as curvas, com sobreposição parcial entre Estação e ERA5 e sobreposição reduzida entre ETA-BESM e as demais fontes, indica que as três bases descrevem o regime anual com magnitudes distintas, reforçando que comparações em valores absolutos devem considerar diferenças de escala e vieses estruturais, especialmente no caso do ETA-BESM.

Gráfico 10 – Densidade das somas anuais de precipitação do conjunto ETA-BESM no período de 1994–2024 (mm/ano).



Fonte: Autor (2025).

4.1.4. Análise de Tendências e Anomalias da Precipitação

A etapa de análise de anomalias foi conduzida com o propósito de identificar oscilações interanuais nas séries de precipitação. Para permitir a comparação direta entre bases com diferentes magnitudes e reduzir o efeito de escala, as anomalias anuais foram expressas em percentuais, calculadas em relação à média do período de referência (1994–2024). Valores positivos indicaram anos mais úmidos que a média, enquanto valores negativos representaram anos mais secos.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta as métricas de validação no período de sobreposição entre o ETA-BESM (histórico) e a estação, evidenciando baixa correspondência entre os totais anuais. A associação linear é fraca (Pearson $r = 0,1849$) e a associação por postos também é fraca (Spearman $\rho = 0,1538$), indicando que o modelo não reproduz adequadamente a variabilidade interanual observada em termos de pareamento ano a ano. Além disso, as métricas de erro mostram discrepâncias elevadas, com viés médio positivo (Bias = +1118,11 mm), MAE = 1118,11 mm, RMSE = 1209,10 mm e MAPE = 142,22%. Esses resultados reforçam que o uso direto do ETA-BESM para magnitudes absolutas anuais locais deve ser feito com cautela, sendo metodologicamente mais robusto interpretar as projeções em termos de mudanças relativas (Δ) entre períodos/cenários e/ou após correção de viés ancorada na referência observacional.

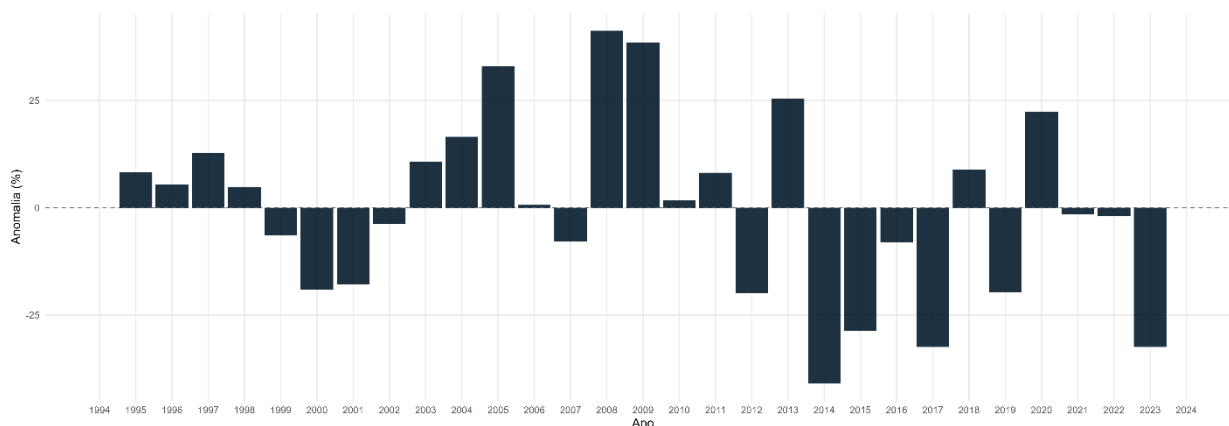
Tabela 5 – Validação (período de sobreposição) – ETA-BESM Histórico vs Estação.

Comparação	Período	n	Pearson (r)	Spearman (ρ)	Bias (mm)	MAE (mm)	RMSE (mm)	MAPE (%)
ETA_Historico_vs_ESTACAO	1994–2024	12	0,1849	0,1538	1118,11	1118,11	1209,1	142,22

Fonte: Autor (2025).

No Gráfico 11, apresentaram-se as anomalias anuais percentuais do conjunto ERA5 para 1994–2024, evidenciando a alternância de fases secas e úmidas ao longo da série. Observou-se a ocorrência de anomalias negativas mais recorrentes entre 1999–2002 e 2014–2017, enquanto anomalias positivas destacaram-se entre 2005–2009, sugerindo períodos de maior aporte pluviométrico em relação ao padrão médio

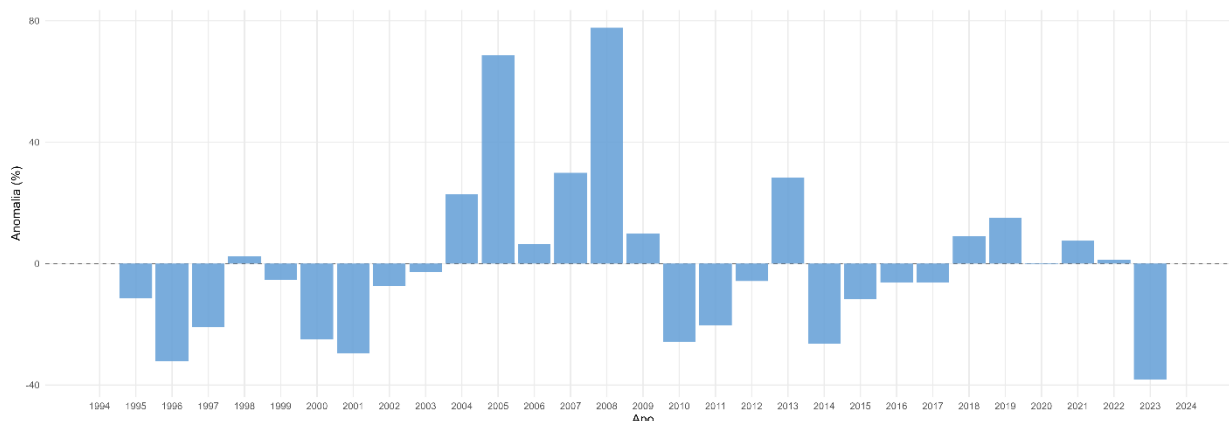
Gráfico 11 – Anomalias anuais de precipitação do conjunto ERA5 no período de 1994–2024 (%).



Fonte: Autor (2025).

Na sequência, o Gráfico 12 apresenta as anomalias anuais percentuais obtidas a partir dos dados observacionais da Estação 83698, permitindo comparar o comportamento interanual observado com o estimado pela reanálise. Verificaram-se oscilações expressivas ao longo da série, com anos de maior incremento pluviométrico, como 2006 e 2008, e reduções mais acentuadas, como 1999, 2011 e 2023, reforçando a variabilidade natural do regime de chuvas na região.

Gráfico 12 – Anomalias anuais de precipitação observadas na Estação Meteorológica de Campos (83698) no período de 1994–2024 (%).



Fonte: Autor (2025).

Os resultados da Tabela 6 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** indicam que, no período de sobreposição, o ETA-BESM (histórico) apresenta baixa

correspondência com a estação em termos de variabilidade interanual pareada, com correlação fraca (Pearson $r = 0,1849$; Spearman $\rho = 0,1538$), sugerindo limitada capacidade de reproduzir o sinal ano a ano observado. Além disso, as métricas de erro apontam desvio sistemático positivo elevado, com Bias = +1118,11 mm, MAE = 1118,11 mm e RMSE = 1209,10 mm, evidenciando superestimação substancial dos totais anuais e discrepâncias médias superiores a 1.000 mm/ano. Esse comportamento reforça que o uso direto das magnitudes absolutas anuais do ETA-BESM para diagnóstico local deve ser feito com cautela, sendo metodologicamente mais robusto interpretar os resultados em termos de mudanças relativas (Δ) entre períodos/cenários e/ou após correção de viés ancorada na referência observacional, quando necessária.

Tabela 6 – Estatísticas unificadas de correlação, viés e testes de mudança de regime.

N	COR	SPEARMAN	BIAS	RBIAS	MAE	RMSE	COMPARACAO
31	0,58	0,44	335,56	36,57	341,96	406,02	ERA5 vs Estação (anual pareado 1994–2024)
12	0,19	0,20	1656,88	192,07	1656,88	1751,82	ETA-BESM(Hist) vs Estação (anual pareado 1994–2024)

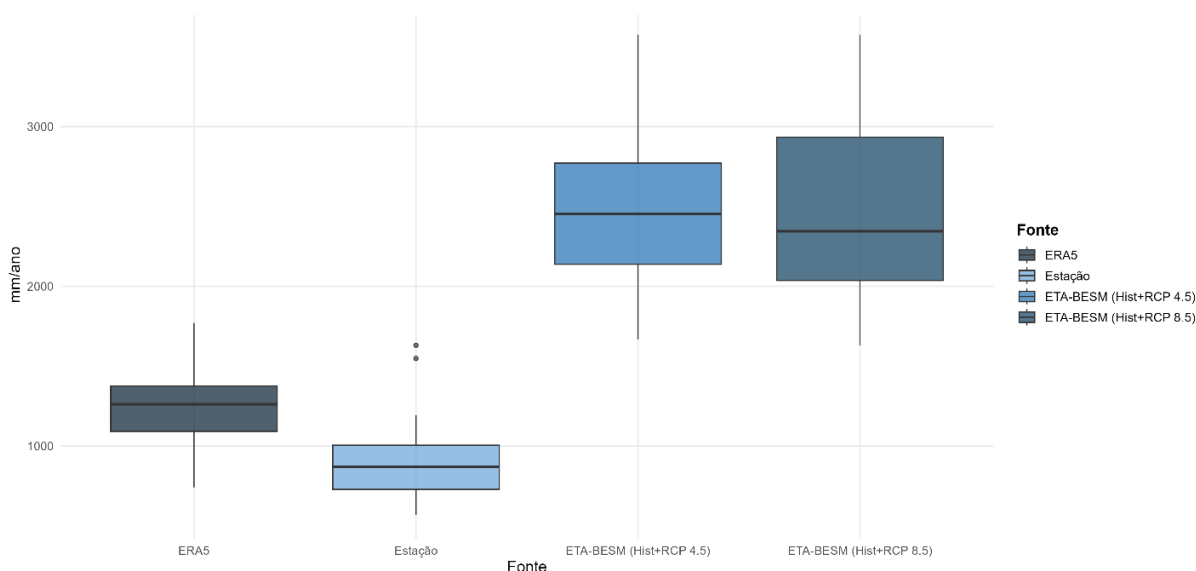
Fonte: Autor (2025).

Ressalta-se que as métricas foram obtidas no período de interseção entre as séries. No caso de ERA5 vs Estação (INMET), o pareamento abrangeu 1994–2024 (N = 31), enquanto para ETA-BESM (Hist) vs Estação a comparação ficou restrita ao trecho histórico disponível em comum (N = 12). Assim, os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 não foram utilizados nesta etapa de validação histórica.

No Gráfico 13, apresenta-se a distribuição dos totais anuais de precipitação (mm/ano) estimados por cada fonte no período 1994–2024. Observa-se que o ERA5 concentra os valores anuais em torno de 1100 a 1400 mm/ano, com mediana próxima de ~1250–1300 mm/ano e menor dispersão em comparação às simulações do modelo (extremos aproximadamente entre 800 e 1750 mm/ano). A estação meteorológica (INMET) apresenta totais anuais mais baixos, com mediana em torno de 850–900 mm/ano e variabilidade moderada (valores típicos entre 700 e 1000

mm/ano), além da ocorrência de outliers acima de 1500–1650 mm/ano, indicando anos isolados com precipitação anual bem acima do padrão central. Por sua vez, as séries do ETA-BESM exibem totais anuais substancialmente maiores e mais dispersos: no Hist+RCP 4.5, a mediana fica em torno de 2450 mm/ano (com valores majoritariamente entre 2100 e 2750 mm/ano e máximos próximos de 3500–3600 mm/ano), enquanto no Hist+RCP 8.5 a mediana é ligeiramente menor (2300–2350 mm/ano), porém com amplitude elevada e máximos também alcançando 3500–3600 mm/ano.

Gráfico 13 – Distribuição anual de precipitação para as fontes ERA5, Estação e ETA_BESM (mm/ano).



Fonte: Autor (2025).

Para o ETA-BESM, as séries agrupadas (Hist + RCP 4.5) e (Hist + RCP 8.5) apresentaram medianas substancialmente mais altas (aproximadamente ~2300–2600 mm/ano) e maior variabilidade, com intervalos interquartis amplos e máximos elevados. Assim, a comparação evidencia que as bases diferem não apenas em magnitude, mas também na dispersão anual, refletindo diferenças de origem (observacional, reanálise e modelagem) e de processamento/representação do regime pluviométrico no recorte analisado.

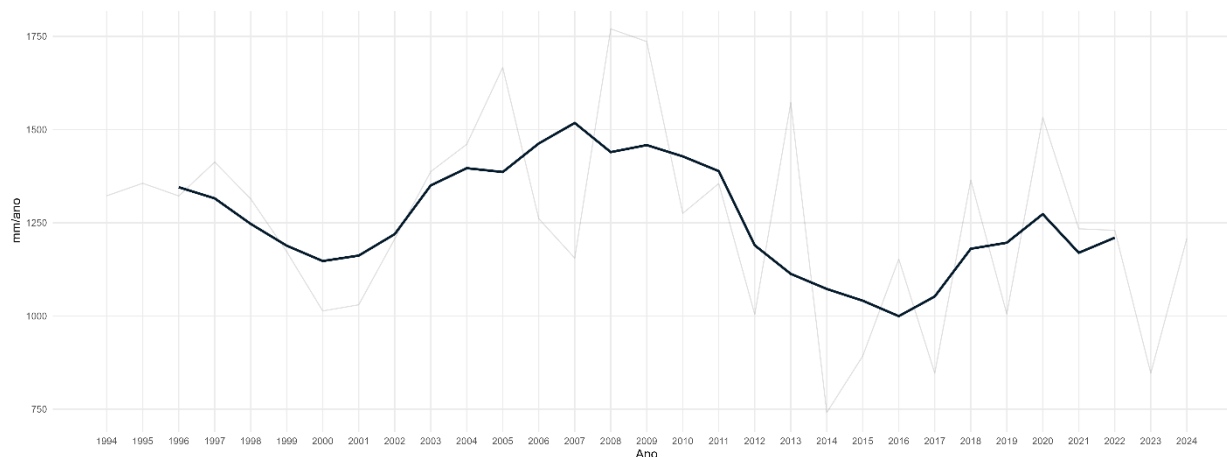
A comparação entre as bases evidencia um deslocamento sistemático de magnitude entre as distribuições anuais. O ETA-BESM (tanto em Hist+RCP4.5

quanto em Hist+RCP8.5) apresenta totais anuais substancialmente mais elevados do que a estação, com medianas e intervalos interquartílicos concentrados acima de 2.000 mm/ano, indicando superestimação acentuada e maior dispersão. Em contraste, o ERA5 apresenta valores anuais mais próximos do observado do que o ETA-BESM, porém ainda superiores aos da estação (ou seja, também sugere um regime mais úmido do que o registrado no ponto observacional). A estação meteorológica, por representar a medição local, mantém os menores totais anuais e deve ser tratada como referência empírica para a validação e, quando necessário, para a correção de viés das bases modeladas, reforçando a necessidade de cautela no uso de magnitudes absolutas (especialmente do ETA-BESM) em aplicações de impacto climático.

Na sequência das análises, aplicou-se uma suavização temporal às séries anuais de precipitação com o objetivo de evidenciar as tendências de médio prazo, minimizando a influência de oscilações pontuais. O cálculo da média móvel de cinco anos permitiu descrever a evolução dos totais pluviométricos de forma mais contínua, possibilitando a observação de ciclos de redução e recuperação ao longo do período analisado.

No Gráfico 14, apresentou-se a série anual de precipitação do ERA5 e sua média móvel centrada de cinco anos (linha destacada). Observou-se que o alisamento reduziu a variabilidade interanual, evidenciando uma evolução em fases. Entre 1996 e 2001, a média móvel indica queda gradual (de valores próximos a 1350 mm/ano para 1150 mm/ano), seguida de elevação contínua entre 2002 e 2007, quando se atinge o máximo da série suavizada (em torno de 1500 mm/ano). A partir de 2008 até 2016, observa-se declínio consistente, com o mínimo por volta de 2016 (~1000 mm/ano). Em seguida, entre 2017 e 2020, ocorre recuperação (subindo para cerca de 1250 mm/ano), e nos anos mais recentes (2021–2022) há estabilização/leve redução, mantendo-se em patamar intermediário. Em conjunto, o comportamento sugere oscilações multianuais (fases úmidas e secas), mais do que uma tendência linear única ao longo de todo o período.

Gráfico 14 – Média móvel de cinco anos aplicada à série anual de precipitação do conjunto ERA5 (1994–2024).

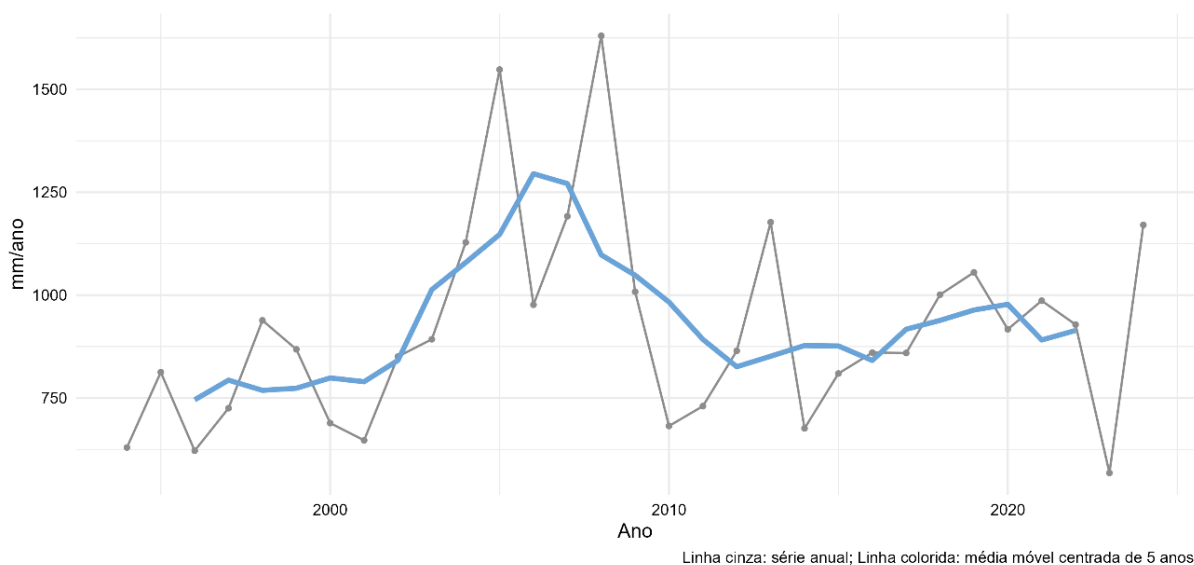


Fonte: Autor (2025).

Na continuidade da investigação das séries históricas, aplicou-se a técnica de média móvel aos registros observacionais da estação meteorológica de Campos (83698), com o intuito de suavizar as variações anuais e evidenciar tendências de médio prazo. Essa abordagem permitiu avaliar se os padrões identificados nas séries do ERA5 mantiveram correspondência com os dados medidos em campo, contribuindo para a verificação da coerência entre as fontes observadas e reanalisadas. A aplicação do filtro temporal de cinco anos buscou representar as oscilações interanuais de modo mais contínuo, favorecendo a identificação de períodos de redução e aumento na precipitação.

Em seguida representou-se a média móvel de cinco anos aplicada à série anual de precipitação observada na estação de Campos, entre 1994 e 2024 no Gráfico 15. Identificou-se que o comportamento da série apresentou oscilações cíclicas, com tendência de aumento gradual até o final da década de 2000, seguida por uma fase de redução contínua até 2015. Observou-se que o período entre 2005 e 2010 apresentou os maiores totais médios anuais, ultrapassando 1200 mm/ano, enquanto a década posterior mostrou valores mais estáveis e inferiores à média de longo prazo. Essa configuração descreveu a alternância de fases úmidas e secas, compatível com o regime climático regional.

Gráfico 15 – Média móvel de cinco anos aplicada à série anual de precipitação observada na Estação Meteorológica de Campos (83698), no período de 1994–2024.

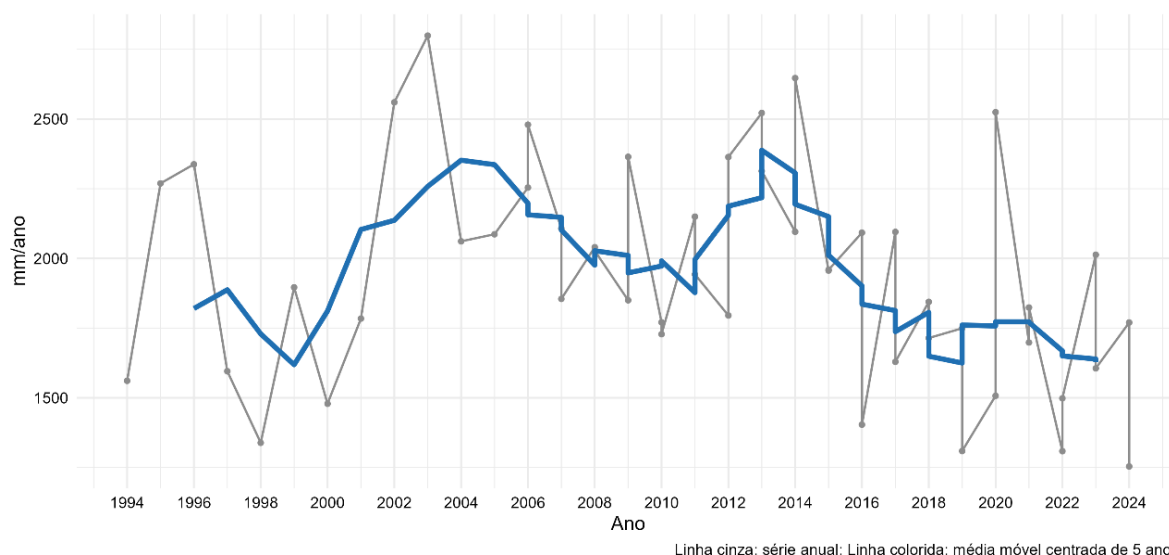


Fonte: Autor (2025).

Para complementar aplicou-se a suavização por média móvel às estimativas anuais do modelo ETA_BESM para o período recente. A operação teve por finalidade reduzir a variabilidade interanual e permitir a leitura de ciclos de médio prazo, de modo a comparar a trajetória simulada com a observada nas demais fontes e com as anomalias previamente discutidas.

Apresentou-se a série anual do ETA_BESM entre 1994 e 2024 com a média móvel centrada de cinco anos superposta no Gráfico 16. Pela representação, descreveu a atenuação das flutuações anuais e identificar fases de incremento e redução sucessivas. Observou-se que a suavização evidenciou patamar mais elevado entre meados da década de 2000 e início de 2010, seguido de declínio progressivo até o final do período. Esse comportamento demonstrou a utilidade do filtro temporal para destacar tendências de médio prazo no conjunto simulado.

Gráfico 16 – Média móvel de cinco anos aplicada à série anual de precipitação do modelo ETA_BESM (1994–2024).



Fonte: Autor (2025).

Embora o presente estudo tenha como foco a comparação e a consistência entre as bases observacionais e de reanálise, incluiu-se o ETA-BESM apenas como fonte complementar de contexto. Assim, os produtos do modelo (histórico e cenários RCP 4.5/8.5) foram organizados em forma de síntese, sem aprofundamento interpretativo no corpo do trabalho, uma vez que a avaliação detalhada de projeções futuras extrapola os objetivos centrais desta dissertação.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** sintetiza os resultados dos testes de tendência e mudança de regime aplicados à precipitação anual. Na série observacional INMET (1994–2024), o teste de Mann–Kendall não indica tendência monotônica estatisticamente significativa ($\tau = 0,2043$; $p = 0,1101$) e a inclinação de Sen aponta aumento de $+7,11$ mm/ano, porém também não significativo ($p = 0,1101$). De forma coerente, o teste de Pettitt sugere um possível ponto de mudança em torno de 2002, mas sem significância estatística ($p = 0,1096$). Em contraste, no conjunto ETA_BESM_total observa-se tendência negativa significativa ($\tau = -0,3596$; $p = 1,31 \times 10^{-9}$), com Sen = $-7,13$ mm/ano ($p = 1,31 \times 10^{-9}$) e mudança de regime significativa (Pettitt ≈ 2037 ; $p = 6,17 \times 10^{-7}$). Ao separar por cenários, o ETA-BESM mantém comportamento não significativo no histórico, mas passa a indicar redução

significativa em RCP 4.5 (Sen = -7,18 mm/ano; p = 0,0108; Pettitt = 2018; p = 0,0063) e queda mais intensa em RCP 8.5 (Sen = -23,68 mm/ano; p = $5,88 \times 10^{-9}$; Pettitt = 2042; p = $1,44 \times 10^{-5}$), apontando para maior sinal de diminuição da precipitação no cenário mais aquecido.

Tabela 7 – Testes de tendência e mudança de regime da precipitação (anual).

Série	Escopo	Cenário	τ (Mann–Kendall)	p (MK)	Sen (mm/ano)	p (Sen)	Pettitt (ano)	p (Pettitt)
ESTACAO	base	—	0,2043	0,1101	7,11	0,1101	2002*	0,1096
ETA_BESM_total	base	—	-0,3596	1,31E-09	-7,13	1,31E-09	2037*	6,170E-07
ETA-BESM	cenário	Histórico	0,2043	0,1101	7,11	0,1101	2002	0,1096
ETA-BESM	cenário	RCP 4.5	-0,2285	0,0108	-7,18	0,0108	2018	0,0063
ETA-BESM	cenário	RCP 8.5	-0,5207	5,88E-09	-23,68	5,88E-09	2042	1,44E-05

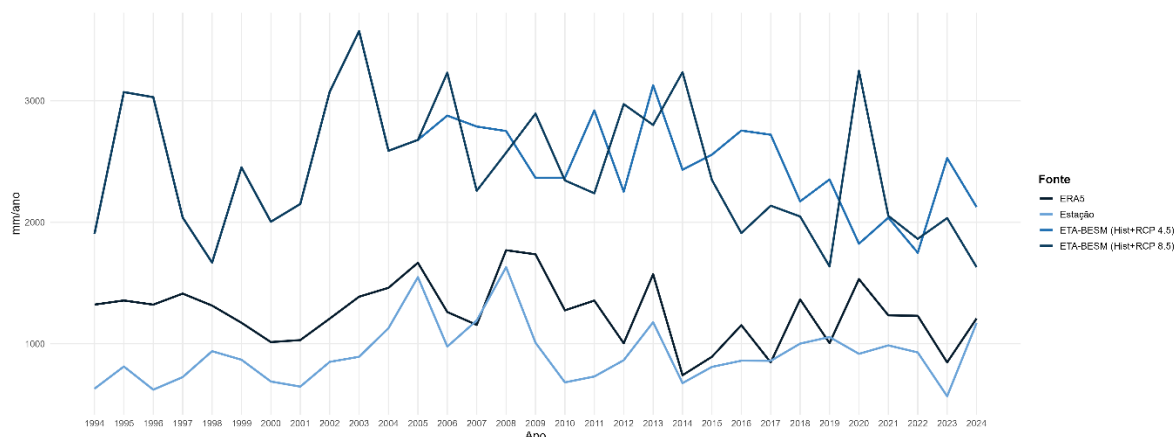
Fonte: Autor (2025).

4.1.5. Síntese Integrada entre Fontes

A etapa seguinte envolveu a comparação das diferentes fontes de dados utilizadas na caracterização da precipitação anual no município de Campos dos Goytacazes, com o objetivo de examinar a consistência entre os registros observacionais e as séries derivadas de reanálise e de modelagem. Essa análise permitiu identificar discrepâncias sistemáticas entre as bases ERA5, Estação e ETA-BESM no período de 1994 a 2024.

No Gráfico 17, observa-se que as séries apresentam variabilidade interanual com oscilações temporalmente comparáveis em alguns intervalos; entretanto, verifica-se um descolamento de magnitude entre as fontes, com a Estação concentrando-se em patamar inferior e as séries do ERA5 e, principalmente, do ETA-BESM, apresentando totais anuais substancialmente superiores. Esse comportamento indica forte evidência de inconsistência de escala/unidade e/ou representatividade espacial, reforçando que a interpretação integrada e quaisquer inferências sobre tendências (incluindo cenários futuros) devem ser condicionadas à verificação das unidades, dos procedimentos de agregação e da representatividade do ponto/pixel empregado em cada base.

Gráfico 17 – Precipitação anual nas diferentes fontes de dados (ERA5, Estação e ETA-BESM) para o período de 1994 a 2024.

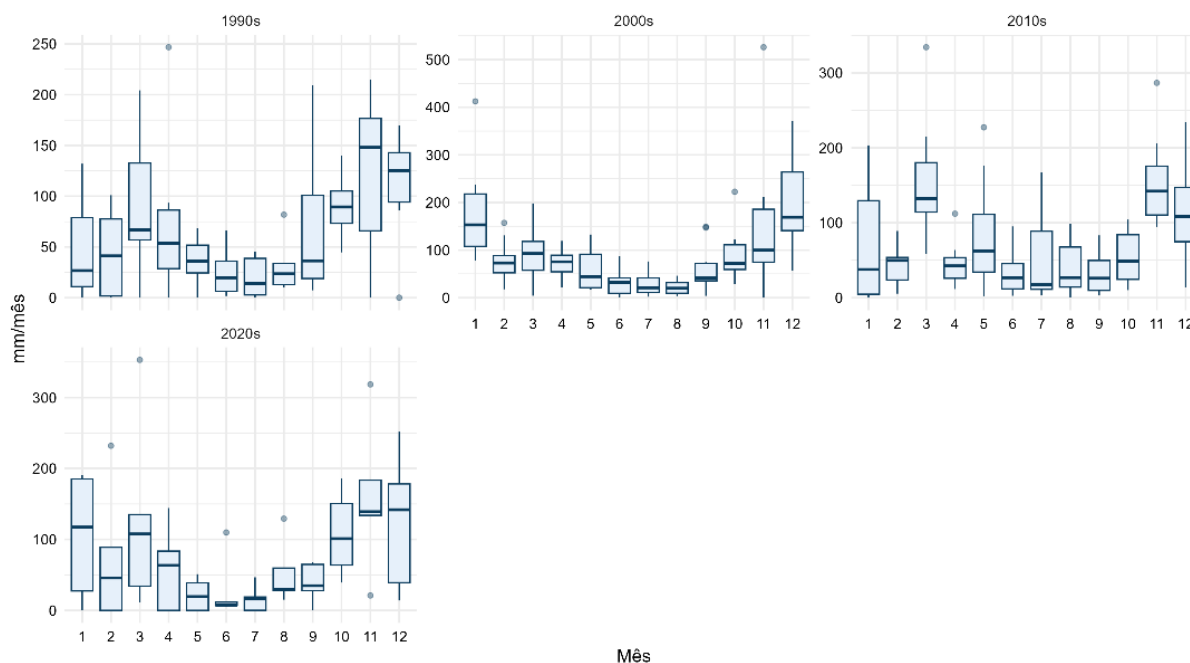


Fonte: Autor (2025).

Identificou-se após a análise que o comportamento das três séries manteve coerência quanto à tendência geral de variação no período estudado. A série da estação meteorológica apresentou comportamento intermediário, descrevendo valores anuais situados entre os extremos simulados pelos modelos. A análise demonstrou que, apesar das diferenças quantitativas, as três fontes refletiram de forma consistente a dinâmica pluviométrica regional.

Com o objetivo de complementar a análise da variabilidade temporal, foram examinadas as distribuições mensais da precipitação observada pela estação meteorológica (código 83698), segmentadas por década. Essa avaliação possibilitou identificar a recorrência de padrões sazonais e eventuais mudanças no regime de chuvas ao longo do período histórico considerado. O Gráfico 18 apresenta os boxplots mensais por década, permitindo a visualização das flutuações e da dispersão dos valores médios de precipitação.

Gráfico 18 – Distribuição mensal da precipitação por década com base nos dados da estação meteorológica (83698) para o período de 1994 a 2024.



Fonte: Autor (2025).

O padrão sazonal típico da precipitação na estação INMET 83698 mantém-se ao longo das décadas, com maiores acumulados nos meses do período chuvoso e valores reduzidos no período mais seco. Ao comparar as décadas entre si, os boxplots evidenciam mudanças principalmente na dispersão (amplitude interquartílica e ocorrência de outliers) e, em alguns meses, na posição das medianas, indicando diferenças entre décadas e não alterações dentro de um mesmo ciclo sazonal. Destaca-se a década de 1990, que apresenta maior variabilidade nos meses úmidos, enquanto nas décadas subsequentes observa-se, em parte dos meses, tendência a menor dispersão, embora persistam episódios extremos. Assim, os resultados sugerem estabilidade do calendário sazonal, porém com possíveis mudanças na intensidade e na variabilidade interanual das chuvas ao longo das décadas, aspecto que pode ser aprofundado e confirmado por testes estatísticos específicos.

4.2. Avaliação da Geração Fotovoltaica

4.2.1. Consolidação e Qualidade dos Resultados

De acordo com os valores apresentados no Apêndice B, observou-se que o período histórico (1994–2014) apresentou geração anual entre 1.215 MWh e 1.266 MWh, com média em torno de 1.244 MWh. Para os cenários futuros, no intervalo 2015–2054, verificou-se que o SSP2-4.5 apresentou valores entre 1.202 MWh e 1.304 MWh (média \approx 1.255 MWh), enquanto o SSP5-8.5 variou entre 1.209 MWh e 1.281 MWh (média \approx 1.249 MWh). De forma geral, as três séries mantiveram magnitudes próximas e não evidenciaram mudanças expressivas no patamar médio da geração anual ao longo do horizonte analisado, predominando oscilações interanuais.

Na leitura comparativa, notou-se que o SSP2-4.5 apresentou a maior amplitude interanual, incluindo o maior pico de geração do conjunto (\approx 1.304 MWh), enquanto o SSP5-8.5 mostrou variação mais contida, embora ainda com flutuações relevantes. Assim, os resultados do Apêndice C indicaram que as diferenças entre cenários foram sutis em termos de média, e que a variabilidade ano a ano permaneceu como o principal componente do comportamento da geração anual simulada.

A partir dos valores consolidados na Tabela 8, estatísticas descritivas da geração anual simulada e dos fatores de capacidade para os cenários histórico, SSP2-4.5 e SSP5-8.5, observou-se que o cenário histórico apresentou média anual de 1249,94 MWh e desvio padrão de 23,49 MWh, com mediana de 1253,27 MWh (P25 = 1238,41 MWh; P75 = 1261,35 MWh), evidenciando baixa dispersão interanual no período analisado. Nos cenários projetados, verificou-se que as médias permaneceram muito próximas: 1248,22 MWh no SSP2-4.5 (DP = 21,63 MWh; mediana = 1246,08 MWh; P25 = 1232,68 MWh; P75 = 1261,35 MWh) e 1250,28 MWh no SSP5-8.5 (DP = 23,43 MWh; mediana = 1253,27 MWh; P25 = 1233,03 MWh; P75 = 1267,79 MWh). De forma coerente, os fatores de capacidade médios também se mantiveram estáveis e praticamente equivalentes entre os cenários (histórico: 0,142; SSP2-4.5: 0,142; SSP5-8.5: 0,143), com medianas em torno de 0,142–0,143 e baixa variabilidade (DP \approx 0,002–0,003), indicando uniformidade estatística e ausência de mudanças expressivas no desempenho médio do sistema ao longo das décadas

simuladas.

Tabela 8 – Estatísticas descritivas da geração anual simulada e fatores de capacidade para os cenários histórico, SSP2-4.5 e SSP5-8.5.

CENÁRIO	MWH_N	MWH_MEAN	MWH_STD	MWH_MIN	MWH_P25	MWH_MEDIAN	MWH_P75	MWH_MAX
historical	21,000	1249,942	23,494	1202,443	1238,413	1253,267	1261,348	1300,081
ssp245	61,000	1248,223	21,634	1202,443	1232,681	1246,082	1261,348	1304,200
ssp585	61,000	1250,276	23,433	1202,443	1233,033	1253,267	1267,794	1300,081

CF_N	CF_MEAN	CF_STD	CF_MIN	CF_P25	CF_MEDIAN	CF_P75	CF_MAX
21	0,1426874	0,00268191	0,137265163	0,141371353	0,143066971	0,14398954	0,148411059
61	0,142491196	0,002469581	0,137265163	0,140717019	0,142246781	0,14398954	0,148881305
61	0,142725516	0,002675034	0,137265163	0,140757146	0,143066971	0,144725348	0,148411059

Fonte: Autor (2025).

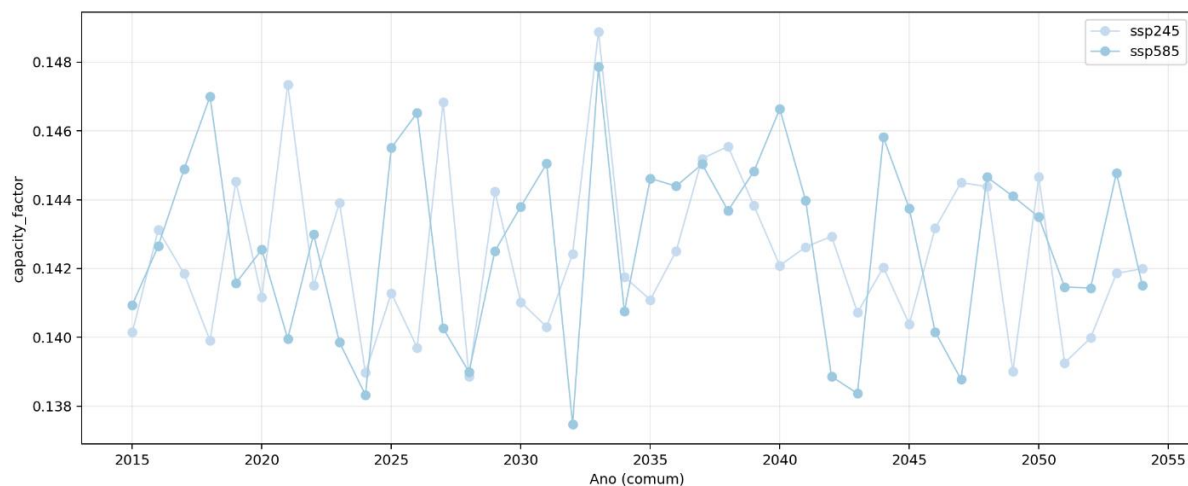
Nota: DP/STD = desvio padrão; MEAN = média; MIN = mínimo; MAX = máximo; P25 = percentil 25 (1º quartil); P75 = percentil 75 (3º quartil); MEDIAN = percentil 50; CF = fator de capacidade.

4.2.2. Avaliação Comparativa dos Cenários

Para complementar a análise estatística descritiva, foi elaborada uma avaliação comparativa do fator de capacidade ao longo dos anos simulados nos diferentes cenários climáticos. Essa etapa buscou identificar o comportamento anual do indicador energético em períodos equivalentes, permitindo verificar a correspondência entre o desempenho histórico e as projeções futuras. O objetivo principal foi compreender se as condições climáticas projetadas influenciaram a estabilidade do fator de capacidade médio do sistema fotovoltaico.

A análise do Gráfico 19 – Fator de capacidade (CF) comparativo entre os cenários histórico, SSP2-4.5 e SSP5-8.5 (anos em comum)., identificou, ainda, que o cenário SSP2-4.5 manteve ligeira proximidade com o comportamento histórico, enquanto o SSP5-8.5 demonstrou maior oscilação interanual (DP = 0,00271; amplitude = 0,01040; 0,13747–0,14787), em comparação ao SSP2-4.5 (DP = 0,00238; amplitude = 0,01003; 0,13885–0,14888). Essa variação refletiu a sensibilidade do sistema às alterações projetadas nas variáveis meteorológicas, especialmente radiação solar e temperatura ambiente. Dessa forma, o conjunto de resultados descreveu um comportamento estável e demonstrou que a eficiência relativa do sistema permaneceu praticamente constante, independentemente do cenário climático considerado.

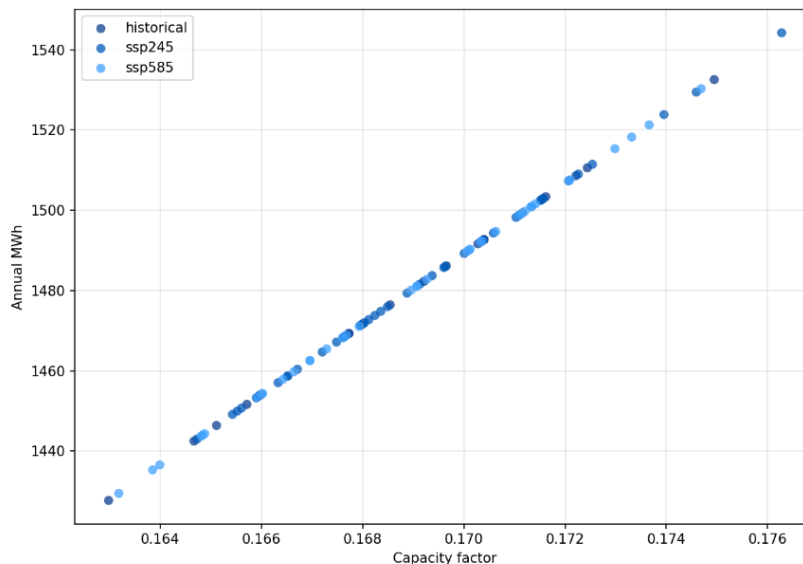
Gráfico 19 – Fator de capacidade (CF) comparativo entre os cenários histórico, SSP2-4.5 e SSP5-8.5 (anos em comum).



Fonte: Autor (2025).

Conforme apresentado no Gráfico 20, observou-se uma relação linear e positiva entre o fator de capacidade e a geração anual de energia. Embora as médias sejam muito próximas entre os cenários histórico, SSP2-4.5 e SSP5-8.5, a variabilidade não é idêntica: o SSP2-4.5 apresenta menor dispersão dos pontos (menor espalhamento em torno da relação linear), enquanto o SSP5-8.5 exibe maior amplitude/espalhamento, indicando maior variabilidade interanual da geração e do fator de capacidade sob o cenário mais aquecido. Assim, o gráfico sugere estabilidade do comportamento médio, mas diferenças na variabilidade entre cenários, o que é relevante para a avaliação de risco e previsibilidade operacional.

Gráfico 20 – Relação entre a produção anual de energia (MWh) e o fator de capacidade (CF) nos cenários histórico, SSP2-4.5 e SSP5-8.5.



Fonte: Autor (2025).

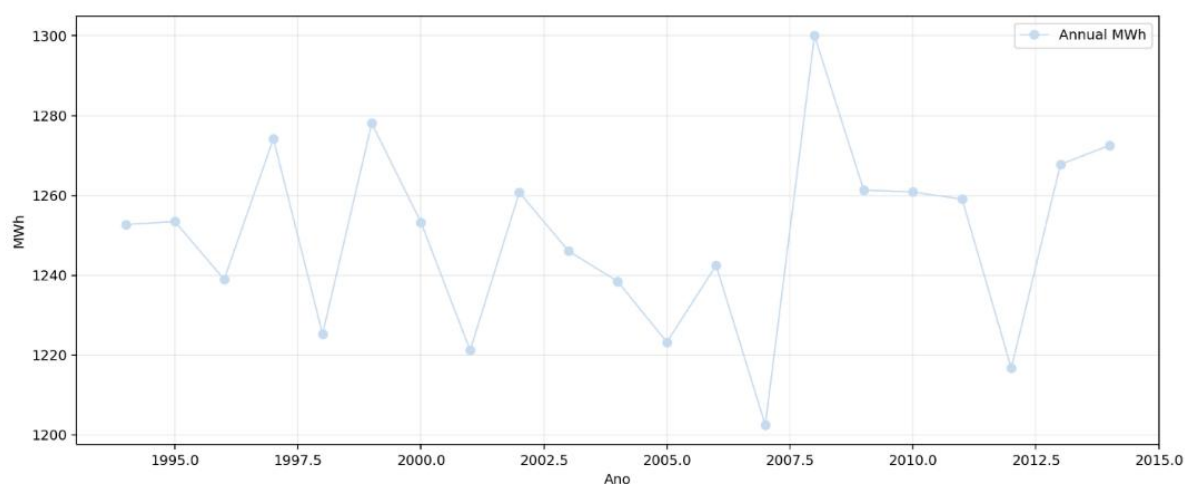
4.2.3. Análise Temporal e Tendências da Geração de Energia

Na sequência da avaliação comparativa entre cenários, procedeu-se à análise do comportamento histórico da geração anual de energia fotovoltaica simulada, com o objetivo de descrever a tendência temporal observada entre os anos de 1994 e 2014. Essa abordagem permitiu examinar se, ao longo do período, ocorreram alterações consistentes no volume de produção, associadas às condições atmosféricas locais e às variações naturais da irradiância solar.

Com base no Gráfico 21, verificou-se que a série histórica apresentou oscilações interanuais da geração entre 1202,44 e 1300,08 MWh, mantendo média estável em torno de 1249,94 MWh. A inclinação positiva da linha de tendência, estimada em 0,32 MWh por ano, indicou leve aumento no valor médio anual de geração; contudo, essa tendência não foi estatisticamente significativa ($p = 0,717$; IC95%: $-1,49$ a $+2,13$ MWh/ano), não caracterizando mudança estrutural no período analisado. Dessa forma, a variação descreveu um comportamento de estabilidade, em que os acréscimos observados ao longo do tempo não representaram tendência consistente de crescimento ou redução. A análise evidenciou que o modelo respondeu de maneira consistente às condições históricas de entrada, refletindo o

comportamento climático da série de referência. A avaliação dos resultados demonstrou que os anos de maior geração coincidiram com períodos de maior disponibilidade de radiação solar, enquanto os declínios anuais estiveram associados à variação natural dos parâmetros meteorológicos.

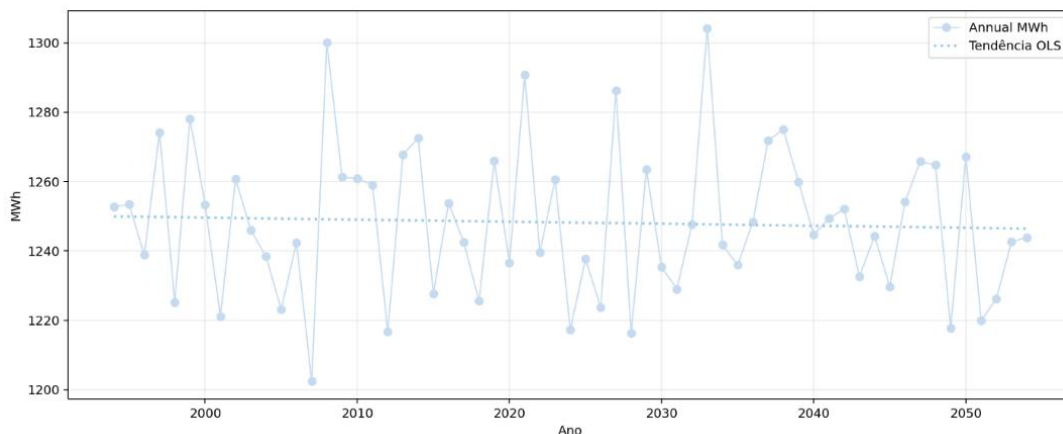
Gráfico 21 – Evolução da geração anual de energia (MWh) no período histórico de 1994 a 2014.



Fonte: Autor (2025).

Os valores anuais apresentaram oscilações regulares em torno da média de 1248 MWh, com variações típicas de anos de maior ou menor incidência solar no Gráfico 22, oscilando entre 1202 e 1304 MWh. A inclinação da reta de tendência foi levemente negativa ($-0,06$ MWh por ano); contudo, essa tendência não foi estatisticamente significativa ($p = 0,713$; IC95%: $-0,376$ a $+0,258$ MWh/ano), indicando que as flutuações observadas não caracterizam mudança estrutural na geração média ao longo do período.

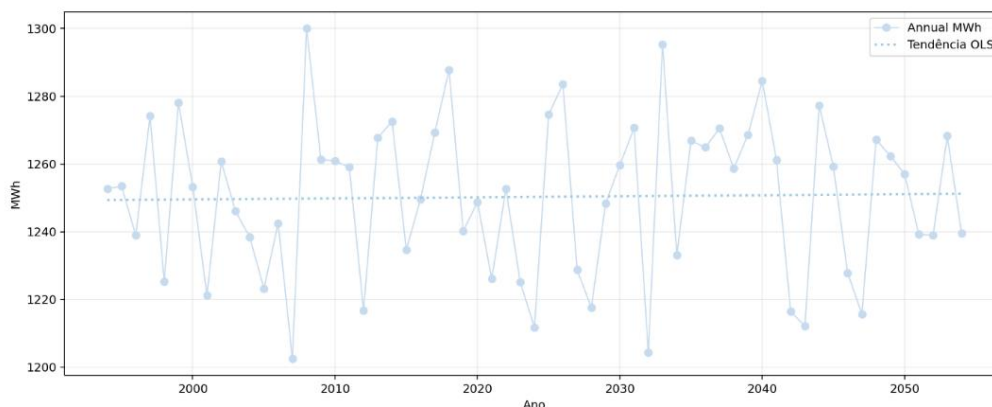
Gráfico 22 – Tendência da geração anual de energia (MWh) para o cenário SSP2-4.5, no período de 1994 a 2054.



Fonte: Autor (2025).

Verificou-se no Gráfico 23 que os valores anuais oscilam em torno da média de 1 250,28 MWh, com amplitude semelhante à observada nos demais contextos, variando entre 1202,44 e 1300,08 MWh. A inclinação da reta de tendência foi ligeiramente positiva (+0,03 MWh por ano); contudo, essa tendência não foi estatisticamente significativa ($p = 0,856$; IC95%: -0,31 a +0,38 MWh/ano), indicando que as flutuações interanuais não caracterizam mudança estrutural na geração fotovoltaica projetada para o cenário SSP5-8.5, e que a média geral se manteve essencialmente estável ao longo do período analisado.

Gráfico 23 – Tendência da geração anual de energia (MWh) para o cenário SSP5-8.5, no período de 2014 a 2054.



Fonte: Autor (2025).

Em estudo do Gráfico 24, observou-se que a linha correspondente à média móvel de 5 anos apresentou leve oscilação em torno do valor médio de aproximadamente 1250 MWh, acompanhando a tendência geral da série anual. A aplicação da média móvel demonstrou que as flutuações de curto prazo foram atenuadas, evidenciando um comportamento essencialmente estável ao longo das duas décadas analisadas, com variações suaves associadas à variabilidade natural das condições meteorológicas (em especial, disponibilidade de radiação solar).

Gráfico 24 – Geração anual de energia (MWh) e média móvel de cinco anos no cenário histórico (1994–2014).

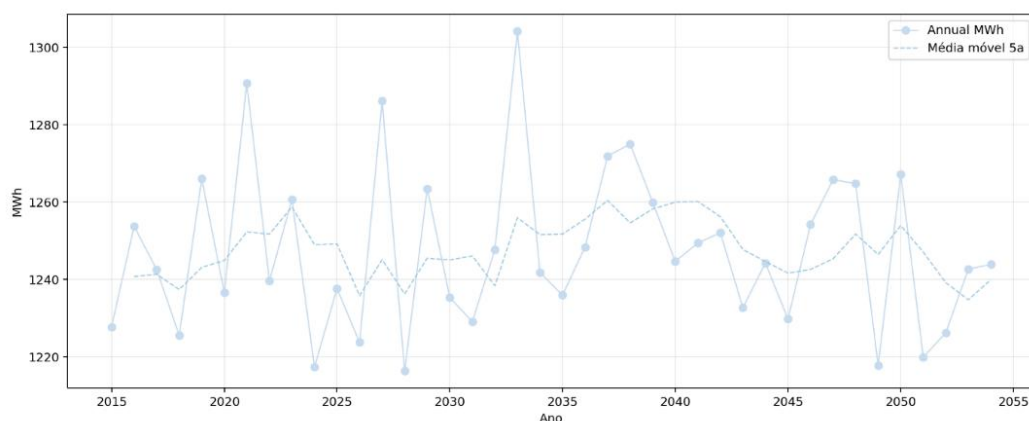


Fonte: Autor (2025).

A análise demonstrou que, entre 2015 e 2035, houve leve alternância entre

aumentos e reduções, seguida de estabilização e discreta queda na média móvel a partir do início da década de 2040, com recuperação pontual nos anos finais. Conforme apresentado no Gráfico 25, a curva de média móvel de 5 anos exibiu variações moderadas ao redor de aproximadamente 1250 MWh, acompanhando de forma coerente as oscilações da série anual. A aplicação da média móvel evidenciou que o comportamento do sistema se manteve essencialmente estável, com dispersões compatíveis com a variabilidade natural das condições meteorológicas, especialmente radiação solar e temperatura ambiente.

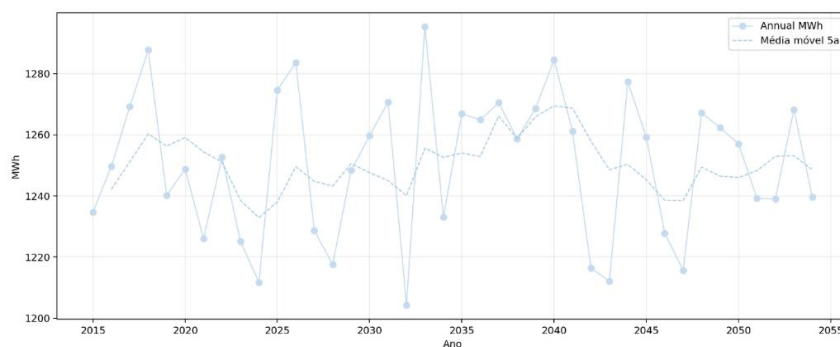
Gráfico 25 – Geração anual de energia (MWh) e média móvel de cinco anos no cenário histórico (1994–2055).



Fonte: Autor (2025).

A leitura conjunta das curvas no Gráfico 26 identificou que os períodos de maior geração ocorreram de forma mais concentrada entre aproximadamente 2017 e 2040, enquanto os valores mais baixos apareceram de maneira pontual, sobretudo em alguns anos isolados ao longo da série, inclusive no início e no final da simulação. Em termos gerais, a geração manteve-se estável em torno de 1250 MWh, com a curva de média móvel (5 anos) suavizando as flutuações interanuais e evidenciando apenas oscilações leves, sem tendência definida de aumento ou decréscimo acentuado ao longo do horizonte analisado.

Gráfico 26 – Geração anual de energia (MWh) e média móvel de cinco anos para o cenário SSP5-8.5 (2014–2054).

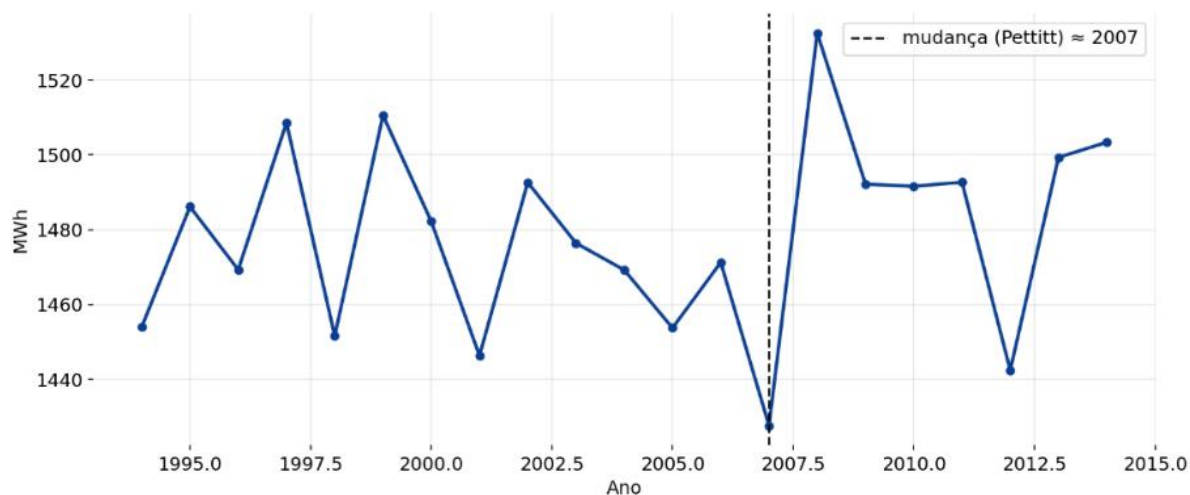


Fonte: Autor (2025).

4.2.4. Testes Estatísticos de Mudança de Regime na Geração Fotovoltaica

Para o período histórico, realizou-se o teste de Pettitt com o objetivo de detectar a presença de possíveis pontos de mudança na série temporal de geração anual. O procedimento foi aplicado sobre o conjunto de dados compreendido entre 1994 e 2014, a fim de verificar alterações na tendência média de energia produzida e identificar períodos de variação significativa na série. O teste retornou estatística $U_{\max} = 50$, com $p\text{-valor} = 0,426$, e indicou um ponto candidato de mudança em 2007 (Gráfico 27). Observou-se que os valores anteriores a esse ponto apresentaram maior variabilidade e uma queda acentuada, enquanto os anos subsequentes mostraram maior estabilidade em torno da média; entretanto, como $p > 0,05$, a hipótese nula de ausência de mudança não é rejeitada, de modo que o ponto indicado não caracteriza ruptura estrutural estatisticamente significativa.

Gráfico 27 – Geração anual de energia (MWh) no período histórico com marcação do ponto de mudança pelo teste de Pettitt.

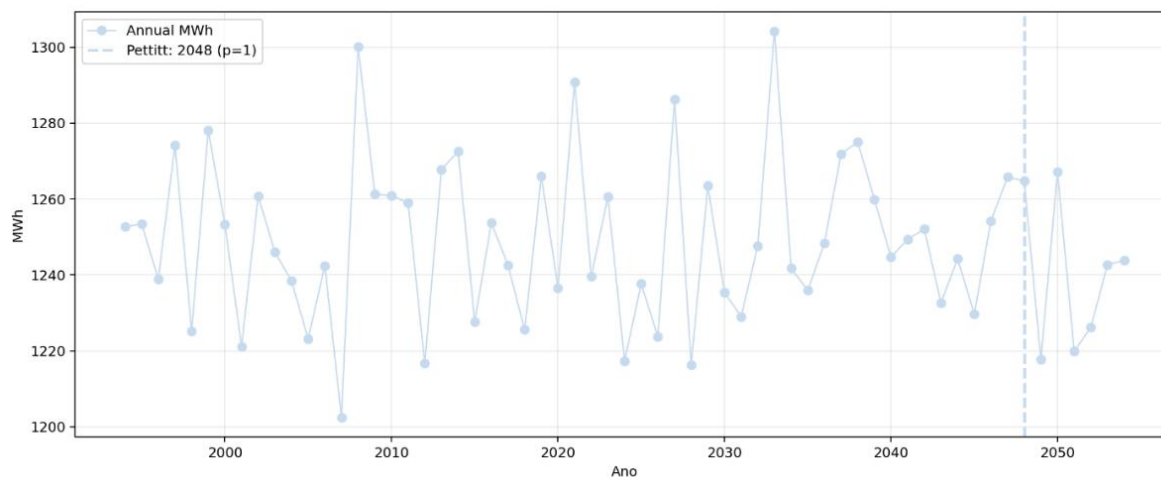


Fonte: Autor (2025).

Além disso, a diferença entre os níveis médios antes e depois do ponto é pequena (≈ 19 MWh, cerca de 1,5% da média), o que reforça que o sinal identificado representa uma reorganização natural da variabilidade interanual da geração simulada, e não uma mudança relevante no comportamento da série.

De acordo com o Gráfico 28, o teste de Pettitt apontou um ponto candidato de mudança em torno do ano de 2048, indicado pela linha tracejada vertical. Entretanto, o resultado apresentou $p\text{-valor} = 1,0$, o que indica ausência de evidência estatística para rejeitar a hipótese nula de não haver mudança na mediana (ou nível) da série. Assim, embora visualmente possa haver anos com valores um pouco menores após esse marco, tal comportamento é compatível com a variabilidade interanual natural e não caracteriza ruptura estrutural nem deslocamento abrupto na série simulada, devendo ser interpretado como flutuação aleatória ao longo do período analisado.

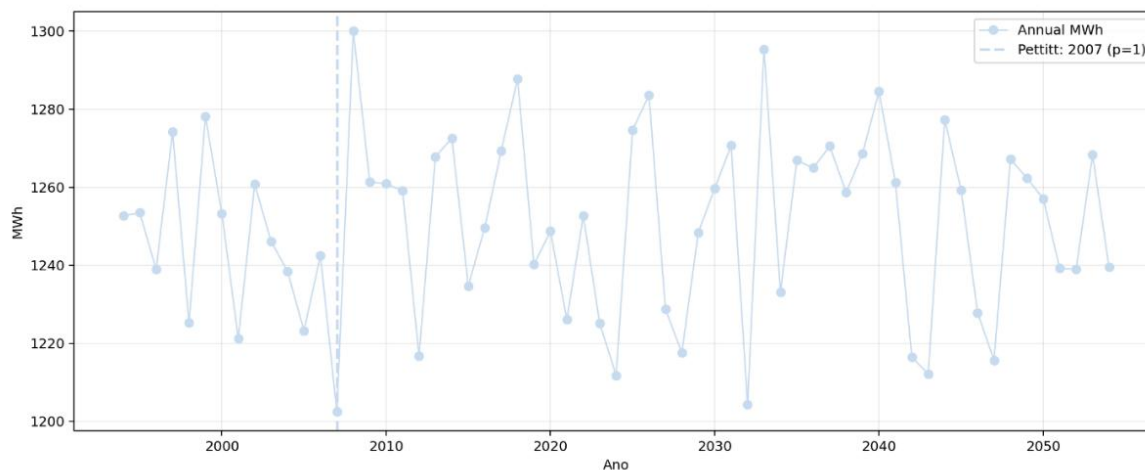
Gráfico 28 – Geração anual de energia (MWh) no cenário SSP2-4.5 com marcação do ponto de mudança pelo teste de Pettitt.



Fonte: Autor (2025).

Procedeu-se à avaliação do cenário SSP5-8.5 com a mesma metodologia, aplicando o teste de Pettitt para o período de 2015 a 2054. O Gráfico 29 apontou um ponto candidato de mudança em torno do ano de 2007 (linha tracejada); entretanto, o resultado apresentou $p\text{-valor} = 1,0$, o que indica ausência de evidência estatística para rejeitar a hipótese nula de inexistência de mudança na série. Assim, eventuais oscilações observadas ao longo do período — incluindo anos com leves reduções e recuperações subsequentes — são compatíveis com a variabilidade interanual natural, sem indícios de ruptura estrutural ou tendência persistente. Dessa forma, os resultados reforçam que o comportamento geral da geração simulada permaneceu estável, consistente com a variabilidade esperada nas projeções do cenário analisado.

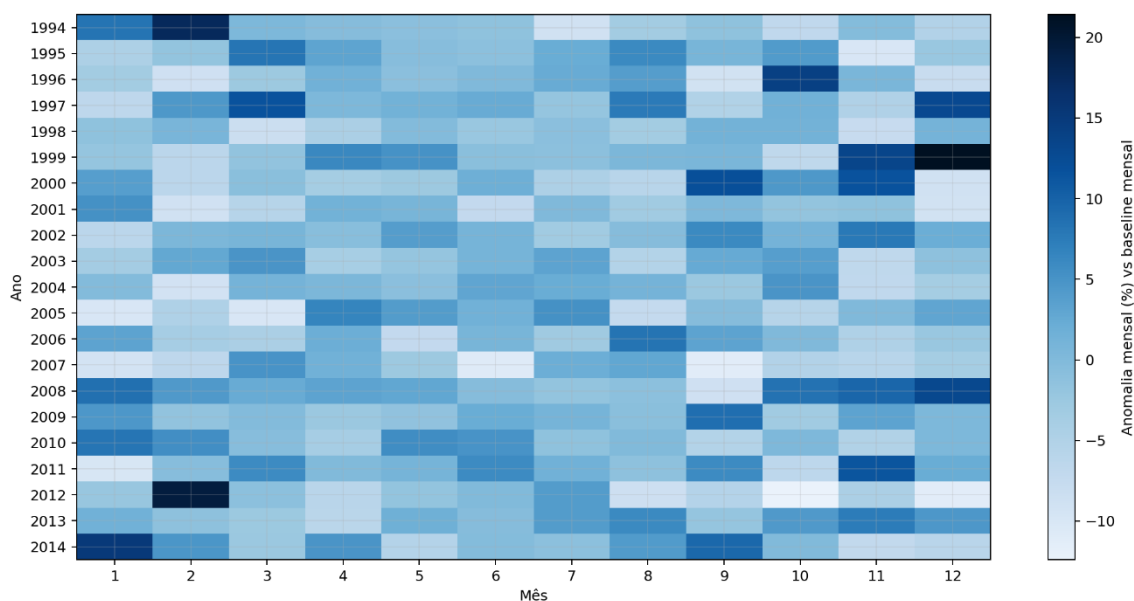
Gráfico 29 – Geração anual de energia (MWh) no cenário SSP5-8.5 com marcação do ponto de mudança pelo teste de Pettitt.



Fonte: Autor (2025).

No prosseguimento das análises, o Gráfico 30 apresentou a distribuição das anomalias percentuais mensais da geração no período histórico (1994–2014) em relação à linha de base mensal adotada. As tonalidades evidenciaram um mosaico de desvios positivos e negativos ao longo dos anos, com predominância de variações pontuais e intermitentes, sem formação de “blocos” persistentes (sequências contínuas) de anomalias altas ou baixas. Observou-se que as anomalias permaneceram, em geral, dentro de uma faixa moderada (aproximadamente de –10% a +20%, conforme a barra de cores), com ocorrências isoladas de valores mais elevados em meses específicos. Esse padrão reforçou a interpretação de um comportamento essencialmente estacionário no período histórico, no qual as oscilações refletem a variabilidade climática natural (sazonal e interanual), sem indicar uma tendência sistemática de aumento ou redução ao longo do tempo.

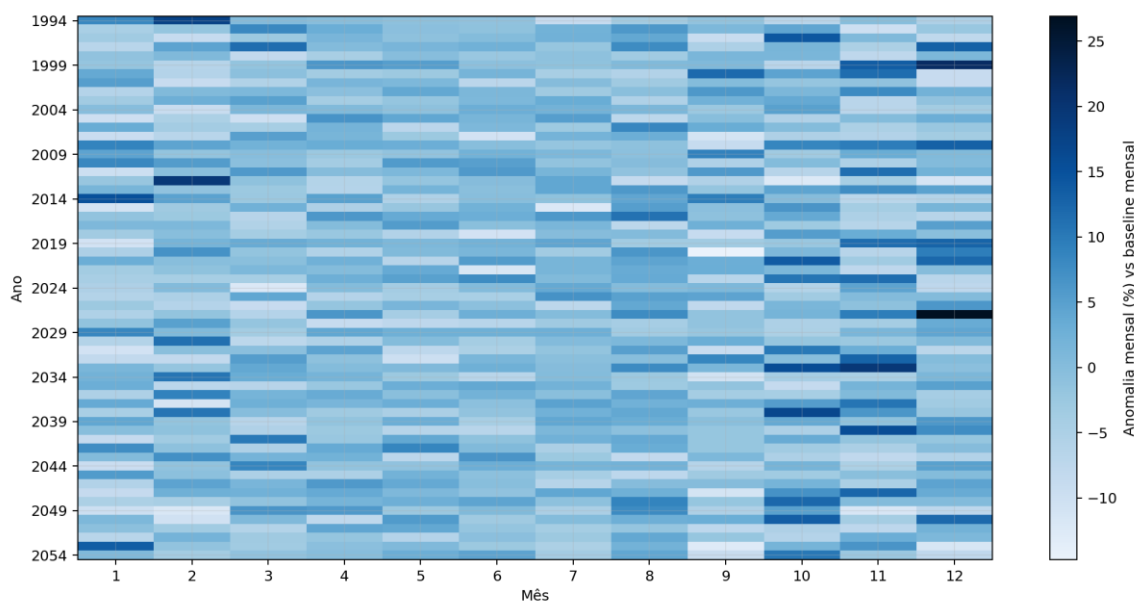
Gráfico 30 – Heatmap – Anomalia (%) vs baseline – histórica.



Fonte: Autor (2025).

Em continuidade, o Gráfico 31 apresenta a distribuição das anomalias percentuais mensais no cenário SSP2-4.5 em relação à linha de base mensal, evidenciando predominância de tons intermediários (anomalias próximas de zero) e ausência de um padrão persistente de desvios extremos ao longo do tempo. Observou-se alternância entre anomalias positivas e negativas em meses específicos, com ocorrência pontual de valores mais elevados, mas sem formação de faixas contínuas que indicassem mudança sistemática do regime de geração. A escala do gráfico sugere que as variações se mantiveram, em geral, dentro de uma faixa moderada (aproximadamente entre -10% e $+25\%$), indicando que a resposta do sistema permaneceu globalmente estável sob o cenário de estabilização intermediária de emissões, com oscilações associadas à variabilidade meteorológica interanual e sazonal, sem desvio expressivo e persistente em relação à referência.

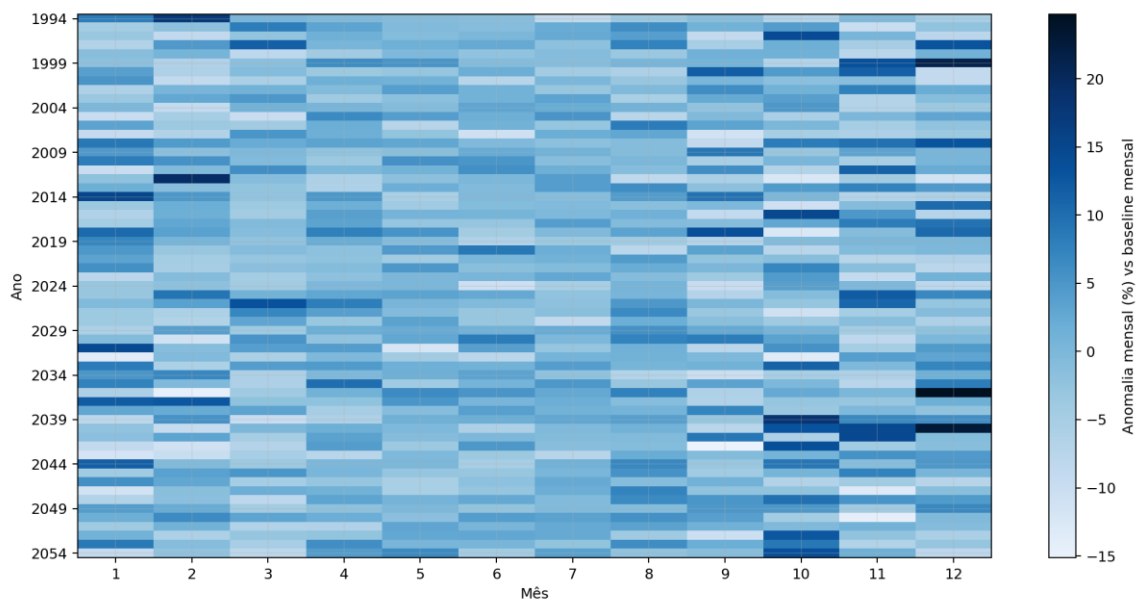
Gráfico 31 – Heatmap – Anomalia (%) vs baseline – ssp245.



Fonte: Autor (2025).

O cenário SSP5-8.5 foi examinado quanto às anomalias percentuais mensais em relação à linha de base, conforme demonstrado no Gráfico 32. Observou-se uma distribuição dispersa das anomalias ao longo do tempo, com alternância entre valores positivos e negativos indicada pela gradação cromática, sem formação de faixas contínuas ou concentração persistente em décadas específicas. De modo geral, o padrão visual sugere variação moderada, com a maioria dos meses apresentando desvios próximos de zero e ocorrências pontuais de anomalias mais intensas; pela escala do gráfico, essas variações situam-se aproximadamente entre -15% e $+20\%$. Assim, embora ocorram flutuações interanuais e sazonais esperadas da variabilidade meteorológica, o conjunto de resultados não indica tendência expressiva ou mudança estrutural no comportamento da geração simulada para o SSP5-8.5 ao longo do período analisado.

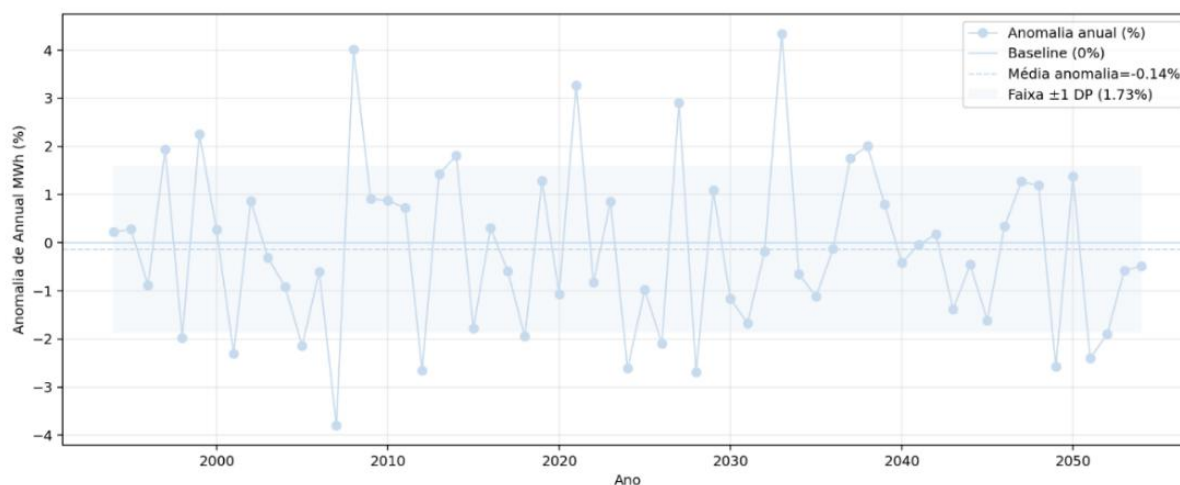
Gráfico 32 – Heatmap – Anomalia (%) vs baseline – ssp585.



Fonte: Autor (2025).

Em sequência, o Gráfico 33 apresentou a anomalia percentual anual da geração em relação à linha de base (0%), evidenciando oscilações interanuais com alternância de valores positivos e negativos. A média da anomalia permaneceu praticamente nula ($\approx -0,00\%$), indicando que, no conjunto do período histórico, a série não apresentou deslocamento sistemático em relação ao nível de referência. A faixa sombreada correspondente a ± 1 desvio-padrão ($\pm 1,88\%$) concentrou a maior parte dos anos, sugerindo que as variações observadas se mantiveram predominantemente dentro do intervalo esperado da variabilidade natural. Pontos isolados fora dessa faixa indicaram eventos anuais mais atípicos, porém sem caracterizar tendência persistente ou mudança estrutural na série.

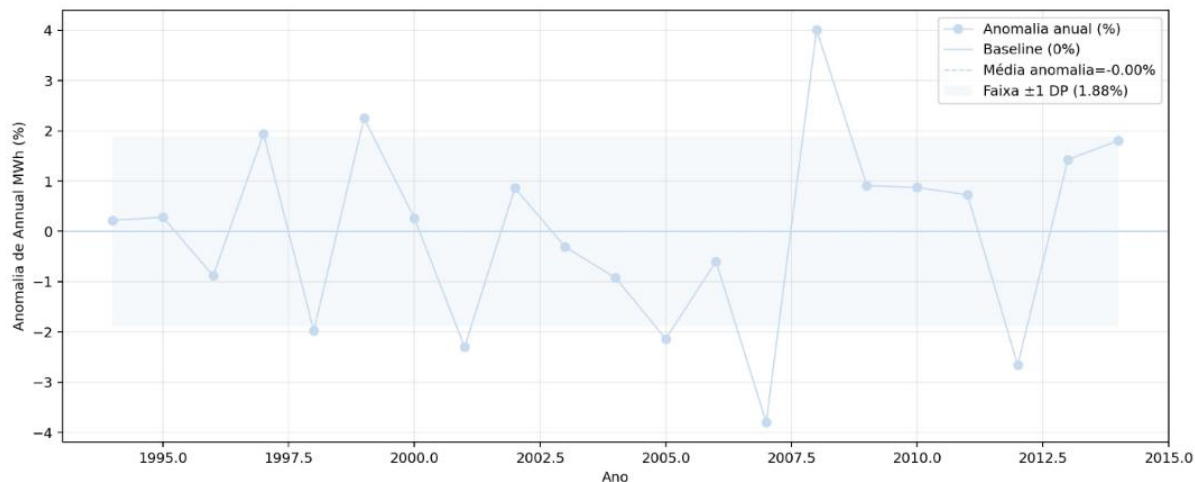
Gráfico 33 – Anomalia de Annual MWh em relação à baseline do cenário (%).



Fonte: Autor (2025).

No Gráfico 34, referente ao SSP2-4.5, observou-se comportamento semelhante ao histórico: a série de anomalias oscilou em torno do zero, com flutuações interanuais sem padrão direcional contínuo. A média das anomalias foi ligeiramente negativa ($\approx -0,14\%$), o que sugere um deslocamento muito discreto para valores abaixo da linha de base, mas de magnitude reduzida frente à variabilidade. O desvio-padrão de $\pm 1,73\%$ (faixa sombreada) indicou dispersão moderada, e a maior parte dos anos permaneceu dentro desse intervalo, reforçando a interpretação de estabilidade relativa do regime de geração. Ocorrências pontuais fora da faixa ± 1 DP representaram anos com anomalias mais intensas, interpretáveis como variabilidade interanual, e não como tendência consistente do cenário.

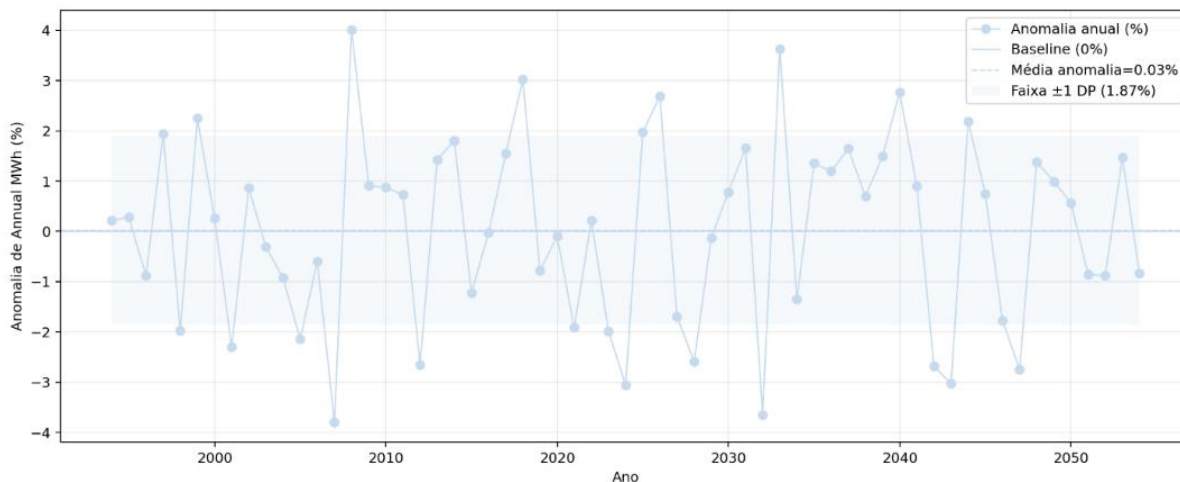
Gráfico 34 – Anomalia de Annual MWh em relação à baseline do cenário (%) (anos em comum).



Fonte: Autor (2025).

Para o SSP5-8.5 (Gráfico 35), o comportamento também foi dominado por oscilações interanuais em torno da linha de base. A média da anomalia foi próxima de zero e levemente positiva ($\approx 0,03\%$), evidenciando que, apesar das variações anuais, não houve deslocamento médio relevante em relação ao baseline. A faixa de ± 1 desvio-padrão ($\pm 1,87\%$) apresentou amplitude comparável aos demais cenários, indicando dispersão semelhante e reforçando a leitura de estabilidade estatística do sinal global. Alguns anos extrapolaram a faixa sombreada, indicando episódios de anomalia mais elevada (positiva ou negativa), mas sem sequência prolongada que sustentasse interpretação de mudança de regime persistente.

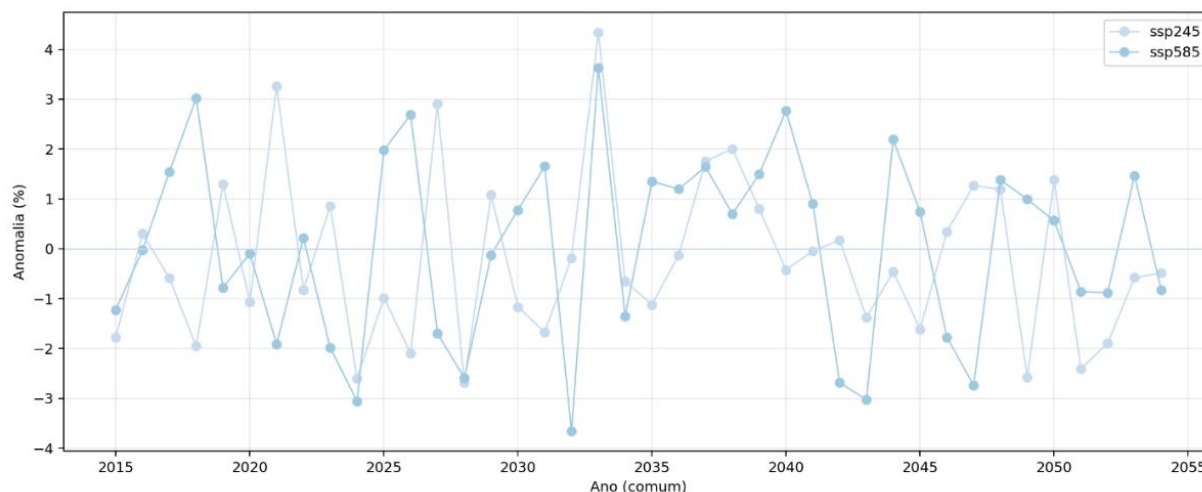
Gráfico 35 – Anomalia de Annual MWh em relação à baseline do cenário (%) (anos em comum).



Fonte: Autor (2025).

O Gráfico 36 apresentou a comparação das anomalias anuais (%) de geração entre os cenários SSP2-4.5 (ssp245) e SSP5-8.5 (ssp585) considerando apenas os anos coincidentes (eixo “Ano (comum)”). Observou-se que ambas as séries oscilaram de forma semelhante em torno da linha de referência (0%), indicando que, na maior parte do período, as variações permaneceram próximas ao nível basal adotado para o cálculo das anomalias. As diferenças entre os cenários foram pontuais e não sistemáticas, com alternância de anos em que um cenário apresentou anomalia ligeiramente superior ou inferior ao outro, sem manutenção prolongada de um afastamento em uma única direção. Dessa forma, a comparação reforçou que o comportamento projetado em anos comuns é dominado pela variabilidade interanual, e que as trajetórias de emissão se refletiram apenas em contrastes episódicos, sem evidência de divergência persistente no comportamento médio das anomalias ao longo do horizonte analisado.

Gráfico 36 – Anomalia de Annual MWh em relação à baseline do cenário (%) (anos em comum).



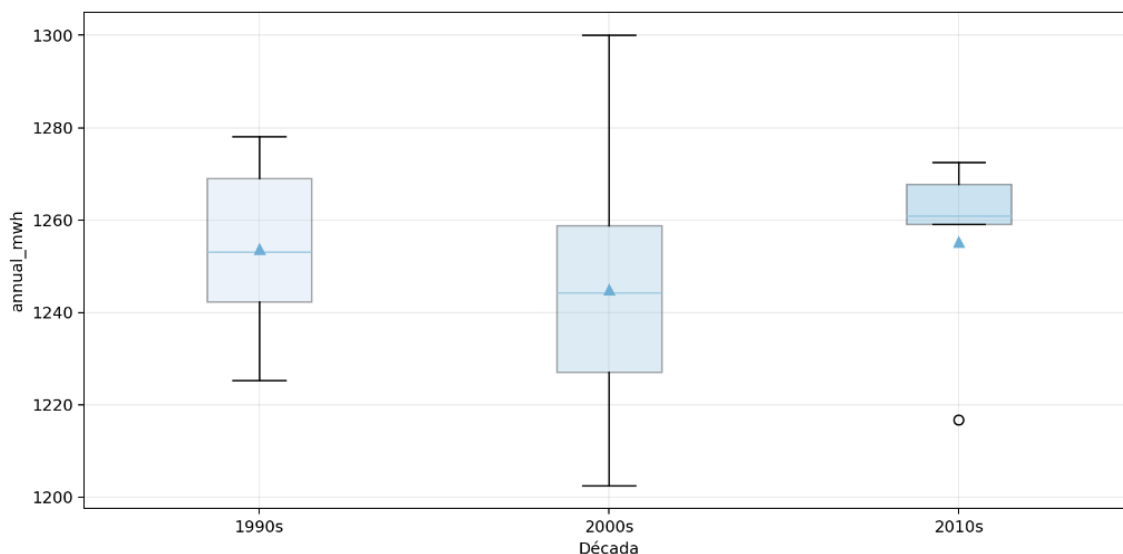
Fonte: Autor (2025).

4.2.5. Distribuição e Estatística Descritiva

No segmento inicial da análise, avaliou-se a série histórica com o objetivo de caracterizar a dispersão da geração anual (MWh) por década. O Gráfico 37 evidenciou que a distribuição da produção se manteve relativamente semelhante entre as décadas de 1990, 2000 e 2010, com medianas próximas e sem deslocamentos abruptos entre os períodos.

Observou-se que a década de 2000 apresentou a maior variabilidade, expressa por um intervalo interquartil mais amplo e maior extensão entre valores mínimos e máximos, indicando maior dispersão interanual nesse intervalo. Já a década de 1990 exibiu variação moderada, com limites inferior e superior concentrados em faixa comparável à década seguinte. Por sua vez, a década de 2010 apresentou menor dispersão, com caixa mais estreita e concentração dos valores em torno da mediana, embora com a presença de um valor atípico inferior (outlier), indicando ocorrência pontual de ano com geração abaixo do padrão observado no período. Em conjunto, o gráfico reforçou que as diferenças entre décadas estavam associadas principalmente à variabilidade natural, sem indicar mudança estrutural marcante no nível médio de geração histórica.

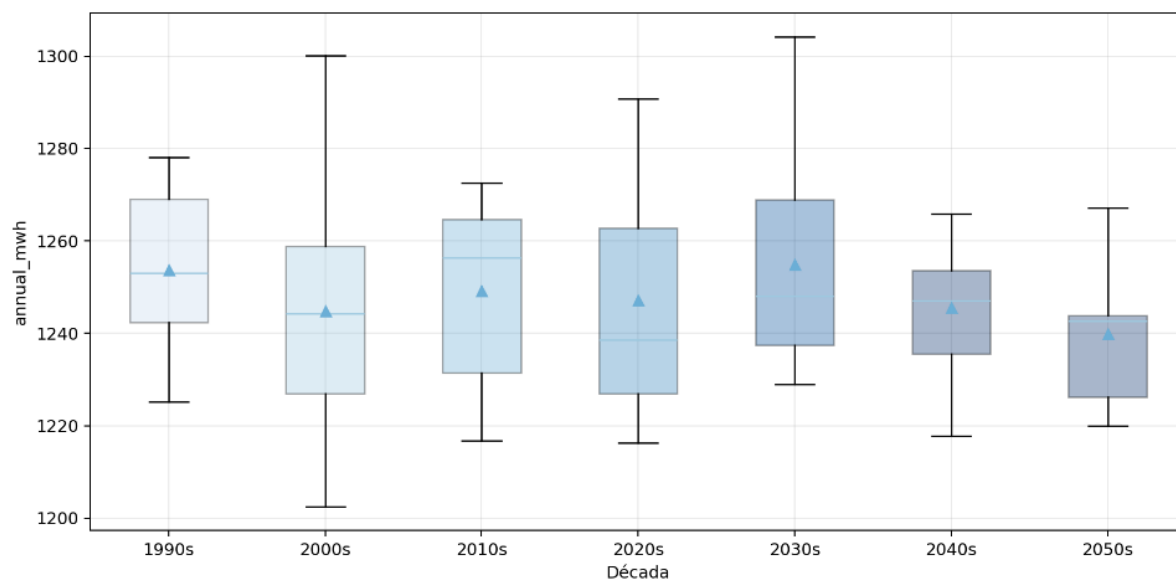
Gráfico 37 – Distribuição de Annual MWh por década – histórico.



Fonte: Autor (2025).

O Gráfico 38 sintetiza a dispersão estatística da geração anual no cenário ssp245 ao longo das décadas (1990–2050), indicando que as medianas permanecem, em geral, em níveis semelhantes, o que reforça a estabilidade do comportamento médio da série. Nota-se, entretanto, variação na amplitude entre os períodos: a década de 2000 apresenta maior dispersão (maior intervalo total), enquanto as décadas intermediárias mantêm variabilidade moderada e relativamente homogênea, com alguns anos pontuais de maior geração. Nas décadas finais, especialmente em 2050, observa-se redução da amplitude interquartil, sugerindo menor variabilidade das projeções nesse horizonte, sem evidência de mudança estrutural persistente.

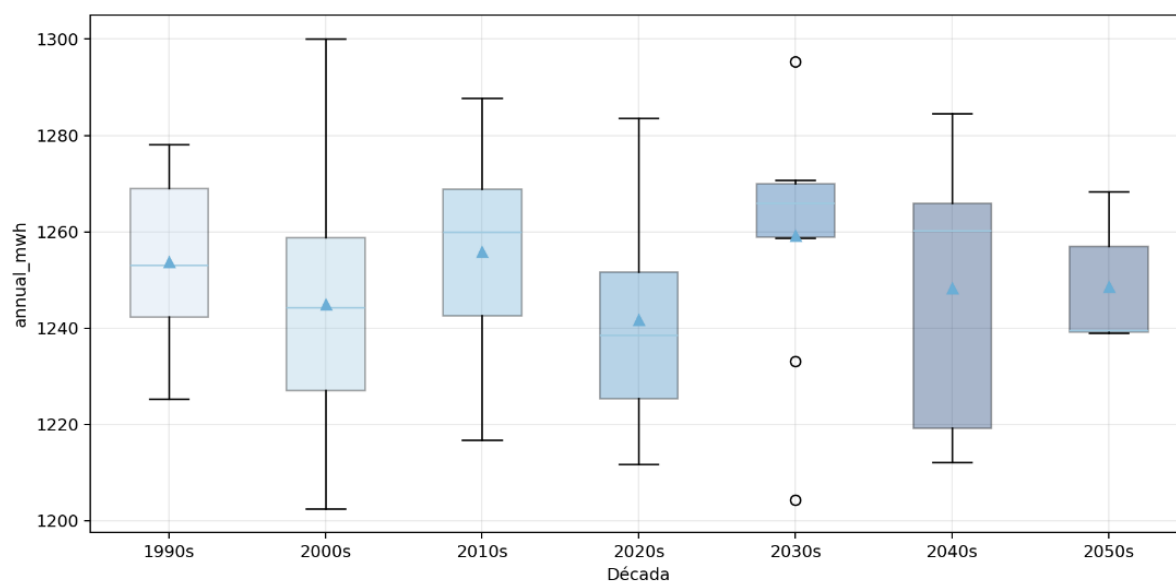
Gráfico 38 – Distribuição de Annual MWh por década – ssp245.



Fonte: Autor (2025).

Posteriormente, no Gráfico 39, o cenário ssp585 é caracterizado por boxplots decadais que evidenciam manutenção das medianas em patamares próximos ao longo do período analisado, indicando ausência de deslocamento sistemático do nível central de geração. Observa-se, contudo, variação na dispersão entre décadas: a década de 2000 apresenta maior amplitude total, enquanto 2010 e 2020 mantêm variabilidade moderada. Nas décadas de 2030 e 2040 destacam-se valores pontuais mais elevados e a presença de outliers (especialmente em 2030), sugerindo ocorrência de anos específicos com geração atípica, sem que isso se traduza em mudança persistente do comportamento médio. De modo geral, o intervalo interquartil permanece comparável entre as décadas iniciais e finais, reforçando que as oscilações observadas são predominantemente associadas à variabilidade interanual da simulação, sem tendência crescente ou decrescente significativa.

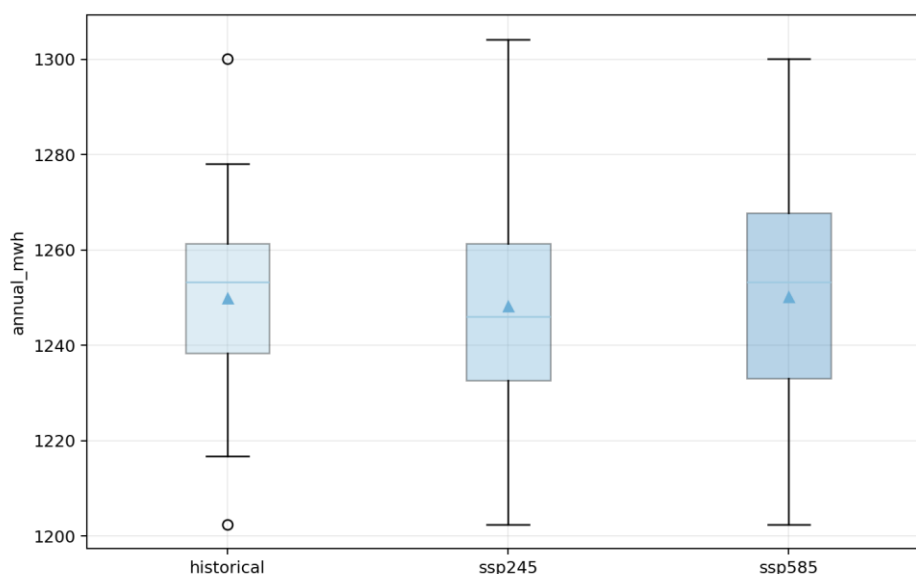
Gráfico 39 – Distribuição de Annual MWh por década – ssp585.



Fonte: Autor (2025).

Em continuidade, no Gráfico 40, a comparação conjunta entre o período histórico, ssp245 e ssp585 indica elevada similaridade na distribuição da geração anual. As medianas permanecem muito próximas entre os três conjuntos, sugerindo consistência do nível central de produção entre a referência histórica e as projeções. A dispersão interquartil também se apresenta comparável, com leve diferença no espalhamento dos cenários futuros, mas sem mudança sistemática que caracterize deslocamento do regime. Observam-se valores extremos pontuais (outliers), especialmente no histórico, porém estes não alteram o comportamento predominante. Em síntese, as variações entre cenários permanecem dentro de uma faixa comum de variabilidade, sem evidência de mudanças abruptas na distribuição central da série.

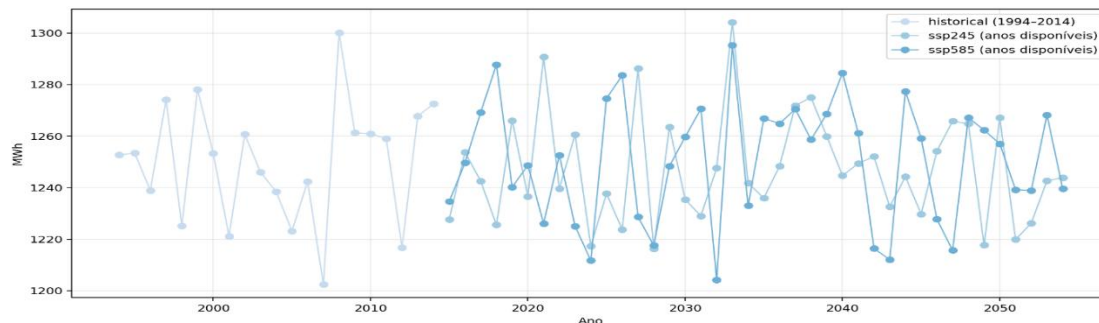
Gráfico 40 – Distribuição de Annual MWh por cenário.



Fonte: Autor (2025).

No Gráfico 41, a comparação entre a série histórica (1994–2014) e as projeções dos cenários ssp245 e ssp585 (anos disponíveis) evidenciou comportamento temporal bastante semelhante, marcado por oscilações interanuais recorrentes e sem padrão persistente de aumento ou redução. Observou-se ampla sobreposição dos intervalos de variação entre as três séries, com valores médios próximos e flutuações distribuídas ao longo das décadas, o que sugere que as diferenças entre cenários se mantiveram dentro da variabilidade natural representada pela simulação. Assim, apesar de picos e quedas pontuais em anos específicos, não se identificou tendência sistemática de crescimento ou decréscimo expressivo da geração anual no horizonte analisado.

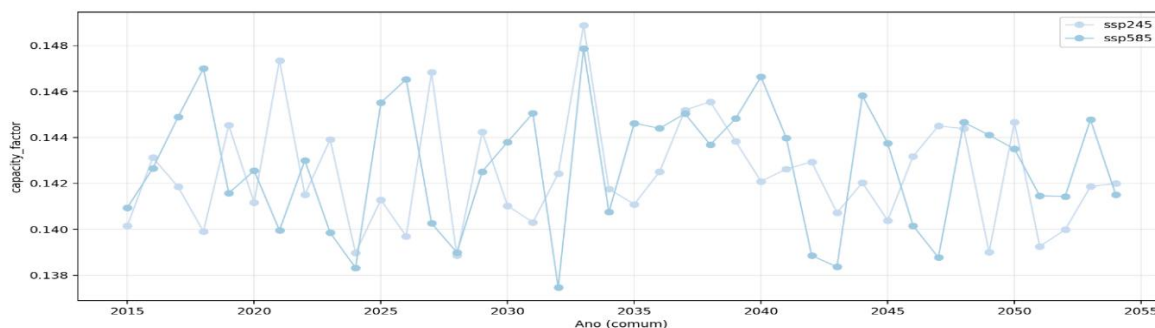
Gráfico 41 – Annual MWh – comparação de cenários (histórico, SSP2-4.5 e SSP5-8.5).



Fonte: Autor (2025).

No Gráfico 42, a comparação do fator de capacidade (CF) entre os cenários ssp245 e ssp585 para os anos coincidentes evidenciou séries muito próximas e com variabilidade anual de baixa amplitude, sem divergências relevantes entre os cenários. Observou-se que as oscilações ocorreram em uma faixa estreita e com comportamento semelhante ao longo do período, indicando estabilidade da eficiência relativa de conversão energética simulada. Além disso, a ocorrência de picos e vales em anos correspondentes em ambos os cenários sugere sincronia na resposta do modelo às variações interanuais, reforçando a consistência das projeções quanto ao CF no horizonte analisado.

Gráfico 42 – Fator de capacidade anual (CF) comparado entre os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, considerando anos em comum.



Fonte: Autor (2025).

5. PRODUTO TECNOLÓGICO

O produto técnico-tecnológico resultante deste trabalho (Apêndice D), consiste em um Relatório Técnico Conclusivo operacional, desenvolvido a partir da pesquisa “Análise das Mudanças Climáticas no Regime Pluviométrico no Município de Campos dos Goytacazes”, e estruturado como instrumento aplicado de apoio à decisão para a gestão municipal. Diferentemente de um documento apenas descritivo, o relatório sistematiza um procedimento replicável (protocolo) de diagnóstico clima–energia, com rotinas automatizadas que permitem reproduzir e atualizar periodicamente os resultados com base em novas entradas de dados.

O núcleo tecnológico do produto é um fluxo automatizado e reexecutável que integra: (i) aquisição e padronização de bases climáticas (observações e reanálises/projeções); (ii) controle de qualidade (QA/QC) e consolidação das séries; (iii) geração de métricas e indicadores (estatísticas descritivas, anomalias, tendências e mudanças de regime, quando aplicável); e (iv) produção automática de tabelas e gráficos padronizados para interpretação e uso operacional. Esse pipeline foi implementado em R e Python, permitindo replicação do procedimento (coleta → tratamento → análise → outputs) e aplicação em diferentes janelas temporais, cenários e localidades, desde que mantida a estrutura de dados de entrada.

A metodologia integra dados históricos do ERA5 e projeções do ETA-BESM sob cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, processados por rotinas automatizadas que geram produtos finais prontos para uso: séries anuais e mensais, boxplots por década, tabelas-síntese de métricas e indicadores comparativos entre períodos/cenários. Como evidência de consistência do componente energético simulado (linha de base 1994–2014), a geração anual média situa-se em torno de 1249,94 MWh e o fator de capacidade médio em $\sim 0,1427$, com anomalias anuais oscilando em torno de zero e dispersões da ordem de $\sim 1,7\%$ a $\sim 1,9\%$ conforme o cenário, o que estabelece um referencial quantitativo para monitoramento e comparação.

O produto é direcionado ao uso prático por gestores e equipes técnicas, com aplicações diretas em: (1) Defesa Civil e drenagem urbana, ao identificar meses/períodos de maior anomalia e dispersão para orientar contingência e manutenção preventiva; (2) planejamento hídrico, ao subsidiar priorização de ações

e protocolos operacionais em anos com maior probabilidade de desvios; e (3) energia e resiliência, ao permitir dimensionamento e avaliação de desempenho de sistemas fotovoltaicos sob diferentes cenários climáticos por meio de indicadores como média, dispersão, anomalias e comparações interdecadais. Assim, o relatório funciona como uma ferramenta tecnológica de apoio à gestão, pois entrega não apenas interpretação, mas também rotinas automatizadas e outputs padronizados que podem ser incorporados a rotinas institucionais de planejamento.

Reconhecem-se limitações inerentes às fontes e cenários: (i) o ERA5, por ser reanálise, pode apresentar vieses locais; (ii) o ETA-BESM carrega incertezas estruturais do modelo e da regionalização; e (iii) os cenários RCP representam trajetórias plausíveis, não previsões determinísticas. Por isso, o relatório prioriza interpretação comparativa (entre períodos/cenários) e resultados em termos de faixas estatísticas (médias, dispersões, anomalias e deltas), evitando leitura pontual ano a ano como previsão.

6. CONCLUSÃO

Este estudo integrou bases observacionais (INMET), reanálise (ERA5) e projeções climáticas (ETA-BESM e cenários) para avaliar sinais de mudança no regime pluviométrico e seus possíveis reflexos no desempenho da geração fotovoltaica em Campos dos Goytacazes. A influência climática foi constatada a partir:

- (i) da caracterização quantitativa da variabilidade e dos extremos de chuva ao longo da série,
- (ii) da aplicação de testes estatísticos de tendência e mudança de regime (Mann-Kendall, Sen's Slope e Pettitt);
- (iii) da análise de estabilidade/variabilidade da geração anual e das anomalias em relação às linhas de base, permitindo distinguir flutuações naturais de mudanças persistentes de comportamento.

Quanto ao regime de chuvas, verificou-se variabilidade interanual expressiva, com anos de déficit abaixo de 700 mm (por exemplo, 2014 com 676,0 mm e 2023 com 567,8 mm) e anos muito chuvosos acima de 1.500 mm (2005 com 1.548,1 mm e 2008 com 1.630,2 mm), evidenciando alternância de fases secas e úmidas e maior irregularidade na distribuição anual.

Essa amplitude reforça implicações diretas para gestão hídrica e proteção urbana (drenagem, enchentes e deslizamentos), além de setores dependentes de água, como agricultura e serviços.

No componente energético, as simulações indicaram que o potencial fotovoltaico permanece favorável e, sobretudo, estatisticamente estável no sinal médio, embora com oscilações interanuais relevantes. No histórico (1994–2014), a geração anual variou entre 1202,44 e 1300,08 MWh, com média em torno de 1249,94 MWh, e a tendência estimada não foi significativa ($p = 0,717$), não caracterizando mudança estrutural no período.

Nos cenários futuros, a leitura foi semelhante: no SSP5-8.5, a média anual ficou em torno de 1250,28 MWh, com tendência também não significativa ($p = 0,856$), sugerindo manutenção do patamar médio de geração, mas com variabilidade ano a ano.

Coerentemente, a análise de anomalias anuais em anos coincidentes mostrou

médias próximas de zero (no SSP5-8.5, $\approx +0,03\%$) e dispersão típica em torno de $\pm 1,87\%$ (± 1 desvio-padrão), com episódios pontuais fora da faixa, porém sem sequência prolongada que indicasse mudança de regime persistente.

Do ponto de vista adaptativo, os resultados sustentam recomendações diretamente ligadas ao padrão climático local: meses do período úmido tendem a coincidir com maior nebulosidade e maior variabilidade do desempenho mensal, enquanto meses mais secos favorecem maior previsibilidade da produção; essa relação é corroborada por associação estatisticamente significativa entre precipitação mensal e geração fotovoltaica mensal no período histórico (1994–2014), com correlação de Pearson $r = 0,351$ ($p = 9,95 \times 10^{-9}$) e Spearman $\rho = 0,416$ ($p = 5,42 \times 10^{-12}$); portanto, estratégias como armazenamento, gestão de demanda, reserva operativa e complementaridade com outras fontes renováveis devem ser priorizadas para o período mais úmido (especialmente novembro–março).

Em termos metodológicos, é essencial explicitar limitações: reanálises representam médias de grade e podem suavizar extremos locais, enquanto modelos podem apresentar vieses de magnitude, exigindo validação/correção e leitura cautelosa na comparação ponto-grade versus observação pontual.

Como trabalhos futuros, recomenda-se:

- (1) ampliar a avaliação multivariável clima-energia (radiação, nebulosidade, temperatura e vento) com séries mais longas e múltiplos modelos para reduzir incertezas;
- (2) aprofundar a análise de extremos e de mudança de regime para chuva e variáveis radiativas, conectando resultados a limiares operacionais do sistema elétrico;
- (3) incorporar explicitamente dimensões socioeconômicas (setores mais vulneráveis, custo de interrupções, priorização territorial e mecanismos de incentivo), para transformar as evidências climáticas e energéticas em estratégias municipais de adaptação e planejamento de infraestrutura.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, L. A.; CUNHA, S. B. da; SOUZA, V. dos S.; MIRO, J. M. R. Anais do VII Congresso Brasileiro de Geógrafos (CBG) - Caracterização do Canal Coqueiros: dos Problemas Ambientais Urbanos ao Conflito Pelo Uso da Água na Zona Rural – Campos dos Goytacazes/RJ. [S. l.]: Agb-Niterói, 2014. 2014.

ARGUEZ, A.; INAMDAR, A.; PALECKI, M. A.; SCHRECK, C. J.; YOUNG, A. H. ENSO Normals: A New U.S. Climate Normals Product Conditioned by ENSO Phase and Intensity and Accounting for Secular Trends. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, [s. l.], v. 58, n. 6, p. 1381–1397, 2019. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/58/6/jamc-d-18-0252.1.xml>. Acesso em: 3 mar. 2026.

AYADI, O.; SHADID, R.; BANI-ABDULLAH, A.; ALRBAI, M.; ABU-MUALLA, M.; BALAH, N. Experimental comparison between Monocrystalline, Polycrystalline, and Thin-film solar systems under sunny climatic conditions. *Energy Reports*, [s. l.], v. 8, p. 218–230, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352484722012288>. Acesso em: 3 fev. 2026.

BENGHANEM, M.; HADDAD, S.; ALZHRANI, A.; MELLIT, A.; ALMOHAMADI, H.; KHUSHAIM, M.; AIDA, M. S. Evaluation of the Performance of Polycrystalline and Monocrystalline PV Technologies in a Hot and Arid Region: An Experimental Analysis. *Sustainability*, [s. l.], v. 15, n. 20, p. 14831, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/20/14831>. Acesso em: 3 fev. 2026.

BÜHLER, A. J.; GABE, I. J.; SANTOS, F. H. D. Uma Revisão Sobre as Tecnologias Fotovoltaicas Atuais. Em: PAULO JAYME PEREIRA ABDALA. *Energia solar e eólica*. 1. ed. [S. l.]: Antonella Carvalho de Oliveira, 2019. p. 10–25. Disponível em: <https://www.atenaeditora.com.br/wp-content/uploads/2019/01/E-book-Energia-Solar-e-E%C3%B3lica.pdf>. Acesso em: 3 fev. 2026.

CALVIN, K.; DASGUPTA, D.; KRINNER, G.; MUKHERJI, A.; THORNE, P. W.; TRISOS, C.; ROMERO, J.; ALDUNCE, P.; BARRETT, K.; BLANCO, G.; CHEUNG, W. W. L.; CONNORS, S.; DENTON, F.; DIONGUE-NIANG, A.; DODMAN, D.; GARSCHAGEN, M.; GEDEN, O.; HAYWARD, B.; JONES, C.; JOTZO, F.; KRUG, T.; LASCO, R.; LEE, Y.-Y.; MASSON-DELMOTTE, V.; MEINSHAUSEN, M.;

MINTENBECK, K.; MOKSSIT, A.; OTTO, F. E. L.; PATHAK, M.; PIRANI, A.; POLOCZANSKA, E.; PÖRTNER, H.-O.; REVI, A.; ROBERTS, D. C.; ROY, J.; RUANE, A. C.; SKEA, J.; SHUKLA, P. R.; SLADE, R.; SLANGEN, A.; SOKONA, Y.; SÖRENSON, A. A.; TIGNOR, M.; VAN VUUREN, D.; WEI, Y.-M.; WINKLER, H.; ZHAI, P.; ZOMMERS, Z.; HOURCADE, J.-C.; JOHNSON, F. X.; PACHAURI, S.; SIMPSON, N. P.; SINGH, C.; THOMAS, A.; TOTIN, E.; ARIAS, P.; BUSTAMANTE, M.; ELGIZOULI, I.; FLATO, G.; HOWDEN, M.; MÉNDEZ-VALLEJO, C.; PEREIRA, J. J.; PICHES-MADRUGA, R.; ROSE, S. K.; SAHEB, Y.; SÁNCHEZ RODRÍGUEZ, R.; ÜRGE-VORSATZ, D.; XIAO, C.; YASSAA, N.; ALEGRÍA, A.; ARMOUR, K.; BEDNAR-FRIEDL, B.; BLOK, K.; CISSÉ, G.; DENTENER, F.; ERIKSEN, S.; FISCHER, E.; GARNER, G.; GUIVARCH, C.; HAASNOOT, M.; HANSEN, G.; HAUSER, M.; HAWKINS, E.; HERMANS, T.; KOPP, R.; LEPRINCE-RINGUET, N.; LEWIS, J.; LEY, D.; LUDDEN, C.; NIAMIR, L.; NICHOLLS, Z.; SOME, S.; SZOPA, S.; TREWIN, B.; VAN DER WIJST, K.-I.; WINTER, G.; WITTING, M.; BIRT, A.; HA, M.; ROMERO, J.; KIM, J.; HAITES, E. F.; JUNG, Y.; STAVINS, R.; BIRT, A.; HA, M.; ORENDAIN, D. J. A.; IGNON, L.; PARK, S.; PARK, Y.; REISINGER, A.; CAMMARAMO, D.; FISCHLIN, A.; FUGLESTVEDT, J. S.; HANSEN, G.; LUDDEN, C.; MASSON-DELMOTTE, V.; MATTHEWS, J. B. R.; MINTENBECK, K.; PIRANI, A.; POLOCZANSKA, E.; LEPRINCE-RINGUET, N.; PÉAN, C. IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. [S. I.]: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. Acesso em: 3 fev. 2026.

CANTANHEDE, V. P. P.; AMORIM, R. R. 11o Sinageo - Uso do Modelo Digital de Elevação na Análise Morfométrica do Relevo: o Estudo de Caso do Município de Campos dos Goytacazes-RJ. [S. I.: s. n.], 2016. Disponível em: <https://www.sinageo.org.br/2016/trabalhos/6/6-13-255.html>. Acesso em: 3 fev. 2026.

CAVALCANTI DA SILVA, L. R.; VIGODERIS, R. B. Estudo da viabilidade para instalação eletrogeradores termossolares no município de Garanhuns, Pernambuco. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, [s. l.], v. 11, n. 6, p. 347–356, 2022.

Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/jhrs/article/view/252314>.

Acesso em: 3 fev. 2026.

COELHO, C. de A. W. Mudança do clima no Brasil: síntese atualizada e perspectivas para decisões estratégicas. Brasília, DF: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2025. 2025.

CUARTAS, L. A.; CUNHA, A. P. M. D. A.; ALVES, J. A.; PARRA, L. M. P.; DEUSDARÁ-LEAL, K.; COSTA, L. C. O.; MOLINA, R. D.; AMORE, D.; BROEDEL, E.; SELUCHI, M. E.; CUNNINGHAM, C.; ALVALÁ, R. C. D. S.; MARENGO, J. A. Recent Hydrological Droughts in Brazil and Their Impact on Hydropower Generation. *Water*, [s. l.], v. 14, n. 4, p. 601, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/4/601>. Acesso em: 27 fev. 2026.

D'ADAMO, I.; FALCONE, P. M.; GASTALDI, M.; MORONE, P. The economic viability of photovoltaic systems in public buildings: Evidence from Italy. *Energy*, [s. l.], v. 207, p. 118316, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544220314237>. Acesso em: 3 fev. 2026.

DI GIULIO, G. M.; TORRES, R. R.; LAPOLA, D. M.; BEDRAN-MARTINS, A. M.; DA PENHA VASCONCELLOS, M.; BRAGA, D. R.; FUCK, M. P.; JUK, Y.; NOGUEIRA, V.; PENNA, A. C.; JACAÚNA, T.; FETZ, M.; PESSOA, Z.; PONTES, R.; SCHONS, M.; PREMEBIDA, A. Bridging the gap between will and action on climate change adaptation in large cities in Brazil. *Regional Environmental Change*, [s. l.], v. 19, n. 8, p. 2491–2502, 2019. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s10113-019-01570-z>. Acesso em: 27 fev. 2026.

EQUIPE TÉCNICA CONSÓRCIO GESTÃO DE RESÍDUOS. Plano Municipal De Gestão Integrada De Resíduos Sólidos De Campos Dos Goytacazes(3), 2024. Disponível em: <https://www.campos.rj.gov.br/pmcg-residuos.php>

FERON, S.; CORDERO, R. R.; DAMIANI, A.; JACKSON, R. B. Climate change extremes and photovoltaic power output. *Nature Sustainability*, [s. l.], v. 4, n. 3, p. 270–276, 2020. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41893-020-00643-w>. Acesso em: 27 fev. 2026.

GRAHAME, M. 2024: record-breaking watershed year for global climate 2024.

[S. l.: s. n.], 2025. Disponível em: <https://www.metoffice.gov.uk/about-us/news-and-media/media-centre/weather-and-climate-news/2025/2024-record-breaking-watershed-year-for-global-climate>. Acesso em: 3 fev. 2026.

GUTIERREZ, M. B. G. P. S. As Mudanças climáticas e seus impactos sobre o setor de energia elétrica no Brasil: a necessidade de aprimorar o planejamento energético. Boletim Regional, Urbano e Ambiental (BRUA): n. 33, [s. l.], v. 33, p. 111–119, 2024. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/16393/1/BRUA_33_Artigo_9_Mudancas_climaticas_impacto_energia.pdf. Acesso em: 3 fev. 2026.

INPE. INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS Eta Model – Eta Model. Em: [s. d.]. Disponível em: <https://www3.cptec.inpe.br/eta/eta-model/>. Acesso em: 3 fev. 2026.

IPCC. Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change-1. 1. ed. [S. l.]: Cambridge University Press, 2023a. 2023. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9781009157896/type/book>. Acesso em: 10 out. 2025.

IPCC. Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change3. 1. ed. [S. l.]: Cambridge University Press, 2023b. 2023. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9781009325844/type/book>. Acesso em: 3 fev. 2026.

ISLAM, Md. I.; BIN JADIN, M. S.; AL MANSUR, A.; ALHARBI, T. Electrical Performance and Degradation Analysis of Field-Aged PV Modules in Tropical Climates: A Comparative Experimental Study. Energy Conversion and Management: X, [s. l.], v. 24, p. 100719, 2024. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2590174524001971>. Acesso em: 3 fev. 2026.

KENDALL, M. G. Rank Correlation Methods. 4 ed. London: Charles Griffin, 1975.

KHALIL, N. A.; KAMOONA, G. M. I. Improving Thermal Performance in the

University Classrooms. *Journal of Engineering*, [s. l.], v. 30, n. 01, p. 74–89, 2024. Disponível em: <https://joe.uobaghdad.edu.iq/index.php/main/article/view/1912>. Acesso em: 3 fev. 2026.

MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, [S.l.]: Econometric Society, v. 13, n. 3, p. 245–259, jul. 1945.

LAZARETTI, A. F.; PINHO, D.; MEDEIROS, M. C. S. Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação: município de Campos dos Goytacazes - RJ. [s. l.], 2015. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/15687>. Acesso em: 3 fev. 2026.

MARENCO, J. A. Impactos sociais dos eventos climáticos extremos. *Ciência e Cultura*, [s. l.], v. 76, n. 3, p. 01–08, 2024. Disponível em: http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0009-67252024000300009&lng=en&nrm=iso&tlng=pt. Acesso em: 3 fev. 2026.

MENDES, P. D. A. G.; ALMEIDA, A. C.; LITRE, G.; RODRIGUES FILHO, S.; SAITO, C. H.; DÁVALOS, N. E. B.; GAIVIZZO, L. H. B.; LINDOSO, D. P.; REIS, R. M.; FERREIRA, J. L. Políticas públicas e adaptação às mudanças climáticas: três estudos de casos no semiárido brasileiro. *Sustainability in Debate*, [s. l.], v. 13, n. 3, p. 209–245, 2022. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/sust/article/view/46064>. Acesso em: 3 fev. 2026.

MITRATECH. Como Funciona a Energia Solar Fotovoltaica. Em: MITRATECH. 2025. Disponível em: <https://mitratech.com.br/como-funciona-energia-solar-fotovoltaica/>. Acesso em: 3 fev. 2026.

NATIVIDADE, U. A.; GARCIA, S. R.; TORRES, R. R. Tendência dos Índices de Extremos Climáticos Observados e Projetados no Estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Meteorologia*, [s. l.], v. 32, n. 4, p. 600–614, 2017. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862017000400600&tlng=pt. Acesso em: 3 fev. 2026.

OLIVEIRA, T. A.; FERREIRA, C. D. C. M. Mudanças climáticas e chuvas no sudeste do Brasil: tendências e eventos extremos. *Revista de Geografia*, [s. l.], v. 42, n. 2, p. 87–111, 2025. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/revistageografia/article/view/262807>. Acesso em: 3 fev. 2026.

PETTITT, A. N. A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. *Applied Statistics*, [s. l.], v. 28, n. 2, p. 126, 1979. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/10.2307/2346729?origin=crossref>. Acesso em: 3 mar. 2026.

REFEITURA DE CAMPOS. Grupo de Emergência em alagamentos atua em vários pontos de Campos. [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: https://campos.rj.gov.br/exibirNoticia.php?id_noticia=57215. Acesso em: 3 fev. 2026.

REZENDE MONTEIRO, R.; CADJA INDIO DO BRASIL DA MATA, C.; SUELI PADILHA, N. AdaptaCidades, ODS 11 e 13 e Mudanças Climáticas: desafios da Resiliência Urbana no Brasil. *Revista Brasileira de Direito Urbanístico | RBDU*, [s. l.], v. 11, n. 20, p. 537–556, 2025. Disponível em: <https://biblioteca.ibdu.org.br/direitourbanistico/article/view/1069>. Acesso em: 3 fev. 2026.

SCHILL, C.; ANDERSON, A.; BURNHAM, L.; LEONARDO, M. Soiling Losses – Impact on the Performance of Photovoltaic Power Plants. [S. l.: s. n.], 2022. 2022.

SEA/RJ, S. de E. do A. (RJ). Plano de Adaptação Climática do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: SEA / INEA, 2018. Disponível em: <https://www.iis-rio.org/wp-content/uploads/2021/11/PAERJ-Relato%CC%81rio-Final-compactado.pdf>.

SEN, P. K. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, [s. l.], v. 63, n. 324, p. 1379–1389, 1968. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01621459.1968.10480934>. Acesso em: 3 mar. 2026.

SHAKER, L. M.; AL-AMIERY, A. A.; HANOON, M. M.; AL-AZZAWI, W. K.; KADHUM, A. A. H. Examining the influence of thermal effects on solar cells: a comprehensive review. *Sustainable Energy Research*, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 6, 2024. Disponível em: <https://jrenewables.springeropen.com/articles/10.1186/s40807-024-00100-8>. Acesso em: 3 fev. 2026.

SILVA, W. L.; DERECHYNSKI, C.; CHOU, S. C.; CAVALCANTI, I. Future Changes in Temperature and Precipitation Extremes in the State of Rio de Janeiro (Brazil). *American Journal of Climate Change*, [s. l.], v. 03, n. 04, p. 353–365, 2014.

Disponível em: <http://www.scirp.org/journal/doi.aspx?DOI=10.4236/ajcc.2014.34031>.

Acesso em: 3 fev. 2026.

SILVA, C. M. A.; FERREIRA, A. B. S.; GOMES FILHO, T. A.; NASCIMENTO, L. D.; ACRUZ, C. S.; MARQUES, F. R. V.; SILVA, L. H. P. D.; PEREIRA, D. D. D. M.; LIMA, L. A. T. D.; SILVA, G. P. G. D. Sustainable energy in Brazil: Challenges and opportunities for the coming years. Em: EXPLORING THE FIELD OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL SCIENCES. 1. ed. [S. l.]: Seven Editora, 2024. Disponível em: <https://sevenpublicacoes.com.br/index.php/editora/article/view/4228>.

Acesso em: 3 fev. 2026.

SOARES, K. W. D. S.; BATTISTI, R.; DAPPER, F. P.; CARVALHO, A. P. M. D.; SILVA, M. V. D.; SILVA, J. L. B. D.; DE OLIVEIRA, H. F. E.; MESQUITA, M. Shifting Climate Patterns in the Brazilian Savanna Evidenced by the Köppen Classification and Drought Indices. *Atmosphere*, [s. l.], v. 16, n. 7, p. 849, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4433/16/7/849>. Acesso em: 3 fev. 2026.

SOFFIATI, A. O Núcleo de Campos dos Goytacazes/RJ e a drenagem urbana. [s. l.], 2019. Disponível em: <https://boletimpetroleoroyaltieseregiao.ucam-campos.br/index.php/bprrr/article/view/68>.

TAKEUCHI, R. D. O. A.; CREMASCO, N. P.; LELUDAK, J. A.; URBANETZ JUNIOR, J. AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA SUJIDADE DEPOSITADA SOBRE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS INSTALADOS EM ZONAS CLIMÁTICAS DO PARANÁ, BRASIL. Em: 2022, [s. l.], . Anais [...]. [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1054>. Acesso em: 3 fev. 2026.

TZOUMANIKAS, P.; NIKITIDOU, E.; BAIS, A. F.; KAZANTZIDIS, A. The effect of clouds on surface solar irradiance, based on data from an all-sky imaging system. *Renewable Energy*, [s. l.], v. 95, p. 314–322, 2016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148116303305>. Acesso em: 27 fev. 2026.

VELASCO HOLENDER, B.; BARBOSA SANTOS, E. Análise de tendência dos eventos de precipitação intensa no Sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, [s. l.], v. 32, p. 584–606, 2023. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbclima/article/view/16411>. Acesso em: 27 fev.

2026.

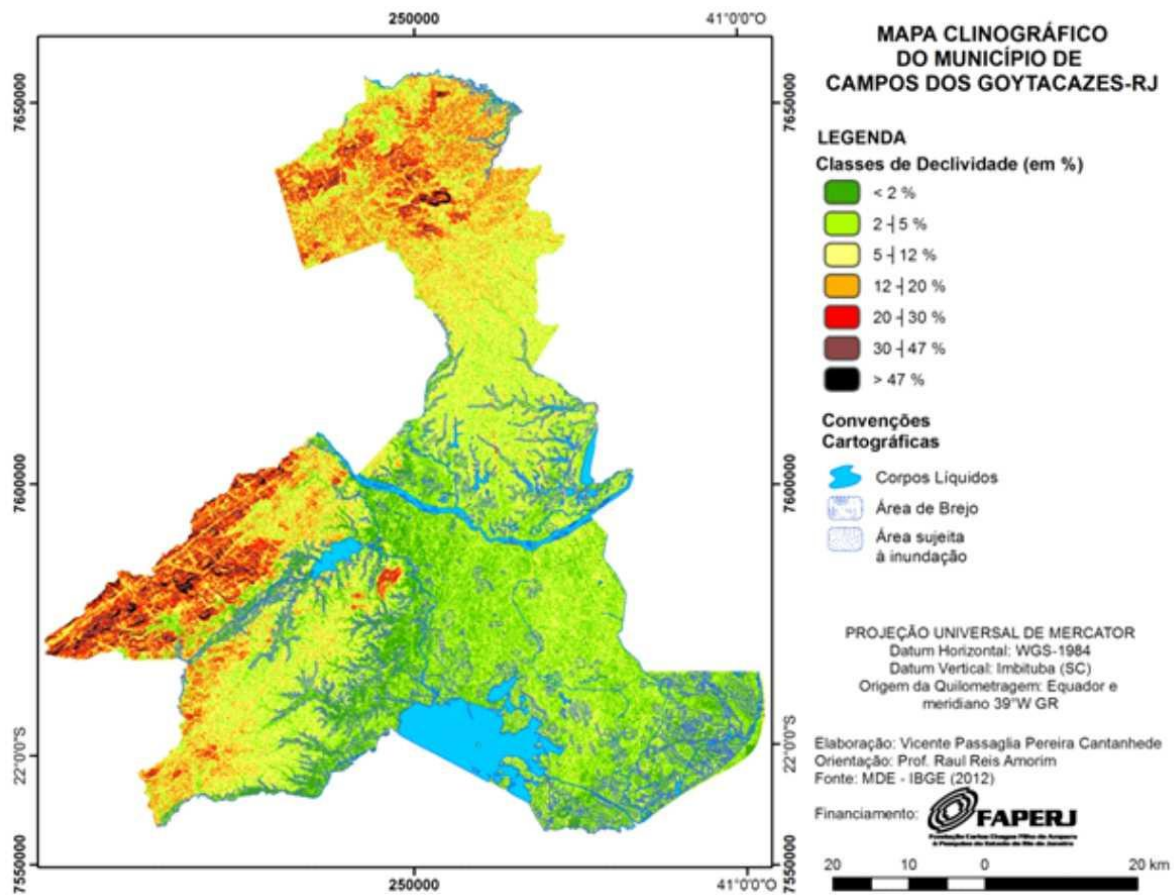
VICTORIA, M.; HAEGEL, N.; PETERS, I. M.; SINTON, R.; JÄGER-WALDAU, A.; DEL CAÑIZO, C.; BREYER, C.; STOCKS, M.; BLAKERS, A.; KAIZUKA, I.; KOMOTO, K.; SMETS, A. Solar photovoltaics is ready to power a sustainable future. *Joule*, [s. l.], v. 5, n. 5, p. 1041–1056, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2542435121001008>. Acesso em: 3 fev. 2026.

VOUDOUKIS, N. F. Photovoltaic Technology and Innovative Solar Cells. *European Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, [s. l.], v. 2, n. 1, 2018. Disponível em: <https://ejece.org/index.php/ejece/article/view/13>. Acesso em: 3 fev. 2026.

WMO, W. M. State of the Global Climate 2023. Erscheinungsort nicht ermittelbar: United Nations, 2024. 2024. Disponível em: https://library.wmo.int/viewer/68835/download?file=1347_Global-statement-2023_en.pdf&type=pdf&navigator=1.

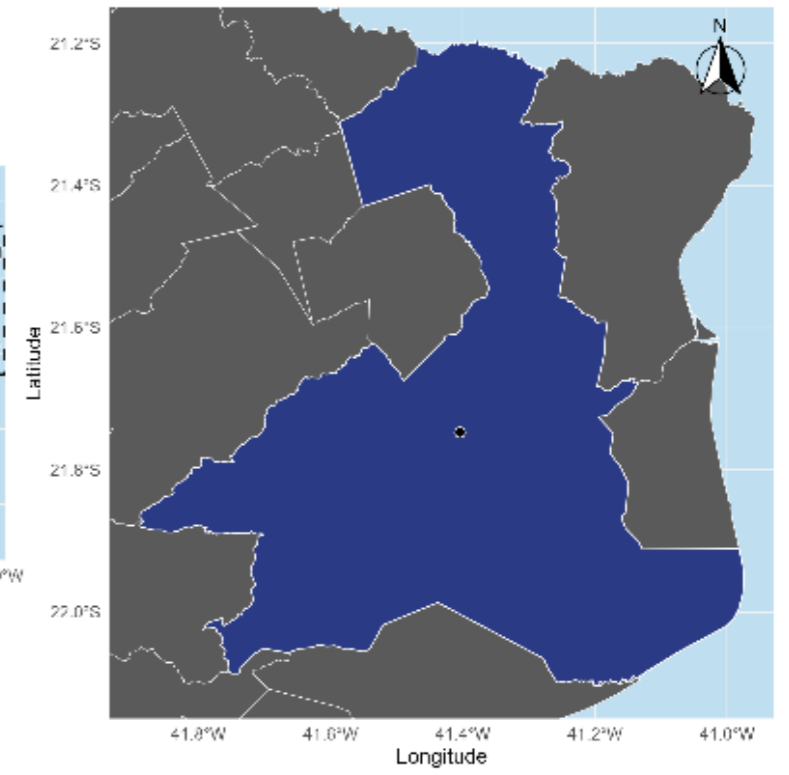
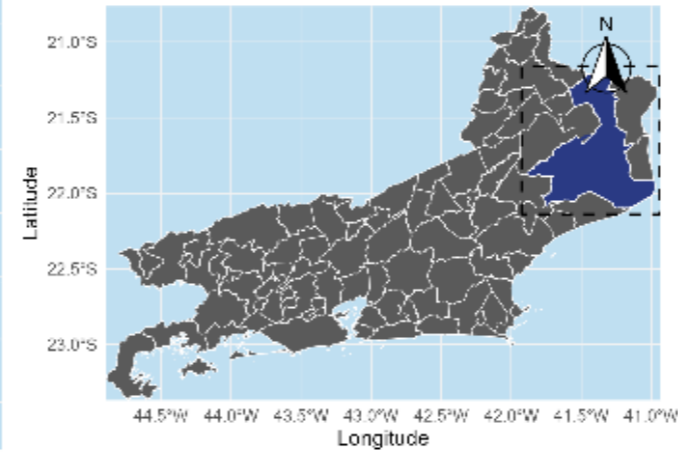
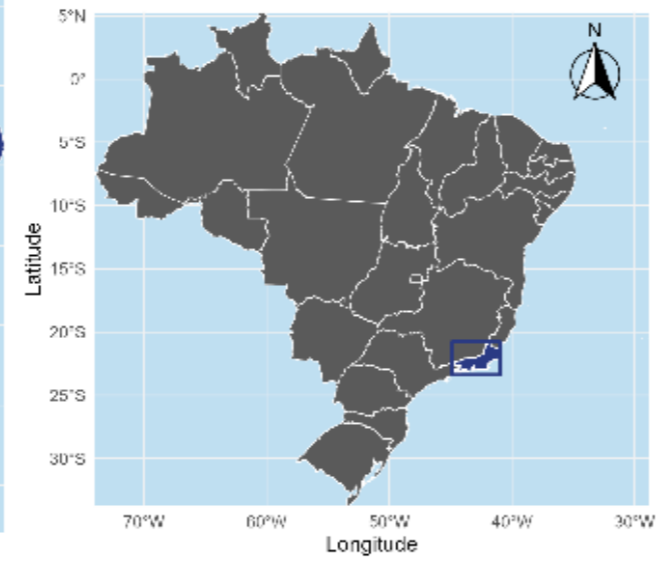
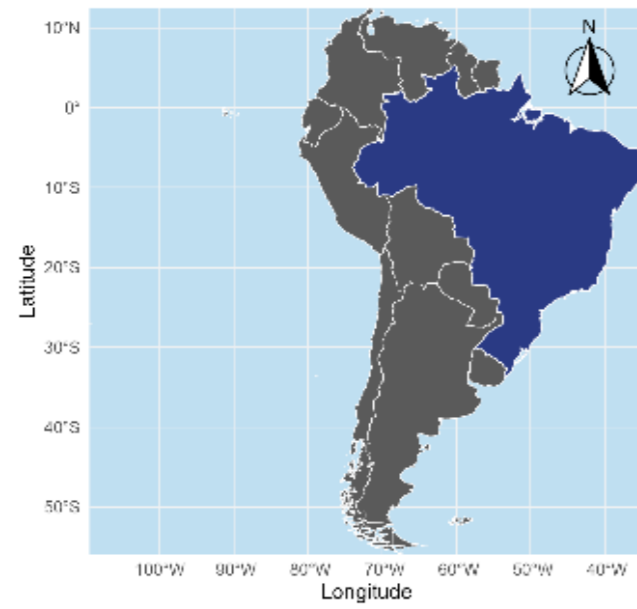
WMO, W. M. O. WMO confirms 2024 as warmest year on record at about 1.55°C above pre-industrial level. [S. l.: s. n.], 2025. Disponível em: <https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2024-warmest-year-record-about-155degc-above-pre-industrial-level>. Acesso em: 3 fev. 2026.

Anexo A – Mapa Clinográfico do município de Campos dos Goytacazes.



Fonte: SINAGEO (2016).

Apêndice A – Mapa de localização de Campos dos Goytacazes.



Apêndice B – Resultados anuais simulados de geração elétrica e fator de capacidade para os cenários histórico, SSP2-4.5 e SSP5-8.5.

CENÁRIO	ANO	MWh	CENÁRIO	ANO	MWh	CENÁRIO	ANO	MWh	CENÁRIO	ANO	MWh
historical	1994	1252,7006	ssp245	2020	1236,6318	ssp245	2046	1254,2077	ssp585	2032	1204,228
historical	1995	1253,4533	ssp245	2021	1290,7472	ssp245	2047	1265,8112	ssp585	2033	1295,3636
historical	1996	1238,9213	ssp245	2022	1239,6191	ssp245	2048	1264,775	ssp585	2034	1233,0326
historical	1997	1274,1996	ssp245	2023	1260,6431	ssp245	2049	1217,7614	ssp585	2035	1266,8645
historical	1998	1225,2608	ssp245	2024	1217,3763	ssp245	2050	1267,18	ssp585	2036	1264,9033
historical	1999	1278,0757	ssp245	2025	1237,669	ssp245	2051	1219,9039	ssp585	2037	1270,4962
historical	2000	1253,2667	ssp245	2026	1223,7474	ssp245	2052	1226,2389	ssp585	2038	1258,6607
historical	2001	1221,1769	ssp245	2027	1286,223	ssp245	2053	1242,7039	ssp585	2039	1268,6421
historical	2002	1260,7255	ssp245	2028	1216,3534	ssp245	2054	1243,8826	ssp585	2040	1284,5517
historical	2003	1246,0818	ssp245	2029	1263,4866	ssp585	2015	1234,669	ssp585	2041	1261,1947
historical	2004	1238,4131	ssp245	2030	1235,3926	ssp585	2016	1249,6406	ssp585	2042	1216,3992
historical	2005	1223,2082	ssp245	2031	1229,0542	ssp585	2017	1269,2398	ssp585	2043	1212,1055
historical	2006	1242,454	ssp245	2032	1247,6698	ssp585	2018	1287,739	ssp585	2044	1277,3453
historical	2007	1202,4428	ssp245	2033	1304,2002	ssp585	2019	1240,2045	ssp585	2045	1259,2042
historical	2008	1300,0809	ssp245	2034	1241,7978	ssp585	2020	1248,7341	ssp585	2046	1227,8035
historical	2009	1261,3484	ssp245	2035	1235,9498	ssp585	2021	1226,0482	ssp585	2047	1215,6611
historical	2010	1260,8506	ssp245	2036	1248,3751	ssp585	2022	1252,6548	ssp585	2048	1267,2083
historical	2011	1259,0627	ssp245	2037	1271,8929	ssp585	2023	1225,1105	ssp585	2049	1262,3411
historical	2012	1216,7221	ssp245	2038	1275,0252	ssp585	2024	1211,738	ssp585	2050	1257,0337
historical	2013	1267,7941	ssp245	2039	1259,951	ssp585	2025	1274,6406	ssp585	2051	1239,1949
historical	2014	1272,5352	ssp245	2040	1244,6759	ssp585	2026	1283,598	ssp585	2052	1238,9576
ssp245	2015	1227,7342	ssp245	2041	1249,4164	ssp585	2027	1228,7244	ssp585	2053	1268,2599
ssp245	2016	1253,7453	ssp245	2042	1252,0909	ssp585	2028	1217,5555	ssp585	2054	1239,5577
ssp245	2017	1242,5886	ssp245	2043	1232,6811	ssp585	2029	1248,3882			
ssp245	2018	1225,5679	ssp245	2044	1244,2385	ssp585	2030	1259,6965			
ssp245	2019	1266,0349	ssp245	2045	1229,778	ssp585	2031	1270,6416			

Apêndice C – Produção anual de energia elétrica e fator de capacidade para os cenários histórico, SSP2-4.5 e SSP5-8.5 (1994–2054).

ANO	SSP	ANNUAL MWH	CAPACITY FACTOR	ANO	SSP	ANNUAL MWH	CAPACITY FACTOR	ANO	SSP	ANNUAL MWH	CAPACITY FACTOR	ANO	SSP	ANNUAL MWH	CAPACITY FACTOR
1994	historical	1454,023	0,166	2019	ssp245	1502,860	0,172	2045	ssp245	1458,690	0,167	2030	ssp585	1494,694	0,171
1995	historical	1486,160	0,170	2020	ssp245	1468,303	0,168	2046	ssp245	1489,247	0,170	2031	ssp585	1499,266	0,171
1996	historical	1469,320	0,168	2021	ssp245	1529,420	0,175	2047	ssp245	1502,459	0,172	2032	ssp585	1429,466	0,163
1997	historical	1508,604	0,172	2022	ssp245	1472,730	0,168	2048	ssp245	1502,871	0,172	2033	ssp585	1530,273	0,175
1998	historical	1451,640	0,166	2023	ssp245	1498,232	0,171	2049	ssp245	1450,694	0,166	2034	ssp585	1459,742	0,167
1999	historical	1510,565	0,172	2024	ssp245	1449,129	0,165	2050	ssp245	1502,558	0,172	2035	ssp585	1499,039	0,171
2000	historical	1482,238	0,169	2025	ssp245	1471,479	0,168	2051	ssp245	1449,947	0,166	2036	ssp585	1498,689	0,171
2001	historical	1446,371	0,165	2026	ssp245	1453,264	0,166	2052	ssp245	1457,037	0,166	2037	ssp585	1500,949	0,171
2002	historical	1492,652	0,170	2027	ssp245	1523,836	0,174	2053	ssp245	1471,770	0,168	2038	ssp585	1490,059	0,170
2003	historical	1476,430	0,169	2028	ssp245	1443,013	0,165	2054	ssp245	1473,782	0,168	2039	ssp585	1501,580	0,171
2004	historical	1469,250	0,168	2029	ssp245	1498,724	0,171	2014	ssp585	1462,552	0,167	2040	ssp585	1515,336	0,173
2005	historical	1453,767	0,166	2030	ssp245	1467,142	0,167	2015	ssp585	1462,552	0,167	2041	ssp585	1492,332	0,170
2006	historical	1471,278	0,168	2031	ssp245	1460,377	0,167	2016	ssp585	1481,036	0,169	2042	ssp585	1444,317	0,165
2007	historical	1427,691	0,163	2032	ssp245	1481,558	0,169	2017	ssp585	1500,901	0,171	2043	ssp585	1436,550	0,164
2008	historical	1532,535	0,175	2033	ssp245	1544,205	0,176	2018	ssp585	1521,265	0,174	2044	ssp585	1507,561	0,172
2009	historical	1492,192	0,170	2034	ssp245	1471,988	0,168	2019	ssp585	1465,441	0,167	2045	ssp585	1489,746	0,170
2010	historical	1491,627	0,170	2035	ssp245	1468,580	0,168	2020	ssp585	1480,060	0,169	2046	ssp585	1454,346	0,166
2011	historical	1492,687	0,170	2036	ssp245	1483,700	0,169	2021	ssp585	1453,425	0,166	2047	ssp585	1443,935	0,165
2012	historical	1442,483	0,165	2037	ssp245	1509,007	0,172	2022	ssp585	1482,797	0,169	2048	ssp585	1500,781	0,171
2013	historical	1499,335	0,171	2038	ssp245	1511,446	0,173	2023	ssp585	1454,207	0,166	2049	ssp585	1492,052	0,170
2014	historical	1503,374	0,172	2039	ssp245	1494,316	0,171	2024	ssp585	1435,315	0,164	2050	ssp585	1490,291	0,170
2014	ssp245	1507,343	0,172	2040	ssp245	1474,799	0,168	2025	ssp585	1507,302	0,172	2051	ssp585	1468,878	0,168
2015	ssp245	1458,666	0,167	2041	ssp245	1485,723	0,170	2026	ssp585	1518,235	0,173	2052	ssp585	1468,173	0,168
2016	ssp245	1492,489	0,170	2042	ssp245	1485,953	0,170	2027	ssp585	1457,872	0,166	2053	ssp585	1499,760	0,171
2017	ssp245	1475,971	0,168	2043	ssp245	1464,682	0,167	2028	ssp585	1443,755	0,165	2054	ssp585	1471,077	0,168
2018	ssp245	1453,861	0,166	2044	ssp245	1479,364	0,169	2029	ssp585	1481,053	0,169				

1

Apêndice D– Relatório Técnico Conclusivo

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO - UENF
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CLIMA E ENERGIA - PPGC&E

ALEX SANDRO DE PAULA SILVA

**MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SEUS IMPACTOS NO REGIME PLUVIOMÉTRICO E
NA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA EM CAMPOS DOS GOYTACAZES (RJ)**

MACAÉ-RJ, 2025

ALEX SANDRO DE PAULA SILVA

**MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SEUS IMPACTOS NO REGIME PLUVIOMÉTRICO E
NA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA EM CAMPOS DOS GOYTACAZES (RJ)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Clima e Energia, do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Clima e Energia.

Orientador: Prof. Diego Cunha Malagueta, D.Sc.

MACAÉ-RJ, 2025

1. INTRODUÇÃO

Os efeitos das mudanças climáticas sobre o ciclo hidrológico têm sido amplamente estudados nas ciências ambientais e atmosféricas, especialmente devido ao aumento de eventos climáticos extremos nas últimas décadas. O Brasil, com sua grande extensão e diversidade climática, apresenta diferentes padrões de precipitação, o que exige análises regionais para avaliar os impactos climáticos (Coelho; Ministério da Ciência, 2025). Esses padrões climáticos contrastantes no país trazem desafios que exigem a colaboração entre governo, setor privado e sociedade civil, com a adaptação a esses novos cenários dependendo principalmente da expansão da rede de monitoramento hidrometeorológico e da inclusão de cenários climáticos no planejamento de longo prazo (Vissirini et al., 2023).

A Região Sudeste, por exemplo, tem enfrentado períodos alternados de seca severa e chuvas intensas. A crise hídrica de 2014–2015 em São Paulo e os desastres por tempestades em Minas Gerais e Espírito Santo entre 2020 e 2023 ilustram essa dualidade (ANA, 2020). Velasco Holender e Barbosa Santos (2023) observaram um aumento de episódios de precipitação intensa nas séries da rede ANA, enquanto Santos et al. (2016) identificaram não-estacionariedade nas máximas diárias de precipitação no Brasil, um quadro alinhado com o diagnóstico climático recente da WMO (2024). No Sudeste, estudos de Vilar et al. (2020) indicam mudanças na distribuição das chuvas ao longo do ano, além de uma maior persistência de estiagens, padrões que coincidem com as normais 1994–2020 do INMET e o diagnóstico do PBMC (2022). Esses fenômenos indicam pressões sazonais sobre a disponibilidade hídrica e impactos na geração de energia renovável, especialmente nas áreas de hidro e fotovoltaica, como observado na Região Norte Fluminense.

A vulnerabilidade dessa região, que inclui os municípios de Campos dos Goytacazes, Macaé, Quissamã, São João da Barra, Carapebus, São Francisco de Itabapoana e Conceição de Macabu, é resultado de fatores físicos, como a planície costeira e drenagem de baixa declividade, além de aspectos socioeconômicos, como a expansão urbana e ocupação de áreas de risco (INEA/ANA). A região tem grande relevância econômica e ambiental, com forte presença da agroindústria, pecuária e, mais recentemente, da exploração de petróleo e gás (IBGE, 2023).

Campos dos Goytacazes, o maior município da região, com 4.032 km²,

apresenta uma grande diversidade de usos do solo, que inclui áreas agrícolas, urbanas, reservas ambientais e zonas de exploração energética (IBGE, 2023). Localizado na planície costeira, com relevo plano a suavemente ondulado, o município tem suas dinâmicas de precipitação influenciadas pelas características geográficas locais, como a proximidade com a Serra do Mar, que favorece a formação de zonas de convergência e chuvas convectivas, especialmente durante a transição entre as estações (Santos; Santos, 2020).

Este estudo tem como objetivo principal analisar como as mudanças climáticas projetadas podem alterar o regime pluviométrico de Campos dos Goytacazes. A pesquisa se propõe a examinar as tendências de precipitação, verificar as mudanças na intensidade e frequência das chuvas e avaliar os impactos dessas alterações no ciclo hidrológico local.

2. METODOLOGIA

A análise pluviométrica de Campos dos Goytacazes foi realizada utilizando dados históricos de precipitação e projeções climáticas futuras de três fontes principais: ERA5, Estação Meteorológica Local, e Modelos de Projeção Climática (ETA_BESM).

2.1. Fonte dos dados

2.1.1. Estação Meteorológica Local

A Estação Meteorológica Local fornece dados diretos de precipitação observada em Campos dos Goytacazes, com registros diários de precipitação. Esses dados são coletados e mantidos pela estação meteorológica 83698, localizada na cidade. Esses dados são cruciais para validar as informações de precipitação fornecidas pelos modelos climáticos e para a construção de séries temporais locais de precipitação.

- Fonte: Dados de precipitação observada diretamente na estação meteorológica de Campos dos Goytacazes (código de estação 83698).
- Escala Temporal: Dados diários de precipitação, com séries temporais de 1994 a 2024.
- Resolução Espacial: Localizada em Campos dos Goytacazes, fornecendo dados específicos para a cidade e região.

- Formatos: Arquivo XLSX contendo registros diários de precipitação.
- Objetivo: Fornecer uma fonte confiável de dados observacionais de precipitação para validação e comparação com outros conjuntos de dados (ERA5 e ETA_BESM).
- Site para acesso: <https://bdmep.inmet.gov.br/>

2.1.2. ERA5 - Dados Históricos de Precipitação

O ERA5 é um conjunto de dados climatológicos de alta resolução temporal e espacial fornecido pelo European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Ele fornece informações detalhadas sobre variáveis climáticas globais, incluindo precipitação, temperatura, umidade e vento. Para a análise pluviométrica, foram utilizados os dados de precipitação diária e anual disponibilizados pelo ERA5 para o período de 1994 a 2024.

- Fonte: Dados históricos de precipitação, obtidos de séries temporais do ECMWF (ERA5).
- Escala Temporal: Dados diários e anuais de precipitação para o período de 1994 a 2024.
- Resolução Espacial: 30 km (grade regular).
- Formatos: Arquivos CSV ou XLSX, dependendo da fonte, com variáveis de precipitação diária e anual.
- Objetivo: Fornecer uma base sólida para a análise histórica da precipitação em Campos dos Goytacazes, comparando os dados de precipitação observada com as projeções futuras.
- Site para acesso: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels?tab=download>

2.1.3. Modelos de Projeção Climática (ETA_BESM)

O ETA_BESM (Sistema de Modelagem Climática do Brasil) é um modelo regional de projeção climática utilizado para estimar os impactos das mudanças climáticas na precipitação e outras variáveis climáticas. Para a análise, foram usados os cenários climáticos RCP 4.5 e RCP 8.5 do ETA_BESM, que representam diferentes trajetórias de emissões de gases de efeito estufa. O modelo fornece projeções de precipitação para o período de 2006 a 2064.

- Fonte: Dados de projeção climática do modelo ETA-BESM, com base em cenários de emissões de gases de efeito estufa.
- Escala Temporal: Dados anuais e diários de precipitação para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, abrangendo o período de 2006 a 2064.
- Resolução Espacial: A resolução dos dados do ETA-BESM é de aproximadamente 20 km, permitindo uma boa representação regional.
- Formatos: Arquivos CSV contendo dados diários e anuais de precipitação.
- Objetivo: Analisar as projeções futuras de precipitação para Campos dos Goytacazes, considerando os cenários de emissão de gases de efeito estufa mais otimistas (RCP 4.5) e mais pessimistas (RCP 8.5).
- Site para acesso:
https://ftp1.cptec.inpe.br/pesquisa/grpeta/mudclimaticas/projeta/Netcdf_Diarios/Precipitacao/

2.2. Detalhamento das Fontes de Dados

Integração de Dados Históricos (ERA5 e Estação Meteorológica): A série histórica de precipitação fornecida pelo ERA5 foi combinada com os dados da Estação Meteorológica Local para garantir uma comparação robusta entre os dados observacionais e modelados. A análise de variabilidade intra-anual e interanual da precipitação foi realizada utilizando essas duas fontes de dados, permitindo a avaliação de mudanças nos padrões de precipitação ao longo das últimas três décadas.

Projeções Futuras (ETA_BESM): As projeções climáticas do modelo ETA_BESM (para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5) foram utilizadas para simular as mudanças na precipitação de Campos dos Goytacazes até 2064. Esses cenários forneceram uma visão de como a precipitação poderá variar sob diferentes condições de emissão de gases de efeito estufa, com o objetivo de avaliar os impactos futuros das mudanças climáticas no regime pluviométrico da região.

A qualidade dos dados foi verificada através de uma análise preliminar dos registros de precipitação. Foram realizados testes de consistência e correção de unidades para garantir que os dados estivessem em conformidade com as unidades de medida de precipitação padrão (mm). A análise incluiu também a detecção de valores ausentes ou anômalos, que foram tratados de acordo com as

melhores práticas de tratamento de dados.

2.3. Qualidade dos Dados

A qualidade dos dados foi um aspecto essencial para garantir a precisão da análise pluviométrica. Para tanto, foram realizados procedimentos de controle de qualidade nas seguintes etapas:

A presença de valores ausentes nos conjuntos de dados foi identificada e tratada por meio de técnicas de interpolação ou exclusão de pontos fora de especificação.

Para garantir que todos os dados de precipitação estivessem em milímetros por ano, foi realizada uma verificação e ajuste de unidades. Em casos de discrepância, os valores foram corrigidos, como no caso dos dados de precipitação de ERA5, que foram ajustados dividindo os valores anuais por 1000, quando necessário.

A consistência dos dados de precipitação foi verificada com base em médias históricas e tendências observadas. Desvios significativos ou inconsistências foram sinalizados e analisados para assegurar a integridade da base de dados.

2.4. Processamento de Dados

O processamento de dados foi realizado de forma sistemática para garantir a consistência e a qualidade das informações utilizadas nas análises. As etapas principais envolvem a leitura, a preparação, a organização e a limpeza dos dados, com o objetivo de fornecer uma base confiável para as análises subsequentes.

2.4.1. Leitura e Preparação dos Dados

Os dados de precipitação histórica foram obtidos a partir das fontes ERA5 e da Estação Meteorológica Local, enquanto as projeções climáticas futuras foram extraídas do modelo ETA_BESM. Para a leitura e processamento dos dados, foram utilizados pacotes e funções específicas que permitiram a importação de arquivos CSV e XLSX, garantindo a correta identificação das colunas de interesse, como "ano", "precipitação" e "data". Para os dados do ERA5, foi realizada a normalização dos nomes das colunas, de modo a padronizar as informações e facilitar a integração com os dados da Estação Meteorológica Local e do ETA_BESM.

Estabeleceu uma limitação temporal para a análise, com o período de 1994

a 2024 sendo considerado para os dados históricos do ERA5 e da Estação Meteorológica Local. Para as projeções futuras, os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 do modelo ETA_BESM foram analisados para o período de 2006 a 2064.

A unidade de precipitação foi verificada e ajustada para garantir a consistência das medições, com os dados convertidos para milímetros (mm), quando necessário. Especificamente, para os dados de precipitação anual do ERA5, foi aplicada uma correção de unidade, dividindo os valores por 1000. Essa etapa foi fundamental para assegurar que os dados estivessem em conformidade, evitando distorções nos resultados da análise.

A integração dos dados provenientes das diferentes fontes foi realizada para permitir a comparação entre as séries históricas e as projeções futuras. A consistência temporal entre os dados foi rigorosamente verificada, assegurando que os intervalos de tempo (ano e mês) fossem coincidentes, o que foi essencial para garantir a precisão na análise das variações pluviométricas ao longo do tempo.

2.5. Análises Estatísticas

A análise estatística foi conduzida para identificar tendências e padrões nas séries temporais de precipitação, com o objetivo de avaliar as mudanças no regime pluviométrico de Campos dos Goytacazes. Com as seguintes técnicas aplicadas a seguir.

2.5.1. Técnicas estatísticas

O teste Mann-Kendall foi utilizado para avaliar a existência de tendências significativas nas séries temporais de precipitação. Esse teste não paramétrico permite verificar se as séries de precipitação apresentam uma tendência de aumento ou diminuição ao longo do tempo, sem fazer suposições sobre a distribuição dos dados.

O teste foi aplicado tanto aos dados históricos de precipitação quanto às projeções futuras, com o objetivo de identificar tendências em diferentes cenários climáticos.

O Sen's Slope foi utilizado para quantificar a magnitude da tendência identificada pelo teste de Mann-Kendall. Esta técnica permite calcular a taxa de variação das séries temporais de precipitação ao longo do tempo, fornecendo uma

medida da intensidade da mudança nas variáveis analisadas.

O teste de Pettitt foi aplicado para identificar pontos de mudança nas séries temporais de precipitação, ou seja, identificar anos em que o regime pluviométrico apresentou mudanças abruptas. Esse teste foi utilizado para detectar mudanças na distribuição da precipitação ao longo do tempo, o que pode indicar alterações significativas no comportamento climático da região.

2.5.2. Análise de Anomalias:

As anomalias de precipitação foram calculadas para comparar os valores observados com a média histórica de 1994 a 2024. As anomalias representam as diferenças entre a precipitação observada em cada ano e a média histórica, permitindo identificar anos com precipitação acima ou abaixo da média.

As anomalias foram calculadas para os dados históricos do ERA5, da Estação Meteorológica Local e das projeções do ETA_BESM, com o objetivo de comparar as variações anuais e mensais de precipitação e avaliar as mudanças previstas para o futuro.

2.5.3. Estatísticas Descritivas:

As estatísticas descritivas, como média, mediana, desvio padrão e quartis, foram calculadas para as séries temporais de precipitação, tanto para os dados históricos quanto para as projeções futuras. Essas estatísticas fornecem uma visão geral das características das distribuições de precipitação e permitem comparar os padrões observados e projetados.

2.6. Abordagem de Análise

A análise foi dividida em duas partes principais: a análise dos dados históricos e a análise das projeções climáticas futuras.

2.6.1. Análise dos Dados Históricos:

A análise dos dados históricos de precipitação, obtidos a partir das bases ERA5 e da Estação Meteorológica Local, concentrou-se na identificação de padrões e tendências ao longo do tempo. Para isso, foi aplicado o teste de Mann-Kendall, a fim de verificar a existência de tendências estatisticamente significativas de aumento ou redução da precipitação no município de Campos dos Goytacazes. Complementarmente, a análise de anomalias possibilitou a comparação entre os

valores anuais observados e a média histórica do período, permitindo identificar anos com ocorrência de secas severas ou chuvas intensas acima do padrão climatológico.

Com base nos cenários climáticos RCP 4.5 e RCP 8.5 do modelo ETA_BESM, foram analisadas as projeções de precipitação para o período de 2006 a 2064, buscando compreender as possíveis mudanças no regime pluviométrico futuro da região. Essa etapa foi essencial para avaliar a magnitude e a direção das alterações esperadas na precipitação, considerando diferentes trajetórias de emissões de gases de efeito estufa.

A comparação entre os dados históricos (1994–2024) e as projeções futuras (2006–2064) permitiu avaliar os impactos potenciais das mudanças climáticas sobre o ciclo hidrológico local. Essa análise integrativa possibilitou compreender como variações na frequência e na intensidade das chuvas podem influenciar diretamente a disponibilidade hídrica, a agricultura e a geração de energia renovável, especialmente nas fontes hidrelétrica e fotovoltaica.

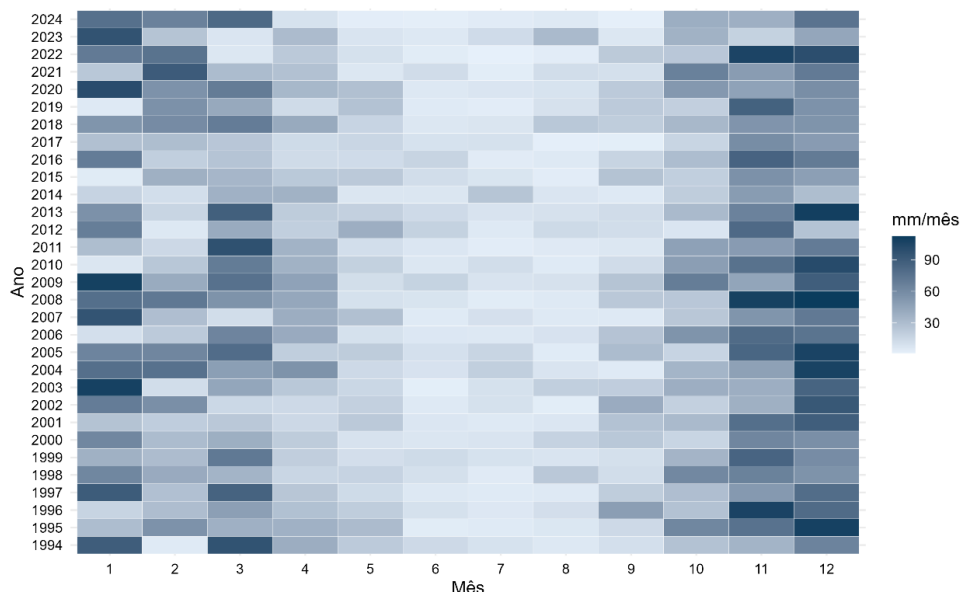
A combinação das análises de anomalias e tendências de precipitação possibilitou identificar as regiões mais suscetíveis aos extremos climáticos e delinear possíveis estratégias de adaptação e mitigação. Esses resultados fornecem subsídios importantes para o planejamento hídrico e energético regional, contribuindo para a construção de políticas públicas mais resilientes frente aos efeitos das mudanças climáticas.

3. RESULTADOS

3.1. Séries Históricas e Distribuição Espacial

Com o objetivo de analisar a variação temporal da precipitação, foi elaborado um **mapa de calor (heatmap)** com base no conjunto **ERA5**. Nessa representação, os valores médios mensais de precipitação (mm/mês) foram dispostos no eixo horizontal e os anos no eixo vertical, permitindo observar de forma contínua as variações sazonais e interanuais. O Gráfico 1 apresenta o padrão de chuvas entre **1994 e 2024**, evidenciando períodos de maior e menor precipitação e a frequência relativa de meses mais secos ou mais chuvosos.

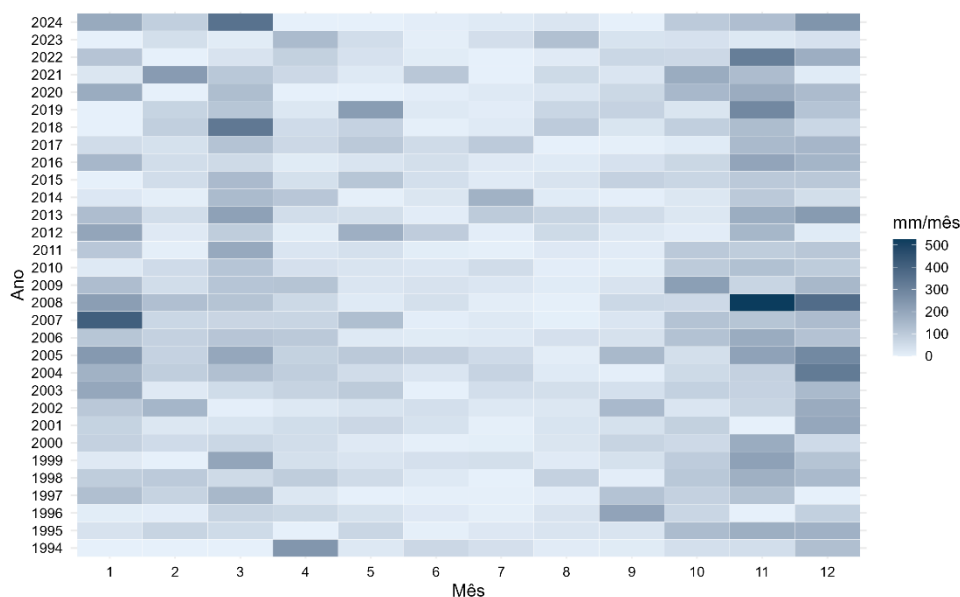
Gráfico 1 – Mapa de calor (heatmap) mensal da precipitação do conjunto ERA5 no período de 1994–2024 (mm/mês).



Fonte: Autor (2025).

Os dados da Estação Meteorológica 83698 foram analisados por meio de um mapa de calor construído a partir das médias mensais de precipitação acumulada (mm/mês). Cada célula representa a intensidade média registrada em determinado mês e ano, permitindo observar de forma contínua a variação temporal das chuvas entre 1994 e 2024. O Gráfico 2 evidencia os padrões sazonais do regime pluviométrico, destacando os períodos mais úmidos e mais secos ao longo da série observacional.

Gráfico 2 – Mapa de calor (heatmap) mensal da precipitação da Estação Meteorológica 83698 no período de 1994–2024 (mm/mês).



Fonte: Autor (2025).

3.2. Estatísticas e Séries Anuais

Após a análise gráfica dos padrões pluviométricos, aplicaram-se testes estatísticos para verificar a existência de tendências significativas nas séries históricas e nas projeções futuras. O objetivo foi identificar variações no comportamento temporal da precipitação, distinguindo períodos de aumento ou redução nos acumulados anuais. Utilizaram-se o teste de Mann-Kendall (τ e p-valor), o estimador de Sen's Slope e o teste de Pettitt, cujos resultados estão apresentados na Tabela 1 Tabela 6.

Tabela 1 – Estatísticas unificadas de correlação, viés e testes de mudança de regime.

CENÁRIO	ESCOPO	LABEL	TAU	PVAL	SLOPE	SLOPE_P	CP	PETT_P
Hitórico	Cenário	Hitórico	-0,31	0,00	-5,67	0,00	24,00	0,00
RCP 4,5	Cenário	RCP 4,5	-0,23	0,01	-7,18	0,01	13,00	0,01
RCP 8,5	Cenário	RCP 8,5	-0,52	0,06	-2,37	0,06	37,00	0,01
NA	base	ERA5	-0,18	0,15	-1,58	0,15	17,00	0,17
NA	base	ESTACAO	0,20	0,11	7,11	0,11	9,00	0,11
NA	base	ETA_BESM	-0,36	0,13	-7,13	0,01	44,00	0,62

Fonte: Autor (2025).

A etapa inicial do estudo envolveu a padronização e verificação da qualidade das séries anuais de precipitação em Campos dos Goytacazes, abrangendo o período de 1994 a 2024. Essa etapa foi essencial para assegurar a consistência estatística e temporal dos dados utilizados nas análises climáticas, incluindo o cálculo de anomalias, tendências e comparações entre diferentes fontes. A Tabela 2 apresenta os totais anuais de precipitação após a padronização, com valores variando entre 256,7 mm/ano (2014) e 549,4 mm/ano (2009). Esses resultados evidenciam uma amplitude significativa ao longo da série, refletindo a variabilidade interanual característica do regime pluviométrico da região Norte Fluminense, influenciado por zonas de convergência, eventos convectivos e variações sazonais do Atlântico Tropical.

Tabela 2 – Série anual ERA5 padronizada (1994–2024) (mm/ano)

ANO	PRECIPITACAO	ANO	PRECIPITACAO
1994	421,669	2010	420,165
1995	469,416	2011	379,083
1996	435,301	2012	339,591
1997	439,973	2013	453,934
1998	407,487	2014	256,706
1999	392,043	2015	298,792
2000	358,008	2016	371,194
2001	355,321	2017	263,176
2002	384,125	2018	444,012
2003	421,263	2019	347,734
2004	503,787	2020	489,783
2005	520,018	2021	405,003
2006	407,12	2022	447,709
2007	380,711	2023	325,066
2008	545,114	2024	404,048
2009	549,428		

Fonte: Autor (2025).

A análise dos valores da Tabela 3 revelou variação interanual expressiva da precipitação em Campos dos Goytacazes. Identificaram-se anos com déficit pluviométrico, como 2014 (676,0 mm) e 2023 (567,8 mm), e anos com excesso de chuvas, como 2005 (1.548,1 mm) e 2008 (1.630,2 mm). Essa oscilação reflete a variabilidade natural do regime pluviométrico local, influenciada por sistemas atmosféricos de grande escala, como o El Niño–Oscilação Sul (ENOS) e as anomalias de temperatura da superfície do Atlântico Tropical.

Tabela 3 – Série anual ESTAÇÃO padronizada (1994–2024) (mm/ano)

ANO	PRECIPITACAO	ANO	PRECIPITACAO
1994	629,6	2010	681,9
1995	812,6	2011	730,1
1996	621,8	2012	864,5
1997	725,2	2013	1177,1
1998	938,6	2014	676
1999	868,2	2015	809,4
2000	688,9	2016	860,2
2001	647,1	2017	859,3
2002	850,6	2018	1001
2003	892,7	2019	1055,2
2004	1128,2	2020	916,9
2005	1548,1	2021	986,4
2006	976,6	2022	928,4
2007	1191,6	2023	567,8
2008	1630,2	2024	1170,5
2009	1008,2		

Fonte: Autor (2025).

A análise seguinte considerou os registros anuais de precipitação de 1994 a 2054, abrangendo o período histórico e os cenários projetados RCP 4.5 e RCP 8.5. O objetivo foi avaliar a continuidade e transição entre os dados observados e simulados, verificando a coerência das tendências ao longo do tempo. Os valores foram expressos em milímetros por ano (mm/ano) e submetidos ao mesmo processo de padronização utilizado nas séries históricas. A Tabela 4 apresenta os totais anuais padronizados, mostrando a sequência histórica até 2005 e a inclusão dos cenários projetados a partir de 2006.

Tabela 4 – Totais anuais de precipitação (1994–2054) nos cenários Histórico, RCP 4.5 e RCP 8.5 (mm/ano)

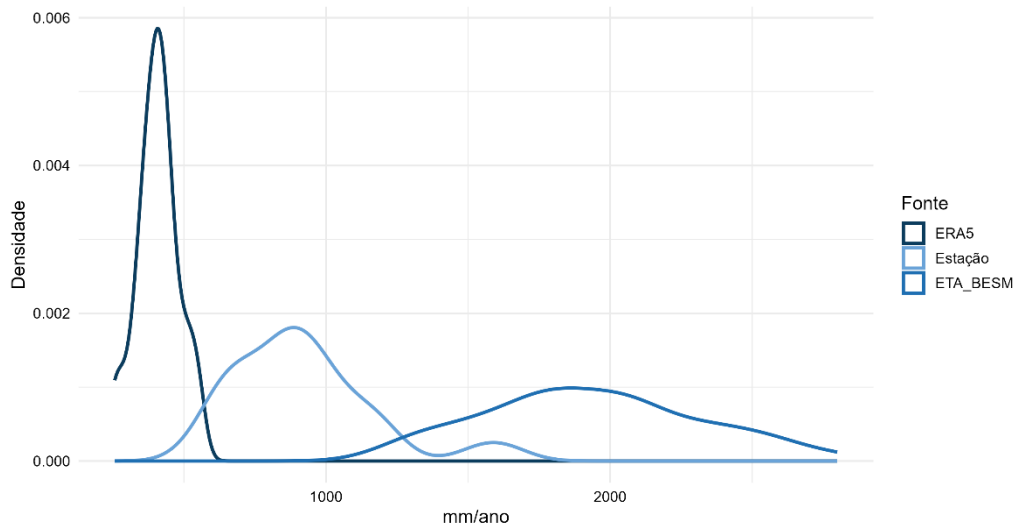
ANO	CENÁRIO	PRECIPITACAO	ANO	CENÁRIO	PRECIPITACAO	ANO	CENÁRIO	PRECIPITACAO
1994	Historico	1561,02	2022	RCP 4,5	1308,77	2044	RCP 4,5	1338,84
1995	Historico	2269,14	2022	RCP 8,5	1498,24	2044	RCP 8,5	1051,62
1996	Historico	2337,65	2023	RCP 4,5	2013,31	2045	RCP 4,5	2118,86
1997	Historico	1595,41	2023	RCP 8,5	1605,78	2045	RCP 8,5	716,19
1998	Historico	1338,72	2024	RCP 4,5	1770,05	2046	RCP 4,5	1943,40
1999	Historico	1896,34	2024	RCP 8,5	1253,86	2046	RCP 8,5	2522,83
2000	Historico	1478,82	2025	RCP 4,5	1597,00	2047	RCP 4,5	1891,15
2001	Historico	1784,28	2025	RCP 8,5	1278,45	2047	RCP 8,5	1525,57
2002	Historico	2560,11	2026	RCP 4,5	1715,01	2048	RCP 4,5	2649,05
2003	Historico	2799,17	2026	RCP 8,5	1776,60	2048	RCP 8,5	1779,61
2004	Historico	2061,46	2027	RCP 4,5	1581,00	2049	RCP 4,5	1831,42
2005	Historico	2086,75	2027	RCP 8,5	1314,84	2049	RCP 8,5	915,78
2006	RCP 4,5	2254,15	2028	RCP 4,5	1844,75	2050	RCP 4,5	1906,52
2006	RCP 8,5	2479,70	2028	RCP 8,5	1287,28	2050	RCP 8,5	1096,56
2007	RCP 4,5	2107,56	2029	RCP 4,5	1161,53	2051	RCP 4,5	1665,05
2007	RCP 8,5	1854,87	2029	RCP 8,5	1544,96	2051	RCP 8,5	535,33
2008	RCP 4,5	2040,30	2030	RCP 4,5	991,50	2052	RCP 4,5	1913,02
2008	RCP 8,5	2027,61	2030	RCP 8,5	2082,68	2052	RCP 8,5	1043,31
2009	RCP 4,5	1849,98	2031	RCP 4,5	863,14	2053	RCP 4,5	1698,96
2009	RCP 8,5	2364,45	2031	RCP 8,5	1788,45	2053	RCP 8,5	735,30
2010	RCP 4,5	1770,78	2032	RCP 4,5	1788,12	2054	RCP 4,5	1771,96
2010	RCP 8,5	1728,38	2032	RCP 8,5	1459,85	2054	RCP 8,5	1358,65
2011	RCP 4,5	2149,73	2033	RCP 4,5	1124,80	2055	RCP 4,5	1410,12
2011	RCP 8,5	1942,76	2033	RCP 8,5	1543,93	2055	RCP 8,5	1207,25
2012	RCP 4,5	1795,45	2034	RCP 4,5	928,41	2056	RCP 4,5	1437,00
2012	RCP 8,5	2363,53	2034	RCP 8,5	1573,13	2056	RCP 8,5	1001,13
2013	RCP 4,5	2521,73	2035	RCP 4,5	1448,01	2057	RCP 4,5	2249,20
2013	RCP 8,5	2313,39	2035	RCP 8,5	1433,34	2057	RCP 8,5	718,92
2014	RCP 4,5	2095,67	2036	RCP 4,5	1682,65	2058	RCP 4,5	1832,07
2014	RCP 8,5	2646,72	2036	RCP 8,5	2421,47	2058	RCP 8,5	1054,50
2015	RCP 4,5	1956,51	2037	RCP 4,5	1107,77	2059	RCP 4,5	1351,77
2015	RCP 8,5	1959,13	2037	RCP 8,5	1879,24	2059	RCP 8,5	647,79
2016	RCP 4,5	2092,33	2038	RCP 4,5	731,85	2060	RCP 4,5	1924,45
2016	RCP 8,5	1403,80	2038	RCP 8,5	1881,72	2060	RCP 8,5	580,66
2017	RCP 4,5	2095,12	2039	RCP 4,5	1522,54	2061	RCP 4,5	738,55
2017	RCP 8,5	1629,25	2039	RCP 8,5	1702,64	2061	RCP 8,5	1348,54
2018	RCP 4,5	1844,12	2040	RCP 4,5	1736,06	2062	RCP 4,5	1273,70
2018	RCP 8,5	1714,43	2040	RCP 8,5	1250,52	2062	RCP 8,5	579,24
2019	RCP 4,5	1749,51	2041	RCP 4,5	1801,08	2063	RCP 4,5	1723,90
2019	RCP 8,5	1309,28	2041	RCP 8,5	1640,05	2063	RCP 8,5	681,24
2020	RCP 4,5	1507,25	2042	RCP 4,5	1965,01	2064	RCP 4,5	1350,20
2020	RCP 8,5	2524,52	2042	RCP 8,5	1976,10	2064	RCP 8,5	298,25
2021	RCP 4,5	1698,44	2043	RCP 4,5	1449,95			
2021	RCP 8,5	1823,97	2043	RCP 8,5	1490,81			

Fonte: Autor (2025).

3.3. Comparações entre Fontes e Modelos

As distribuições de densidade das precipitações anuais estimadas por cada fonte analisada apresenta-se no Gráfico 3. Verificou-se que o conjunto ERA5 concentrou valores predominantemente inferiores a 1.000 mm/ano, enquanto os dados da Estação Meteorológica mostraram dispersão intermediária. Já o modelo ETA_BESM apresentou maior amplitude, com valores que ultrapassam 2.000 mm/ano. Essas diferenças refletem variações na forma como cada base de dados representa a variabilidade pluviométrica regional.

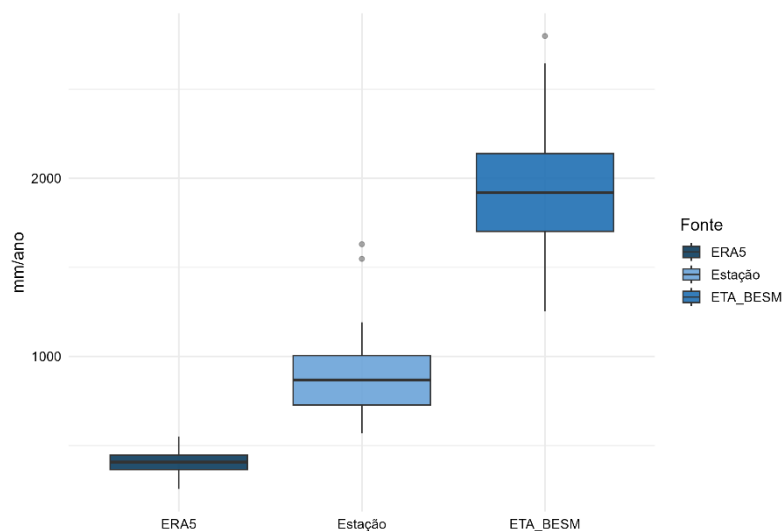
Gráfico 3 – Densidade das somas anuais de precipitação do conjunto ETA-BESM no período de 1994–2024 (mm/ano).



Fonte: Autor (2025).

O Gráfico 4, apresenta a distribuição dos totais anuais de precipitação estimados por cada fonte analisada. O conjunto ERA5 registrou a menor variabilidade, com valores concentrados em torno de 500 mm/ano, enquanto os dados da Estação Meteorológica mostraram uma mediana próxima de 900 mm/ano e amplitude moderada. Já o modelo ETA_BESM exibiu valores mais elevados e dispersos, com médias que ultrapassam 2.000 mm/ano. As diferenças observadas entre as fontes refletem métodos distintos de aquisição e processamento, o que influencia diretamente o comportamento estatístico das séries analisadas.

Gráfico 4 – Distribuição anual de precipitação para as fontes ERA5, Estação e ETA_BESM (mm/ano).



Fonte: Autor (2025).

Para comparar as distribuições de precipitação entre as diferentes fontes de dados, realizou-se uma análise estatística descritiva abrangendo os conjuntos ERA5, Estação Meteorológica e ETA-BESM. Essa etapa permitiu sintetizar a amplitude dos totais anuais e identificar a posição relativa de cada série em relação aos quartis e valores extremos. A Tabela 5 apresenta o número de observações (N), além dos valores mínimos, máximos e quartis (Q25, mediana e Q75) das precipitações anuais, expressas em milímetros por ano (mm/ano), obtidas após o processo de padronização e verificação de consistência das séries.

Tabela 5 – Estatísticas descritivas da precipitação anual (mm/ano) para as bases ERA5, Estação Meteorológica e ETA-BESM.

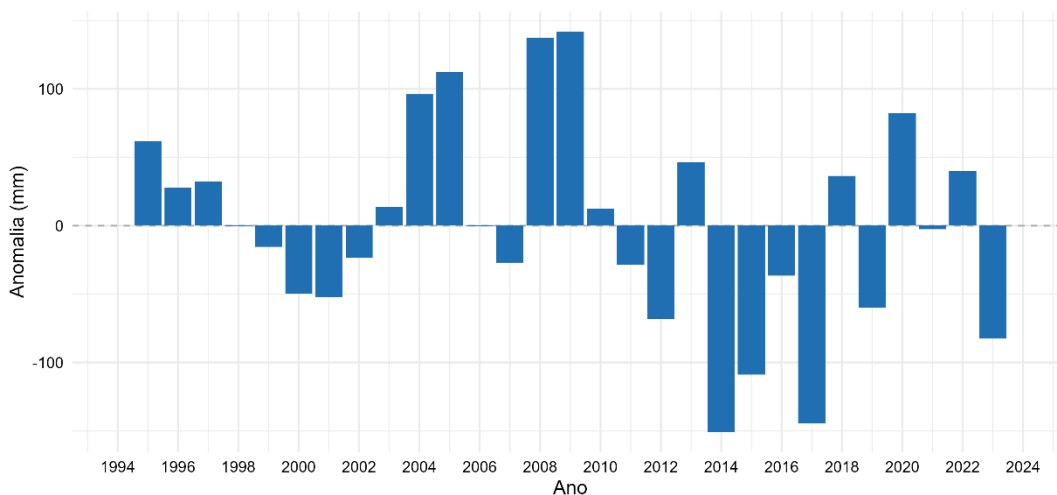
FONTES	N	MIN	Q25	MED	Q75	MAX
ERA5	31	256,71	364,60	407,12	445,86	549,43
ESTACAO	31	567,80	727,65	868,20	1004,60	1630,20
ETA_BESM	130	2982,54	1338,75	1700,80	1943,24	2799,17

Fonte: Autor (2025).

3.4. Anomalias e Tendências

Analisa as variações anuais de precipitação do conjunto ERA5, a partir de uma série de anomalias calculada em relação ao período de referência 1991–2024. Essa análise permitiu visualizar as oscilações em torno da média histórica, destacando anos com excesso ou déficit de precipitação. O Gráfico 5 apresenta o comportamento temporal dessas anomalias, evidenciando a alternância entre fases secas e úmidas e revelando padrões consistentes de variação ao longo da série analisada.

Gráfico 5 – Anomalias anuais de precipitação do conjunto ERA5 no período de 1994–2024 (mm).

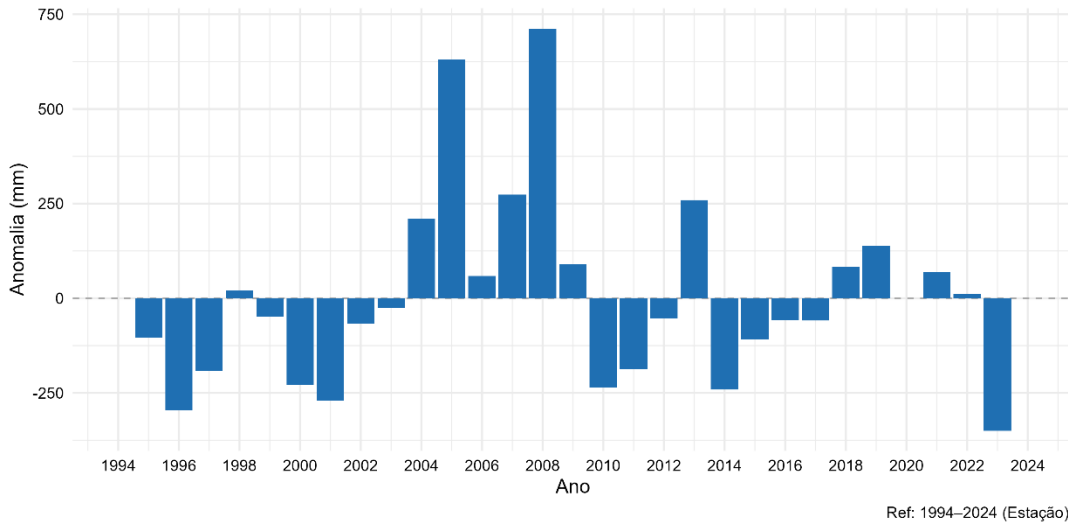


Ref: 1994–2024 (ERA5/Histórico).

Fonte: Autor (2025).

Na sequência da análise das anomalias de precipitação, avaliaram-se os dados observacionais da estação meteorológica local para comparar os padrões históricos de variação anual entre 1994 e 2024. O **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra oscilações expressivas nas anomalias anuais, com alternância de valores positivos e negativos ao longo da série. Os anos de 2006 e 2008 registraram os maiores incrementos pluviométricos, enquanto 1999, 2011 e 2023 apresentaram reduções mais acentuadas em relação à média histórica. Após 2010, observou-se o predomínio de anomalias negativas, indicando uma tendência de redução gradual dos totais anuais no período recente.

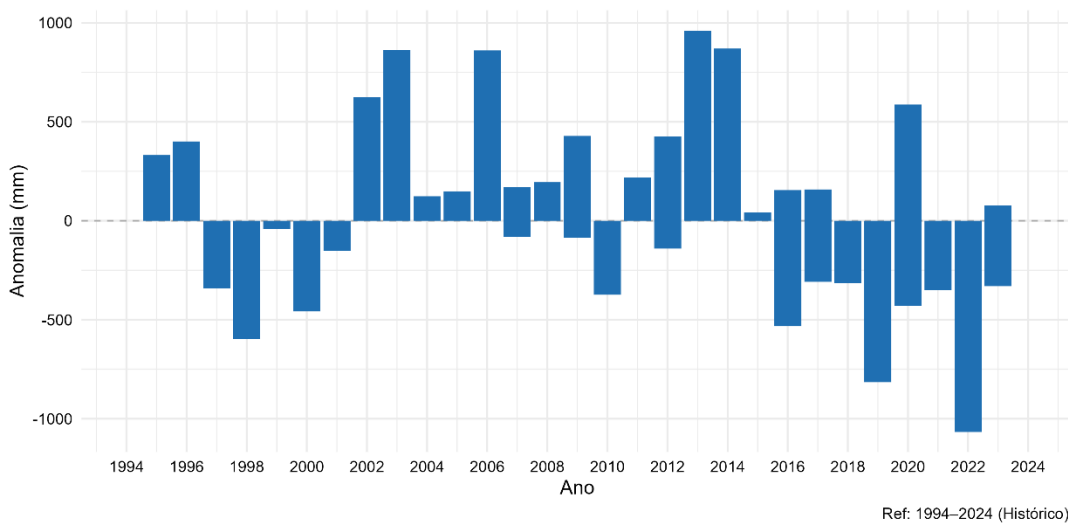
Gráfico 6 – Anomalias anuais de precipitação observadas na Estação Meteorológica de Campos (83698) no período de 1994–2024 (mm)



Fonte: Autor (2025).

Os anos de 1997, 2011 e 2013 apresentaram valores positivos mais elevados, enquanto 1998, 2015 e 2022 registraram reduções acentuadas em relação à média de referência. O Gráfico 7 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** evidencia flutuações expressivas nas anomalias anuais, com alternância entre períodos úmidos e secos. Nas duas últimas décadas, as anomalias negativas tornaram-se mais frequentes, indicando uma tendência de redução nos acumulados anuais de precipitação.

Gráfico 7 – Anomalias anuais de precipitação simuladas pelo modelo ETA_BESM (1994–2024) em relação à média de referência 1991–2020 (ERA5).



Fonte: Autor (2025).

Após avaliar graficamente os padrões pluviométricos, aplicaram-se testes estatísticos para identificar tendências significativas nas séries históricas e nos cenários projetados. Essa etapa teve como objetivo detectar variações no comportamento temporal da precipitação, diferenciando períodos de aumento ou redução dos acumulados anuais. Utilizaram-se o teste de Mann-Kendall (τ e p-valor), o estimador de Sen's Slope e o teste de Pettitt, cujos resultados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Estatísticas unificadas de correlação, viés e testes de mudança de regime.

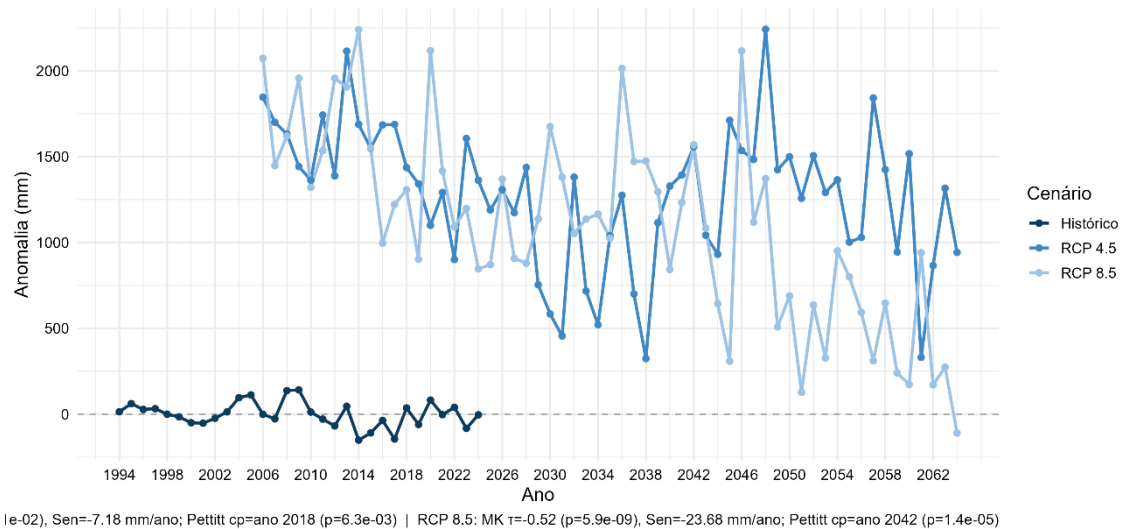
CENÁRIO	ESCOPO	LABEL	TAU	PVAL	SLOPE	SLOPE_P	CP	PETT_P
Hitórico	Cenário	Hitórico	-0,31	0,00	-5,67	0,00	24,00	0,00
RCP 4,5	Cenário	RCP 4,5	-0,23	0,01	-7,18	0,01	13,00	0,01
RCP 8,5	Cenário	RCP 8,5	-0,52	0,06	-2,37	0,06	37,00	0,01
NA	base	ERA5	-0,18	0,15	-1,58	0,15	17,00	0,17
NA	base	ESTACAO	0,20	0,11	7,11	0,11	9,00	0,11
NA	base	ETA_BESM	-0,36	0,13	-7,13	0,01	44,00	0,62

Fonte: Autor (2025).

3.5. Cenários Futuros e Comparações Climáticas

O cenário RCP 8.5 exibiu variações mais amplas e reduções progressivas a partir da metade do século, evidenciando maior sensibilidade ao aquecimento global intensificado. O Gráfico 8 mostra que, no cenário RCP 4.5, os valores oscilaram em torno da média histórica até cerca de 2050, seguidos por um leve decréscimo no final do período. Em comparação, o cenário histórico manteve estabilidade relativa, demonstrando coerência entre as séries observadas e as projeções do modelo ETA_BESM.

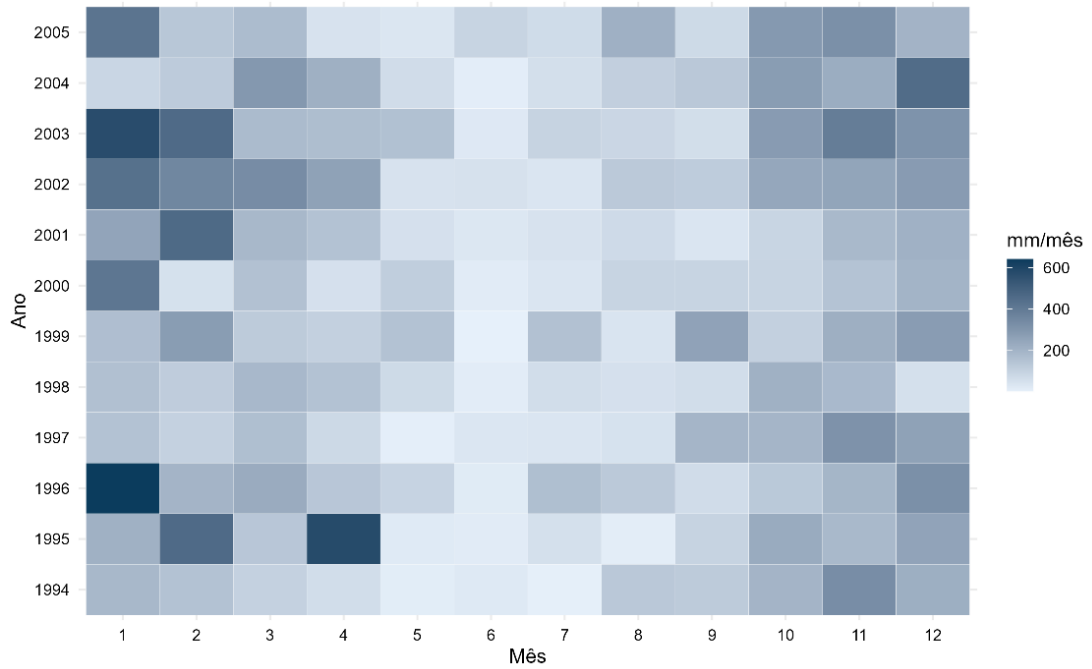
Gráfico 8 – Anomalia anual de precipitação por cenário (Baseline: Histórico 1994–2024).



Fonte: Autor (2025).

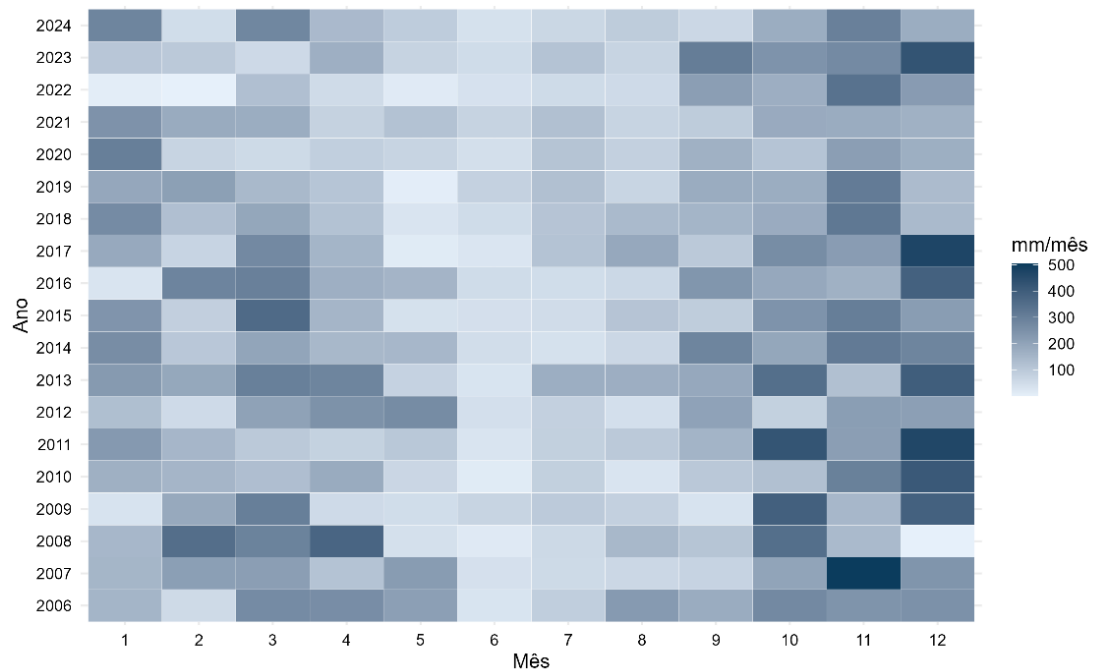
No período histórico (Gráfico 9), as chuvas se concentraram nos primeiros meses do ano, com episódios mais intensos em 1996, 2003 e 2005. No cenário RCP 4.5 (Gráfico 10), ocorreu uma redistribuição das precipitações, marcada por maior frequência de volumes médios no verão e redução dos extremos de intensidade. Já no cenário RCP 8.5 (Gráfico 11), as variações mensais permaneceram mais amplas, com aumentos isolados em janeiro e novembro, indicando mudanças na distribuição sazonal das chuvas projetadas para o futuro.

Gráfico 9 – Heatmap de precipitação mensal do modelo ETA_BESM (Histórico).



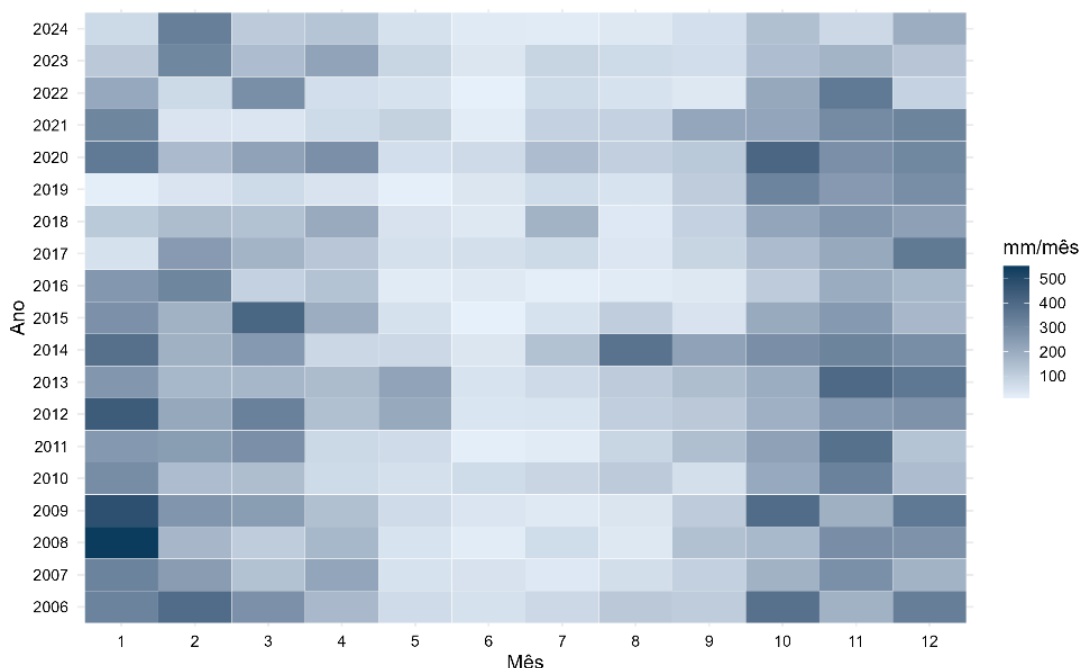
Fonte: Autor (2025).

Gráfico 10 – Heatmap de precipitação mensal do modelo ETA_BESM sob o cenário RCP 4.5.



Fonte: Autor (2025).

Gráfico 11 – Heatmap de precipitação mensal do modelo ETA_BESM sob o cenário RCP 8.5



Fonte: Autor (2025).

Na sequência da verificação e caracterização das séries temporais, analisaram-se os resultados diários do modelo ETA-BESM, abrangendo as projeções históricas e os cenários futuros. Essa etapa teve como objetivo sintetizar o comportamento geral das simulações entre 1994 e 2064, avaliando a distribuição e a consistência das precipitações diárias. Devido ao grande volume de dados, os resultados foram resumidos e estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Distribuição resumida dos dados diários padronizados do modelo ETA-BESM (1994–2064).

CENÁRIO	DATA	PRECIPITACAO DIA	CENÁRIO	DATA	PRECIPITACAO DIA
Histórico	1994-01-01	10,87144132	Histórico	1994-01-17	2,63070406
Histórico	1994-01-02	13,21872635	Histórico	1994-01-18	14,50343818
Histórico	1994-01-03	3,911435948	Histórico	1994-01-19	12,05847808
Histórico	1994-01-04	4,2115725	Histórico	1994-01-20	0,045970225
Histórico	1994-01-05	4,939213409	Histórico	1994-01-21	0,222958055
Histórico	1994-01-06	5,595523925	Histórico	1994-01-22	0,030445356
Histórico	1994-01-07	21,19290303	Histórico	1994-01-23	0,00040436
Histórico	1994-01-08	7,007996203	Histórico	1994-01-24	0,001989501
Histórico	1994-01-09	0,018918424	Histórico	1994-01-25	0,168048381
Histórico	1994-01-10	1,18650638	Histórico	1994-01-26	0,020941947
Histórico	1994-01-11	4,297951831	Histórico	1994-01-27	1,371524675
Histórico	1994-01-12	0,061250042	Histórico	1994-01-28	2,683027056
Histórico	1994-01-13	0,207599004	Histórico	1994-01-29	0,487138544
Histórico	1994-01-14	11,25543053	Histórico	1994-01-30	2,41585686
Histórico	1994-01-15	32,84681029	Histórico	1994-01-31	0,730731217
Histórico	1994-01-16	29,42326672			

Fonte: Autor (2025).

A Tabela 8 mostra que o cenário histórico registrou doze observações válidas, enquanto os cenários futuros RCP 4.5 e RCP 8.5 apresentaram cinquenta e nove valores cada, sem falhas ou inconsistências. Todas as séries mantiveram-se completas e consistentes, garantindo padrão adequado para as análises estatísticas. Esses resultados confirmam que o conjunto de dados do modelo ETA-BESM possui qualidade satisfatória para representar tanto as condições históricas quanto as projeções climáticas futuras.

Tabela 8 – Resultados do controle de qualidade das séries anuais do modelo ETA-BESM para os cenários histórico e projetados.

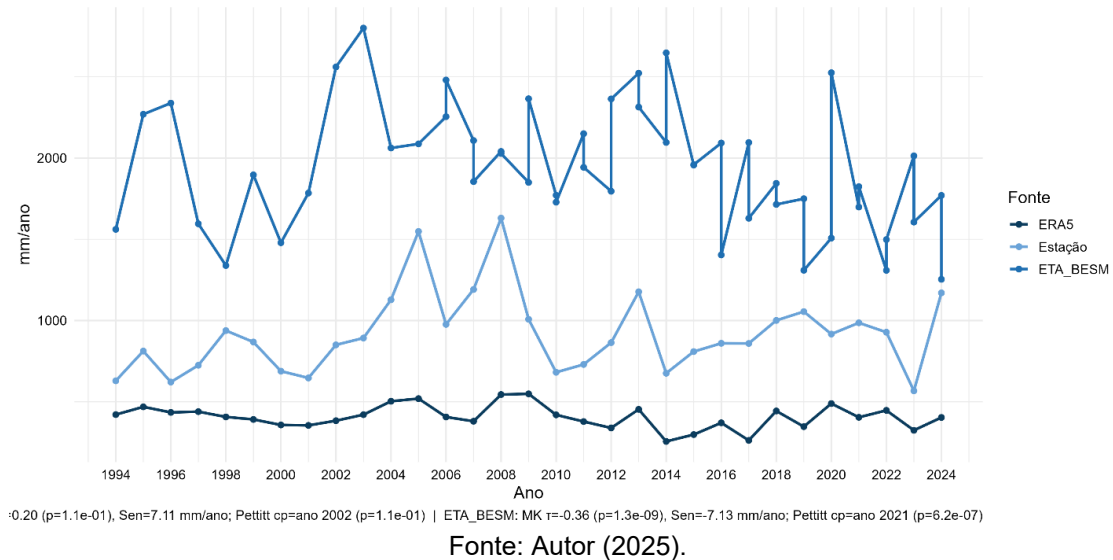
CENÁRIO	N	ZEROS	ZEROS_PCT	NA	NA_PCT
Histórico	12	0	0	0	0
RCP 4.5	59	0	0	0	0
RCP 8.5	59	0	0	0	0

Fonte: Autor (2025).

3.6. Síntese Integrada e Variabilidade Regional

Na etapa seguinte, compararam-se as diferentes fontes de dados utilizadas para caracterizar a precipitação anual em Campos dos Goytacazes, com o objetivo de avaliar a coerência entre os registros observacionais e os resultados modelados. Essa análise permitiu identificar discrepâncias e verificar o grau de concordância entre as bases ERA5, Estação Meteorológica e ETA-BESM no período de 1994 a 2024. O Gráfico 12 mostra a evolução temporal da precipitação anual nas três fontes, destacando a variabilidade interanual e a consistência geral das séries analisadas.

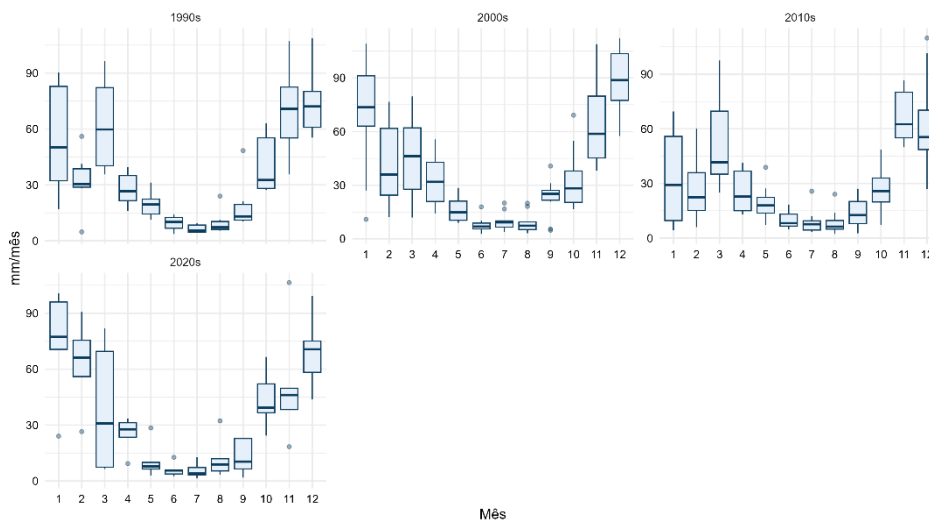
Gráfico 12 – Precipitação anual nas diferentes fontes de dados (ERA5, Estação e ETA-BESM) para o período de 1994 a 2024.



A análise mostrou que as três séries mantiveram coerência quanto à tendência geral de variação no período estudado. A série da Estação Meteorológica apresentou comportamento intermediário, com valores anuais situados entre os extremos simulados pelos modelos, enquanto as demais bases acompanharam de forma consistente a dinâmica pluviométrica regional.

Na sequência, realizou-se a caracterização temporal das precipitações, examinando a distribuição mensal dos dados do ERA5, segmentada por décadas. Essa abordagem permitiu avaliar a variabilidade intra-anual ao longo do período histórico de 1994 a 2024, identificando padrões recorrentes e mudanças sazonais entre diferentes intervalos de tempo. O Gráfico 13 sintetiza esses resultados, mostrando a dispersão dos valores mensais por década.

Gráfico 13 – Distribuição mensal da precipitação por década a partir dos dados do ERA5 (1994–2024).



Fonte: Autor (2025).

4. DISCUSSÃO

Os resultados obtidos neste estudo evidenciaram a variabilidade temporal e espacial do regime pluviométrico no município de Campos dos Goytacazes, revelando padrões consistentes de oscilação entre períodos secos e úmidos ao longo das últimas décadas. A análise das séries históricas provenientes do ERA5 e da Estação Meteorológica local demonstrou coerência entre as fontes, reforçando a confiabilidade dos dados utilizados como base para as comparações com os cenários climáticos projetados.

As anomalias anuais indicaram uma predominância de valores negativos a partir da década de 2010, sugerindo tendência de redução gradual nos acumulados anuais de precipitação. Essa tendência é compatível com observações regionais e nacionais que apontam para a intensificação de períodos secos alternados com eventos de chuva concentrada, o que caracteriza um aumento na irregularidade das precipitações. Tal comportamento pode estar relacionado à influência combinada de fenômenos de grande escala, como o El Niño–Oscilação Sul (ENOS), e às anomalias de temperatura da superfície do Atlântico Tropical, que afetam diretamente os sistemas de circulação e a formação de zonas de convergência na região Sudeste.

As análises estatísticas — incluindo os testes de Mann-Kendall, Sen's Slope e Pettitt — corroboraram a existência de variações significativas nas séries temporais. O modelo ETA-BESM indicou que, sob o cenário RCP 8.5, as flutuações

pluviométricas tornam-se mais pronunciadas a partir da metade do século, sugerindo maior sensibilidade às condições de aquecimento global intensificado. Em contrapartida, o cenário RCP 4.5 apresentou oscilações próximas à média histórica até meados de 2050, com leve declínio posterior, o que reflete um padrão de estabilização sob emissões moderadas de gases de efeito estufa.

A comparação entre as diferentes bases de dados mostrou coerência na tendência geral de comportamento, embora as magnitudes das precipitações variem conforme a metodologia e a resolução de cada fonte. Os resultados confirmam que o modelo ETA-BESM reproduz adequadamente as condições observadas no período histórico, o que reforça sua aplicabilidade para projeções regionais de precipitação. Além disso, a integração entre dados observacionais e modelados permitiu uma visão abrangente da dinâmica climática, fortalecendo o diagnóstico sobre possíveis impactos das mudanças climáticas na região Norte Fluminense.

Esses resultados apontam para a necessidade de estratégias de adaptação voltadas à gestão dos recursos hídricos e à mitigação dos riscos associados a extremos climáticos. A redução dos acumulados anuais, combinada à maior variabilidade intra-anual, pode impactar setores estratégicos como a agricultura, o abastecimento urbano e a geração de energia. Assim, recomenda-se a ampliação do monitoramento hidrometeorológico e a incorporação de cenários climáticos no planejamento de médio e longo prazo, de modo a promover políticas públicas mais resilientes frente às mudanças climáticas projetadas para as próximas décadas.

5. CONCLUSÃO

O presente Relatório Técnico Conclusivo apresentou uma investigação aprofundada acerca das variações no regime pluviométrico do município de Campos dos Goytacazes, fundamentada em séries históricas e projeções climáticas obtidas a partir dos conjuntos de dados ERA5, Estação Meteorológica Local e modelo ETA-BESM. A integração entre essas bases permitiu o estabelecimento de uma análise temporal abrangente, contemplando o período histórico de 1994 a 2024 e as projeções futuras até 2064, sob os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5.

Os resultados demonstraram elevada variabilidade interanual da precipitação, caracterizada por alternância entre períodos de déficit e de excesso

hídrico. A partir da década de 2010, observou-se a predominância de anomalias negativas, evidenciando uma tendência de redução gradual dos acumulados anuais. Tal comportamento encontra correspondência com estudos regionais e nacionais, indicando que os fatores de larga escala — como o El Niño–Oscilação Sul (ENOS) e as anomalias térmicas do Atlântico Tropical — exercem influência significativa sobre a dinâmica atmosférica e a distribuição das chuvas no Sudeste brasileiro (PAMPUCH et al., 2016).

As análises estatísticas, conduzidas por meio dos testes de Mann-Kendall, Sen's Slope e Pettitt, confirmaram a existência de tendências significativas e mudanças estruturais nas séries temporais de precipitação. O desempenho do modelo ETA-BESM demonstrou-se satisfatório tanto na reprodução das condições históricas quanto na simulação dos cenários futuros, evidenciando maior amplitude de variação e sensibilidade no cenário RCP 8.5, o que reforça a hipótese de intensificação dos efeitos decorrentes do aquecimento global sobre o regime pluviométrico regional.

As evidências obtidas apontam para impactos potenciais sobre os recursos hídricos, a produção agrícola e a geração de energia renovável, especialmente nas fontes hidrelétrica e fotovoltaica, em função da maior irregularidade das precipitações e da possível redução dos volumes anuais. Tais resultados ressaltam a necessidade de incorporar a variável climática no planejamento urbano, agrícola e energético, promovendo a adoção de estratégias de adaptação e mitigação que assegurem a resiliência dos sistemas produtivos e infraestruturais frente às condições futuras projetadas.

Conclui-se que o estudo contribui de forma efetiva para o aperfeiçoamento do diagnóstico climático municipal e fornece subsídios técnicos e científicos para a formulação de políticas públicas orientadas à sustentabilidade e à gestão integrada dos recursos hídricos e energéticos. A metodologia automatizada desenvolvida — baseada na análise integrada de séries históricas e projeções — constitui uma ferramenta replicável, aplicável a outros municípios e regiões, reforçando o caráter inovador e a relevância prática do produto tecnológico resultante desta pesquisa.

6. REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil: Informe 2020. Brasília: ANA, 2020. Disponível em:

<https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura-2020>. Acesso em: 11 out. 2025.

Coelho, Cíntia de Albuquerque Wanderley; Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Mudança do clima no Brasil: síntese atualizada e perspectivas para decisões estratégicas. Brasília, DF: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2025. ISBN: 978-65-5471-018-3.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Atlas Geográfico das Regiões de Influência das Cidades – REGIC 2023. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv102069.pdf>. Acesso em: 11 out. 2025.

Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC). Mudança do clima no Brasil: síntese atualizada e perspectivas para decisões estratégicas. Brasília: MCTI; FGV/CEMADEN, 2022. 180 p. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/arquivos/Relatorio_Mudanca_Clima_Brasil.pdf. Acesso em: 10 out. 2025.

PAMPUCH, L. A.; ARAVÉQUIA, J. A.; DIAS, P. L. S.; REBOITA, M. S. Anomalous patterns of SST and moisture sources in the South Atlantic Ocean associated with dry events in southeastern Brazil. *International Journal of Climatology*, v. 36, n. 15, p. 4831–4845, 2016. DOI: 10.1002/joc.4679.

Santos, Cleber Assis Dos et al. Análise estatística da não estacionariedade de séries temporais de vazão máxima anual diária na bacia hidrográfica do Rio Pardo. *Holos*, v. 7, p. 179–193, 12 nov. 2016. DOI: 10.15628/holos.2016.4892.

Santos, Giovana Deolinda Rodrigues Nery; Santos, Eliane Barbosa. Análise das Secas nas Regiões Norte e Noroeste Fluminense. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 43, n. 4, 18 dez. 2020. DOI: https://dx.doi.org/10.11137/2020_4_01_10.

Vasconcellos, André. O desafio da gestão urbana em Campos dos Goytacazes no contexto das mudanças climáticas: entre a construção da resiliência e a persistência de fórmulas tradicionais de governar. 2021. 136 f. Dissertação (Mestrado em Políticas Sociais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Campos dos Goytacazes, 2021. Disponível em: <https://uenf.br/posgraduacao/politicas-sociais/wp-content/uploads/sites/11/2022/10/ANDRE-VASCONCELLOS.pdf>. Acesso em: 10 out. 2025.

Velasco Holender, Bárbara; BARBOSA SANTOS, Eliane. Análise de tendência dos eventos de precipitação intensa no Sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 32, p. 584–606, 29 abr. 2023. DOI: 10.55761/abclima.v32i19.16411.

Vilar, Rafaella De Araújo Aires et al. Avaliação do Impacto de Secas Severas no Nordeste Brasileiro na Geração de Energia Elétrica Através do Modelo Newave: Projeção das Energias Afluentes e Armazenadas. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 35, n. 1, p. 89–98, mar. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-7786351004>.

Vissirini , Fernanda Santa Barbara et al. Vulnerabilidade urbana e ferramentas aplicadas na gestão de risco de desastres hidrometeorológicos. *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, v. 12, n. 2, p. 1–37, 3 jul. 2023. DOI: <https://doi.org/10.5585/geas.v12i2.22616>.

World Meteorological Organization (WMO). *State of the Global Climate 2023*. Geneva: WMO, 2024. (WMO-No. 1347, ISBN 978-92-63-11347-4).