

Projeções de mudanças climáticas e seus impactos na qualidade da água bruta na Bacia do Rio Paraíba do Sul paulista

*Climate change projections and impacts on raw water
quality in the Paraíba do Sul River basin, Southeast
Brazil*

Diovana de Moura Rahmani ¹

Luiz Fernando Satolo ²

Erica Acioli Canamary ³

Javier Tomasella ⁴

¹ Mestrado em Engenharia Aeroespacial, Doutorando em Ciência do Sistema Terrestre,
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), São José dos Campos, São Paulo, Brasil
E-mail: dbms10@gmail.com

² Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre, Pesquisador, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
(Inpe), São José dos Campos, São Paulo, Brasil
E-mail: satololuiz@gmail.com

³ Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre, Pesquisadora, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
(Inpe), São José dos Campos, São Paulo, Brasil
E-mail: erica.canamary@gmail.com

⁴ Doutorado em Hidrologia, Professor, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe),
Cachoeira Paulista, São Paulo, Brasil
E-mail: javier.tomasella@inpe.br

doi:10.18472/SustDeb.v17n1.2026.58433

Received: 31/05/2025
Accepted: 01/04/2026

ARTICLE- VARIA

RESUMO

Este estudo tem como propósito avaliar a evolução dos indicadores de qualidade da água na Bacia do Rio Paraíba do Sul paulista ao longo dos últimos anos, bem como investigar os efeitos das mudanças climáticas sobre esses parâmetros. A análise comparativa entre projeções futuras e um cenário de referência revela que as variações climáticas estão associadas a alterações nos indicadores de potabilidade da água. Ademais, os resultados indicam uma tendência de redução da disponibilidade hídrica, sobretudo em cenários de maior emissão de gases de efeito estufa, o que evidencia a necessidade de ações voltadas à mitigação e à adaptação para garantir a segurança hídrica da região.

Palavras-chave: Modelos climáticos regionais. Cenários futuros. Recursos hídricos. Segurança hídrica.

ABSTRACT

This study aims to assess recent trends in water quality indicators in the Paraíba do Sul River Basin in the state of São Paulo and to analyse the influence of climate change on these parameters. A comparative analysis between future projections and a historical reference scenario reveals that climate variability plays a significant role in water quality. Additionally, the findings indicate a decline in water availability, particularly under high-emission scenarios, underscoring the urgency of mitigation and adaptation measures to ensure water security in the region.

Keywords: Regional climate models. Future scenarios. Water resources. Water security.

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas têm gerado impactos profundos na saúde dos ecossistemas, na economia global e na vida cotidiana das populações, sendo amplamente reconhecidas como um dos principais desafios ambientais contemporâneos. Entre os setores mais vulneráveis a essas transformações, destaca-se o de recursos hídricos, que enfrenta consequências diretas na qualidade e na disponibilidade da água (IPCC, 2021; Prado, 2024). Estudos demonstram que alterações nas propriedades físico-químicas da água, influenciadas por fatores climáticos e hidrológicos, podem comprometer não apenas os sistemas naturais, mas também a segurança hídrica das sociedades humanas (Amâncio; Cataldi, 2019; Cravinho et al., 2004).

Eventos climáticos extremos, como o aumento das temperaturas, variações nos padrões de precipitação e outros, exercem influência direta sobre a qualidade e a disponibilidade dos recursos hídricos em escala global (Prado, 2024). De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021), observou-se um aumento significativo na frequência desses eventos, o que impõe pressão adicional aos sistemas de saneamento básico e de abastecimento de água. Exemplos recentes incluem a crise hídrica ocorrida no Brasil em 2014, que trouxe grandes alterações nas seguranças hídrica, energética e alimentar (Canamary et al., 2023; Nobre et al., 2016).

No contexto da Bacia do Rio Paraíba do Sul, a bacia apresenta elevada vulnerabilidade hidrológica. Amâncio e Cataldi (2019) alertam que, a partir da década de 2070, há uma tendência clara de redução das vazões na bacia, independentemente do cenário climático analisado. Desse modo, compreender as variações na qualidade da água e os desafios associados ao seu tratamento é essencial para a formulação de estratégias eficazes de gestão, assegurando o acesso à água potável à população. Para tanto, foram utilizados modelos climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), incluindo *EtaHadGEM2-ES*, *EtaMIROC5* e *EtaCanESM2*, com o intuito de projetar cenários futuros e avaliar potenciais impactos na qualidade da água na bacia.

As alterações climáticas previstas para as próximas décadas impõem desafios técnicos e impactos financeiros aos sistemas de abastecimento e de tratamento de água. Estudos corroboram essas projeções (Delpla et al., 2009; Whitehead et al., 2009), indicando que mudanças climáticas tendem a deteriorar a qualidade da água superficial, aumentando os desafios para o tratamento convencional. Essas alterações podem demandar investimentos em tecnologias de tratamento, monitoramento e controle operacional.

As mudanças climáticas elevam os custos operacionais dos sistemas de tratamento de água devido à maior necessidade de insumos químicos e à adoção de tecnologias avançadas, como a filtração por membranas. Estimativas apontam aumentos de até 20% nesses custos em cenários de estresse climático, segundo a Water Environment Federation (WEF, 2023) e o *United Nations World Water Development Report* (WWAP, 2022). Além disso, exigem-se investimentos estruturais em modernização, monitoramento automatizado e capacitação técnica (Vörösmarty et al., 2010). Incorporar o risco climático ao planejamento financeiro do saneamento torna-se relevante, considerando impactos

diretos e indiretos sobre a saúde, o meio ambiente e a economia regional (Organisation for Economic Co-Operation and Development - OECD, 2018).

2 ÁREA DE ESTUDO

O presente trabalho tem foco na porção paulista da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, localizada aproximadamente entre 22°00'S e 23°30'S de latitude e 44°00'W e 45°52'W de longitude, abrangendo o Vale do Paraíba, no estado de São Paulo. Essa região é delimitada pela Serra da Mantiqueira ao norte e pela Serra do Mar ao sul, estendendo-se desde as cabeceiras do rio Paraíba do Sul, formadas pela confluência dos rios Paraibuna e Paraitinga, até a divisa com o estado do Rio de Janeiro.

Na Figura 1, abaixo, observam-se as dimensões da porção paulista da Bacia do Rio Paraíba do Sul.

A Bacia do Rio Paraíba do Sul possui área de drenagem com cerca de 55.500 km², compreendendo os estados de São Paulo (13.900 km²), do Rio de Janeiro (20.900 km²) e Minas Gerais (20.700 km²). É limitada ao norte pelas bacias dos rios Grande e Doce e pelas serras da Mantiqueira, Caparaó e Santo Eduardo.

Ao nordeste, a bacia é limitada pelo rio Itabapoana; ao sul, pelas Serras dos Órgãos e do Mar. A oeste, a bacia é limitada pelo rio Tietê, separada por ramificações da Serra do Mar e da Serra da Mantiqueira. O rio Paraíba do Sul é formado pela união dos rios Paraibuna e Paraitinga, com extensão superior a 1.100 km (ANA, 2011).

Bacia Hidrográfica Paulista

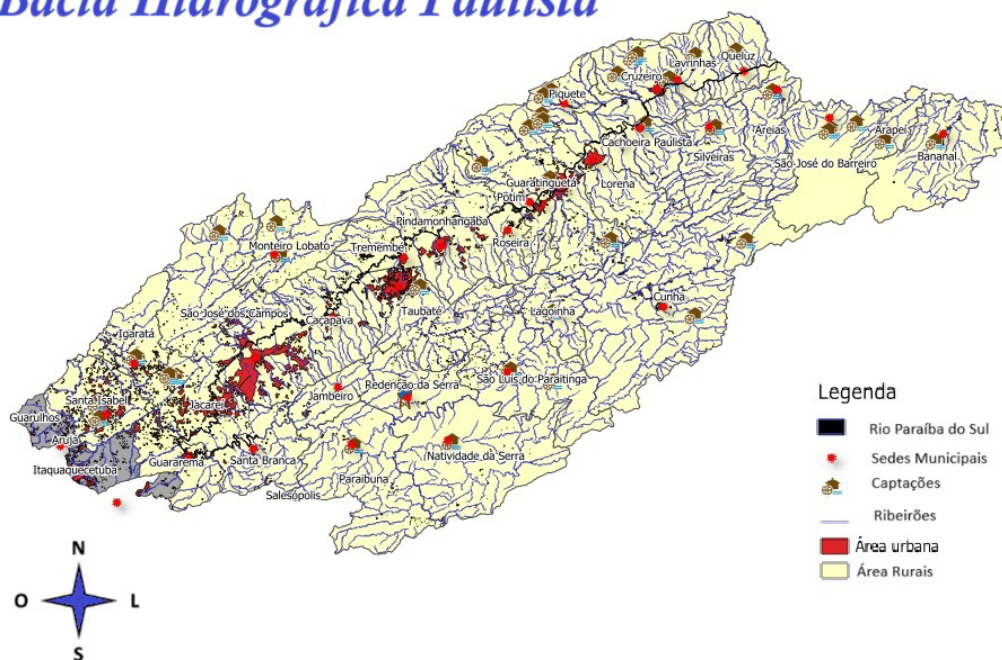


Figura 1 – Bacia Hidrográfica Paulista, considerada neste estudo, indicando as sedes municipais, as captações, o Rio Paraíba do Sul e as áreas urbanas e rurais.

Fonte: Produzido pelo autor (2025)

3 METODOLOGIA

No estudo atual, foram utilizados métodos integrados de modelos climáticos, de modelagem hidrológica e de técnicas de aprendizado de máquina para avaliar os efeitos das mudanças climáticas nos parâmetros de qualidade da água da porção paulista da Bacia do Rio Paraíba do Sul.

Os modelos climáticos representam abordagens numéricas baseadas em equações físicas e são empregados para visualizar os processos básicos que produzem os sistemas climáticos da Terra, como a função da atmosfera, oceanos, superfície terrestre e biosfera. Princípios fundamentais da física, como a conservação de massa, energia e momento, são empregados nesses modelos para simular o clima em diferentes escalas de tempo e espaço (IPCC, 2021). A partir dessas simulações, também é possível prever mudanças futuras em fatores meteorológicos críticos, como temperatura, precipitação e radiação solar, bem como avaliar os potenciais impactos ambientais e hidrológicos das mudanças climáticas.

Os modelos climáticos podem ser divididos em modelos climáticos globais (GCMs) e modelos climáticos regionais (RCMs). Os GCMs são modelos climáticos planetários que modelam a circulação atmosférica global, a oceânica e as dinâmicas de interação de vários elementos do sistema climático. No entanto, eles apresentam limitações para análises em nível regional ou local devido à sua resolução espacial relativamente baixa. Essa limitação pode ser superada pelo uso de modelos climáticos regionais, que realizam práticas de regionalização climática, ajudando a ajustar espacialmente as projeções globais, denominadas *downscaling* climático. Isso permite a disponibilidade de projeções climáticas com maior resolução espacial e maior representatividade das condições climáticas regionais, particularmente em regiões onde topografia e hidrologia complexas convergem, como as bacias hidrográficas (Almagro *et al.*, 2020).

No Brasil, o modelo climático regional Eta é amplamente utilizado na regionalização de cenários climáticos globais. As projeções climáticas regionalizadas do Eta permitem uma resolução espacial mais detalhada ao calcular os impactos das mudanças climáticas em sistemas hidrológicos e ambientais.

Neste estudo, foram utilizados modelos climáticos globais do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados Fase 5 (CMIP5) para realizar as projeções que foram então convertidas para o modelo Eta.

Os modelos escolhidos foram HadGEM2-ES, MIROC5 e CanESM2, modelos de variabilidade climática e de emissões de gases de efeito estufa, bem estabelecidos por sua capacidade de capturar diversos padrões de variabilidade climática. Eles fornecem simulações de várias trajetórias climáticas no futuro, com base em diferentes cenários de concentração de gases de efeito estufa, denominados Cenários de Concentração Representativa (RCPs).

Para o modelo hidrológico MHD-Inpe, foram usadas projeções climáticas regionalizadas como entradas, incluindo principalmente processos hidrológicos como precipitação, infiltração, evapotranspiração, escoamento superficial e fluxo de água subterrânea. O modelo MHD baseia-se em princípios físicos e matemáticos que permitem modelar a dinâmica hidrológica em escala de bacia hidrográfica, fornecendo, por sua vez, informações relevantes para a análise da disponibilidade de água e condições ambientais do sistema (Paiva *et al.*, 2023).

Para explorar o impacto dos fatores climáticos nos parâmetros de qualidade da água do rio Paraíba do Sul, a modelagem climática e a modelagem hidrológica, juntamente com técnicas de aprendizado de máquina, foram empregadas, permitindo uma avaliação integrada, bem como a análise das possíveis consequências a jusante das mudanças climáticas nos recursos hídricos da região.

Portanto, embora os modelos climáticos tenham sido amplamente adotados para simulações ambientais, essas ferramentas são inerentemente limitadas devido às simplificações necessárias para descrever o funcionamento complexo do sistema climático.

As projeções sobre o clima enfrentam diferentes fontes de incerteza, que decorrem de:

- Limitações estruturais dos modelos, relacionadas à representação de processos atmosféricos e oceânicos.
- Diferenças entre modelos climáticos globais na simulação da variabilidade climática.
- Incertezas dos cenários futuros das emissões de gases de efeito estufa (IPCC, 2021).
- Outra fonte importante de incerteza está relacionada ao processo de *downscaling* climático, que aplica limites regionais às estimativas globais com base em condições de contorno de modelos globais (por exemplo, o modelo climático Eta).

Dessa forma, quaisquer erros ou vieses nos modelos globais podem se refletir localmente nas simulações. Em determinados casos, a resolução espacial em microescala pode falhar em capturar processos locais importantes, como eventos convectivos intensos e a variabilidade hidrológica.

Devido a essas limitações, a aplicação de múltiplos modelos climáticos, como os adotados neste estudo (HadGEM2-ES, MIROC5, CanESM2), é atualmente considerada uma das estratégias mais comuns na literatura científica para minimizar a dependência excessiva de um único modelo climático e aumentar a robustez das projeções climáticas. Essa abordagem permite avaliar a sensibilidade dos resultados a diferentes representações dos processos climáticos e, assim, realizar uma análise mais abrangente dos cenários atuais e futuros possíveis (Almagro *et al.*, 2020; IPCC, 2021).

3.1 CENÁRIOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Os modelos climáticos selecionados para o estudo em questão foram o *HadGEM2-ES*, o *MIROC5* e o *CanESM2*. Esses modelos foram escolhidos por sua reconhecida credibilidade e por sua notável capacidade de simular diversos cenários climáticos futuros (Almagro *et al.*, 2020). O modelo *HadGEM2-ES*, desenvolvido pelo Met Office Hadley Centre, oferece uma visão particularmente detalhada e abrangente das mudanças climáticas que podem ocorrer ao longo do tempo. Por outro lado, o *MIROC5*, fruto do trabalho da Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, e o *CanESM2*, desenvolvido pelo Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, apresentam diferentes abordagens e perspectivas para a análise dos fenômenos climáticos. A utilização combinada desses três modelos permitiu uma comparação robusta, resultando em uma melhor compreensão dos impactos das mudanças climáticas na qualidade da água do rio Paraíba do Sul, bem como de suas possíveis implicações para o meio ambiente e a sociedade (Rodrigues, 2022).

3.2 SIMULAÇÃO DA TEMPERATURA DA ÁGUA

O cálculo da temperatura da água baseia-se no princípio da temperatura de equilíbrio (Edinger *et al.*, 1968). Esse tipo de formulação tem sido utilizado em vários modelos hidrológicos, como o *CE-QUAL-W2* (Cole; Wells, 2006) e o *MIKE SHE* (Dhi, 2017), devido à sua simplicidade e estabilidade numérica.

No caso de temperatura uniforme, os gradientes em relação à distância são iguais a zero; a equação (1) de transporte de calor unidimensional pode ser escrita como:

$$\rho_w c_{pw} \frac{dT_w}{dt} = \frac{q_{net}}{depth} \quad (1)$$

Sendo ρ_w a densidade da água; c_{pw} o calor específico da água; q_{net} a radiação líquida à superfície; T_w a temperatura; e $depth$ a profundidade da água.

A radiação líquida é composta por fluxos provenientes de diferentes processos físicos, especificamente: a radiação solar líquida; a radiação atmosférica de onda longa; a radiação de onda longa emitida pela superfície da água; o fluxo de calor evaporativo; o fluxo de calor convectivo; e o fluxo de calor devido à precipitação. De todas essas componentes, o fluxo mais importante corresponde ao termo de radiação solar líquida q_{atm} . Portanto, a equação anterior pode ser simplificada como:

$$\rho_w c_{pw} \frac{dT_w}{dt} = \frac{q_{atm} + \varepsilon_q}{depth} \quad (2)$$

Sendo ε_q um parâmetro que incorpora os demais termos da radiação.

Edinger *et al.* (1968) definiram a temperatura de equilíbrio como a temperatura da água em que o fluxo de calor atmosférico líquido (q_{atm}) é igual a zero. Nessas condições, o balanço de radiação pode ser escrito como:

$$q_{atm} = K(T_e - T_w) \quad (3)$$

Sendo T_e a temperatura de equilíbrio e K coeficiente global de troca de calor superficial. O coeficiente de troca de calor da superfície total, K , pode ser calculado a partir das equações empíricas de Edinger. K é uma função da temperatura da água, da temperatura do ponto de orvalho T_{dew} e da velocidade do vento w usando:

$$K = 4.48 + (\beta + 0.47)f_w + 0.05T_w$$

sendo

$$f_w = 9.2 + 0.46w^2$$

$$\beta = 0.35 + 0.015 \left(\frac{T_{dew} + T_w}{2} \right) + 0.0012 \left(\frac{T_{dew} + T_w}{2} \right)^2$$

$$T_e = T_{dew} + \frac{S}{K} + \varepsilon_t \quad (4)$$

Sendo S a radiação incidente de onda curta e ε_t um parâmetro de ajuste. Combinando as duas equações anteriores, resulta em:

$$\rho_w c_{pw} \frac{dT_w}{dt} = \frac{K(T_e - T_w) + \varepsilon_q}{depth} \quad (5)$$

Integrando no intervalo de tempo temos:

$$T_{w_{t+\Delta t}} = T_e \left(1 - e^{-\frac{K t_{res}}{\rho_w c_{pw} depth}} \right) + T_{w_{in,t}} e^{-\frac{K t_{res}}{\rho_w c_{pw} depth}} + \frac{\varepsilon_q}{K} \left(1 - e^{-\frac{K t_{res}}{\rho_w c_{pw} depth}} \right) \quad (6)$$

Sendo T_w , in a entrada de calor vinda de outras células contíguas. Essa equação é muito similar à encontrada por Bogan *et al.* (2004).

3.3 SIMULAÇÃO EM PYTHON COM MODELO HISTGRADIENTBOOSTINGREGRESSOR

A presente análise foi conduzida em Python, utilizando o algoritmo *HistGradientBoostingRegressor*, implementado na biblioteca *scikit-learn*, com o objetivo de estimar parâmetros físico-químicos da água do rio Paraíba do Sul.

As variáveis preditoras compreenderam indicadores climáticos e hidrológicos — como temperatura do ar, precipitação e vazão —, enquanto as variáveis-resposta incluíram indicadores-chave de qualidade da água: pH, turbidez, cor aparente e nitrogênio amoniacal (NHH3).

As séries temporais utilizadas para treinamento do modelo foram obtidas a partir de bases de dados disponibilizadas por instituições oficiais, tais como o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e o Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet). Essa abordagem possibilitou a avaliação quantitativa da influência de fatores climáticos e hidrológicos sobre os parâmetros de qualidade da água, oferecendo subsídios relevantes para a projeção de cenários futuros sob os efeitos das mudanças climáticas.

Estudos recentes corroboram a eficácia de modelos baseados em aprendizado de máquina para fins semelhantes. Khan *et al.* (2021) aplicaram regressão por componentes principais (*Principal Component Regression* – PCR) associada ao algoritmo *Gradient Boosting* para prever e classificar a qualidade da água, atingindo acurácia de 95% e 100%, respectivamente, na estimativa do Índice de Qualidade da Água (IQA), com base em variáveis como pH, turbidez e oxigênio dissolvido (OD).

De forma complementar, Manikandan *et al.* (2024) demonstraram que algoritmos de *Gradient Boosting* podem estimar o IQA com elevada precisão a partir de 20 características físico-químicas de amostras hídricas. Os autores evidenciam a relação direta entre a degradação da qualidade da água e os riscos à segurança hídrica.

Ainda nesse contexto, Wang *et al.* (2017) aplicaram o método de *Support Vector Regression* (SVR) para previsão do IQA, alcançando acurácia superior a 90% a partir de 22 variáveis de entrada.

Os resultados confirmam a eficácia do modelo *HistGradientBoostingRegressor* na previsão da qualidade da água, demonstrando sua aptidão para lidar com dados multidimensionais e com relações complexas entre variáveis ambientais e químicas.

3.4 CENÁRIOS DA QUALIDADE DA ÁGUA

Para a elaboração dos mapas de uso e cobertura da terra, considerou-se o estudo de Rezende *et al.* (2018), que delineou três cenários futuros de mudanças no uso e na ocupação do solo entre 2010 e 2050. Esse estudo enfatizou as transições entre as categorias de silvicultura, floresta e pastagem. Posteriormente, essas projeções foram revisadas por Paiva *et al.* (2023), que incorporaram a expansão das áreas urbanas ao modelo. Adicionalmente, os cenários de Rezende *et al.* (2018) foram aprimorados com a inclusão de pressupostos relacionados ao comportamento das demandas de água para abastecimento humano e industrial, com cenários otimista, pessimista e atual (Canamary *et al.*, 2023). Agora são adicionadas informações de qualidade da água, com os seguintes parâmetros: temperatura da água °C (físico), temperatura do ar °C (físico), fósforo mg/L (químico), DBO5 mg/L O2 (químico), pH U.pH (químico), turbidez NTU (físico) e OD mg/L (químico). Os cenários foram projetados para três

períodos: Histórico, Atual e Futuro, e, para cada período, atual e futuro, três cenários foram projetados: otimista, pessimista e atual.

- Período Histórico de 1976 até 2015
- Período Atual: 2016 até 2035
- Período Futuro: 2036 até 2055

a) Cenário otimista (O): reflete um aumento significativo no acesso aos serviços de abastecimento público, acompanhado de uma redução no consumo *per capita* de água, impulsionada por maior conscientização sobre a preservação dos recursos hídricos.

b) Cenário pessimista (P): considera melhorias nos níveis de acesso ao abastecimento de água, mas com crescimento da demanda *per capita*.

c) Cenário atual (A): baseia-se nas tendências de consumo e de ocupação observadas no momento.

O estudo conduzido por Martins *et al.* (2023) também está incorporado neste modelo, em que é abordada a demanda hídrica na agricultura na porção paulista da bacia do rio Paraíba do Sul. Existe também a projeção sob dois cenários de emissões de gases de efeito estufa, *RCP 4.5* e *RCP 8.5*, com o objetivo de analisar os impactos potenciais das mudanças climáticas na disponibilidade e no consumo de recursos hídricos para a produção agrícola na região.

4 RESULTADOS

Os resultados obtidos por meio da modelagem executada foram apresentados de forma gráfica com o auxílio de tabelas numéricas e de comparações de dados ao longo das décadas pesquisadas. A análise permitiu verificar as progressões, inclusões e exclusões de cada parâmetro no tratamento de água bruta ao longo dos anos estudados. Para confirmar a precisão do modelo, foi realizada uma análise estatística comparativa entre os dados mensurados durante os tratamentos de água bruta (dados históricos, chamados de *baseline*) e os dados simulados pelo modelo hidrológico.

4.1 TEMPERATURA DO AR E DA ÁGUA

As projeções dos modelos climáticos CAM, MIROC e HADGEN indicam um aumento progressivo da temperatura do ar nos municípios paulistas entre os períodos de 2035 e 2055. O cenário de referência *baseline* apresenta as menores medianas, com valores concentrados entre 21°C e 22°C nos três modelos. Em 2035, as temperaturas se elevam levemente em relação ao histórico, com diferenças mínimas entre os cenários (atual, otimista e pessimista). Já em 2055, observa-se um aumento mais expressivo, com os cenários pessimistas indicando as maiores medianas, o que indica tendência de aquecimento. Abaixo, apresenta-se um gráfico com os dados e realizam-se uma análise estatística descritiva, a variância e o teste de *Tukey*.

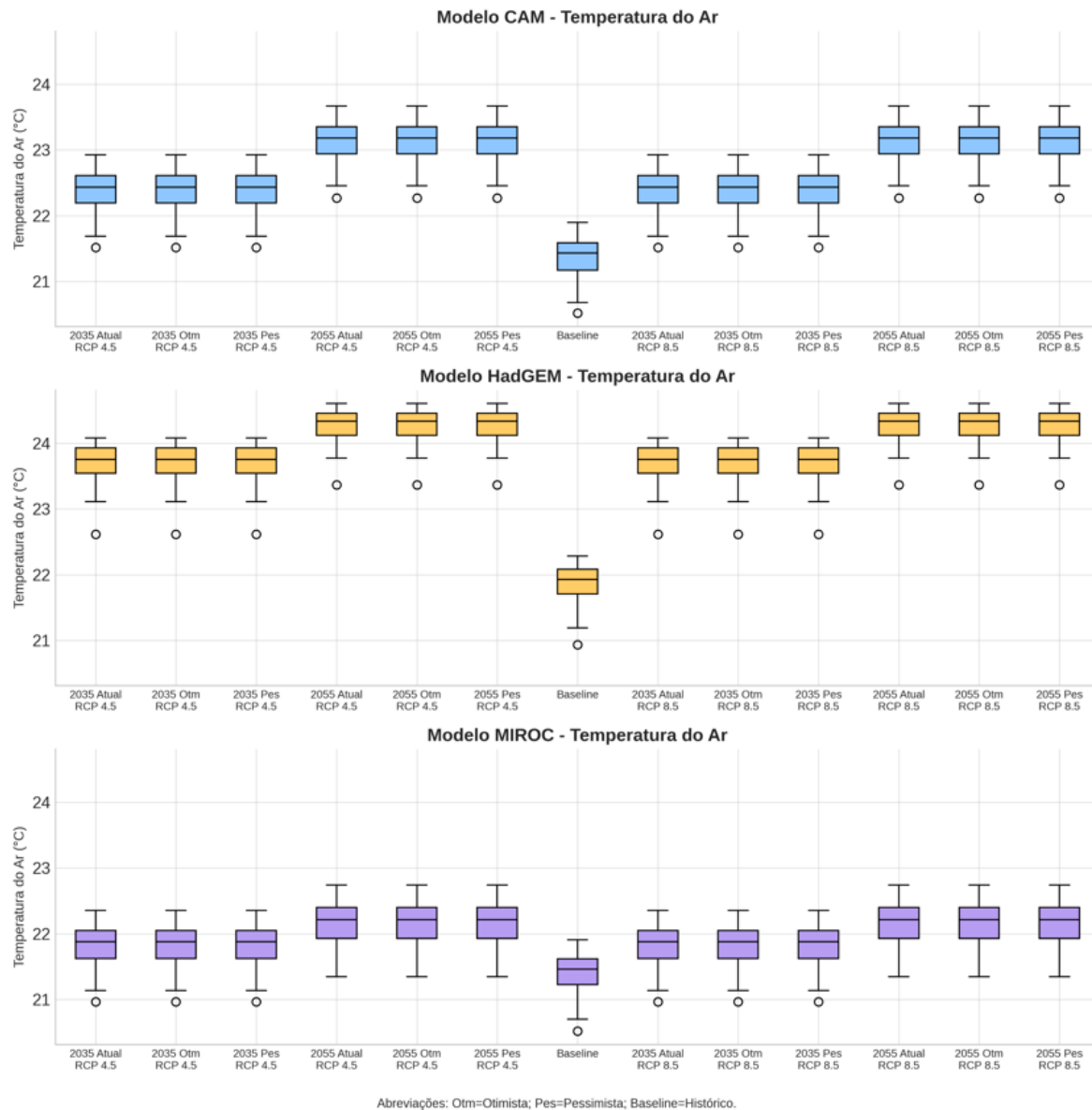


Figura 2 – Projeções da temperatura do ar a partir dos modelos climáticos regionais (Eta-CMIP5)

Fonte: Produzido pelos autores (2025)

A análise *pós-hoc* confirmou diferenças estatisticamente significativas entre todos os modelos climáticos, o que indica a relevância de múltiplas abordagens na projeção de cenários ambientais. As projeções para 2035 e 2055 indicam um aumento gradual da temperatura da água em relação ao cenário de referência. Em 2035, as variações entre os cenários são discretas, enquanto, em 2055, observa-se uma elevação mais acentuada, especialmente no cenário pessimista (RPC 8.5), que indica maior impacto climático e possíveis impactos adicionais sobre os sistemas hídricos.

Tabela 1 – Análise estatística para o parâmetro temperatura do ar

<i>Estatística descritiva para o parâmetro temperatura do ar</i>				
<i>Modelo Climático</i>	<i>Média de Temperatura (°C)</i>	<i>Desvio-Padrão Médio</i>	<i>Amplitude Média</i>	<i>Observações</i>
CAM	22,644	0,342	1,402	Variabilidade moderada entre os cenários.
HadGEM	23,809	0,300	1,352	Variabilidade ligeiramente inferior ao CAM.
MIROC	21,941	0,350	1,391	Variabilidade comparável ao modelo CAM.
<i>Análise de variância (ANOVA) - Temperatura do ar entre os cenários dentro de cada modelo</i>				
<i>Modelo Climático</i>	<i>Estatística F</i>	<i>Valor-p</i>	<i>Significância Estatística</i>	<i>Interpretação</i>
CAM	83,520	< 0,0001	Sim	Diferenças estatisticamente significativas entre os cenários do modelo.
HadGEM	161,210	< 0,0001	Sim	Diferenças estatisticamente significativas entre os cenários simulados.
MIROC	15,720	< 0,0001	Sim	Todos os cenários apresentaram variações estatisticamente relevantes.
<i>Teste de Tukey para comparação de médias da temperatura do ar entre os modelos</i>				
<i>Group 1</i>	<i>Group 2</i>	<i>Mean Difference</i>	<i>p-Value</i>	<i>Statistical Significance</i>
CAM	HadGEM	+1,1649	< 0.001	Sim
CAM	MIROC	-0,7030	< 0.001	Sim
HadGEM	MIROC	-1,8679	< 0.001	Sim

Fonte: Produzido pelos autores (2025)

O comportamento térmico da água segue, de forma atenuada, o padrão observado na temperatura do ar, refletindo o acoplamento entre a atmosfera e a superfície hídrica. Nos cenários futuros, as medianas aumentam discretamente, e a amplitude térmica cresce nos cenários pessimistas de 2055. Essas observações podem ser verificadas na Figura 3, logo abaixo:

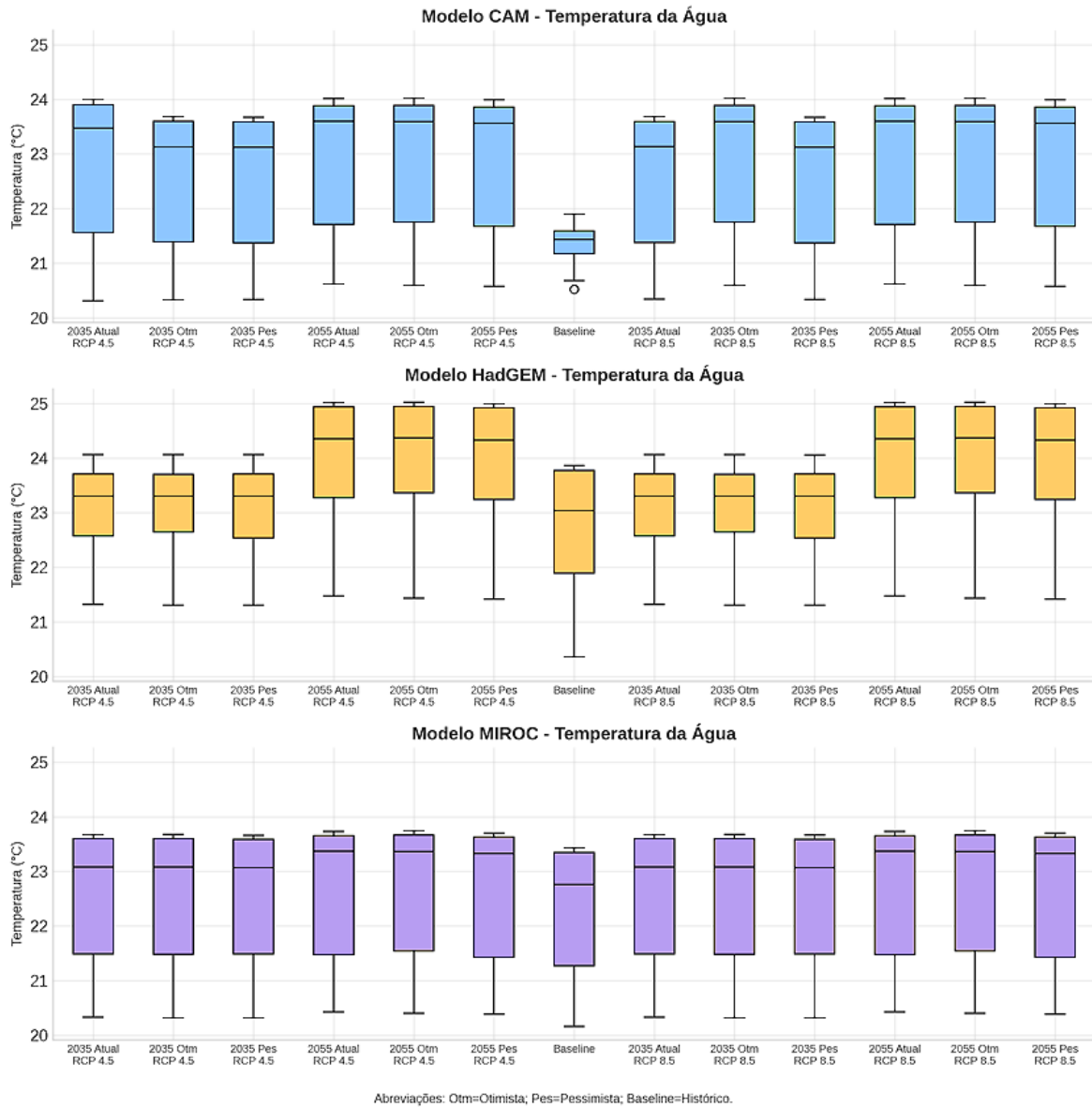


Figura 3 – Projeções da temperatura da água estimadas pelo modelo hidrológico MHD-Inpe.

Fonte: Produzido pelos autores (2025)

A análise estatística do parâmetro Temperatura da Água (Tabela 2) evidencia padrões térmicos distintos entre os modelos climáticos Eta-CamESM2, HadGEM e MIROC, refletindo diferenças estruturais na representação dos processos de troca de energia entre a atmosfera e a superfície hídrica. As médias variaram entre 23,1°C (MIROC) e 24,0°C (HadGEM), com o CAM apresentando um valor intermediário de 23,5°C. Essa diferença de até 0,9°C entre os extremos confirma a presença de um gradiente térmico intermodelo estatisticamente significativo.

Tabela 2 – Análise estatística para o parâmetro temperatura da água

<i>Estatística descritiva para o parâmetro temperatura da água</i>				
<i>Modelo Climático</i>	<i>Média de Temperatura (°C)</i>	<i>Desvio-Padrão Médio</i>	<i>Amplitude Média</i>	<i>Observações</i>
CAM	23,500	0,342	1,402	Dispersão moderada; variabilidade considerável entre os cenários.
HADGEM	24,000	0,300	1,352	Média superior ao CAM; variabilidade interna significativa.
MIROC	23,100	0,350	1,391	Variabilidade superior ao HADGEM; distribuição homogênea.
<i>Análise de variância (Anova) - temperatura da água entre os cenários dentro de cada modelo</i>				
<i>Modelo Climático</i>	<i>Estatística F</i>	<i>Valor-p</i>	<i>Significância Estatística</i>	<i>Interpretação</i>
CAM	4,765	< 0,0001	Sim	Diferenças estatisticamente significativas entre os cenários do modelo.
HADGEM	8,747	< 0,0001	Sim	Diferenças estatisticamente significativas entre os cenários simulados.
MIROC	0,254	> 0,0001	Não	Sem diferenças estatisticamente significativas.
<i>Teste de Tukey para comparação de médias da temperatura da água entre os modelos</i>				
<i>Grupo 1</i>	<i>Grupo 2</i>	<i>Diferença de Média (c°)</i>	<i>Valor-p</i>	<i>Diferença Significativa</i>
CAM	HADGEM	+0,774	< 0.001	Sim
CAM	MIROC	- 0,084	>0.05	Não
HADGEM	MIROC	-0,858	< 0.001	Sim

Fonte: Produzido pelos autores (2025).

4.2 ESTIMATIVAS DOS PARÂMETROS DA QUALIDADE DA ÁGUA – PH, COR, TURBIDEZ E NH₃.

Para as simulações apresentadas, utilizaram-se como dados de entrada as temperaturas de água e de ar, obtidas a partir das simulações dos modelos climáticos integrados ao modelo hidrológico (MHD) e inseridas no software *Python*. Nos gráficos abaixo, apresentamos os quatro parâmetros da qualidade da água analisados.

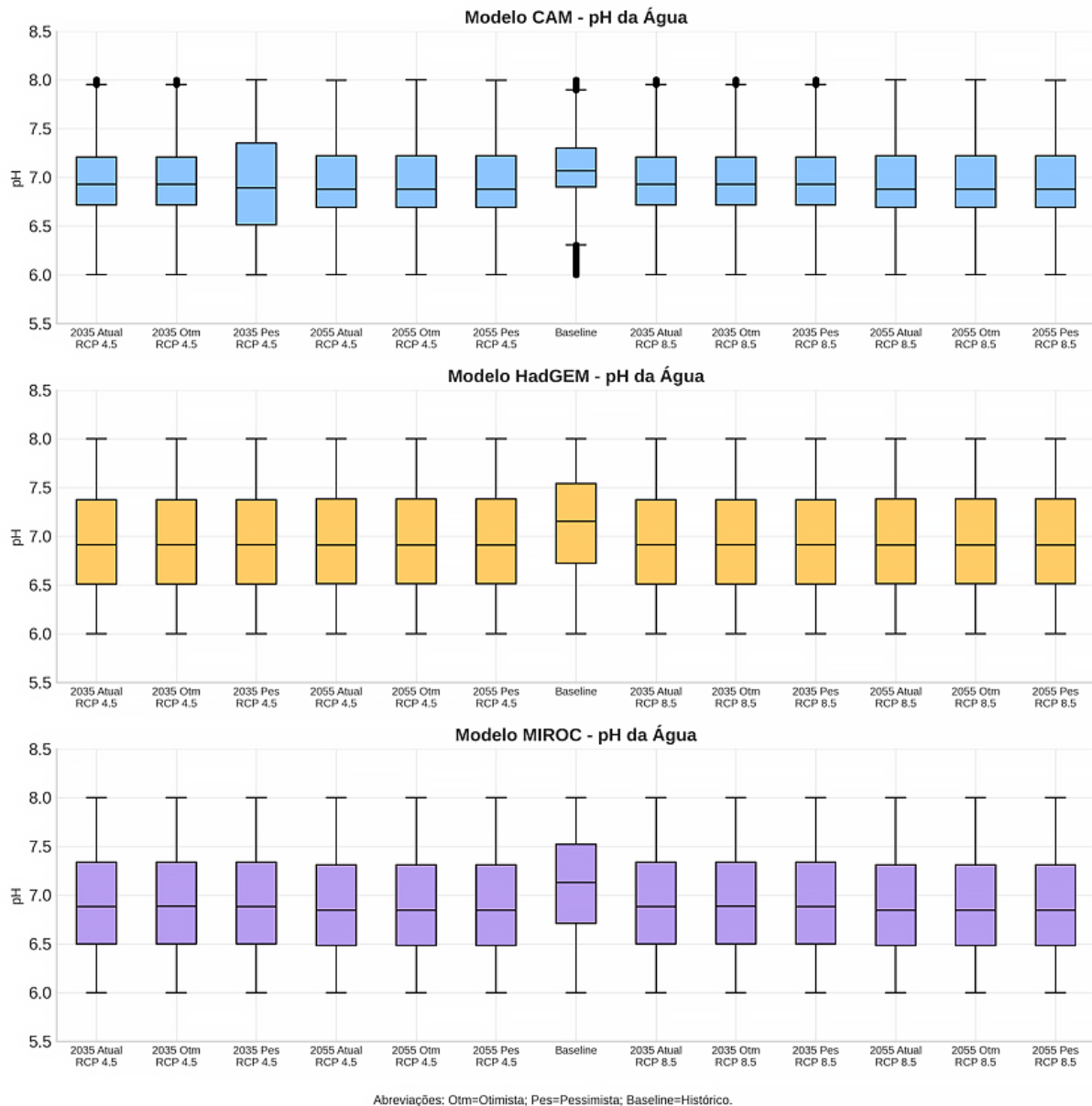


Figura 4 – Projeções do pH da água (Gradient Boosting) sob variáveis climáticas (Eta–CMIP5) e hidrológicas (MHD-Inpe) para 2035 e 2055

Fonte: Produzidos pelo autores (2025).

Para o pH, conforme análise gráfica, não houve mudanças significativas; a média ficou próxima de 7,0, indicando pH neutro, sem grandes alterações ao longo de todos os períodos.

O modelo CAM apresentou variabilidade moderada, com pH entre 6.7 e 7.7 em diferentes cenários. Observa-se uma tendência de redução do pH nos cenários de 2055, sem outliers expressivos. O modelo sugere um comportamento estável, porém ligeiramente mais ácido no futuro.

Entre os modelos climáticos analisados, o HADGEM apresentou maior estabilidade nas projeções de pH, com medianas próximas de 7, baixa variabilidade e ausência de valores anômalos.

Em contraste, o MIROC exibiu maior variabilidade e tendência de queda do pH nos cenários de 2055, especialmente sob a condição pessimista, o que se reflete maior variabilidade nas projeções. A tendência geral indica uma leve redução do pH até 2055 nos modelos MIROC e CAM, enquanto o

HADGEM permanece praticamente inalterado. O cenário de altas emissões (RCP 8.5) não resultou em acidificação significativa, exceto no modelo CAM. A análise estatística confirmou diferenças significativas entre os modelos, indicando a importância de considerar múltiplas abordagens de modelagem nas projeções ambientais.

Tabela 3 – Análise estatística para o parâmetro pH da água

<i>Estatística descritiva para o parâmetro pH</i>				
<i>Modelo Climático</i>	<i>Média de pH</i>	<i>Desvio-Padrão</i>	<i>Amplitude</i>	<i>Observações</i>
CAM	6,975	0,365	1,999	Baixa dispersão; valores concentrados próximos à neutralidade.
HADGEM	6,960	0,543	6,931	Maior dispersão influenciada por valores extremos.
MIROC	6,930	0,536	6,858	Variabilidade semelhante à do HADGEM; presença de extremos.
<i>Análise de variância (ANOVA) - pH entre os cenários dentro de cada modelo</i>				
<i>Modelo Climático</i>	<i>Estatística F</i>	<i>Valor-p</i>	<i>Significância Estatística</i>	<i>Interpretação</i>
CAM	1387,44	< 0,0001	Sim	Diferenças estatisticamente significativas, porém, com efeito pequeno.
HADGEM	697,85	< 0,0001	Sim	Significativo; magnitude de efeito muito pequena.
MIROC	905,09	< 0,0001	Sim	Significativo; efeito reduzido.
<i>Teste de Tukey para comparação de médias de pH entre os modelos</i>				
<i>Grupo 1</i>	<i>Grupo 2</i>	<i>Diferença de Média</i>	<i>Valor-p</i>	<i>Diferença Significativa</i>
CAM	HADGEM	+ 0,01451	< 0,001	Sim
CAM	MIROC	+ 0,04487	< 0,001	Sim
HADGEM	MIROC	+ 0,03035	< 0,001	Sim

Fonte: Produzido pelos autores (2025).

O parâmetro Turbidez apresentou grandes *outliers* (pontos fora da média), expressivos. Na *base de linha*, a mediana de turbidez está próxima de 20, mas há registros de amostras com valores entre 40 e 80, possivelmente decorrentes de chuvas intensas e enxurradas.

No período 2035 (A, O, P), a mediana sobe ligeiramente, mas os *outliers* permanecem expressivos. Já na previsão de 2055 (A, O, P), observa-se um pequeno aumento na mediana, o que indica que eventos de turbidez podem se tornar mais frequentes.

O grande número de *outliers* (fora da média) em todos os períodos sugere que o controle da turbidez será um desafio constante, o que pode implicar ajustes operacionais futuros, conforme a Figura 5.

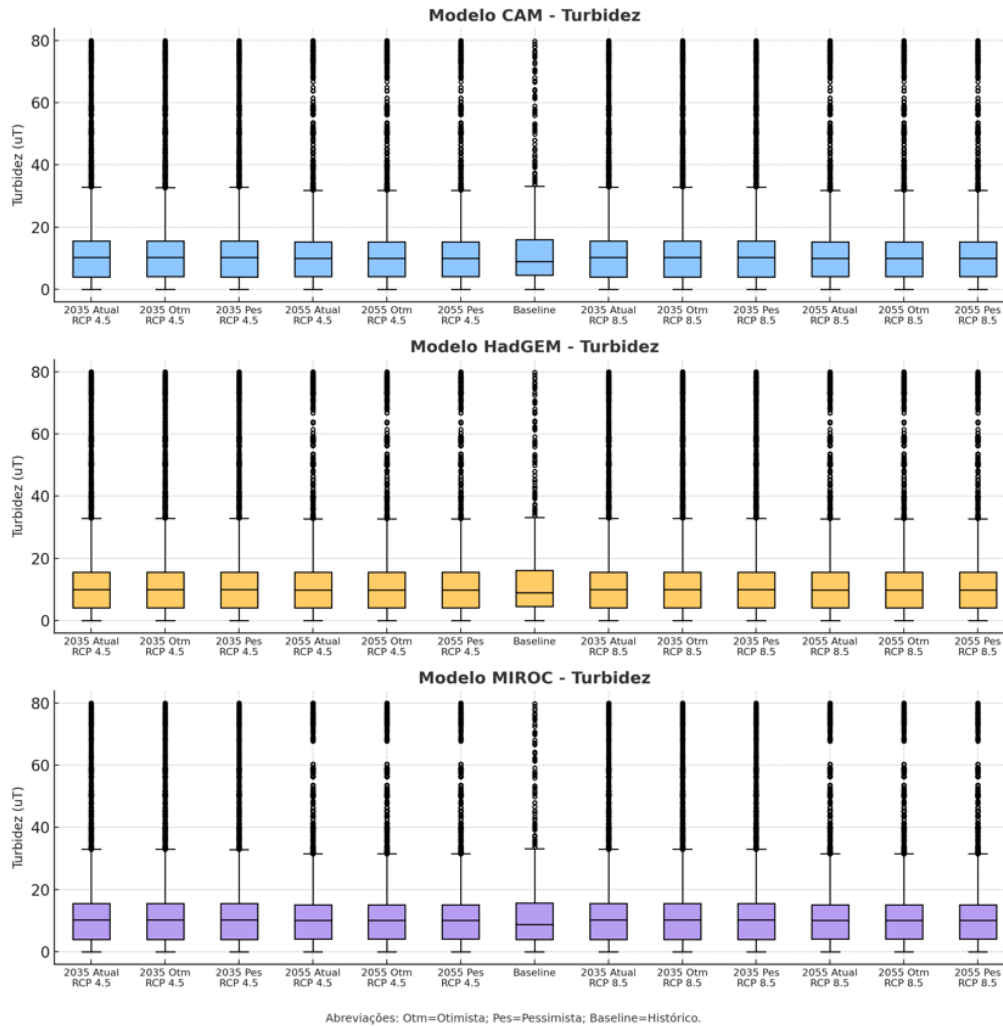


Figura 5 – Projeções da turbidez da água (Gradient Boosting) sob variáveis climáticas (Eta–CMIP5) e hidrológicas (MHD-Inpe) para 2035 e 2055.

Fonte: Produzido pelos autores (2025).

Na estatística descritiva, observa-se heterogeneidade entre os modelos, em que os desvios-padrão variaram entre 11,77 e 12,64 UNT, com amplitudes máximas próximas de 80 UNT em todos os modelos, indicando a presença recorrente de valores extremos. Contudo, as médias globais foram bastante próximas ($\approx 12,5$ a $12,8$ UNT), sugerindo baixa diferença estrutural entre os regimes médios simulados.

Tabela 4 – Análise estatística para o parâmetro turbidez

Estatística descritiva para o parâmetro turbidez			
Modelo Climático	Média de pH	Amplitude	Observações
CAM	12,188	79,999	Distribuição assimétrica; presença de valores extremos elevados
HADGEM	12,636	79,997	Maior média entre os modelos; dispersão ligeiramente maior.
MIROC	11,769	79,939	Média inferior; variabilidade comparável à do CAM.

<i>Análise de variância (ANOVA) - Turbidez entre os cenários dentro de cada modelo</i>				
<i>Modelo Climático</i>	<i>Estatística F</i>	<i>Valor-p</i>	<i>Significância Estatística</i>	<i>Interpretação</i>
CAM	0,182	0,9991	Não	Ausência de diferenças entre cenários.
HADGEM	5,933	< 0,0001	Sim	Diferença estatística com efeito extremamente pequeno.
MIROC	0,068	0,999	Não	Ausência de diferenças entre cenários.
<i>Teste de Tukey para comparação de médias de turbidez entre os modelos</i>				
<i>Grupo 1</i>	<i>Grupo 2</i>	<i>Diferença de Média</i>	<i>Valor-p</i>	<i>Diferença Significativa</i>
CAM	HADGEM	+0,1225	< 0.001	Sim
CAM	MIROC	-0,1069	< 0.001	Sim
HADGEM	MIROC	-0,2294	< 0.001	Sim

Fonte: Produzido pelos autores (2025)

A análise do parâmetro Cor aparente da água, apresentada na Figura 6 abaixo, com base nos modelos climáticos CAM, HADGEM e MIROC, indica uma tendência de maior variabilidade e dispersão nas projeções futuras (2035 e 2055), em comparação ao cenário de referência (*baseline*), cuja média está em torno de 100 unidades. Esse aumento de variações, especialmente nos cenários pessimistas, sugere um risco crescente de instabilidade na cor da água, o que pode representar um desafio operacional contínuo, principalmente por sua relação direta com o parâmetro de Turbidez.

Entre os modelos, o *HADGEM* destacou-se por sua baixa variabilidade, menor dispersão interquartil e medianas mais baixas, sendo o mais conservador e confiável para aplicações que exigem maior precisão regulatória. O *CAM* apresentou projeções moderadamente estáveis, com medianas consistentes ao longo dos cenários, enquanto o *MIROC* indicou maior suscetibilidade a variações, especialmente no longo prazo.

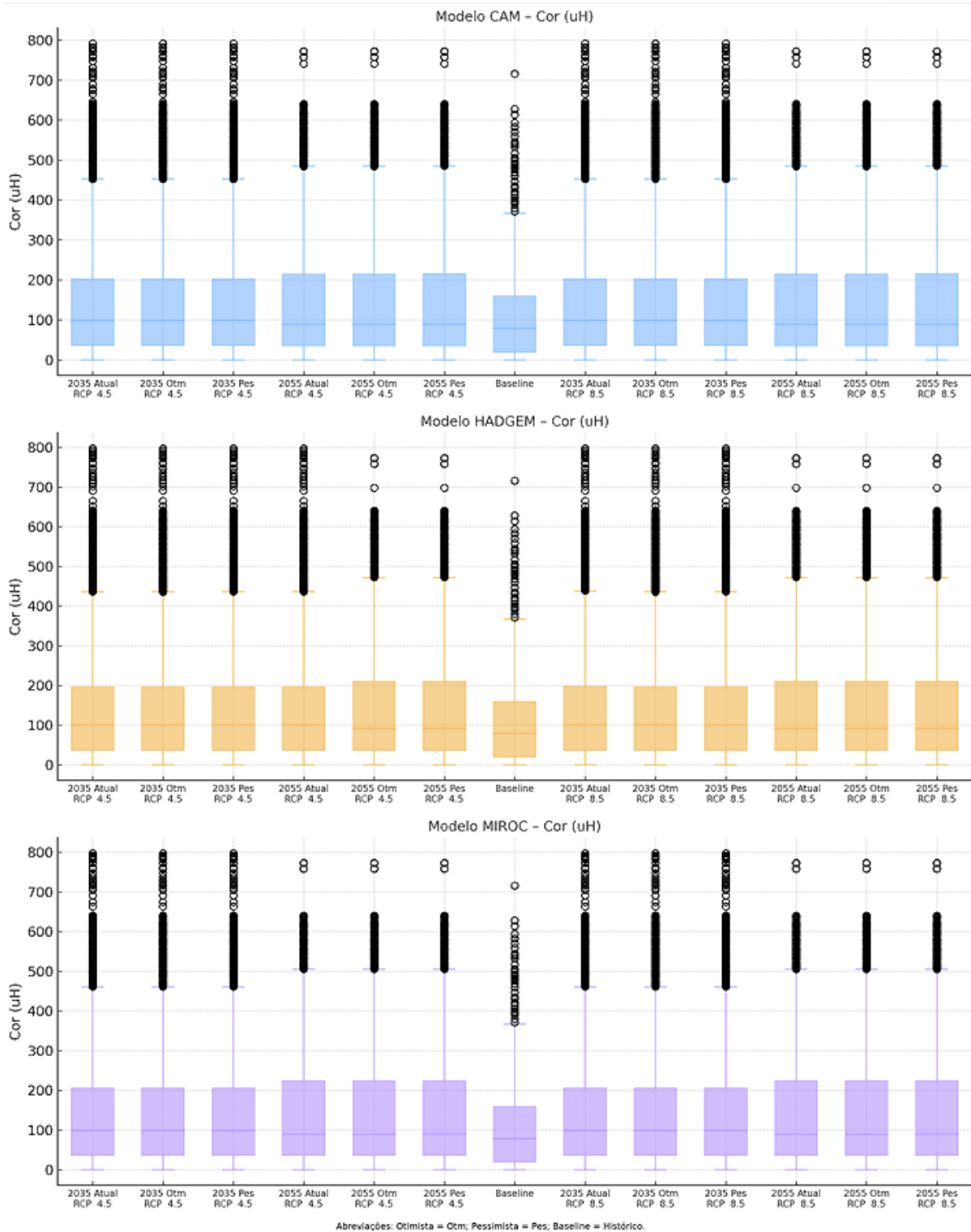


Figura 6 – Projeções da Cor aparente da água (Gradient Boosting) sob variáveis climáticas (Eta-CMIP5) e hidrológicas (MHD-Inpe) para 2035 e 2055.

Fonte: Produzido pelos autores (2025).

A análise estatística do parâmetro Cor (uH) fornece subsídios quantitativos para a interpretação dos efeitos climáticos na qualidade da água.

O modelo Eta-CamESM2 apresentou maior amplitude interquartil e maior proporção de valores anômalos, indicando maior variabilidade interna. Entretanto, a Anova entre os cenários do modelo

CAM não indicou diferença estatisticamente significativa ($F = 0,294$; $p = 0,995$), sugerindo que a variação observada decorre predominantemente da variabilidade interna da série, e não de deslocamentos sistemáticos entre os cenários climáticos. Em contrapartida, o modelo MIROC apresentou menor dispersão e valores medianos mais próximos do *baseline*, evidenciando maior estabilidade relativa. O HadGEM apresentou comportamento intermediário, com valores medianos ligeiramente superiores ao *baseline* e variabilidade moderada.

Tabela 5 – Análise estatística para o parâmetro cor aparente

<i>Estadística descritiva para o parâmetro cor aparente</i>				
<i>Modelo Climático</i>	<i>Média de pH</i>	<i>Amplitude</i>	<i>Observações</i>	
CAM	32,418	199,998	Distribuição assimétrica; presença recorrente de valores extremos elevados.	
HADGEM	33,104	199,997	Maior média entre os modelos; dispersão ligeiramente maior.	
MIROC	31,884	199,995	Média inferior; variabilidade comparável à do CAM.	
<i>Análise de variância (ANOVA) - Cor entre os cenários dentro de cada modelo</i>				
<i>Modelo Climático</i>	<i>Estatística F</i>	<i>Valor-p</i>	<i>Significância Estatística</i>	<i>Interpretação</i>
CAM	0,294	0,995	Não	Ausência de diferenças entre cenários.
HADGEM	7,814	< 0,0001	Sim	Diferença estatística com efeito extremamente pequeno.
MIROC	0,117	0,999	Não	Ausência de diferenças entre cenários.
<i>Teste de Tukey para comparação de médias de cor aparente entre os modelos</i>				
<i>Grupo 1</i>	<i>Grupo 2</i>	<i>Diferença de Média</i>	<i>Valor-p</i>	<i>Diferença Significativa</i>
CAM	HADGEM	+0,724	< 0,001	Sim
CAM	MIROC	-0,335	< 0,001	Sim
HADGEM	MIROC	-1,059	< 0,001	Sim

Fonte: Produzido pelos autores (2025).

A Figura 7 apresenta o comportamento do parâmetro $\text{NH}_3\text{-N}$ (nitrogênio amoniacal) sob diferentes cenários climáticos, segundo os modelos Eta-CamESM2, HADGEM e MIROC. Observa-se que, de modo geral, as concentrações projetadas de $\text{NH}_3\text{-N}$ tendem a aumentar nos cenários futuros, com destaque para o RCP 8.5 (Pessimista), o que indica maior vulnerabilidade da qualidade da água diante das condições de aquecimento e das variações hidrológicas.

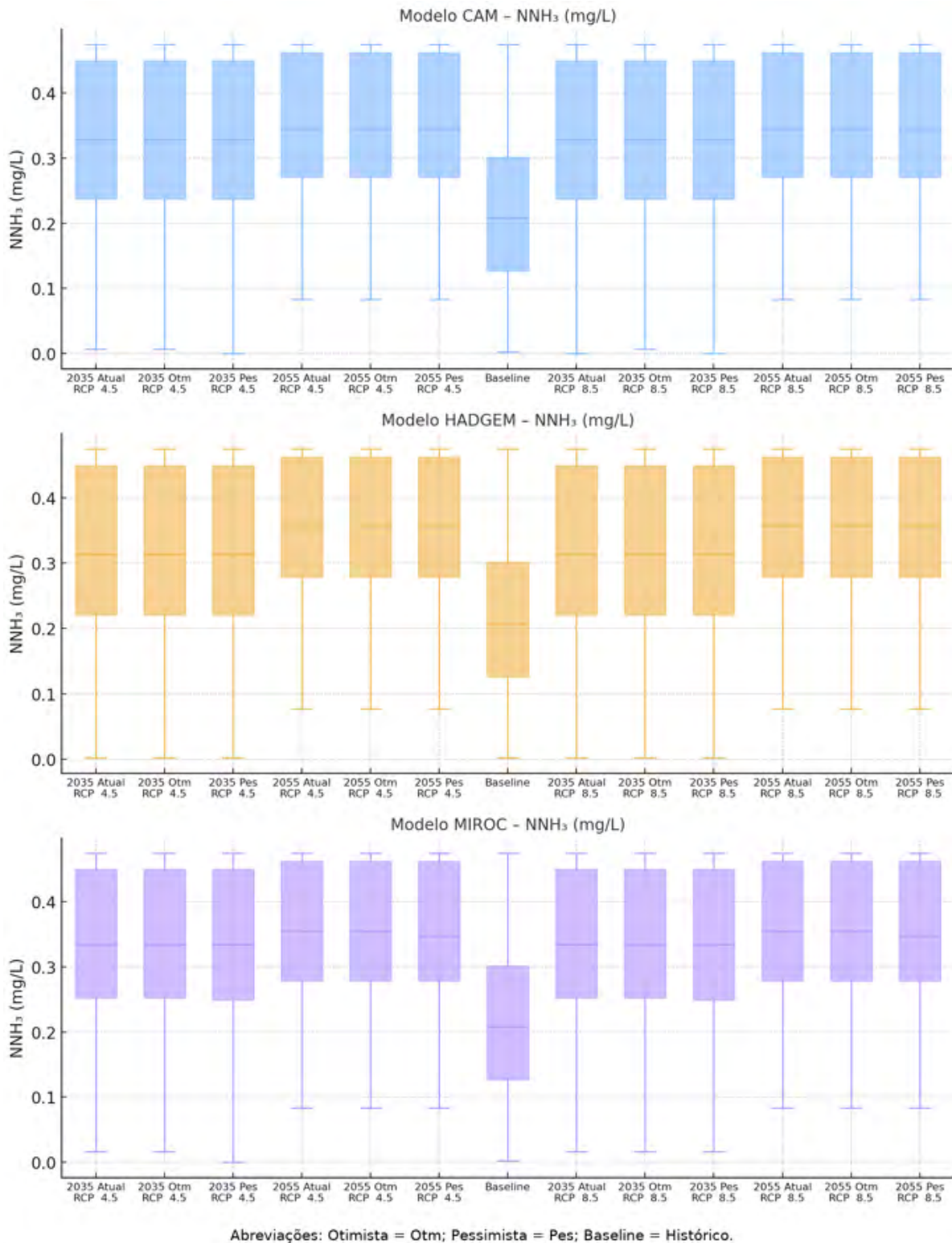


Figura 7 – Projeções do $\text{NH}_3\text{-N}$ da água (Gradient Boosting) sob variáveis climáticas (Eta-CMIP5) e hidrológicas (MHD-Inpe) para 2035 e 2055.

Fonte: Produzido pelos autores (2025).

De forma integrada, os resultados indicam que o Eta-CamESM2 apresenta maior sensibilidade à variabilidade interna, o HADGEM mantém um comportamento mais concentrado e o MIROC combina estabilidade central com ocorrência de extremos pontuais.

Contudo, a variabilidade global do $\text{NH}_3\text{-N}$ é explicada pela dinâmica interna da série e pela ocorrência de eventos extremos, e não por diferenças estruturais robustas entre modelos ou cenários.

Tabela 6 – Análise estatística para o parâmetro $\text{NH}_3\text{-N}$

<i>Estadística descritiva para o parâmetro $\text{NH}_3\text{-N}$</i>				
<i>Modelo Climático</i>	<i>Média de pH</i>	<i>Amplitude</i>	<i>Observações</i>	
CAM	0,1086	0,477	Variabilidade moderada; presença de outliers pontuais; distribuição relativamente estável entre os cenários.	
HADGEM	0,1051	0,472	Dispersão semelhante ao CAM; comportamento central concentrado.	
MIROC	0,104	0,472	Menor dispersão relativa; ocorrência pontual de extremos.	
<i>Análise de variância (ANOVA) - $\text{NH}_3\text{-N}$ entre os cenários dentro de cada modelo</i>				
<i>Modelo Climático</i>	<i>Estatística F</i>	<i>Valor-p</i>	<i>Significância Estatística</i>	<i>Interpretação</i>
CAM	2,873	< 0,0001	Sim	Diferença estatisticamente detectável, porém, pequena e baixa relevância prática.
HADGEM	4,912	< 0,0001	Sim	Diferença estatisticamente detectável; magnitude do efeito reduzida.
MIROC	1,964	< 0,0001	Sim	Diferença estatisticamente detectável; variação explicada pelos cenários é pequena.
<i>Teste de Tukey para comparação de médias de $\text{NH}_3\text{-N}$ entre os modelos</i>				
<i>Grupo 1</i>	<i>Grupo 2</i>	<i>Diferença de Média</i>	<i>Valor-p</i>	<i>Diferença Significativa</i>
CAM	HADGEM	+0,0037	< 0,001	Sim
CAM	MIROC	-0,0052	< 0,001	Sim
HADGEM	MIROC	-0,0089	< 0,001	Sim

Fonte: Produzido pelos autores (2025).

A simulação em *Python* do parâmetro $\text{NH}_3\text{-N}$ mostra um aumento percentual considerável em relação à *baseline*, que está em torno de 0,2 mg/L. Os resultados do período de 2035 (A, O, P) apresentam um valor mediano de cerca de 0,25 mg/L, o que representa um acréscimo de 25%. No período de 2055 (A, O, P), a mediana permanece estável, mas as variações continuam presentes.

A escolha do modelo climático exerce impacto direto sobre as projeções de amônia (NNH_3) nos cenários futuros, sendo recomendada uma análise integrada e cautelosa, considerando os objetivos da gestão e os níveis de risco aceitáveis.

5 DISCUSSÕES

Os resultados das simulações indicam que as mudanças climáticas podem influenciar os desafios relacionados à qualidade da água na Bacia do Rio Paraíba do Sul. A análise dos dados revela correlações

diretas entre o aumento das temperaturas do ar e da água, bem como impactos significativos nos parâmetros de qualidade, como pH, turbidez, cor e amônia (NH₃).

As projeções indicam que eventos climáticos extremos, como secas prolongadas e chuvas intensas, podem alterar significativamente a dinâmica hídrica da região, aumentando a concentração de poluentes e sedimentos, e demandando ajustes nos processos de tratamento. Já o aumento da temperatura favorece a proliferação de algas e a produção de toxinas, elevando a DBO e os desafios operacionais.

Estudos anteriores corroboram as informações encontradas. Em Andrade *et al.* (2016), a urbanização, a agricultura e o desmatamento afetam o ciclo hidrológico na Bacia do Rio Paraíba do Sul, impactando diretamente a qualidade da água disponível. Além disso, Gonçalves *et al.* (2015) utilizaram o Índice de Qualidade das Águas (IQA) para avaliar a contaminação por esgotos domésticos e por outras fontes poluidoras, o que evidencia a importância de medidas adicionais de gestão.

Coliformes termotolerantes e fósforo total apresentaram índices de desconformidade de 54% e 12%, respectivamente, na região do baixo Paraíba do Sul, entre 2012 e 2019, evidenciando a necessidade de medidas de gestão mais eficazes (Nunes *et al.*, 2024).

Alvarenga *et al.* (2012) ressaltam que práticas conservacionistas e ações de recuperação ambiental na microbacia do Ribeirão dos Macacos contribuíram para a melhoria da qualidade da água e a sustentabilidade hídrica, sendo a temperatura o parâmetro mais afetado pela sazonalidade da vazão.

Canamary *et al.* (2023), a respeito da segurança alimentar e energética com as mudanças climáticas na Bacia do Rio Paraíba do Sul, utilizam os mesmos modelos hidrológicos determinísticos. Assim, seguem algumas medidas que podem auxiliar nas mitigações desses impactos:

- Desenvolver cenários de estresse hídrico para antecipar medidas em situações críticas (ex.: seca severa ou inundação).
- Construção de reservatórios de contingência para garantir a estabilidade do abastecimento em eventos climáticos extremos.
- Buscar novas fontes (ex.: captação subterrânea, dessalinização ou reúso de água) para reduzir dependência de um único manancial.
- Ajustar os protocolos operacionais com base em modelos de previsão climática para que o sistema se adapte ao aumento da variabilidade hídrica.
- Promover campanhas de conscientização para reduzir o impacto das atividades humanas nos corpos de água.
- Reflorestar as áreas de recarga dos aquíferos e as áreas de proteção ambiental na bacia.
- Recuperar áreas degradadas e sem uso plantando árvores.
- Reduzir o desmatamento e fortalecer as políticas de conservação ambiental.
- Tratar 100% do esgoto doméstico e industrial.
- Reduzir o uso de combustíveis fósseis.
- Intensificar o monitoramento dos parâmetros físicos e químicos da qualidade da água na bacia.

Essas ações podem fortalecer a resiliência dos sistemas de tratamento de água, garantindo que, mesmo em cenários de mudanças climáticas, a qualidade da água tratada atenda aos padrões exigidos, porém, sempre haverá impactos financeiros, o que fará com que os tratamentos de água fiquem mais caros.

6 CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo avaliar os impactos das mudanças climáticas na qualidade da água na Bacia do Rio Paraíba do Sul, utilizando modelos climáticos (*CAM*, *HADGEM* e *MIROC*) e técnicas de *machine learning*. Os resultados obtidos confirmam os objetivos propostos, indicando associação entre mudanças climáticas e alterações nos parâmetros analisados na qualidade da água e fornecendo subsídios para estratégias de mitigação e adaptação. A análise comparativa entre cenários futuros e o cenário *baseline* (histórico) revelou que as variações climáticas desempenham papel determinante na potabilidade da água e na disponibilidade hídrica.

Há uma tendência de aumento gradual nas temperaturas do ar e da água em cenários futuros, especialmente nos cenários pessimistas de longo prazo, como o de 2055. Esse aquecimento pode comprometer o equilíbrio climático e hidrológico da região, elevando os custos de tratamento de água bruta. Além disso, o aumento da temperatura favorece o crescimento de algas e cianobactérias, que podem produzir toxinas prejudiciais à saúde humana e animal.

O aumento da temperatura e a maior frequência de eventos climáticos extremos, como chuvas intensas e secas prolongadas, favorecem a proliferação de algas nocivas. Esses organismos podem deteriorar a qualidade da água, aumentando a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e reduzindo a concentração de oxigênio dissolvido (OD).

As mudanças climáticas afetam diretamente parâmetros críticos de qualidade da água, como turbidez, cor, amônia (NNH3) e pH. Secas prolongadas reduzem a vazão dos rios, aumentando a concentração de poluentes, enquanto chuvas intensas transportam mais sedimentos e matéria orgânica para os mananciais. A necessidade de tecnologias mais avançadas e o uso intensificado de produtos químicos podem aumentar os custos de tratamento em até 20%.

Diante desses desafios, algumas medidas para mitigar os impactos das mudanças climáticas foram discutidas no tópico anterior.

Essas ações podem fortalecer a resiliência dos sistemas de tratamento de água, garantindo que mesmo em cenários de mudanças climáticas, a qualidade da água tratada atenda aos padrões exigidos. No entanto, é importante destacar que essas medidas terão impactos financeiros, elevando os custos de tratamento.

Este trabalho foi limitado pela dependência de modelos climáticos específicos (*CAM*, *HADGEM*, *MIROC*), que apresentam níveis distintos de sensibilidade e de incerteza. Estudos futuros devem explorar a eficácia de diferentes tecnologias de tratamento em cenários extremos de mudanças climáticas, além de avaliar o impacto de intervenções socioambientais na qualidade da água. A integração de dados de alta resolução temporal e espacial também pode aprimorar a precisão das projeções.

Em suma, este estudo reforça a importância de uma gestão integrada dos recursos hídricos, combinando soluções tecnológicas, técnicas de gestão ambiental e políticas públicas voltadas à segurança hídrica. A implementação de estratégias de mitigação é relevante para garantir a disponibilidade de água de qualidade no futuro.

DECLARAÇÃO SOBRE O USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Os autores utilizaram ChatGPT (OpenAI) exclusivamente para edição linguística e aprimoramento estilístico. Todo o conteúdo científico, a análise e a contribuição intelectual foram desenvolvidos e verificados pelos autores, que assumem total responsabilidade pela precisão e integridade do manuscrito.

CONSIDERAÇÕES ÉTICAS

O presente estudo baseou-se exclusivamente na análise de dados ambientais secundários e na modelagem computacional, não envolvendo a coleta de dados com seres humanos ou a experimentação com animais. Dessa forma, não foi necessária a submissão nem a aprovação por um comitê de ética em pesquisa.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Atlas Brasil: abastecimento urbano de água**. Brasília: ANA, 2011.
- ALMAGRO, A. *et al.* **Modelos climáticos globais e regionais para o Brasil**. Campinas: ClimaCom, 2020.
- ALVARENGA, L. A. *et al.* Qualidade e quantidade da água na microbacia do Ribeirão dos Macacos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 1, p. 69-75, 2012.
- AMÂNCIO, J. A.; CATALDI, M. B. O futuro da água na Bacia do Rio Paraíba do Sul. **Revista de Estudos Ambientais**, v. 21, n. 2, p. 145-158, 2019.
- ANDRADE, E. M. *et al.* **Qualidade da água e uso e ocupação do solo na Bacia do Rio Paraíba do Sul: engenharia sanitária e ambiental**, v. 21, n. 1, p. 133-144, 2016.
- AWWA. **Water Quality and Treatment: a handbook on drinking water**. 6. ed. New York: McGraw-Hill, 2021.
- BOGAN, T. *et al.* A review of stream temperature prediction models. **Environmental modelling & software**, v. 19, n. 4, p. 403–415, 2004.
- CANAMARY, E. A.; TOMASELLA, J.; PAIVA, A. C. E.; MARTINS, M. A.; MARCHEZINI, V.; SILVA, D. M. Segurança hídrica e energética na Bacia do Paraíba do Sul diante das mudanças climáticas: geração de energia e abastecimento humano. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL, 4., 2023, Campos dos Goytacazes. **Anais [...]** Porto Alegre: ABRHidro, 2023. p. 11–13.
- COLE, T. M.; WELLS, S. A. **CE-QUAL-W2: a two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model, Version 3.6. User Manual**. Portland: Department of Civil and Environmental Engineering, Portland State University, 2006.
- CRAVINHO, J. *et al.* A interação clima e água. **Boletim da Sociedade Portuguesa de Hidrologia**, v. 34, p. 25-44, 2004.
- DELPLA, I. *et al.* Impacts of climate change on surface water quality in relation to drinking water production. **Environment International**, v. 35, n. 8, p. 1225–1233, 2009.
- DHI. Mike She User Manual. **Hørsholm**: DHI Water and Environment, 2017.
- EDINGER, J. E.; DYER, R. S.; GILLELAN, E. S. Thermal pollution: status of the art. **Journal of the Sanitary Engineering Division**, v. 94, n. 1, p. 1–16, 1968.

IPCC. **Sixth Assessment Report**. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021.

KARTHICK, P.; KRISHNAN, M.; MANIKANDAN, R. Water Quality Index estimation using machine learning algorithms. **Environmental Research**, v. 226, 115645, 2024.

KHAN, I. *et al.* A hybrid machine learning model for water quality prediction. **Journal of Environmental Management**, v. 293, 112768, 2021.

MARTINS, F. R. *et al.* Cenários de demanda hídrica na agricultura paulista. **Revista de Geografia Agrária**, v. 42, n. 1, p. 38-59, 2023.

NOBRE, C. A. *et al.* Vulnerabilidades das grandes metrópoles brasileiras às mudanças climáticas: região metropolitana de São Paulo. **Parcerias Estratégicas**, v. 21, n. 42, p. 13-42, 2016.

NUNES, L. S. *et al.* Análise dos padrões de qualidade da água no baixo Paraíba do Sul. **Revista Ambiente & Água**, v. 19, n. 2, e3056, 2024.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Water Risk Hotspots for Agriculture**. Paris: OECD Publishing, 2018.

PAIVA, R. *et al.* Calibration strategies for hydrological modeling in climate change scenarios. **Water**, v. 15, n. 1, p. 65, 2023.

PAIVA, A. C. E.; MARTINS, M.; CANAMARY, E. A.; RODRIGUEZ, D. A.; TOMASELLA, J. Inter-basin water transfers under changing climate and land use: assessing water security and hydropower in the Paraíba do Sul River basin, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 133, p. 1-12, 2024. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104707>

PRADO, P. S. Mudanças climáticas e segurança hídrica. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 34, p. 202-220, 2024.

REZENDE, F. A. *et al.* Projeções de uso e ocupação do solo para a Bacia do Rio Paraíba do Sul. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, n. 3, p. 845-860, 2018.

RODRIGUES, L. M. Avaliação de cenários climáticos em regiões hidrográficas brasileiras. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 37, n. 1, p. 97-110, 2022.

VÖRÖSMARTY, C. J. *et al.* Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, v. 467, p. 555-561, 2010.

WANG, Y. *et al.* SVR model for water quality prediction. **Environmental Modelling & Software**, v. 93, p. 13–20, 2017.

WANG, Y. *et al.* Climate change effects on drinking water quality. **Journal of Hydrology**, v. 561, p. 1–9, 2018.

WATER ENVIRONMENT FEDERATION. **Resilient Water Infrastructure**: strategies for a changing climate. Alexandria, VA: WEF, 2023.

WHITEHEAD, P. G. *et al.* Impacts of climate change on in-stream nitrogen in a lowland chalk stream: an appraisal of adaptation strategies. **Science of the Total Environment**, v. 407, p. 2136-2145, 2009.

WWAP. **The United Nations World Water Development Report 2022**. Groundwater: making the invisible visible. Paris: Unesco, 2022.