

# **CENÁRIOS CLIMÁTICOS FUTUROS PARA O MUNICÍPIO DE UMARIZAL-RN: ANÁLISE REGIONALIZADA MULTIMODELO SOB OS CENÁRIOS RCP 4.5 E RCP 8.5**

Fernando Henrique Paiva de Oliveira <sup>1</sup>

Jacimária Fonseca de Medeiros <sup>2</sup>

Max Anjos <sup>3</sup>

## **RESUMO**

Este estudo analisa projeções de temperatura média anual e precipitação total anual para o município de Umarizal-RN no período de 2010–2099, com base em quatro experimentos regionalizados pelo modelo ETA (HadGEM2-ES, MIROC5, CanESM2 e BESM), sob os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. As projeções foram comparadas ao período histórico (1973–2009) para avaliar tendências e divergências intermodelos. Os resultados indicam que o aquecimento é o sinal mais consistente, sobretudo no cenário de altas emissões, enquanto a precipitação apresenta elevada incerteza, variando entre reduções expressivas e manutenção dos totais anuais. A abordagem multimodelo reforça a necessidade de considerar diferentes cenários no planejamento territorial em regiões semiáridas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Projeções climáticas; Análise multimodelo; Semiárido brasileiro; Vulnerabilidade climática.

## **FUTURE CLIMATE SCENARIOS FOR THE MUNICIPALITY OF UMARIZAL-RN, BRAZIL: REGIONALIZED MULTIMODEL ANALYSIS UNDER THE RCP 4.5 AND RCP 8.5 SCENARIOS**

## **ABSTRACT**

This study analyzes projections of annual mean temperature and total precipitation for Umarizal-RN (Brazil) from 2010 to 2099, based on four ETA regional climate experiments (HadGEM2-ES, MIROC5, CanESM2 and BESM) under RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios. Projections were compared to the historical baseline (1973–2009) to assess trends and intermodel differences. Results indicate that warming is the most consistent signal, especially under high emissions, while precipitation shows substantial uncertainty, ranging from marked reductions to maintenance of annual totals. The multimodel approach highlights the importance of incorporating multiple climate scenarios into territorial planning in semi-arid regions.

**KEYWORDS:** Climate projections; Multimodel analysis; Brazilian semi-arid; Climate vulnerability

## **ESCENARIOS CLIMÁTICOS FUTUROS PARA EL MUNICIPIO DE UMARIZAL-RN, BRASIL: ANÁLISIS REGIONALIZADO MULTIMODELO BAJO LOS ESCENARIOS RCP 4.5 Y RCP 8.5**

## **RESUMEN**

Este estudio analiza proyecciones de temperatura media anual y precipitación total anual para el municipio de Umarizal-RN (Brasil) en el período 2010–2099, utilizando cuatro experimentos regionalizados mediante el modelo ETA (HadGEM2-ES, MIROC5, CanESM2 y BESM), bajo

<sup>1</sup> Discente do Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGEO) da Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (UERN); fernando20251001017@alu.uern.br

<sup>2</sup> Profa. Dra. do Departamento de Geografia (DGE) e do Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGEO) | Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (UERN); jacimariamedeiros@uern.br

<sup>3</sup> Prof. Dr. do Departamento de Geociências - Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF); max.anjos@ufjf.br

los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Las proyecciones fueron comparadas con el período histórico (1973–2009) para evaluar tendencias y divergencias entre modelos. Los resultados indican que el calentamiento es la señal más consistente, especialmente en el escenario de altas emisiones, mientras que la precipitación presenta elevada incertidumbre. El enfoque multimodelo refuerza la necesidad de considerar diferentes escenarios en la planificación territorial de regiones semiáridas.

**PALABRAS CLAVE:** Proyecciones climáticas; Análisis multimodelo; Semiárido brasileiro; Vulnerabilidad climática

## INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas constituem um dos principais desafios ambientais, sociais e territoriais do século XXI, com impactos que se manifestam de forma desigual no espaço geográfico. Embora se trate de um fenômeno de natureza global, seus efeitos se expressam de maneira diferenciada em escalas regionais e locais, especialmente em áreas marcadas por vulnerabilidades socioambientais históricas, como o Semiárido brasileiro. Relatórios sucessivos do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) indicam, com elevado grau de confiança, o aumento das temperaturas médias globais, alterações nos regimes de precipitação e intensificação de eventos extremos, com projeções particularmente preocupantes para regiões de clima seco e semiárido (IPCC, 2021).

No contexto brasileiro, diversos estudos têm apontado o Nordeste como uma das regiões mais sensíveis às mudanças climáticas, em razão da combinação entre variabilidade climática natural, limitação hídrica estrutural e desigualdades socioeconômicas (Marengo & Valverde, 2007; PBMC, 2014). O aumento da temperatura do ar, aliado à tendência de redução ou maior irregularidade das chuvas, tende a intensificar processos como secas prolongadas, estresse hídrico, insegurança alimentar e degradação ambiental, ampliando as vulnerabilidades territoriais já existentes (Marengo, 2018).

Nesse cenário, a análise das mudanças climáticas em escala local assume papel estratégico. A abordagem local não se contrapõe às análises globais ou regionais, mas representa um refinamento espacial que permite captar especificidades territoriais, socioambientais e climáticas que frequentemente se perdem em recortes mais amplos. Conforme destacam Espindola e Ribeiro (2020), a incorporação da dimensão climática no planejamento municipal ainda é incipiente no Brasil, o que reforça a necessidade de estudos que subsidiem diagnósticos mais detalhados e contextualizados.

As projeções climáticas constituem instrumentos analíticos fundamentais nesse processo, pois permitem explorar cenários futuros plausíveis a partir da simulação do

comportamento do sistema climático sob diferentes trajetórias de emissões de gases de efeito estufa. É importante destacar que tais projeções não configuram ações de mitigação ou adaptação, mas sim ferramentas científicas de apoio à análise, à antecipação de riscos e à formulação de estratégias de planejamento territorial e ambiental (IPCC, 2021). Dessa forma, seu papel é diagnóstico e prospectivo, oferecendo subsídios para a tomada de decisão, especialmente em regiões vulneráveis.

Grande parte das pesquisas que utilizam projeções climáticas no Brasil concentra-se em escalas regionais ou em grandes recortes espaciais, como a região Nordeste ou bacias hidrográficas extensas (Sales *et al.*, 2015; Zákha *et al.*, 2021). Embora esses estudos sejam fundamentais para a compreensão de padrões climáticos de larga escala, eles nem sempre contemplam as especificidades locais, sobretudo em municípios de pequeno porte, onde os impactos das mudanças climáticas tendem a ser sentidos de forma mais direta e com menor capacidade adaptativa.

Nesse sentido, estudos em escala municipal têm ganhado relevância nos últimos anos, ao evidenciar como as tendências climáticas globais e regionais se materializam em territórios específicos. Trabalhos como o de Alves, Martins e Reboita (2021) demonstram que análises locais, quando articuladas à climatologia e ao conhecimento geográfico do território, contribuem para a identificação de riscos climáticos e vulnerabilidades socioambientais de forma mais precisa.

Inserido nesse debate, o município de Umarizal-RN, localizado no Semiárido potiguar, apresenta características naturais e socioespaciais que o tornam particularmente sensível às mudanças climáticas, como a dependência de recursos hídricos limitados, a predominância de atividades agropecuárias de base climática e a exposição recorrente a períodos de estiagem. Compreender como variáveis fundamentais, como temperatura média e precipitação, podem se comportar ao longo do século XXI é essencial para subsidiar análises territoriais e ambientais em escala local.

Diante disso, este estudo tem como objetivo analisar projeções climáticas de temperatura média e precipitação para o município de Umarizal-RN ao longo do período de 2010 a 2099, a partir de diferentes experimentos climáticos regionais associados aos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. Busca-se comparar o comportamento projetado dessas variáveis entre experimentos, discutindo suas convergências, divergências e implicações para a compreensão das tendências climáticas locais. A pesquisa parte do pressuposto de que, mesmo considerando

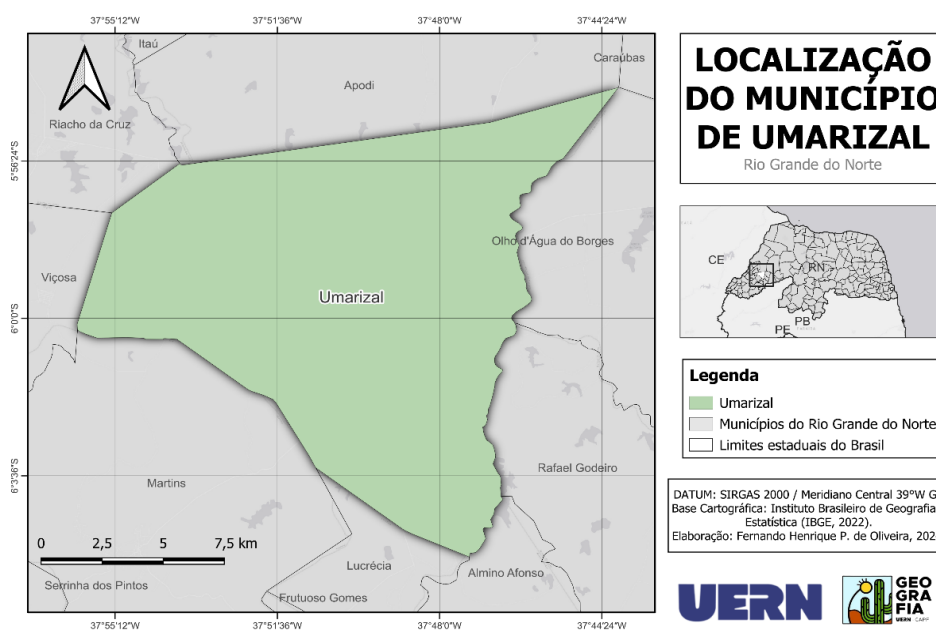
as incertezas inerentes à modelagem climática, a análise comparativa de projeções permite identificar padrões consistentes de aquecimento e alteração no regime pluviométrico, relevantes para o entendimento das vulnerabilidades climáticas do município.

## MATERIAL E MÉTODOS

### CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O presente estudo concentra-se no município de Umarizal, localizado no estado do Rio Grande do Norte, conforme a divisão territorial estabelecida pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017), faz parte da região geográfica intermediária de Mossoró e da região imediata de Pau dos Ferros. Geograficamente, o município está situado nas coordenadas 05°59'27,6" de Latitude Sul e 37°48'50,4" de Longitude Oeste, fazendo fronteira com outros nove municípios conforme apresentado na Figura 1.

**Figura 1** - Mapa de Localização do município de Umarizal-RN



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Do ponto de vista geológico, conforme apontado pela CPRM (2010), o município está inserido na província Borborema, com grande parte de seu território abrangendo áreas dos Granitóides Brasileiros. Sua localização específica situa-se a leste da Zona de Cisalhamento de Portalegre e a oeste do domínio Rio Piranha Seridó.

Quanto às características climáticas, estudos como o de Noronha (2023) classificam o clima de Umarizal-RN como semiárido, considerando o contexto regional em que o município está inserido. Lima (2011) reforça a importância de uma compreensão aprofundada das condições geográficas do Semiárido. Tendo em vista que nesse mesmo cenário Marengo e

Valverde (2007) preveem, para o semiárido nordestino a intensificação das elevadas temperaturas, baixa precipitação e irregularidade nas chuvas até o final do século XXI.

Entretanto, uma análise mais detalhada realizada por Oliveira *et al.* (2023), que considerou fatores como precipitação, temperatura e balanço hídrico ao longo de 30 anos, classificou o clima do município como Megatérmico Subúmido Seco, com pequeno ou nenhum excedente hídrico. As duas classificações não são necessariamente contraditórias, mas são complementares. Enquanto a primeira reflete o contexto regional, a segunda detalha as características específicas do município.

## ANÁLISE EXPERIMENTAL

A pesquisa caracteriza-se como exploratória e analítica, adotando uma abordagem qualiquantitativa. As técnicas de pesquisa empregadas incluem análise estatística e revisão bibliográfica, com um recorte temporal de base de 1973 a 2009 e para as projeções climáticas de 2010 a 2099, focando em variáveis de temperatura e precipitação pluviométrica.

O desenvolvimento da pesquisa foi estruturado e dividido em diferentes etapas. A primeira consistiu no estabelecimento do embasamento teórico sobre as temáticas da pesquisa e a área de estudo, sendo possível compreender sobre o contexto que o município em questão está submetido, e ampliar o conhecimento sobre as projeções climáticas. A etapa subsequente, foi responsável pela caracterização climática do município, utilizando dados de precipitação total e temperatura média entre os anos de 1973 a 2009, os respectivos dados foram obtidos através da Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (Emparn) e da plataforma *Estima\_T*, seguindo metodologia de aquisição de dados similar à Medeiros (2016).

A próxima etapa envolveu a coleta de dados para a elaboração das projeções climáticas através da plataforma do Inpe, utilizando as seguintes configurações: Modelo regional ETA; Experimentos HadGEM-ES (Reino Unido), MIROC5 (Japão), BESM (Brasil) e CanESM2 (Canadá); Cenário RCP4.5 e RCP8.5; análise de temperatura média e precipitação total em frequência anual, abrangendo o período de 2010 a 2099. A combinação de dados foi escolhida através de uma série de testes e observações dos resultados prévios projetados com base nos resultados históricos.

Os resultados de todos os experimentos de projeções mais os dados climáticos históricos de Umarizal-RN foram confeccionados na plataforma do Excel, no formato de climograma, objetivando expressar simultaneamente a interação entre os elementos climáticos de

precipitação total (gráfico de colunas) e temperatura (gráfico de linha) ao longo dos anos, com os auxílios das respectivas linhas de tendências e suas graduais alterações.

Em relação à última etapa, consistiu-se na escrita após análise comparativa entre o perfil climático histórico (1973-2009) e o perfil climático projetado (2010-2099), permitindo a identificação de tendências nas mudanças climáticas e vulnerabilidades para a área de estudo de acordo com os resultados dos quatro diferentes experimentos. As projeções foram divididas em três períodos: 2010-2039 (próximo), 2040-2069 (intermediário) e 2070-2099 (distante), conforme estabelecido pelo INPE (2020). Os dados históricos e projetados foram processados e analisados com o software R (R Core Team, 2024).

Considerando a complexidade inerente aos sistemas climáticos e às técnicas de modelagem, este estudo reconhece limitações associadas à resolução espacial dos modelos, às incertezas dos cenários de emissões e à ausência de procedimentos formais de validação estatística nesta etapa da pesquisa. Conforme destacado por Guimarães *et al.* (2016), projeções climáticas devem ser interpretadas como cenários plausíveis, e não como representações exatas do clima futuro.

Ainda assim, a utilização de múltiplos experimentos climáticos e diferentes cenários de emissões de GEE, permite uma análise comparativa que contribui para a identificação de padrões consistentes e tendências gerais, oferecendo subsídios iniciais para a compreensão das possíveis implicações das mudanças climáticas no município de Umarizal-RN.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base na análise dos climogramas projetados sob métrica de diferentes experimentos, sendo eles: HadGEM-ES, MIROC5, BESM e CanESM2, durante o período de 90 anos, podendo ser divididos e apresentados em três períodos, 2010-2039 (próximo), 2040-2069 (intermediário) e 2070-2099 (distante) de acordo com o (INPE, 2020), permitindo compreender a situação climática atual e destacar as tendências futuras para o clima do município de Umarizal-RN.

A Figura 2 representa o climograma de Umarizal-RN, apresentando de forma objetiva os dados de precipitação pluviométrica total (gráfico de barras) e temperatura média (gráfico de linhas) ao longo do período de 37 anos, entre 1973 e 2009. Essas informações são fundamentais para subsidiar as discussões das projeções climáticas, garantindo maior confiabilidade por meio da comparação com diferentes experimentos.

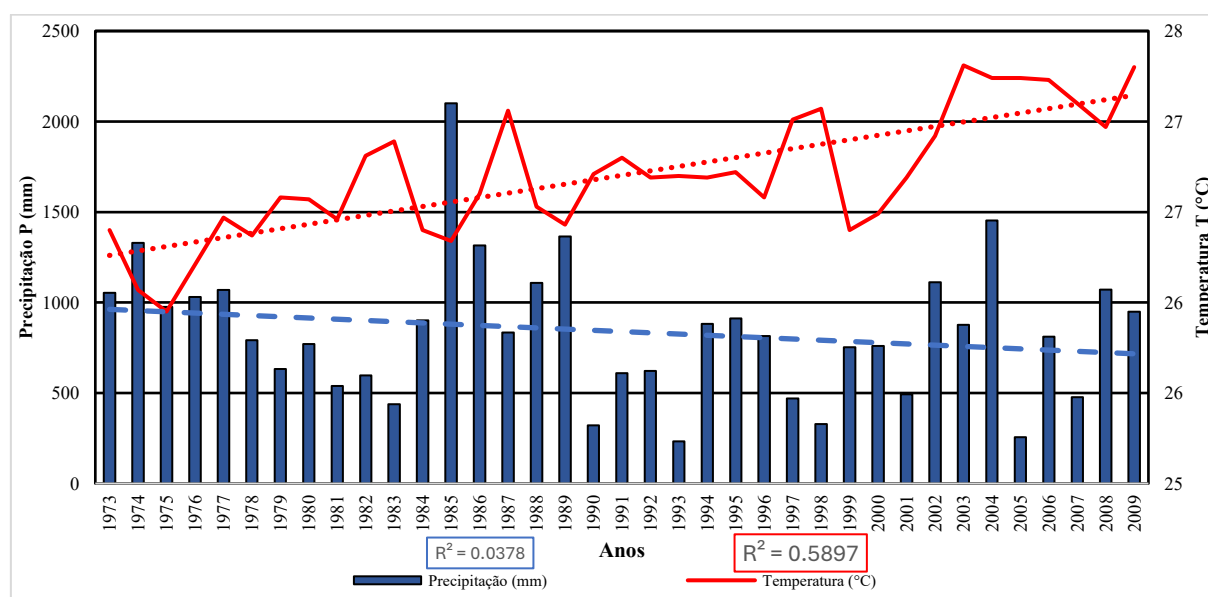
A precipitação média anual de 830 mm, embora ligeiramente superior ao limiar de 800 mm que define o Semiárido (Moura, Sobrinho e Silva, 2019), oculta forte irregularidade temporal. A amplitude pluviométrica, com pico de 2.101 mm em 1985 e mínimo de 233,8 mm em 1993, evidencia a ocorrência de extremos hídricos que dificultam o planejamento agrícola e o manejo dos recursos hídricos.

A linha de tendência negativa observada no climograma indica redução gradual dos volumes precipitados, sugerindo aumento da frequência de anos secos. Essa diminuição da oferta hídrica pode estar associada a ciclos oceânico-atmosféricos globais e a alterações no uso do solo, capazes de influenciar o microclima regional.

A temperatura média apresenta comportamento de ascensão mais linear e estatisticamente perceptível ( $R^2 = 0,5897$ ). A média térmica de 26,6 °C demonstra elevação consistente ao longo das décadas, passando de valores próximos a 26 °C na década de 1970 para médias frequentemente superiores a 27 °C nos anos 2000.

O ponto central da análise é a divergência entre as tendências observadas: aumento das temperaturas e redução da pluviosidade. Esse processo intensifica o déficit hídrico devido ao aumento da evapotranspiração potencial, indicando cenário de crescente vulnerabilidade climática e corroborando projeções de modelos climáticos globais que apontam aquecimento e maior aridez no Nordeste brasileiro.

**Figura 2** – Climograma de Umarizal-RN entre (1973 e 2009)



Fonte: Elaborado pelos autores a partir de dados da EMPAERN e DCA-UFCG (2024)

As Figuras 3 e 4 apresentam os climogramas projetados para o município de Umarizal-

RN no período de 2010 a 2099, a partir do modelo HadGEM2-ES, considerando os cenários de emissões RCP 4.5 e RCP 8.5. A análise integrada da precipitação anual acumulada e da temperatura média anual indica alterações progressivas no comportamento climático local ao longo do século XXI, com intensidades distintas conforme o cenário analisado.

No cenário RCP 4.5 (Figura 3), a precipitação anual apresenta elevada variabilidade interanual, com totais predominantemente entre 600 e 1.000 mm, característica típica do semiárido nordestino. Apesar dessa variabilidade, observa-se maior recorrência de anos com baixos acumulados pluviométricos nas décadas finais da série, especialmente após 2070, quando se intensificam registros inferiores a 400 mm. Segundo o PBMC (2014), a redução da regularidade das chuvas e o aumento da frequência de períodos secos configuram uma das principais manifestações das mudanças climáticas no semiárido brasileiro, o que reforça a coerência dos padrões projetados para o município.

A temperatura média anual no RCP 4.5 apresenta trajetória ascendente ao longo de todo o período analisado, partindo de valores próximos a 25,5–26,0 °C no início da série e atingindo patamares entre 27,5 e 28,0 °C nas últimas décadas do século, com picos superiores a 28 °C em anos específicos. De acordo com o IPCC (2021), mesmo em cenários intermediários de emissões, o aumento da temperatura média é uma resposta climática robusta em escala global, especialmente em regiões de baixa latitude, o que se reflete de forma consistente nas projeções locais. Observa-se ainda que anos mais secos tendem a coincidir com temperaturas médias mais elevadas, evidenciando o acoplamento entre disponibilidade hídrica e aquecimento superficial típico de áreas semiáridas.

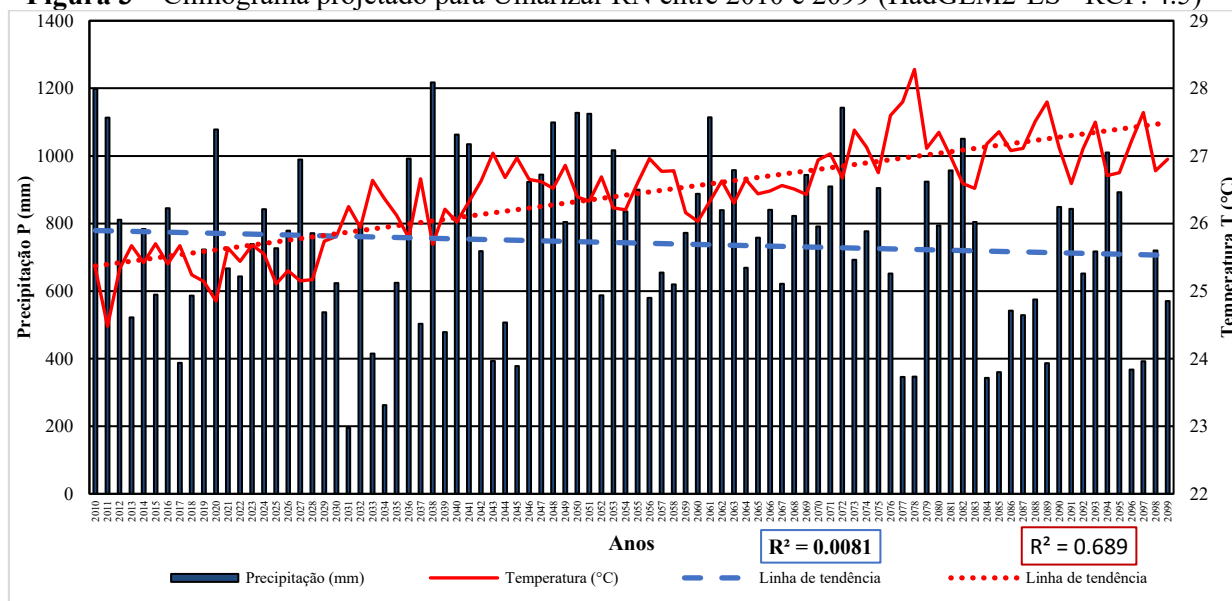
No cenário RCP 8.5 (Figura 4), as alterações tornam-se mais intensas. A precipitação mantém alta variabilidade interanual, com totais geralmente entre 500 e 900 mm, porém com maior frequência de anos secos ao longo de todo o período e intensificação de acumulados inferiores a 300–400 mm após 2070. De acordo com Angelotti, Sá e Melo (2009), a intensificação das estiagens e a maior irregularidade das chuvas constituem uma das principais ameaças climáticas ao semiárido brasileiro, com impactos diretos sobre os sistemas produtivos e a segurança hídrica, aspecto que se mostra compatível com os padrões projetados para Umarizal-RN.

Paralelamente, a temperatura média anual no RCP 8.5 apresenta aquecimento mais acentuado em relação ao cenário intermediário, superando de forma recorrente 29,0 °C a partir da segunda metade do século e alcançando valores próximos ou superiores a 30,0 °C nas décadas finais. Segundo o IPCC (2021), cenários de altas emissões tendem a intensificar

extremos térmicos, sobretudo em regiões semiáridas, ampliando o estresse climático e os riscos associados à exposição prolongada a temperaturas elevadas.

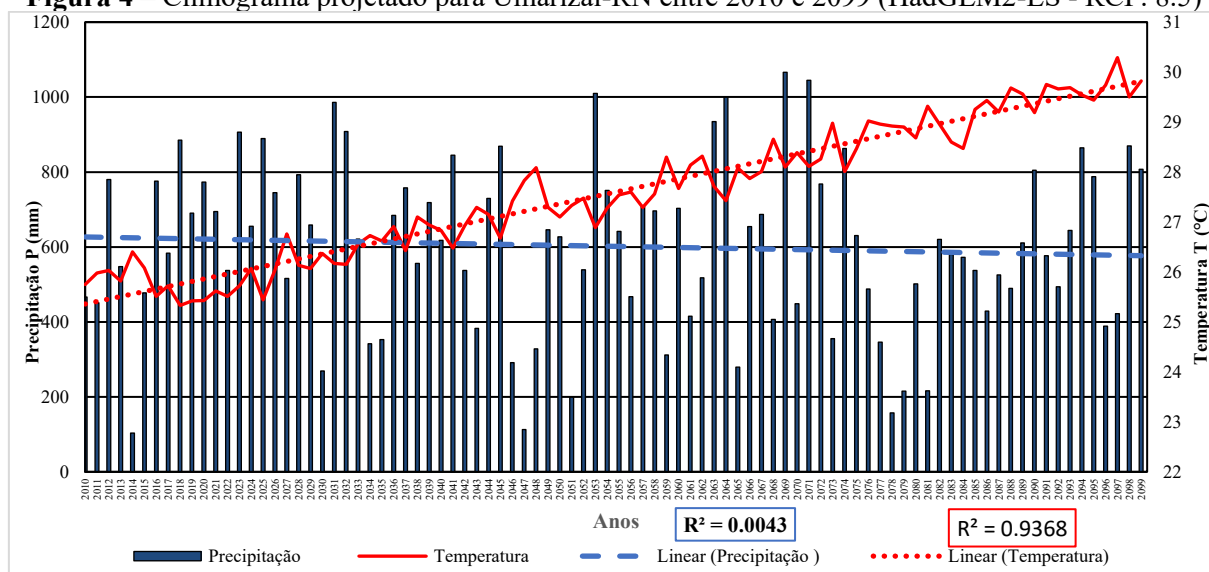
A comparação entre os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 evidencia que, embora ambos indiquem aquecimento progressivo e maior irregularidade das chuvas, o cenário de altas emissões projeta um aprofundamento desses processos, com maior magnitude térmica e maior recorrência de anos secos, reforçando a sensibilidade climática do município frente a diferentes trajetórias globais de emissões.

**Figura 3** – Climograma projetado para Umarizal-RN entre 2010 e 2099 (HadGEM2-ES - RCP. 4.5)



Fonte: Elaborado pelos autores, a partir de dados do INPE (2024)

**Figura 4** – Climograma projetado para Umarizal-RN entre 2010 e 2099 (HadGEM2-ES - RCP. 8.5)



Fonte: Elaborado pelos autores, a partir de dados do INPE (2026)

A análise dos climogramas projetados para o município de Umarizal-RN, segundo o experimento MIROC5, nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, evidencia comportamento distinto em relação aos demais experimentos e aos dados históricos. Em ambos os cenários, mantém-se o padrão observado nos outros modelos, com tendência de aumento da temperatura média do ar e redução da precipitação ao longo do tempo, com diferenças na intensidade dessas alterações.

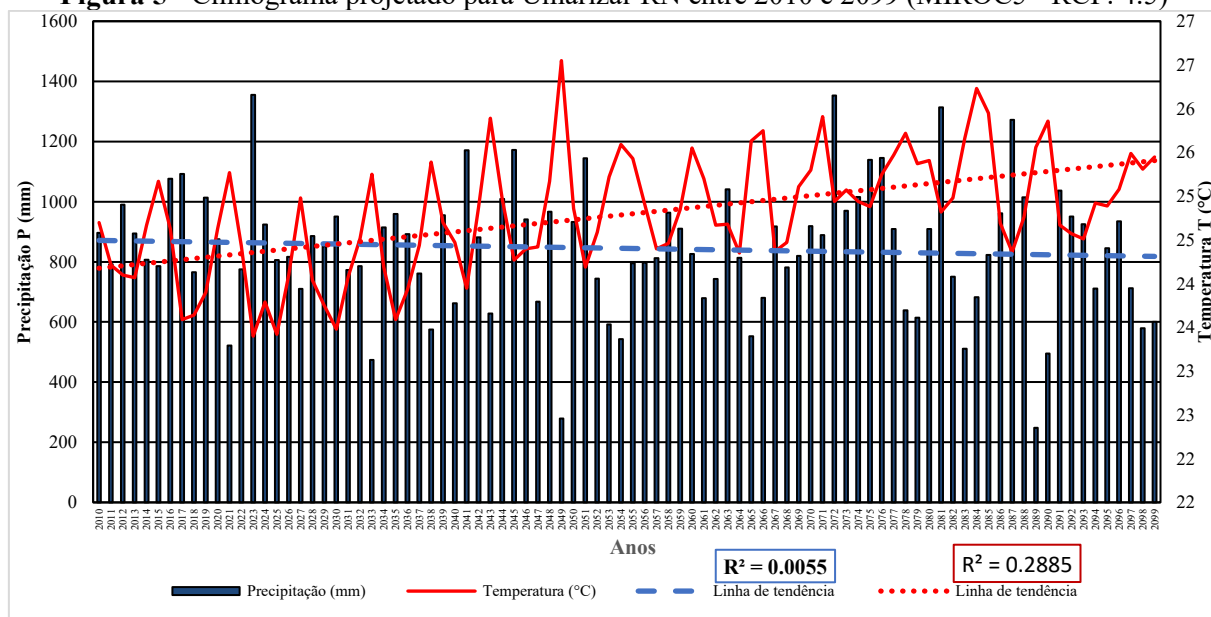
No cenário RCP 4.5, a precipitação apresenta elevada variabilidade interanual, com tendência de redução pouco expressiva e baixo coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,0055$ ), indicando fraca relação linear entre o tempo e os totais pluviométricos. A temperatura apresenta tendência crescente ( $R^2 = 0,2885$ ), indicando aquecimento gradual ao longo do período analisado, ainda marcado por oscilações.

No cenário RCP 8.5, as alterações tornam-se mais evidentes, sobretudo no comportamento térmico. A precipitação mantém a irregularidade, com tendência negativa mais acentuada e  $R^2 = 0,0626$ , indicando sinal mais consistente de redução pluviométrica em relação ao RCP 4.5. A temperatura apresenta forte tendência de elevação, com alto coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,7532$ ), apontando aquecimento mais intenso sob cenário de maiores emissões.

Os climogramas do experimento MIROC5 apresentam oscilações acentuadas nas médias de temperatura e nos totais de precipitação ao longo da série temporal, indicando elevada irregularidade climática. Essas variações podem estar relacionadas à atuação de mecanismos de variabilidade climática de grande escala, conforme discutido por Araújo (2012), especialmente pela influência dos fenômenos *El Niño* e *La Niña* no Nordeste brasileiro.

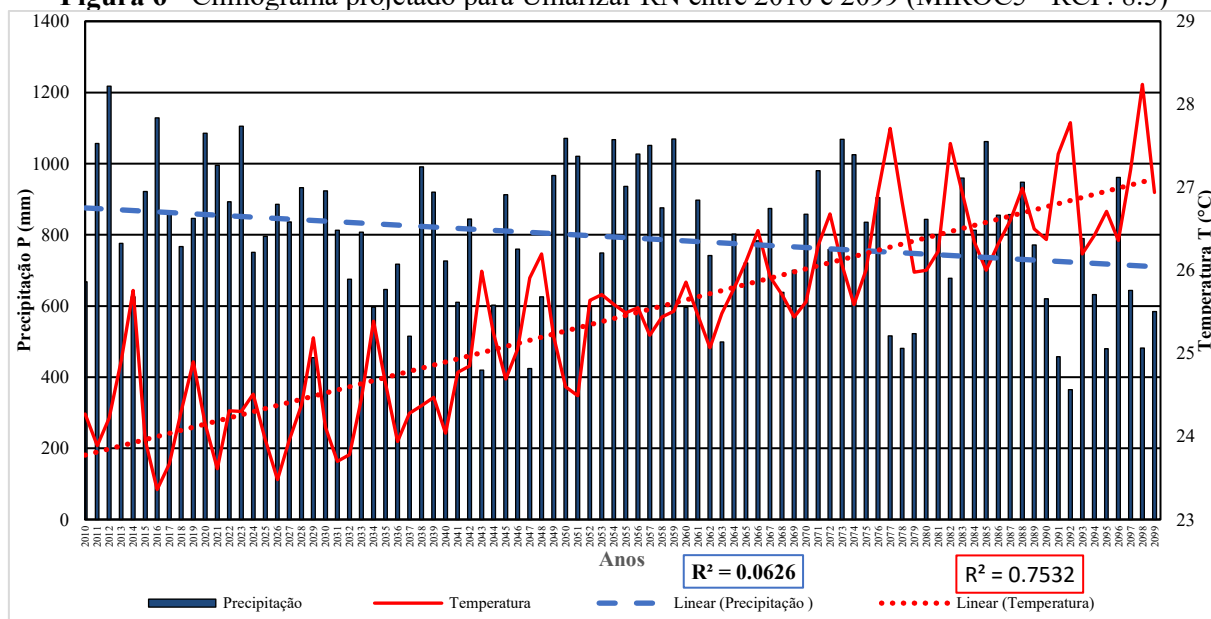
Nos anos finais da série, principalmente no cenário RCP 8.5, observam-se discrepâncias entre anos consecutivos, com contrastes nos totais de precipitação e nas médias térmicas. Esse comportamento reforça a intensificação da irregularidade climática em projeções de longo prazo e dialoga com Black, Galatto e Sousa (2024), que destacam o aumento da variabilidade das chuvas e seus efeitos sobre a insegurança hídrica no Brasil.

**Figura 5 - Climograma projetado para Umarizal-RN entre 2010 e 2099 (MIROC5 - RCP. 4.5)**



Fonte: Elaborado pelos autores, a partir de dados do INPE (2024)

**Figura 6 - Climograma projetado para Umarizal-RN entre 2010 e 2099 (MIROC5 - RCP. 8.5)**



Fonte: Elaborado pelos autores, a partir de dados do INPE (2026)

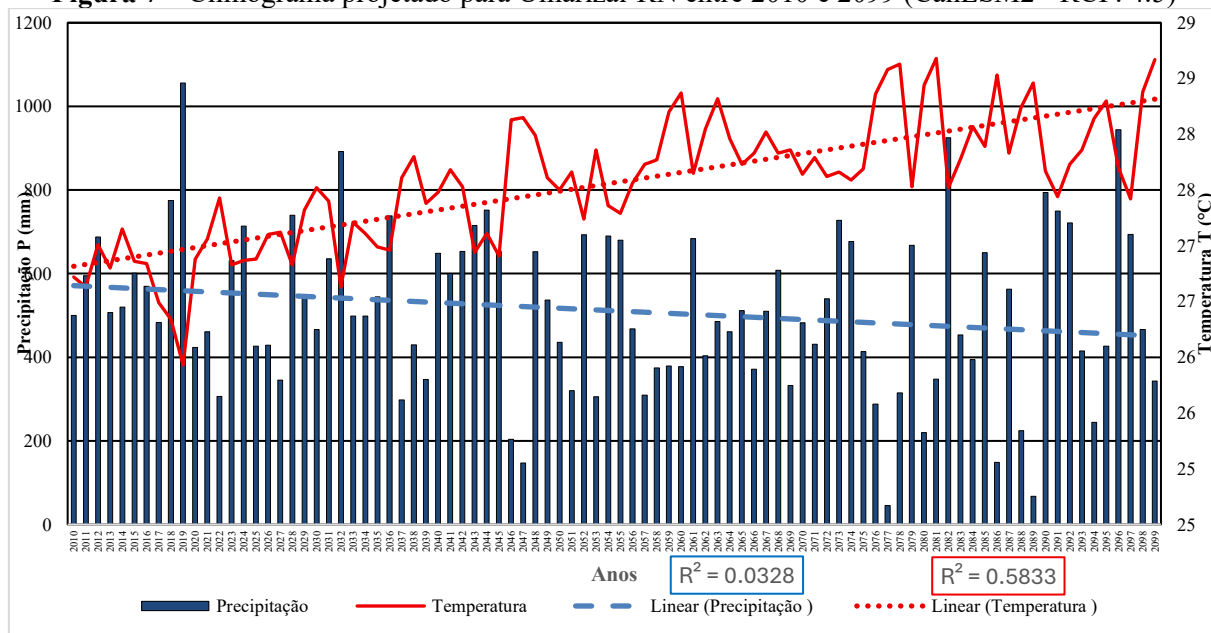
As Figuras 7 e 8 apresentam os climogramas projetados para o município de Umarizal-RN a partir do experimento CanESM2, nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, para o período de 2010 a 2099. De modo geral, ambos mantêm o padrão observado nos demais experimentos, caracterizado pela tendência de redução da precipitação associada ao aumento da temperatura média do ar, com intensidades distintas.

Na Figura 7, referente ao cenário RCP 4.5, a precipitação anual apresenta elevada variabilidade interanual, com anos próximos a 900 mm e outros com valores significativamente inferiores. A linha de tendência indica declínio ao longo do período, com baixo coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,0328$ ), evidenciando fraca relação linear, mas com sinal de redução. A temperatura apresenta tendência de elevação ( $R^2 = 0,5833$ ), indicando aquecimento progressivo, mais evidente na segunda metade da série.

Na Figura 8, correspondente ao cenário RCP 8.5, as alterações tornam-se mais expressivas, especialmente na precipitação. Observam-se oscilações acentuadas nos totais anuais, com valores extremamente baixos em anos como 2077 e 2089, quando os acumulados atingem 45,14 mm e 67,47 mm, respectivamente. A linha de tendência apresenta redução mais acentuada, com  $R^2 = 0,5378$ , indicando sinal mais robusto de declínio pluviométrico em relação ao RCP 4.5.

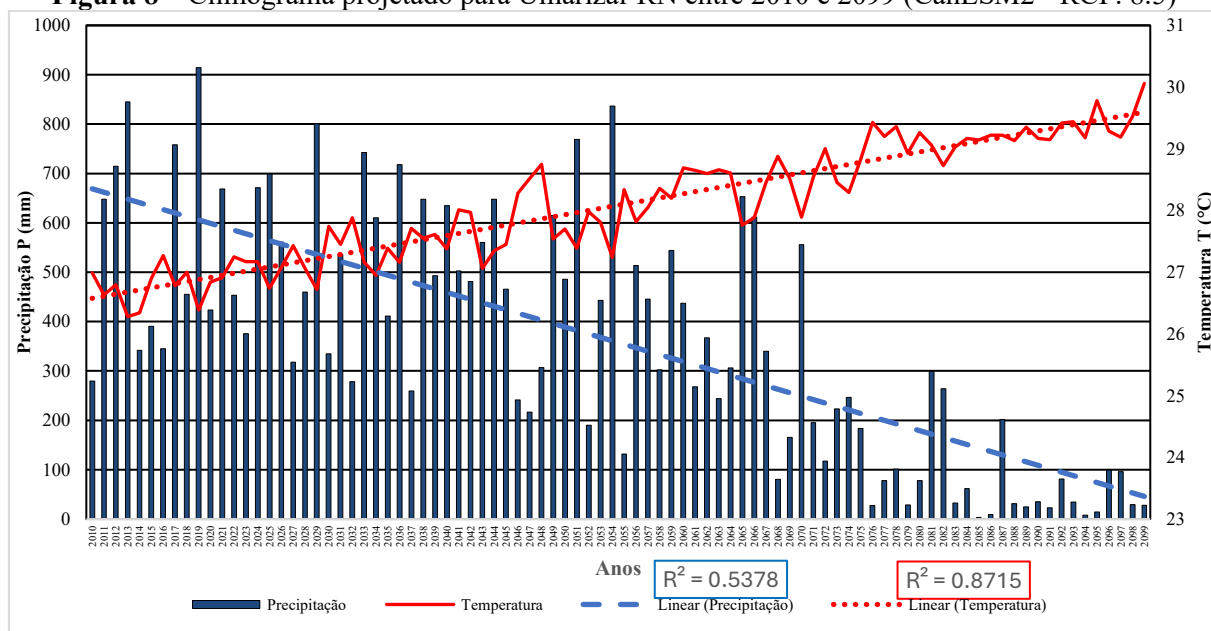
Em relação à temperatura no cenário RCP 8.5, observa-se aumento contínuo ao longo do período, com alto coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,8715$ ), evidenciando forte relação entre o tempo e a elevação térmica. O menor valor ocorre em 2019 (25,93 °C) e o maior em 2099 (28,67 °C). A média anual projetada é de 27,67 °C, representando incremento em relação à média histórica de 26,60 °C (1973–2009). Nos últimos 30 anos da projeção, a diferença em relação ao período histórico aproxima-se de 1,4 °C, valor compatível com as projeções globais apresentadas pelo IPCC (2020).

**Figura 7** – Climograma projetado para Umarizal-RN entre 2010 e 2099 (CanESM2 - RCP. 4.5)



Fonte: Elaborado pelos autores, a partir de dados do INPE (2024)

**Figura 8** – Climograma projetado para Umarizal-RN entre 2010 e 2099 (CanESM2 - RCP. 8.5)



Fonte: Elaborado pelos autores, a partir de dados do INPE (2026)

As Figuras 9 e 10 apresentam os climogramas projetados para o município de Umarizal-RN a partir do experimento BESM, nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, para o período de 2010 a 2099. De modo geral, o experimento projeta valores elevados de precipitação ao longo da série, associados ao aumento progressivo da temperatura média do ar em ambos os cenários.

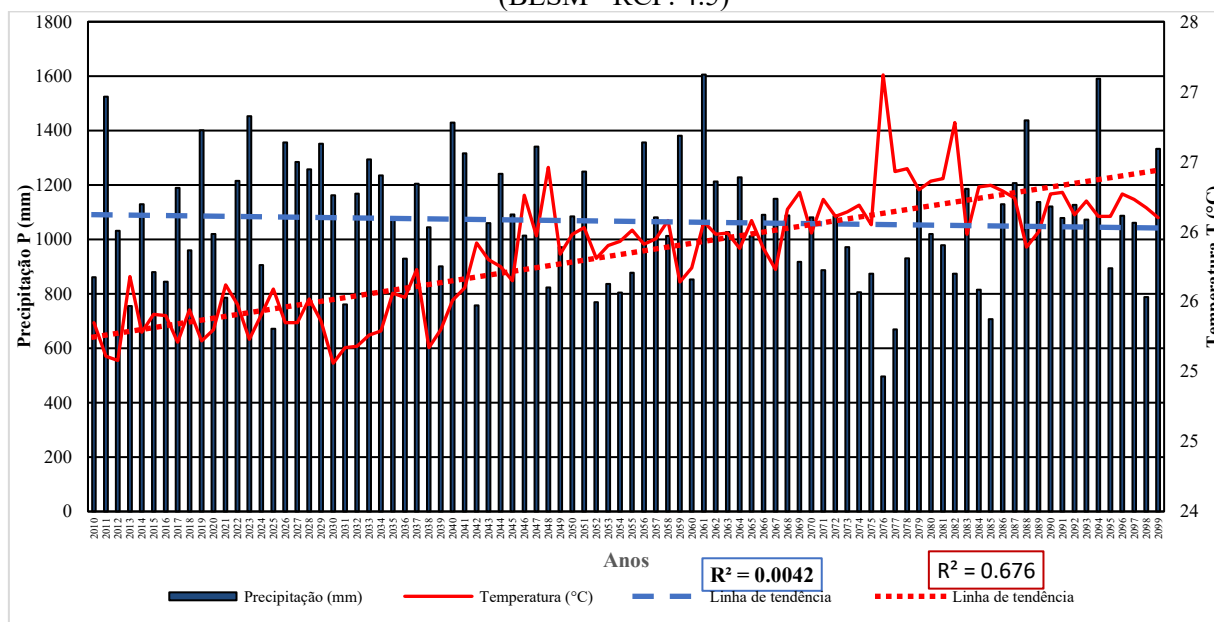
No cenário RCP 4.5, a precipitação apresenta elevada variabilidade interanual, com totais frequentemente superiores a 1000 mm. A linha de tendência indica leve redução, com coeficiente de determinação muito baixo ( $R^2 = 0,0042$ ), evidenciando fraca relação linear. A temperatura apresenta tendência de elevação ( $R^2 = 0,676$ ), indicando aquecimento progressivo, apesar das oscilações interanuais.

No cenário RCP 8.5, as alterações tornam-se mais evidentes. A precipitação mantém valores elevados, porém com tendência negativa mais perceptível ( $R^2 = 0,1091$ ), superior à observada no RCP 4.5, ainda que moderada. A temperatura apresenta forte tendência de elevação ( $R^2 = 0,8746$ ), com relação linear mais consistente, sobretudo nas últimas décadas.

Destaca-se a coexistência de elevados totais pluviométricos com tendência de redução ao longo do tempo, associada ao aumento contínuo da temperatura. Essa combinação indica que, mesmo com maiores volumes de chuva, o aquecimento pode intensificar perdas por evapotranspiração, conforme discutido por Sotchava (1977) e Bolson e Haonat (2016).

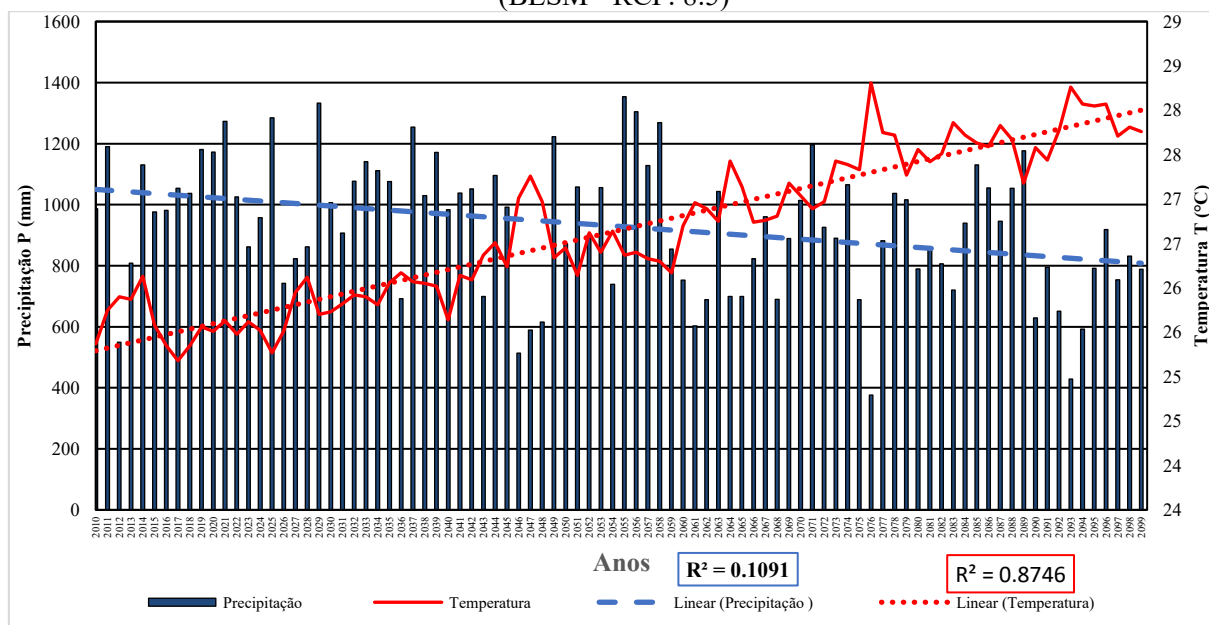
Assim, o experimento BESM aponta para cenário de aquecimento consistente e regime pluviométrico variável, com sinais de redução mais evidentes no cenário de maiores emissões, reforçando a importância da análise integrada entre temperatura e precipitação.

**Figura 9** – Climograma projetado para Umarizal-RN entre 2010 e 2099 (BESM - RCP. 4.5)



Fonte: Elaborado pelos autores, a partir de dados do INPE (2024)

**Figura 10** – Climograma projetado para Umarizal-RN entre 2010 e 2099 (BESM - RCP. 8.5)



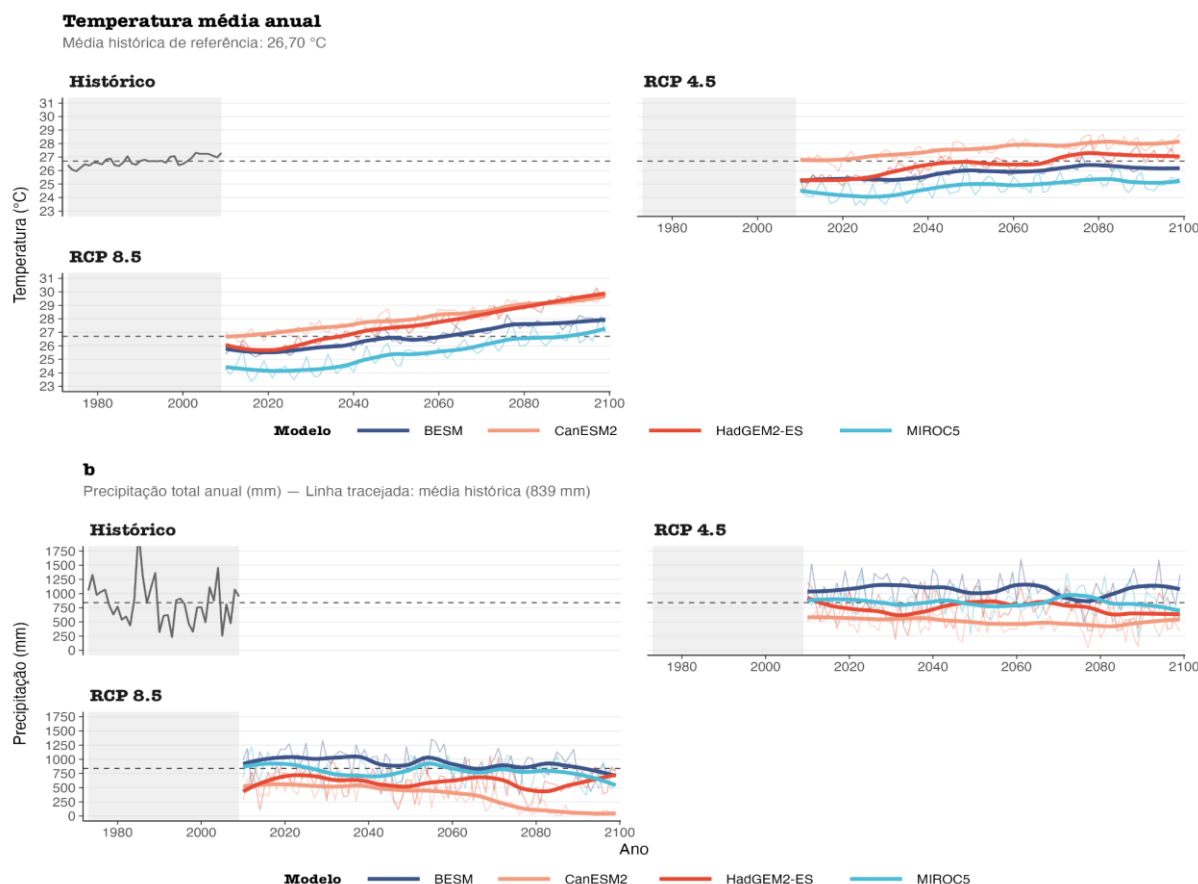
Fonte: Elaborado pelos autores, a partir de dados do INPE (2026)

## TENDÊNCIAS TEMPORAIS ENTRE OS MODELOS

A análise das séries temporais de temperatura média e precipitação anual para o período 2010–2099, em comparação com a linha de base histórica (1973–2009), demonstra a trajetória climática futura para Umarizal-RN (Figura 11). As linhas finas representam os dados anuais brutos, enquanto as linhas espessas indicam a tendência suavizada por meio do método LOESS. A linha tracejada horizontal corresponde à média do período histórico (1973–2009), permitindo a comparação direta entre os valores projetados e o comportamento climático passado.

Para a temperatura média (Figura 11a), observa-se um sinal preliminar de aquecimento e progressivo na maioria dos modelos analisados, particularmente no cenário de altas emissões (RCP 8.5). Os modelos HadGEM2-ES e CanESM2 projetam os aquecimentos mais acentuados, com as tendências ultrapassando  $+2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  em relação à média histórica no final do século. O modelo BESM indica um aquecimento mais modesto. No cenário RCP 4.5, o modelo MIROC5 se posiciona como um *outlier*, projetando temperaturas que permanecem consistentemente abaixo da média histórica durante quase todo o século.

**Figura 11** – Séries temporais de temperatura média anual (°C) e precipitação total anual (mm) para Umarizal-RN.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

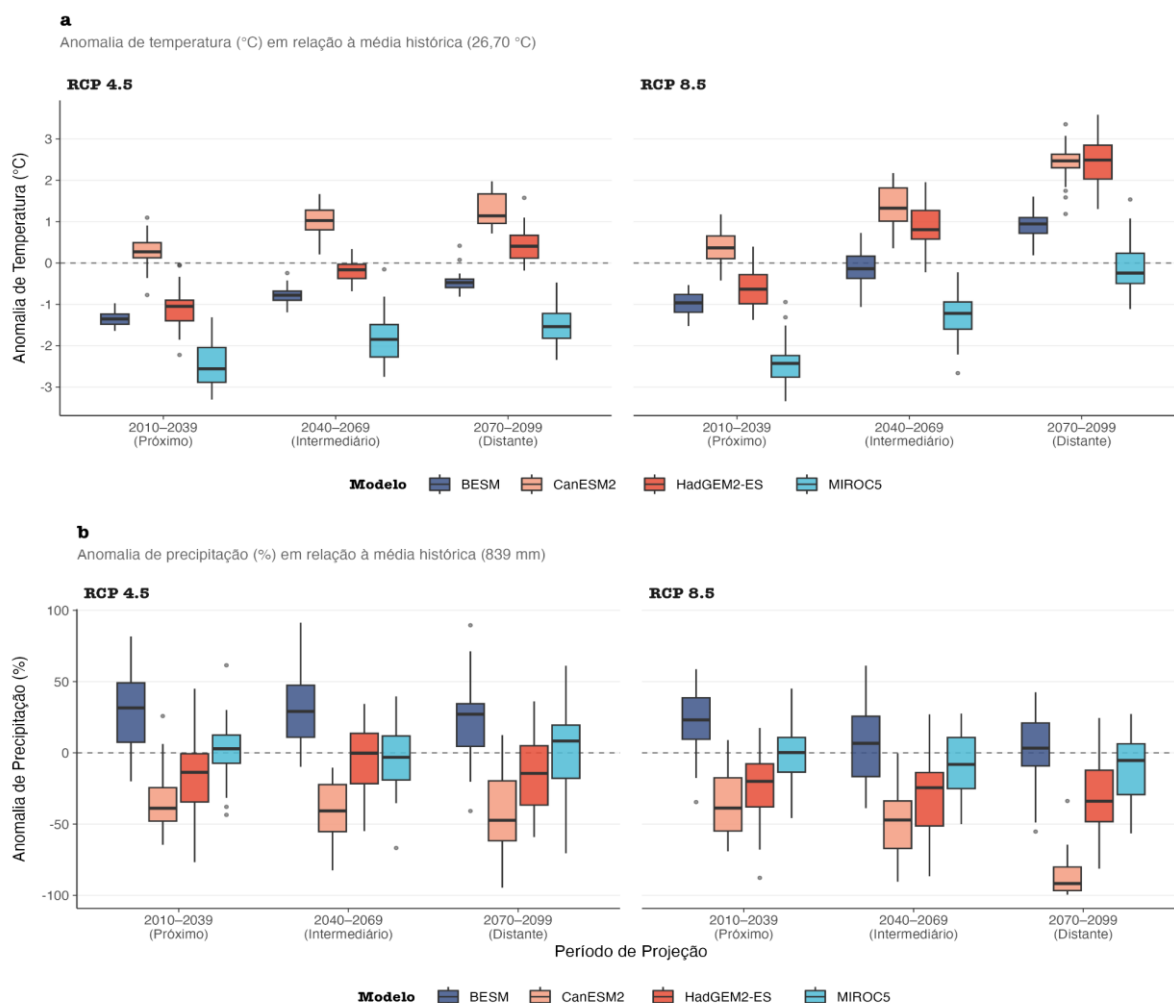
Para a precipitação (Figura 11b), a divergência entre os modelos é ainda mais destacada. O modelo CanESM2 projeta uma redução expressiva, notoriamente no cenário RCP 8.5, onde a tendência se aproxima de zero no final do século, o que poderia indicar um colapso do regime de chuvas com repercussões significativas para os setores produtivos e a sociedade. O modelo HadGEM2-ES também segue para uma tendência de redução, embora menos severa. O modelo BESM, contudo, projeta um discreto aumento e manutenção de totais pluviométricos acima da média histórica. O MIROC5, por sua vez, mostra uma leve tendência de declínio, mas com grande variabilidade interanual.

#### ANOMALIAS CLIMÁTICAS POR PERÍODOS FUTUROS

Para quantificar a magnitude das mudanças ao longo do século, as anomalias de temperatura e precipitação foram agregadas em três períodos de 30 anos: próximo (2010–2039), intermediário (2040–2069) e distante (2070–2099), como ilustrado na Figura 12. A análise considera a anomalia da temperatura média anual (°C) e da precipitação anual (%), em relação

à média do período histórico (1973–2009). Cada caixa representa a distribuição dos 30 valores anuais de cada modelo para o período e cenário correspondente, permitindo visualizar a mediana da mudança, a variabilidade e os extremos (tamanho da caixa e bigodes).

**Figura 12** – Distribuição das anomalias de temperatura média anual (°C) e precipitação anual (%) para Umarizal-RN, em relação ao período histórico (1973–2009).



Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Na anomalia de temperatura, a progressão do aquecimento é clara (Figura 2a). No cenário RCP 8.5, para o período distante (2070-2099), os modelos HadGEM2-ES e CanESM2 mostram que a maioria dos anos terá uma anomalia positiva entre +2 °C e +3 °C. A mediana das anomalias para o CanESM2 no RCP 8.5 no fim do século atinge aproximadamente +2,4 °C. A dispersão dos valores (tamanho das caixas) também tende a aumentar no futuro, sugerindo maior variabilidade térmica interanual. O comportamento anômalo do MIROC5, com anomalias consistentemente negativas, é novamente destacado.

Na anomalia de precipitação, a incerteza é maior (Figura 2b). O modelo CanESM2 (laranja) mostra uma queda progressiva e severa, com a mediana da anomalia atingindo -43% no período distante sob o RCP 4.5, e preocupantes -87% sob o RCP 8.5. Isso significa que, neste cenário, a precipitação média seria menos de 15% do que foi no período histórico. Já o modelo BESM (azul escuro) consistentemente projeta anomalias positivas, enquanto HadGEM2-ES e MIROC5 oscilam em torno da média histórica, mas com uma leve tendência negativa.

## SÍNTESE DAS PROJEÇÕES

A Tabela 1 sintetiza as médias de precipitação e temperatura para cada modelo e cenário ao longo de todo o período projetado (2010-2099), comparando-as com a linha de base histórica (1973-2009).

**Tabela 1** – Comparativo de médias históricas e projeções climáticas para Umarizal-RN.

| Modelo     | Cenário | Precipitação média (mm) | $\Delta$ Precipitação (%) | Temperatura média (°C) | $\Delta$ Temperatura (°C) |
|------------|---------|-------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|
| Histórico  | —       | 839,44                  | 0,0                       | 26,70                  | 0,00                      |
| HadGEM2-ES | RCP 4.5 | 742,53                  | -11,5                     | 26,43                  | -0,27                     |
| HadGEM2-ES | RCP 8.5 | 601,73                  | -28,3                     | 27,58                  | +0,88                     |
| MIROC5     | RCP 4.5 | 844,62                  | +0,6                      | 24,79                  | -1,91                     |
| MIROC5     | RCP 8.5 | 793,00                  | -5,5                      | 25,43                  | -1,27                     |
| CanESM2    | RCP 4.5 | 511,07                  | -39,1                     | 27,56                  | +0,86                     |
| CanESM2    | RCP 8.5 | 357,41                  | -57,4                     | 28,08                  | +1,38                     |
| BESM       | RCP 4.5 | 1.066,00                | +27,0                     | 25,84                  | -0,86                     |
| BESM       | RCP 8.5 | 929,08                  | +10,7                     | 26,64                  | -0,06                     |

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Em suma, a abordagem multimodelo revela que, embora o aquecimento em Umarizal-RN seja um sinal consistente com as projeções globais do IPCC, a resposta do ciclo hidrológico local é ainda altamente incerta. A existência de projeções tão díspares como as do CanESM2 e do BESM reforça a necessidade de incorporar essa incerteza no planejamento de adaptação, considerando desde cenários de redução severa até cenários de aumento de chuvas, ambos acompanhados por um aumento significativo da temperatura.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise comparativa das projeções climáticas para Umarizal-RN evidencia que o aquecimento atmosférico constitui o sinal mais robusto entre os experimentos avaliados, sobretudo sob o cenário de altas emissões (RCP 8.5). Embora a magnitude do incremento térmico varie entre modelos, a tendência geral de elevação da temperatura ao longo do século XXI mostra-se consistente, reforçando a vulnerabilidade térmica do município em escala local.

Em contraste, a precipitação apresentou elevada divergência intermodelos, com projeções que variam desde reduções severas até manutenção ou aumento dos totais anuais. Essa dispersão evidencia a complexidade da simulação do ciclo hidrológico em regiões semiáridas e reforça que a incerteza constitui elemento estruturante das projeções climáticas regionais. Em áreas marcadas por limitação hídrica estrutural, pequenas variações nos totais anuais podem produzir impactos significativos sobre o balanço hídrico e os sistemas produtivos.

A combinação entre aumento térmico e cenários de redução pluviométrica, especialmente nos resultados do CanESM2 sob RCP 8.5, aponta para potencial intensificação do déficit hídrico, decorrente tanto da diminuição das chuvas quanto do aumento da evapotranspiração associado ao aquecimento. Mesmo nos cenários que indicam manutenção ou aumento da precipitação, o incremento térmico tende a alterar a dinâmica hídrica local, ampliando riscos socioambientais.

A utilização de múltiplos modelos mostrou-se fundamental para evitar interpretações lineares ou determinísticas. A comparação intermodelos permitiu explicitar convergências e divergências, evidenciando que a incerteza faz parte constitutiva das projeções climáticas regionais. Nesse sentido, o aprofundamento da pesquisa poderá incorporar abordagens complementares, como análises sazonais, avaliação de extremos climáticos e estimativas mais explícitas de incerteza.

Além disso, a incorporação de cenários mais recentes, como os *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs) do CMIP6, amplia a capacidade interpretativa das análises ao integrar trajetórias climáticas e dinâmicas socioeconômicas, permitindo explorar não apenas mudanças físicas no clima, mas também seus possíveis desdobramentos em contextos territoriais específicos. Tal articulação tende a fortalecer investigações futuras voltadas à avaliação de risco climático e à compreensão das múltiplas dimensões da vulnerabilidade em escala municipal.

## REFERÊNCIAS

ALVES, Alexandre Magalhães de Moraes Ramos; MARTINS, Fabrina Bolzan; REBOITA, Michelle Simões. Balanço hídrico climatológico para Itajubá-MG: cenário atual e projeções climáticas. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 26, 2021.

ANGELOTTI, Francislene; SÁ, Iêdo Bezerra; MELO, Roseli Freire. Mudanças climáticas e desertificação no Semiárido brasileiro. In: EMBRAPA. **Desertificação no Semiárido brasileiro**. Brasília, DF: Embrapa, 2009. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/574628>.

ARAÚJO, Paulo Henrique Cirino. **Eventos climáticos extremos: os efeitos dos fenômenos El Niño e La Niña sobre a produtividade agrícola das regiões Nordeste e Sul do Brasil**. 2012. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) – Universidade Federal de Viçosa, 2012.

BOLSON, Simone Hegele; HAONAT, Ângela Issa. A governança da água, vulnerabilidade hídrica e os impactos das mudanças climáticas no Brasil. **Veredas do Direito: Direito Ambiental e Desenvolvimento Sustentável**, Belo Horizonte, v. 13, n. 25, p. 223–248, 2016. DOI: <https://doi.org/10.18623/rvd.v13i25.575>

ESPÍNDOLA, Isabela Battistello; RIBEIRO, Wagner Costa. **Cidades e mudanças climáticas: desafios para os planos diretores municipais brasileiros**. Cadernos Metrópole, v. 22, n. 48, p. 365–396, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/2236-9996.2020-4802>.

GUIMARÃES, Sullyandro Oliveira et al. Projeções de mudanças climáticas sobre o Nordeste brasileiro dos modelos do CMIP5 e do CORDEX. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 31, n. 3, p. 337–365, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-778631320150150>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Divisão regional do Brasil em regiões geográficas imediatas e regiões geográficas intermediárias**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv100600.pdf>.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Plataforma de análise e projeções climáticas. São José dos Campos: INPE, 2020. Disponível em: <http://pclima.inpe.br/analise/>

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate change 2007: synthesis report: contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva: IPCC, 2007. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/>

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate change 2022: synthesis report: contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Geneva: IPCC, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>

JOIA, Paulo Filho. **Técnicas de projeção para identificação de grupos e comparação de dados multidimensionais usando diferentes medidas de similaridade**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. DOI: <https://doi.org/10.11606/T.55.2016.tde-29032016-143247>

LIMA, Ricardo da Cunha Correia; CAVALCANTE, Arnóbio de Mendonça Barreto; PEREZMARIN, Aldrin Martin. **Desertificação e mudanças climáticas no semiárido brasileiro**. Campina Grande: Instituto Nacional do Semiárido (INSA), 209 p. 2011.

MARENGO, José Antonio; SOUZA JUNIOR, Carlos. **Mudanças climáticas: impactos e cenários para a Amazônia**. São Paulo: Alana, 2018.

MARENGO, José Antonio; VALVERDE, Maria Cleofe. **Caracterização do clima no Século XX e Cenário de Mudanças de clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos do IPCC-AR4**. Revista Multiciência, v. 8, n. 1, p. 5–28, 2007.

MEDEIROS, Jacimária Fonseca. **Da análise sistêmica à Serra de Martins: contribuição teórico-metodológica aos brejos de altitude**. 2016. 219 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes, Natal, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/22696>

- MOURA, Magna Soelma Beserra; SOBRINHO, José Espínola; SILVA, Thieres George Freire. Aspectos meteorológicos do semiárido brasileiro. In: EMBRAPA SEMIÁRIDO. **Agricultura dependente de chuva no Semiárido brasileiro**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2019. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1112124>
- MOURA, Diogo Felipe Santos *et al.* Teoria e Método da Geografia Física Aplicada aos Estudos de Vulnerabilidade. **REVISTA EQUADOR**, v. 8, n. 2, p. 365-386, 2019. DOI: <https://doi.org/10.26694/equador.v8i2.9246>
- NORONHA, Marcelo Augusto Pessoa. **Qualidade físico-química da água mineral comercializada em chafarizes no município de Umarizal–RN**. 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/10467>.
- OLIVEIRA, Luana Laryssa, *et al.* Caracterização climática do município de Umarizal/RN no período de 1973 a 2002. **Anais do EGEORN XXVII**. Assú-RN, 2023. p. 624-633.
- PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS – PBMC. **Base científica das mudanças climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho I ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas**. Rio de Janeiro: COPPE, 2014.
- PFALTZGRAFF, Pedro Augusto dos Santos; TORRES, Fernanda Soares de Miranda. **Geodiversidade do estado do Rio Grande do Norte**. CPRM. 2010. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/16773>.
- SALES, Domingo Cassain *et al.* **Projeções de mudanças na precipitação e temperatura no nordeste brasileiro utilizando a técnica de downscaling dinâmico**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 30, n. 4, p. 435-456, 2015.
- SILVA Souza, Gabriel; BACK, Álvaro José; GALATTO, Sérgio Luciano. **Índice de irregularidade temporal das chuvas no território do Brasil 1991 a 2022**. Revista de Gestão de Água da América Latina, v. 21, n. 2024, 2024. DOI: <https://doi.org/10.21168/rega.v21e13>.
- SOTCHAVA, Viktor Borisovich. O estudo dos geossistemas. In: UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Instituto de Geografia. **Métodos em questão**, n. 1. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1977.
- ZÁKHIA, Estefânia Maria Sousa *et al.* Impactos das mudanças climáticas em uma bacia hidrográfica no Sul do Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 4, p. 667-681, 2021.