



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Análise Espaço-Temporal dos Parâmetros Climáticos Incidentes Sob o Bioma da Caatinga

Gideão Gabriel Gonçalves¹, Diego Gouveia Marques², Elisângela de Araujo³, Valquíria Campos⁴

¹Engenheiro Ambiental pela Universidade do Estado de Minas Gerais.

Doutorando em Ciências Ambientais no Instituto de Ciência e Tecnologia UNESP - Câmpus de Sorocaba ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3575-0349> e-mail: gideao.gabriel@unesp.br (autor correspondente), ²Engenheiro Químico pela Universidade Estadual de Maringá (PR).

Mestre e Doutor em Ciências Ambientais no Instituto de Ciência e Tecnologia UNESP - Câmpus de Sorocaba, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3402-9202> E-mail: diego.marques@unesp.br, ³Engenheira Ambiental pela Universidade do Estado de Minas Gerais. Técnica em Meio Ambiente. Mestre em Ciências Ambientais pela Universidade Estadual Paulista "Júlio Mesquita Silva" ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7715-2956> E-mail: elisangela.araujo@unesp.br ⁴Mestre e Doutora em Geologia pela Universidade de São Paulo. Docente do Instituto de Ciência e Tecnologia da UNESP, campus de Sorocaba. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6568-9935> E-mail: v.campos@unesp.br

Artigo recebido em 12/05/2025 e aceito em 10/01/2025

RESUMO

Este estudo investigou a dinâmica espaço-temporal dos parâmetros climáticos no bioma Caatinga, exclusivamente brasileiro, utilizando dados de temperatura, precipitação e umidade relativa do ar de 74 estações meteorológicas automáticas do INMET, no período de 2004 a 2023. A metodologia envolveu a tabulação e análise dos dados de médias climáticas mensais e anuais, a produção de mapas espaciais para visualizar a distribuição dos parâmetros, e a aplicação do Índice de Anomalia de Chuvas (IAC) para identificar desvios na precipitação. A análise temporal revelou que a média anual de precipitação foi de aproximadamente 576 mm, com maiores volumes entre dezembro e abril e menores entre agosto e outubro. A umidade relativa média foi de 55,6%, e a temperatura média anual foi de 24,6°C. Espacialmente, a região central da Caatinga, abrangendo partes da Bahia, Sergipe, Alagoas, Pernambuco e Piauí, apresentou os valores mais baixos de precipitação e umidade, contrastando com as áreas mais litorâneas. Já o IAC evidenciou na região um aumento significativo na frequência e intensidade de secas nos anos mais recentes, especialmente após 2012, com anos classificados como "muito seco" e "extremamente seco". Os resultados indicam uma crescente aridez no bioma, com implicações importantes para a conservação, o uso da terra e a adaptação às mudanças climáticas na região, destacando a necessidade de monitoramento contínuo e estratégias de mitigação.

Palavras chave: Monitoramento climático, Eventos Extremos e Índice de Anomalia de Chuvas.

Spatiotemporal Analysis of Climatic Parameters Affecting the Caatinga Biome

ABSTRACT

This study investigated the spatial-temporal dynamics of climate parameters in the Caatinga, using available data collected by INMET at automatic station from 2004 to 2023. The methodology involved tabulation and analysis of monthly and annual climate average data, the production of spatial maps to visualize the distribution of parameters, and the application of the Rain Anomaly Index (IAC) to identify deviations in precipitation by comparing actual rainfall to a long-term average. The temporal analysis revealed that the average annual rainfall was approximately 576 mm, with the highest volumes between December and April and the lowest between August and October. The average relative humidity was 55.6% and the average annual temperature was 24.6°C. Spatially, the central region of the Caatinga, covering parts of the Bahia, Sergipe, Alagoas, Pernambuco and Piauí, showed the lowest values, contrasting with the more coastal areas. The IAC showed a significant increase in the frequency and intensity of droughts in the region in recent years, especially after 2012, with years classified as very dry and extremely dry. The results indicate the growing aridity (dryness) in a specific biome, with implications for conservation efforts, land use and adaptation to climate change, requiring proactive monitoring and mitigation measures.

Key words: Climate Monitoring, Extreme Events and Rainfall Anomaly Index.

Introdução

A definição de bioma está associada às interações entre fatores bióticos e abióticos de uma região, como vegetação, fauna e, principalmente, o clima, que influencia diretamente a ocupação e o uso do solo (Freire et al., 2020). Em escala global, os biomas desempenham papel fundamental na regulação dos ciclos biogeoquímicos e na manutenção dos serviços ecossistêmicos, sendo, portanto, unidades chave para a compreensão das dinâmicas ambientais. No Brasil, os seis biomas terrestres — Amazônia, Cerrado, Mata Atlântica, Pampas, Pantanal e Caatinga — abrigam uma diversidade biológica ímpar e enfrentam distintos graus de pressão antrópica. A Caatinga, em especial, é o único bioma exclusivamente brasileiro, ocupando cerca de 10,1% do território nacional e abrigando uma população estimada em 27 milhões de pessoas, das quais aproximadamente 38% residem em áreas rurais (MMA, 2022).

Trata-se de um bioma de grande singularidade ecológica, com espécies vegetais adaptadas a longos períodos de estiagem, além de fauna endêmica e estratégias de sobrevivência únicas. A Caatinga está inteiramente inserida na região do Semiárido Brasileiro, cuja principal característica é a profunda desigualdade entre precipitação e evaporação. Segundo o Instituto Nacional do Semiárido (INSA, 2025), trata-se de uma área onde a quantidade anual de chuvas é inferior à perda de água por evaporação, o que resulta em elevadas taxas de déficit hídrico, recorrentes secas e processos crescentes de degradação ambiental, como a desertificação.

O clima na Caatinga é marcado por elevadas temperaturas médias anuais, variando entre 25 °C e 30 °C, e baixos índices pluviométricos, geralmente entre 400 mm e 1.200 mm ao ano. Contudo, essa média esconde uma heterogeneidade relevante, especialmente em áreas de relevo elevado, como planaltos e serras, onde os volumes de precipitação podem ultrapassar os 1.800 mm anuais (Tabarelli et al., 2018). A estação seca pode durar de 6 a 11 meses, dependendo da localidade, o que impõe restrições severas à agricultura, à segurança hídrica e à conservação da biodiversidade local.

Além das limitações impostas pelo clima, a Caatinga sofre intensa pressão antrópica. Estima-se que 45,4% de sua cobertura vegetal original já tenha sido modificada, tornando-se o terceiro

bioma mais degradado do país (Souza, Artigas e Lima, 2015). Essa vulnerabilidade se agrava com os efeitos das mudanças climáticas, que têm intensificado a frequência e severidade dos eventos extremos, como secas prolongadas e ondas de calor (Carpenedo e Lima, 2022). Tais mudanças impactam diretamente setores vitais para a subsistência das populações locais, sobretudo a agricultura de base familiar, altamente dependente da regularidade das chuvas, da disponibilidade de água e de temperaturas adequadas (Santos, Sousa e Leite, 2022).

Diante desse cenário, torna-se essencial o monitoramento contínuo e detalhado dos parâmetros climáticos que afetam o bioma. Compreender a dinâmica do clima da Caatinga é fundamental para orientar políticas públicas, práticas sustentáveis de uso do solo e estratégias de adaptação às mudanças em curso. A análise de séries temporais de dados meteorológicos permite identificar padrões, variações e anomalias, fornecendo subsídios técnicos e científicos para ações de mitigação de impactos.

Assim, este estudo tem como objetivo realizar uma análise espaço-temporal dos parâmetros climáticos incidentes sobre o bioma da Caatinga, com base na avaliação de dados históricos de temperatura, precipitação e umidade relativa do ar. A proposta busca compreender as dinâmicas climatológicas locais, verificando a existência de comportamentos recorrentes, linearidades ou anomalias que possam indicar tendências futuras e orientar a gestão sustentável do território.

Material e métodos

Caracterização da área de estudo

A Caatinga é o quarto maior bioma do Brasil, ocupando aproximadamente 10,1% do território nacional e abrangendo cerca de 1.209 municípios, segundo dados do IBGE (2024). Conforme ilustrado na Figura 1, o bioma está presente em oito dos nove estados da Região Nordeste — Alagoas, Bahia, Ceará, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte e Sergipe — estando ausente apenas no Maranhão. Além disso, sua ocorrência se estende para a Região Sudeste, ocupando a porção norte do estado de Minas Gerais, o que reforça sua abrangência territorial.

Delimitação do Bioma da Caatinga no Território Brasileiro

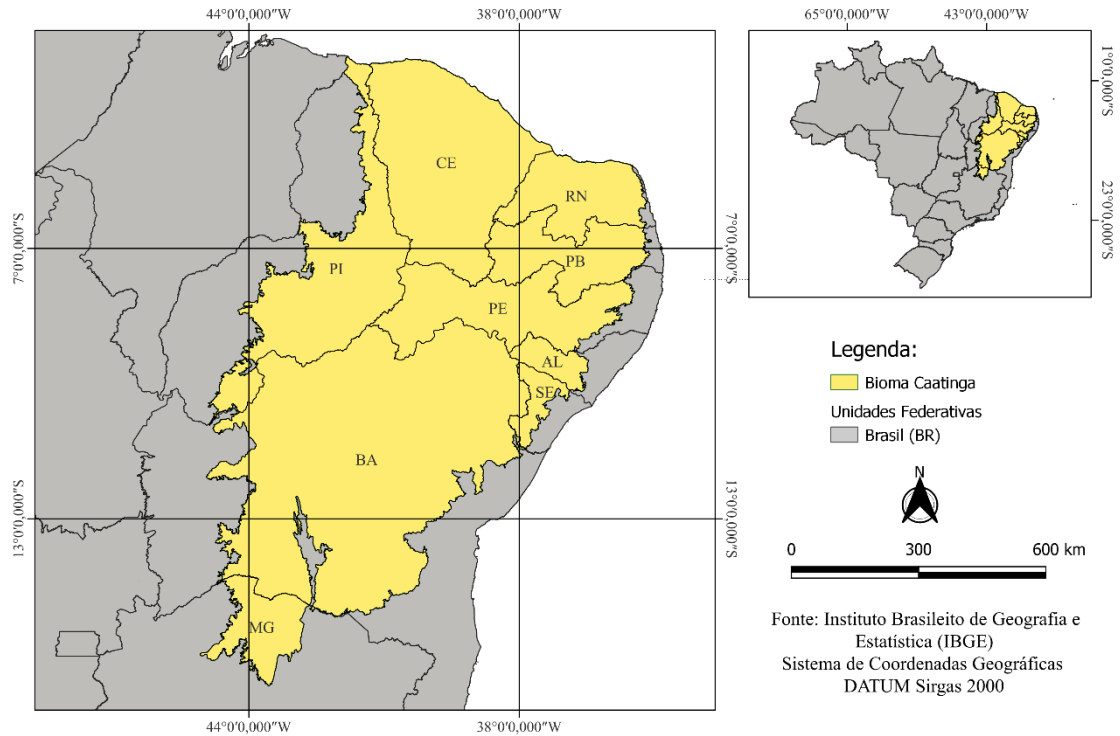


Figura 1. Extensão geográfica do bioma Caatinga no Brasil

Levantamento de dados meteorológicos

Para analisar a variação dos dados meteorológicos ao longo dos anos no bioma Caatinga, foram utilizados dados climáticos fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2025), que mantém o Banco de Dados Meteorológicos, representando o Brasil junto à Organização Meteorológica Mundial (OMM). Esse banco disponibiliza uma variedade de informações climáticas referentes a diferentes períodos e

regiões, obtidas por meio de estações meteorológicas automáticas. Neste estudo, foram selecionados como parâmetros principais os dados de temperatura, precipitação e umidade relativa do ar.

Na região da Caatinga tem-se identificação de ampla rede de estações meteorológicas e, para esta pesquisa, foram selecionadas 74 estações automáticas (Figura 2), que possuem registros mais recentes e consistentes, ao longo dos anos, não apresentando falhas, nos dados coletados.

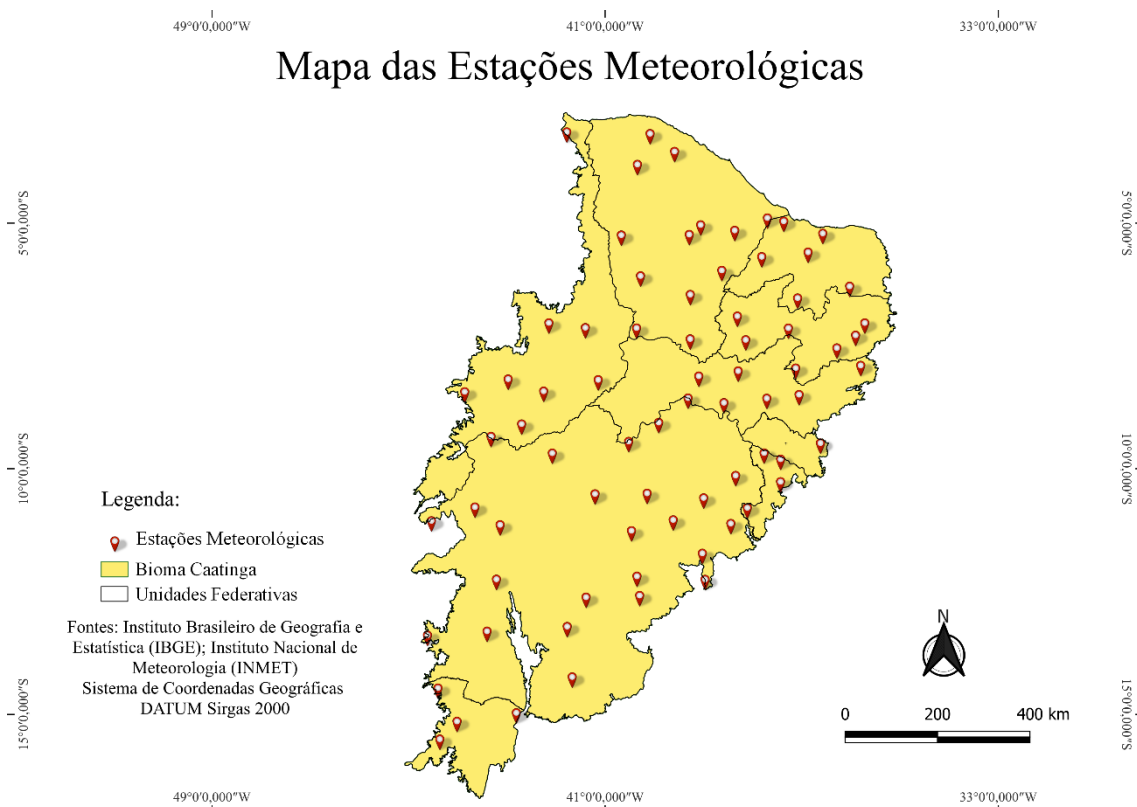


Figura 2. Distribuição de Estações Meteorológicas Automáticas no Bioma da Caatinga

As 74 estações meteorológicas distribuídas pelo território da Caatinga estão presentes em todos os estados que abrangem o bioma, com maior concentração nos estados da Bahia e Ceará e, em menor número nos estados de Sergipe e Alagoas, conforme demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1. Quantificação das Estações Meteorológicas na Área da Caatinga

Estações meteorológicas por estado	
Estado	Quantidade
Alagoas	3
Bahia	22
Ceará	13
Minas Gerais	4
Paraíba	7
Pernambuco	8
Piauí	9
Rio Grande do Norte	6
Sergipe	2

Análise espaço-temporal

A análise dos dados meteorológicos abrangeu o período de 20 anos, entre 2004 e 2023, com o objetivo de avaliar os aspectos climáticos mais recentes, incidentes sobre o bioma da Caatinga. Este intervalo foi escolhido, uma vez que, as estações meteorológicas automáticas começaram a ser instaladas na área de estudo, somente a partir de 2003.

Com o período definido e os dados adquiridos, foram realizadas tabulações e cálculos no software Excel para converter os dados climáticos horários fornecidos pelo INMET em valores mensais e anuais para cada estação. Em seguida, foram calculadas as médias gerais, considerando os dados de todas as 74 estações, permitindo uma análise temporal dos parâmetros climáticos ao longo do período estudado. Após a organização dos dados, foram gerados gráficos no software R para facilitar a visualização das variações temporais.

Para a análise espacial, foram elaborados mapas temáticos por meio de um Sistema de Informação Geográfica (SIG), utilizando o software QGIS. Empregou-se a ferramenta de interpolação IDW (Inverso da Distância Ponderada), que permitiu integrar os dados pontuais das estações meteorológicas. Esse método baseia-se na interpolação de valores a partir de pontos conhecidos, possibilitando a estimativa de valores em áreas onde não há dados observacionais diretos (Oliveira et al., 2024). A aplicação dessa técnica garantiu uma representação contínua e coerente da superfície do bioma Caatinga, permitindo a visualização espacial dos parâmetros climáticos analisados.

Verificação de anomalias climáticas

Para identificar padrões ou anomalias persistentes nos dados observados, foi empregado o Índice de Anomalia de Chuvas (IAC), que sinaliza variações positivas ou negativas com base na série temporal de precipitação de uma área específica (Lima et al., 2023). Com essa abordagem destacou-se, ao longo dos anos analisados, o padrão de ocorrência e a intensidade de períodos de seca e de umidade na região estudada.

Para o cálculo do IAC, foram utilizados os dados médios anuais de precipitação previamente coletados, aplicando-se a metodologia proposta por Rooy (1965) e adaptada por Freitas (2004), que emprega duas equações distintas para a definição de valores positivos (1) e negativos (2).

Equação 1. Índice de Anomalia de Chuva – IAC

$$\text{IAC positivo} = 3 \times \frac{[N - N_1]}{[M - N_1]}$$

$$\text{IAC negativo} = -3 \times \frac{[N - N_1]}{[X - N_1]}$$

Fonte: Rooy, 1965.

Em que:

N = precipitação observada do ano em que será gerado o IAC (mm);

N₁ = precipitação média anual da série histórica (mm);

M = média das dez maiores precipitações anuais da série histórica (mm);

X = média das dez menores precipitações anuais da série histórica (mm).

Com o resultado dos cálculos, os valores foram enquadrados de acordo com a classificação desenvolvida por Araújo et al. (2009), conforme exposto na Tabela 2.

Tabela 2. Classes do Índice de Anomalia de Chuva (IAC)

Índice de anomalia de chuva (IAC)	
Intervalo do IAC	Intensidade
>4	Extremamente Úmido
2 a 4	Muito Úmido
0 a 2	Úmido
0 a -2	Seco
-2 a -4	Muito Seco
< -4	Extremamente Seco

Resultados e discussão

Análise espaço-temporal dos parâmetros climáticos

Com base nos dados meteorológicos processados, foi possível calcular, a partir da análise conjunta das 74 estações, as médias climatológicas mensais e anuais dos parâmetros estudados — precipitação, umidade relativa do ar e temperatura. Essa abordagem permitiu uma análise temporal detalhada, possibilitando compreender o comportamento climático ao longo dos anos e estabelecer uma média geral para cada variável no contexto do bioma.

Além disso, por meio da interpolação das médias de cada estação, foi possível representar espacialmente os dados climáticos da Caatinga, o que permitiu identificar com clareza as áreas com os valores mais elevados ou mais críticos para cada parâmetro analisado. A seguir, são apresentados os principais resultados referentes a cada um dos parâmetros climáticos avaliados.

Precipitação

Iniciando pela precipitação, conforme destacado por Francisco et al. (2012), a cobertura vegetal da Caatinga, já bastante impactada pela ação antrópica, apresenta diferentes feições relacionadas aos fatores edafoclimáticos — entre eles, a precipitação, que, influenciada pelo relevo, tende a aumentar com a altitude nas diversas unidades hidrogeográficas. Quanto menor a precipitação, maior a aridez e a irregularidade na distribuição das chuvas.

No que se refere à precipitação incidente na Caatinga, a Figura 3 apresenta a média mensal observada na região. Verifica-se que os maiores volumes de chuva ocorrem entre os meses de dezembro e abril, com um pico superior a 80 mm em março. De maio a novembro, o regime de chuvas reduz-se significativamente, sendo o período de agosto a outubro o mais seco do ano, com médias mensais inferiores a 20 mm.

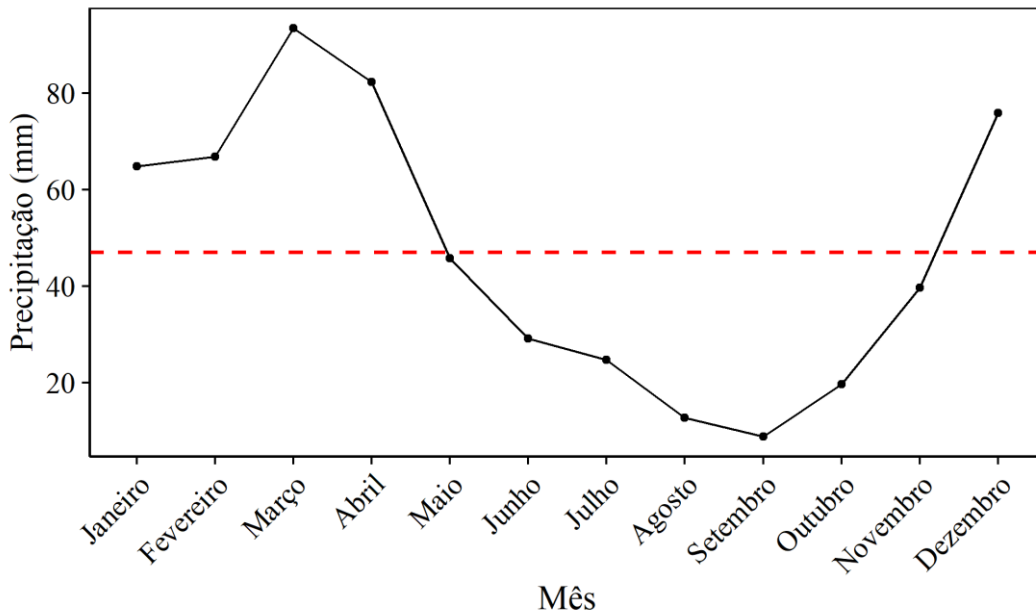


Figura 3. Precipitação média mensal na área da Caatinga

Em relação aos valores médios anuais de precipitação no bioma, a Figura 4 mostra que, durante o período analisado (2004 a 2023), os anos com maior volume de chuvas ocorreram entre 2004 e 2011, com destaque para 2009, que registrou um pico de aproximadamente 900 mm. A partir de

2011, as médias anuais de precipitação passaram a diminuir, mantendo-se abaixo de 600 mm, com exceção do ano de 2020. Os anos de 2012 e 2022 destacaram-se como os mais secos da série, acumulando apenas 338 mm e 376 mm, respectivamente.

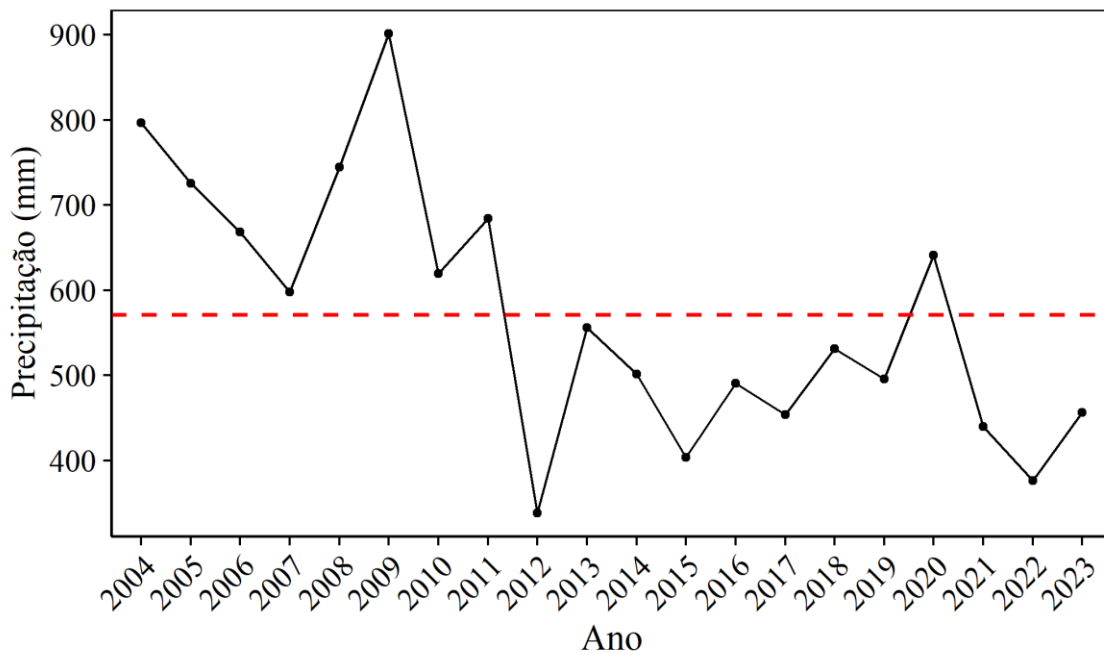


Figura 4. Precipitação média anual na área da Caatinga

De forma geral, ao analisar os dados de precipitação no bioma, foi possível concluir que os picos mensais de maior e menor volume de chuvas ocorrem, respectivamente, em março e setembro. Em termos anuais, a média de precipitação

registrada foi de aproximadamente 576 mm, valor que está de acordo com a variação anual de chuvas no bioma, que oscila entre 300 mm e 800 mm (WWF, 2025).

Esse regime de chuvas tem influência direta nas características da vegetação do bioma. O termo “Caatinga” é de origem tupi e significa “mata ou floresta branca”, uma alusão à aparência da vegetação, que tende a perder as folhas no período da seca, exibindo troncos claros e esbranquiçados. A Caatinga pertence ao bioma global denominado Florestas e Arbustais Tropicais Sazonalmente Secos (FATSS), sendo a maior e mais contínua extensão desse tipo de bioma, abrigando uma vasta biodiversidade (Melo et al., 2023).

Complementando a análise temporal, a distribuição espacial da precipitação no bioma Caatinga também revela importantes contrastes regionais. A Figura 5 demonstra que a região

central da Caatinga — abrangendo áreas dos estados da Bahia, Sergipe, Alagoas, Pernambuco e Piauí — concentra os menores índices anuais de precipitação, com valores médios inferiores a 500 mm. Essa característica é explicada pela posição geográfica da região, uma vez que, frequentemente, as chuvas não conseguem ultrapassar a zona litorânea de alta latitude e alcançar o interior do território (Lucena e Steinke, 2015). A maior parte do restante do bioma apresenta médias entre 500 mm e 600 mm, evidenciando uma predominância de baixos volumes pluviométricos. Apenas algumas áreas pontuais registram índices superiores, o que reforça a irregularidade espacial das chuvas na região.

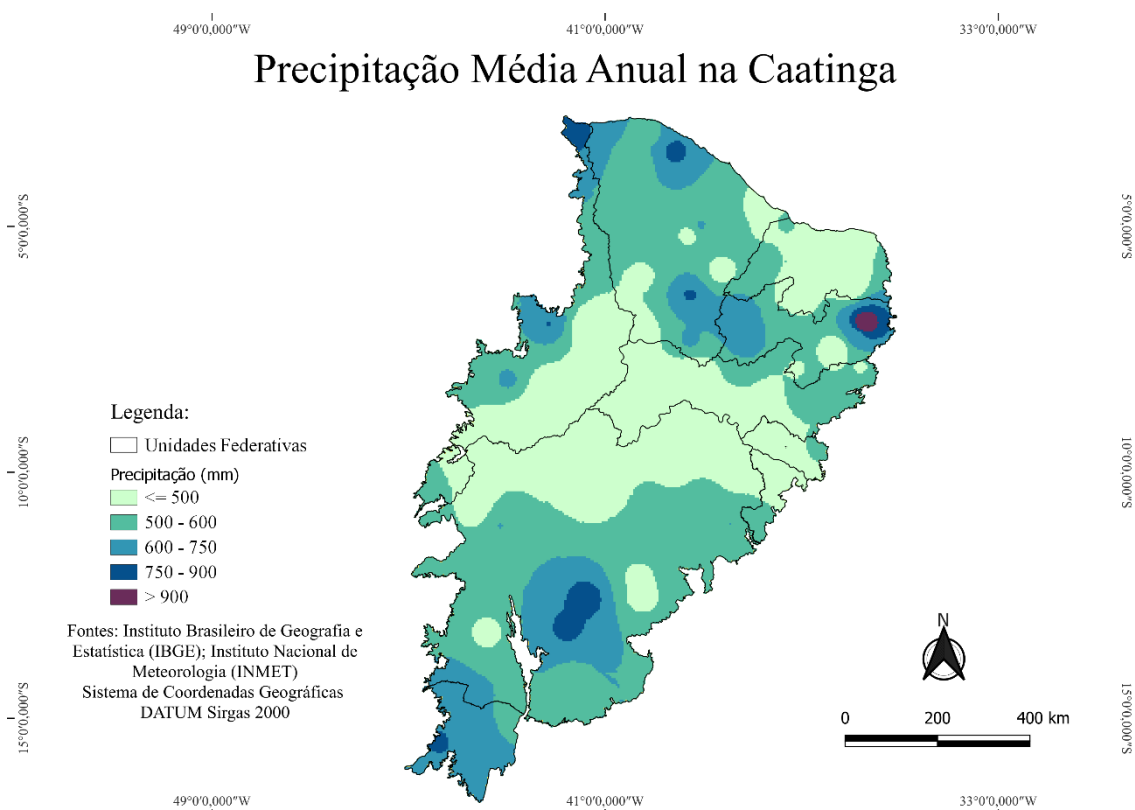


Figura 5. Distribuição espacial da precipitação anual média no bioma Caatinga

Umidade Relativa

Em relação à umidade relativa do ar, os dados expressam, em porcentagem, a média mensal e anual da umidade. A Figura 6 mostra, ao longo do ano, as variações desses valores. Os meses com as maiores taxas de umidade ocorrem entre março e maio, com médias acima de 60%, enquanto setembro e outubro registram os menores índices, com valores inferiores a 50%.

Ao comparar esses dados com os de precipitação, observa-se uma correlação evidente:

os meses com maior volume de chuvas também apresentam maior umidade relativa, e, da mesma forma, nos períodos de estiagem, os níveis de umidade tendem a cair significativamente. Essa relação é comumente observada, uma vez que, quando a umidade relativa do ar está elevada, há maior probabilidade de ocorrência de precipitação, enquanto níveis mais baixos de umidade tendem a indicar condições mais secas (UFT, 2025).

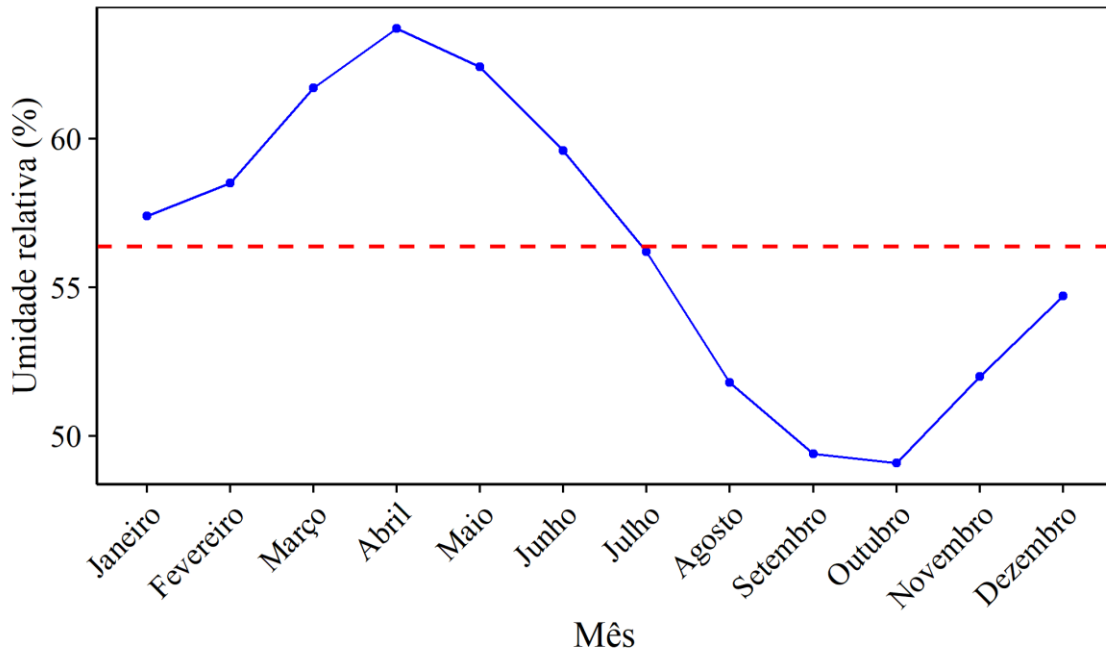


Figura 6. Umidade média mensal na área da Caatinga

Em relação à umidade média anual, a Figura 7 mostra que, durante os primeiros anos do período analisado, os índices foram mais elevados — assim como os de precipitação —, com valores quase sempre acima de 60%. No entanto, a partir

de 2014, observa-se uma tendência de queda nas médias anuais de umidade, atingindo os menores índices em 2021 e 2022, ambos com valores inferiores a 45%.

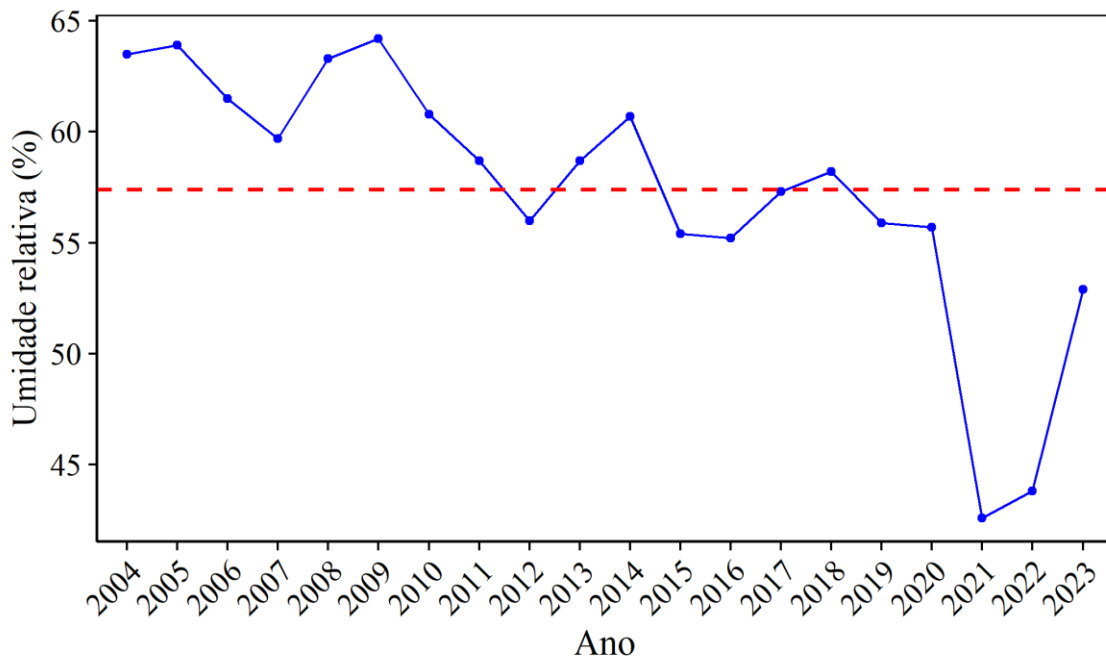


Figura 7. Umidade média anual na área da Caatinga

De modo geral, ao analisar os dados de umidade relativa do ar, pode-se afirmar que abril e setembro representam os meses de maior e menor umidade, respectivamente. Anualmente, a média registrada no bioma foi de aproximadamente

55,6%, valor que está de acordo com a dinâmica climática local, na qual a umidade relativa tende a se manter em torno de 50% (Moura, 2021).

Do ponto de vista espacial, a umidade relativa do ar também apresenta variações

significativas ao longo do território da Caatinga. De acordo com a Figura 8, assim como no padrão observado para a precipitação, a área central do bioma apresenta os menores índices de umidade, com valores anuais inferiores a 50%. A maior parte do bioma, no entanto, apresenta médias de umidade

relativa entre 50% e 60%. Apenas as regiões mais próximas ao litoral, localizadas nas extremidades do bioma, apresentam médias anuais de umidade superiores a 60%, revelando a influência de fatores como proximidade ao mar e características locais de relevo (Moura et al., 2019).

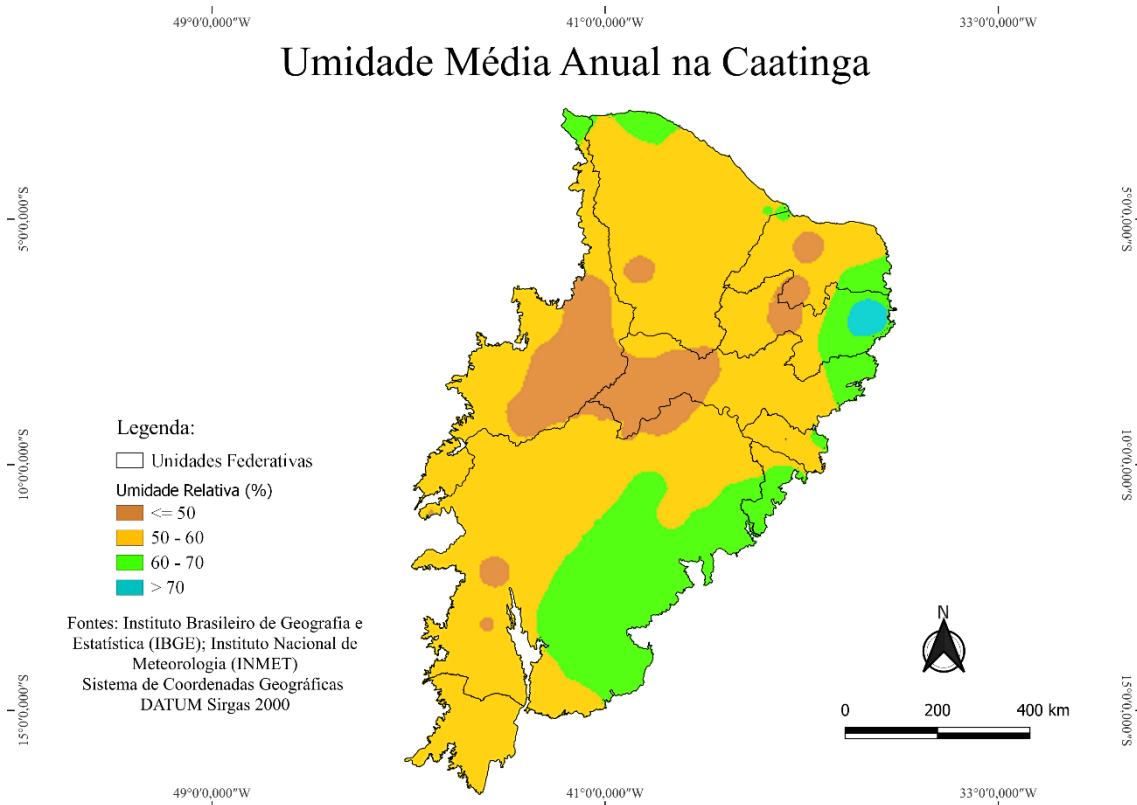


Figura 8. Distribuição espacial da umidade relativa anual média no bioma Caatinga

Temperatura

Em relação à temperatura na área do bioma, a Figura 9 apresenta a variação média mensal ao longo do ano. Observa-se que os picos de temperatura ocorrem predominantemente entre os meses de outubro e março, com médias mensais

próximas a 27°C. Nos meses seguintes, especialmente em junho e julho, os valores diminuem, chegando a ficar abaixo de 24°C. Esses dados estão de acordo com as estações do ano, com temperaturas mais elevadas durante a primavera e o verão, e mais amenas no outono e inverno.

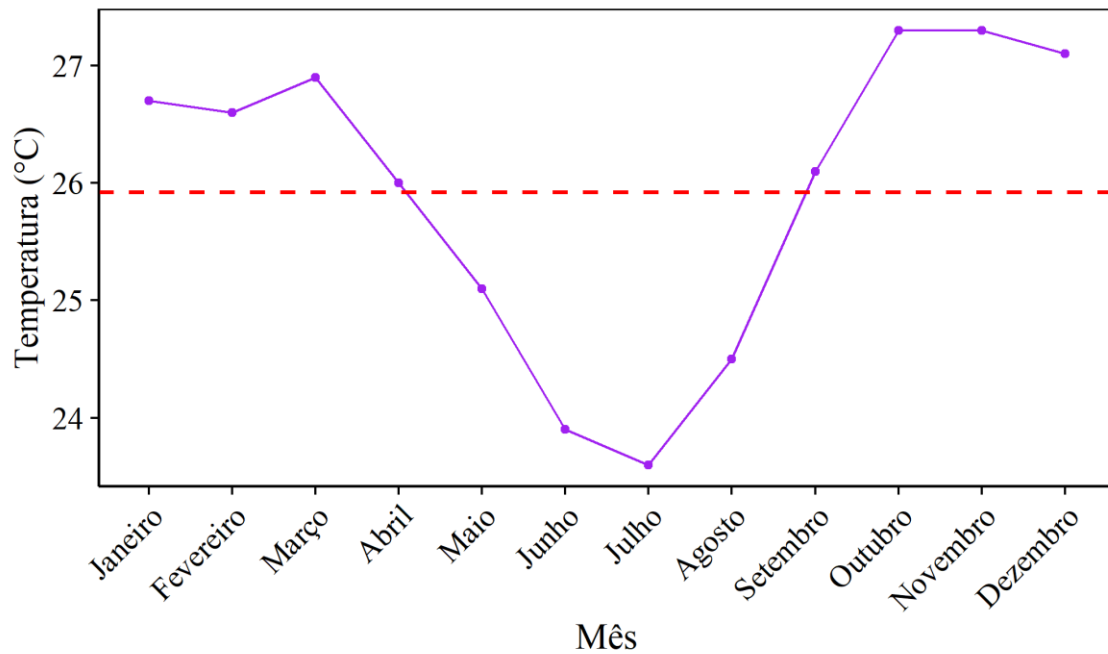


Figura 9. Temperatura média mensal na área da Caatinga

Com base na média de temperatura observada ao longo dos anos, a Figura 10 revela que os valores não seguem um comportamento linear. Anos como 2004, 2008, 2012, 2014 e 2018

apresentaram médias anuais superiores a 25°C, enquanto anos como 2006, 2021 e 2022 registraram médias mais baixas, com valores inferiores a 23°C.

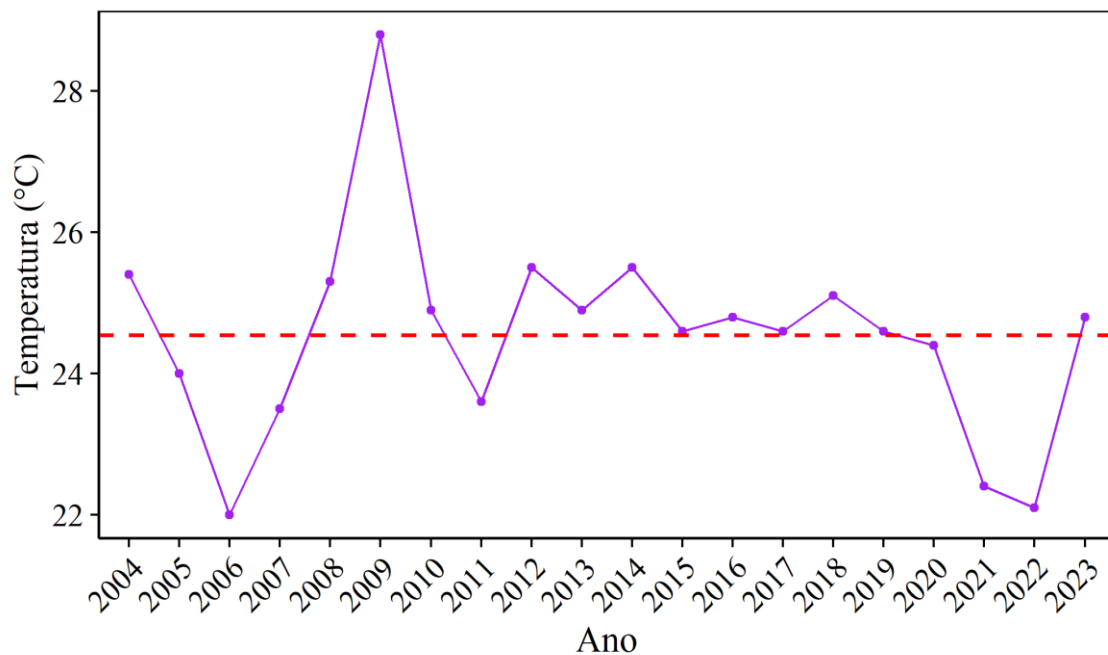


Figura 10. Temperatura média anual na área da Caatinga

Ao analisar os dados de temperatura de forma geral, observa-se que os meses mais quentes registram médias mensais que podem alcançar até 27°C, enquanto os meses mais amenos apresentam temperaturas em torno de 22°C. Considerando as médias anuais ao longo dos anos, é possível afirmar

que a temperatura média do bioma gira em torno de 24,6°C — valor que está de acordo com a definição de Moura (2021), o qual afirma que, na maior parte da área de ocorrência da Caatinga, as temperaturas variam entre 23°C e 27°C.

Ao considerar a distribuição espacial da temperatura, é possível identificar padrões distintos ao longo da área da Caatinga. Conforme apresentado na Figura 11, os estados do Ceará e do Piauí concentram as maiores médias anuais, com valores superiores a 25°C. A maior parte do território do bioma apresenta temperaturas médias

anuais entre 23°C e 25°C, enquanto apenas algumas áreas pontuais — geralmente associadas a regiões de maior altitude — registram valores inferiores a 23°C. Esses padrões refletem a influência de variáveis geográficas e topográficas na configuração térmica regional (Oliveira, Reboita e Rocha, 2018).

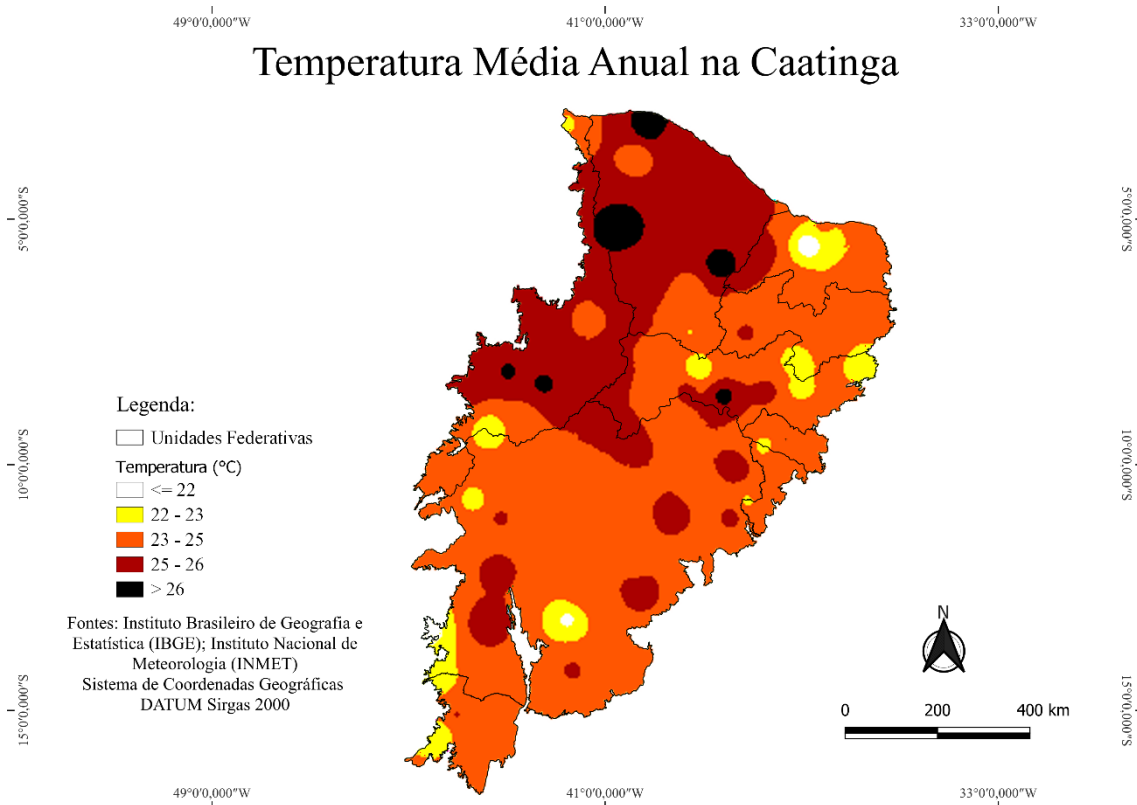


Figura 11. Distribuição espacial da temperatura anual média no bioma Caatinga

De modo geral, a análise espaço-temporal dos dados de precipitação, umidade relativa do ar e temperatura revela a forte influência do clima semiárido nas dinâmicas ambientais da Caatinga. Observa-se uma marcada sazonalidade, com os maiores índices de chuva e umidade concentrados nos primeiros meses do ano, em contraste com o período seco e mais quente. No aspecto espacial, a região central do bioma se destaca como a mais crítica, combinando baixos níveis de precipitação e umidade com altas temperaturas médias.

Essas inter-relações reforçam a vulnerabilidade da Caatinga às mudanças climáticas, que intensificam o risco de desertificação e ressaltam a importância do monitoramento climático para o planejamento ambiental e o desenvolvimento sustentável (Santos et al., 2014). Ressalta-se ainda que esses padrões espaciais coincidem com as subdivisões climáticas do Nordeste brasileiro, onde predominam condições mais amenas no litoral, clima de transição no Agreste e maior severidade climática

no Sertão (Santos, Lira e Cavalcante, 2023; Andrade, 1998).

Análise de Anomalias

Nesse tópico, com base nos valores do Índice de Anomalia de Chuvas (IAC), foi possível identificar variações significativas no regime de precipitação ao longo dos anos analisados. A aplicação do índice evidenciou os períodos mais críticos de seca, bem como os anos com volumes de chuva acima da média, permitindo uma visão mais clara da variabilidade climática no bioma da Caatinga.

Analisando os resultados do IAC apresentados na Figura 12, observa-se que o período entre 2004 e 2011, bem como o ano de 2020, foi marcado predominantemente por anomalias positivas, com destaque para os anos de 2004 e 2009, que apresentaram os maiores desvios favoráveis de precipitação. Em contrapartida, entre 2012 e 2023 — com exceção de 2020 — todos os anos apresentaram índices negativos, evidenciando

a ocorrência de secas. Os picos mais acentuados de anomalias negativas ocorreram em 2012, 2015 e

2022, refletindo períodos de estiagem mais severa na região da Caatinga.

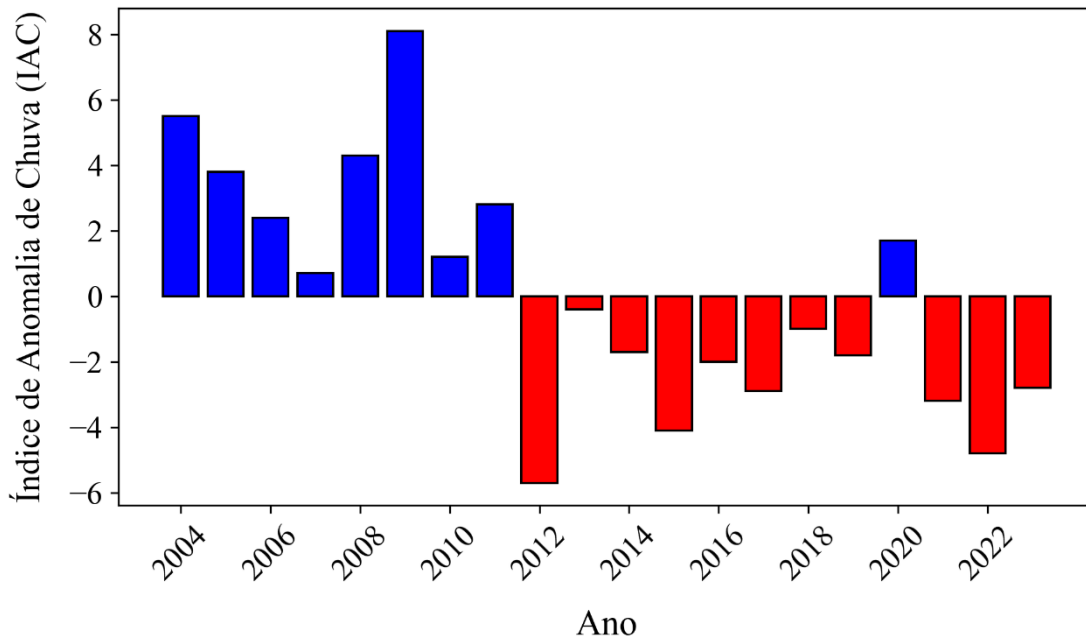


Figura 12. Índice de Anomalias anuais na Caatinga

Ao comparar os valores do IAC com a classificação de intensidade apresentada na Tabela 3, observa-se que os primeiros anos da série, especialmente entre 2004 e 2011, além de 2020, foram predominantemente classificados nas categorias úmido, muito úmido e até extremamente úmido, indicando maior regularidade e volume de

chuvas. Em contraste, os anos mais recentes da análise, principalmente, entre 2012 e 2023, a exceção de 2020, que enquadram-se, majoritariamente, nas classes de seca, muito seca e extremamente seca, refletindo em períodos com estiagens severas e mais recorrentes no bioma.

Tabela 3. Intensidade anual dos valores de IAC na Caatinga

Ano	IAC	Intensidade	Ano	IAC	Intensidade
2004	5,5	Extremamente Úmido	2014	-1,7	Seco
2005	3,8	Muito Úmido	2015	-4,1	Extremamente Seco
2006	2,4	Muito Úmido	2016	-2,0	Muito Seco
2007	0,7	Úmido	2017	-2,9	Muito Seco
2008	4,3	Extremamente Úmido	2018	-1,0	Seco
2009	8,1	Extremamente Úmido	2019	-1,8	Seco
2010	1,2	Úmido	2020	1,7	Úmido
2011	2,8	Muito Úmido	2021	-3,2	Muito Seco
2012	-5,7	Extremamente Seco	2022	-4,8	Extremamente Seco
2013	-0,4	Seco	2023	-2,8	Muito Seco

Em consonância com os anos de seca identificados por meio do Índice de Anomalia de Chuvas (IAC), especialmente nos períodos mais

recentes da série analisada, observou-se uma predominância de anomalias negativas sobre a área da Caatinga, com eventos classificados entre

"seco" e "extremamente seco". Esse padrão evidencia uma tendência crescente de ocorrência de secas prolongadas na região semiárida brasileira.

Ao analisar a correlação entre os eventos El Niño e La Niña (ENOS) e os valores de anomalias de precipitação, observa-se que, embora exista uma relação reconhecida entre esses fenômenos e a variabilidade climática no Brasil, tal correlação não se manifesta de forma linear no bioma Caatinga. Por exemplo, o ano de 2006, marcado pelo El Niño, apresentou comportamento "Muito Úmido", assim como 2009, classificado como "Extremamente Úmido". Em contrapartida, os anos de 2015 e 2016, também sob influência do El Niño, apresentaram anomalias de "Extremamente Seco" e "Muito Seco", respectivamente. Já os anos de 2017 e 2018, mesmo com a ocorrência de La Niña, foram secos. Por outro lado, 2007, 2008, 2011, 2020 e 2021, também sob La Niña, registraram umidade acima da média. Essas discrepâncias sugerem que os efeitos dos ENOS sobre o semiárido brasileiro são modulados possivelmente por condições locais e regionais, reforçando a importância de um monitoramento climático contínuo e aprofundado (INPE, 2025).

Tais comportamentos reforçam a preocupação sob o cenário de intensificação da aridez e variabilidade climática na região, evidenciando a necessidade de atenção quanto aos impactos ambientais, sociais e econômicos decorrentes da redução da precipitação ao longo do tempo. Entre os anos de 2012 e 2017, a região Nordeste, que abriga o bioma Caatinga, enfrentou uma das secas mais severas já registradas, conforme destacado por Santana e Santos (2020) em relatório do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). Estiagens prolongadas comprometeram o abastecimento de água para consumo humano e afetaram diretamente diversas atividades produtivas, exigindo respostas efetivas por parte das políticas públicas, diante do elevado número de municípios em situação de alerta.

De encontro com esse cenário de crescente vulnerabilidade climática, o Primeiro Relatório de Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas projeta um aumento significativo da temperatura do ar e da frequência de eventos extremos no Brasil. Nesse panorama, a região Nordeste destaca-se como uma das mais vulneráveis do ponto de vista socioeconômico e ambiental. Para o semiárido, espera-se um aumento no número de meses com déficit hídrico (processo de aridização). Especificamente para o bioma Caatinga, as projeções indicam um aumento de até 4 °C na temperatura do ar próximo à superfície e uma

redução de até 0,3 mm/dia na precipitação até o ano de 2100 (Torres et al., 2017).

Conclusão

A análise espaço-temporal dos parâmetros climáticos incidentes sobre o bioma da Caatinga permitiu identificar padrões relevantes e evidenciar mudanças significativas nas condições ambientais da região nos últimos 20 anos. Os resultados apontaram que, embora a média anual de precipitação (576 mm), umidade relativa (55,6%) e temperatura (24,6°C) mantenha-se dentro dos limites descritos em estudos anteriores, os dados mais recentes demonstram uma tendência preocupante de redução da umidade e da precipitação, associada ao aumento da ocorrência de anomalias negativas. A aplicação do IAC reforça este cenário ao revelar que a maioria dos anos apresentou índices negativos, indicando maior frequência e intensidade de secas, posterior a 2012. Tais padrões evidenciam a crescente vulnerabilidade climática da Caatinga, com forte tendência à aridização e desertificação, especialmente em sua porção central, que apresenta os menores índices de umidade e precipitação, além das maiores temperaturas médias anuais. Essa ameaça já foi apontada por outros estudos, como o de Costa et al. (2020), que destacam o avanço da desertificação no Brasil, com maior incidência na região Nordeste.

Diante desse contexto, este estudo reforça a urgência do monitoramento contínuo das variáveis climáticas na região, tanto para fins de pesquisa quanto para subsidiar políticas públicas voltadas à mitigação dos impactos da variabilidade climática, principalmente quanto ao aumento da ocorrência de secas. É fundamental que se priorize a implementação de medidas que promovam a conservação dos recursos hídricos, o uso sustentável da terra e o desenvolvimento de práticas agrícolas resilientes ao clima. Além disso, a compreensão aprofundada dessas alterações no clima do bioma é essencial para garantir a preservação de seus ecossistemas e a qualidade de vida de sua população frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas.

Agradecimentos

Esta pesquisa foi financiada pela FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), processo n° 2023/12713-3. Os agradecimentos estendem-se também à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), processo n° 88887.959938/2024-00.

Referências

- Andrade, M.C.O., 1998. A terra e o homem no Nordeste: contribuição ao estudo da questão agrária no Nordeste. 6. ed. Recife: Editora Universitária da UFPE.
- Araújo, E.L., Moraes Neto, J.M., Sousa, F.A.S., 2009. Análise climática da bacia do rio Paraíba – índice de anomalia de chuva (IAC). Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia [Online] 6(3). Disponível:<http://ferramentas.unipinhal.edu.br/engenhariaambiental/viewarticle.php?id=344&locale=e>. Acesso: 2 maio 2025.
- Carpenedo, C.B., Lima, M.P., 2022. Padrões climáticos dos extremos chuvosos em Uberlândia – MG. Revista Brasileira de Climatologia 31, 486–508.
- Costa, R.L., Baptista, G.M.M., Gomes, H.B., Silva, F.D.S., Rocha Junior, R.L., Salvador, M.D., Herdies, D.L., 2020. Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014. Weather and Climate Extremes [Online] 28, 100254. Disponível: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212094719300763>. Acesso: 2 maio 2025.
- Francisco, P.R.M., Chaves, I.B., Lima, E.R.V., Bandeira, M.M., Silva, B.B., 2012. Mapeamento da Caatinga com uso de geotecnologia e análise da umidade antecedente em bacia hidrográfica. Revista Brasileira de Geografia Física 5(3), 676–693.
- Freire, N.C.F., Moura, D.C., Silva, J.B., Pacheco, A.P., 2020. Mapeamento e análise espectro-temporal das unidades de conservação de proteção integral da administração federal no bioma Caatinga. Brazilian Journal of Development 6(5), 24773–24781.
- Freitas, M.A.S., 2004. A previsão de secas e a gestão hidroenergética: o caso da Bacia do Rio Paraíba no nordeste do Brasil. Anais Seminário Internacional sobre Represas y Operación de Embalses. Disponível: <https://www.researchgate.net/publication/275958581>.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2024. IBGE define bioma predominante em cada município brasileiro para fins estatísticos. Brasília. Disponível: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/40519-ibge-define-bioma-predominante-em-cada-municipio-brasileiro-para-fins-estatisticos>. Acesso: 20 mar. 2025.
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia, 2025. Glossário Meteorológico. Disponível: <https://portal.inmet.gov.br/glossario/glossario>. Acesso: 9 mar. 2025.
- INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2025. Monitoramento do El Niño/Oscilação Sul (ENOS). Disponível: <http://enos.cptec.inpe.br/>. Acesso: 10 jul. 2025.
- INSA. Instituto Nacional do Semiárido, 2025. O Semiárido Brasileiro. Brasília. Disponível: <https://www.gov.br/insa/pt-br/semi-arido-brasileiro>. Acesso: 20 mar. 2025.
- Lima, A.F.B., Ferreira, J.B., Moreira, J.G.C., Nascimento, L.O., Santos, D.M., Santos, V.B., Araújo, D.R., 2023. Distribuição espaço-temporal das anomalias de precipitação pluviométrica no Acre. Revista Brasileira de Geografia Física 16(2), 741–754.
- Lucena, R.L., Steinke, E.T., 2015. Fatores geográficos e padrões de circulação atmosférica como base à compreensão do clima semiárido quente da região Nordeste. Anais de Evento, Revista WIASB.
- Melo, J.O., Dantas-Medeiros, R., Moreira, L.G.L., Giordani, R.B., Zucolotto, S.M., 2023. A Caatinga: um bioma exclusivamente brasileiro. Ciência e Cultura 75(4), 01–09.
- MMA. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2022. Caatinga. Brasília. Disponível: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/biodiversidade-e-biomas/biomas-e-ecossistemas/biomas/caatinga>. Acesso: 24 mar. 2025.
- Moura, M.S.B., Sobrinho, J.E., Silva, T.G.F., Souza, W.M., 2019. Aspectos meteorológicos do Semiárido brasileiro. Infoteca-E, Embrapa, cap. 2, 85–104.
- Moura, M.S.B., 2021. Clima. In: Bioma Caatinga. Disponível: <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/bioma-caatinga/clima>. Acesso: 28 mar. 2025.
- Oliveira, D.M., Reboita, M.S., Rocha, R.P., 2018. A influência da topografia da região sul de Minas Gerais nas variáveis atmosféricas simuladas com o RegCM4. Revista Brasileira de Geografia Física [Online] 11(3), 758–772. Disponível: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbge/article/view/234311>. Acesso: 18 abr. 2025.
- Oliveira, P.V.A., Elmira, M.A.T., Macedo, D.R., Nero, M.A., 2024. Estudo comparativo dos interpoladores espaciais IDW e SPLINE para

- dados pluviométricos no Norte de Minas Gerais. *Cadernos do Leste* 24(24).
- Rooy, M.P.V., 1965. A Rainfall Anomaly Index (RAI), Independent of the Time and Space. *Notas* 14, 43–48.
- Santana, A.S., Santos, G.R., 2020. Impactos da seca de 2012–2017 na região semiárida do Nordeste: notas sobre a abordagem de dados quantitativos e conclusões qualitativas. *Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, Boletim Regional, Urbano e Ambiental* 22.
- Santos, E.F.N., Sousa, I.F., Leite, I.V., 2022. Regiões homogêneas em Sergipe agrupadas através dos índices climáticos. *Revista Brasileira de Meteorologia* 37(4), 477–489.
- Santos, M.G., Oliveira, M.T., Figueiredo, K.V., Falcão, H.M., Arruda, E.C.P., Almeida-Cortez, J., Sampaio, E.V.S.B., Ometto, J.P.H.B., Menezes, R.S.C., Oliveira, A.F.M., Pompelli, M.F., Antonino, A.C.D., 2014. Caatinga, the Brazilian dry tropical forest: can it tolerate climate changes? *Theoretical and Experimental Plant Physiology* 26(1), 83–99.
- Santos, R.S., Lira, D.R., Cavalcanti, L.C.S., 2023. O semiárido e o sertão nordestino na formação do território brasileiro. *Revista GeoNordeste* 34(2).
- Souza, B.I., Artigas, R.C., Lima, E.R.V., 2015. Caatinga e desertificação. *Mercator* 14(1), 131–150.
- Tabarelli, M., Legal, I.R., Scarano, F.R., Silva, J.M.C., 2018. Caatinga: legado, trajetória e desafios rumo à sustentabilidade. *Ciência e Cultura* 70(4), 25–29.
- Torres, R.R., Lapola, D.M., Gamarra, N.L.R., 2017. Future Climate Change in the Caatinga. In: Silva, J.M.C., Leal, I.R., Tabarelli, M. (Eds.). *Caatinga: The Largest Tropical Dry Forest Region in South America*. New York: Springer, 383–410.
- FT. Universidade Federal do Tocantins, 2025. Qual a relação entre umidade relativa do ar e precipitação? Disponível: <https://www.uft.edu.br/campus/palmas/laboratorios/laboratorio-de-meteorologia-e-climatologia/perguntas-e-respostas/qual-a-relacao-entre-umidade-relativa-do-ar-e-precipitacao>. Acesso: 15 abr. 2025.
- WWF-Brasil. 2025. Bioma Caatinga. WWF-Brasil. Disponível: https://www.wwf.org.br/nossoscontudos/biomas/bioma_caatinga/. Acesso: 2 abr. 2025.