AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE AO GALGAMENTO DE RESERVATÓRIOS SOB CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Taylon Alves da Silva [1] ; Thaís Antero de Oliveira [2]; José Kerlly Soares de Araújo [3] ; Samiria Maria Oliveira da Silva[4] ; Francisco de Assis de Sousa Filho†

RESUMO – O presente estudo avaliou os impactos das mudanças climáticas na vulnerabilidade ao galgamento dos reservatórios da Região Hidrográfica do Alto Jaguaribe-CE. Foram utilizados dados observados de precipitação máxima anual e projeções de 25 modelos do CMIP6 para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Após o downscaling dos dados climáticos, estimaram-se chuvas de projeto para períodos de retorno de 1.000 e 10.000 anos, empregadas na modelagem hidrológica por meio do *software* HEC-HMS possibilitando a avaliação das lâminas máximas de água e da ocorrência de galgamento nos reservatórios. Os resultados indicaram maior impacto para o TR de 10.000 anos, destacando os reservatórios Poço da Pedra, João Luiz e Pau Preto como os mais vulneráveis, além da ocorrência de galgamento no reservatório Orós em cenários extremos. Os resultados reforçam a importância da incorporação de projeções climáticas às análises de segurança de barragens e ao planejamento de medidas adaptativas.

ABSTRACT – This study evaluated the impacts of climate change on the overtopping vulnerability of reservoirs in the Upper Jaguaribe River Basin, Ceará State, Brazil. Observed annual maximum precipitation data and projections from 25 CMIP6 models under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios were used. After statistically downscaling the climate data, design rainfalls associated with return periods of 1,000 and 10,000 years were estimated and applied in hydrological modeling using the HEC-HMS software, enabling the assessment of maximum water levels and reservoir overtopping occurrence. The results indicated greater impacts for the 10,000-year return period, highlighting the Poço da Pedra, João Luiz, and Pau Preto reservoirs as the most vulnerable. In addition, overtopping was observed at the Orós Reservoir under extreme scenarios. These findings reinforce the importance of incorporating future climate projections into dam safety assessments and the planning of adaptation measures.

Palavras-Chave – Modelagem Hidrológica, CMIP6, Segurança de Barragens.

[1]) Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA), Universidade Federal do Ceará (UFC), Centro de Tecnologia, Depto. de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Campus do Pici – Bloco 713, 60400-900, Fortaleza, Ceará, Brasil. Fone: +55 85 3366.9623; e-mail: pos@deha.ufc.br
[2]) Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA), Universidade Federal do Ceará (UFC), Centro de Tecnologia, Depto. de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Campus do Pici – Bloco 713, 60400-900, Fortaleza, Ceará, Brasil. Fone: +55 85 3366.9623. e-mail: thais.antero@gmail.com
[3]) Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA), Universidade Federal do Ceará (UFC), Centro de Tecnologia, Depto. de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Campus do Pici – Bloco 713, 60400-900, Fortaleza, Ceará, Brasil. Fone: +55 85 3366.9623; e-mail: pos@deha.ufc.br
[4]) Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA), Universidade Federal do Ceará (UFC), Centro de Tecnologia, Depto. de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Campus do Pici – Bloco 713, 60400-900, Fortaleza, Ceará, Brasil. Fone: +55 85 3366.9623; e-mail: pos@deha.ufc.br
† Falecido em março de 2026. O Prof. Assis de Sousa Filho contribuiu significativamente para a concepção, desenvolvimento e orientação deste estudo antes de seu falecimento.

1 – INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas constituem uma das principais preocupações globais devido aos seus efeitos sobre os sistemas naturais e as atividades humanas. Entre suas consequências mais relevantes destaca-se a alteração dos regimes hidrológicos, que pode comprometer o desempenho e a segurança de infraestruturas hídricas, como barragens de reservação, aumentando o risco de falhas e rompimentos dessas estruturas (Qin *et al*., 2022).

No Nordeste brasileiro, onde a precipitação apresenta elevada variabilidade interanual, com ocorrência alternada de anos extremamente secos e chuvosos (Costa *et al.,* 2020), as mudanças climáticas podem provocar alterações significativas no ciclo hidrológico, podendo afetar ainda mais a variabilidade da região e impactar diretamente as bacias hidrográficas e a segurança de infraestruturas hídricas, como os reservatórios. Dessa forma, as mudanças climáticas representam ameaças significativas à segurança e à confiabilidade das infraestruturas hídricas, como barragens, uma vez que a intensificação de eventos climáticos extremos e as alterações nos padrões de precipitação podem aumentar o risco de galgamento e, consequentemente, de falhas estruturais nessas infraestruturas (Mohtar *et al*., 2020).

Diante disso, o planejamento, dimensionamento e gerenciamento de barragens demandam abordagens que considerem não apenas registros hidrológicos históricos, mas também projeções climáticas futuras. Nesse contexto, a utilização de modelos chuva-vazão associados a cenários climáticos é aliada ao entendimento de possíveis alterações no comportamento hidrológico das bacias e seus reflexos sobre a segurança das estruturas hidráulicas.

As projeções climáticas futuras são fornecidas pelos Modelos Climáticos Globais (GCMs) desenvolvidos no âmbito do Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6). Esses dados incluem simulações históricas, baseadas em observações registradas, e cenários futuros que combinam as Trajetórias Socioeconômicas Compartilhadas (SSPs) com diferentes níveis de forçamento radiativo, representando distintas trajetórias de emissões de gases de efeito estufa (Wu et al., 2021).

Nesse contexto, este estudo tem como objetivo avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre a segurança de reservatórios da região hidrográfica do Alto Jaguaribe, no estado do Ceará, considerando diferentes cenários futuros de emissões de gases de efeito estufa. A análise busca quantificar os efeitos das alterações hidrológicas projetadas sobre as lâminas d'água dos reservatórios e a vulnerabilidade das barragens ao galgamento, contribuindo para a avaliação do risco sistêmico associado à operação dessas estruturas.

2 – METODOLOGIA

A Região Hidrográfica do Alto Jaguaribe – CE constitui a área de estudo desta pesquisa e localiza-se na porção sudoeste do Ceará (Figura 1). A região é limitada ao sul pelo estado de Pernambuco e a oeste pelo estado do Piauí. O clima da bacia é do tipo BSh' (clima semiárido quente), segundo a classificação climática de Köppen (Medeiros *et al*., 2014). Essa região é composta por 24 municípios com aproximadamente meio milhão de habitantes e 24 açudes monitorados.

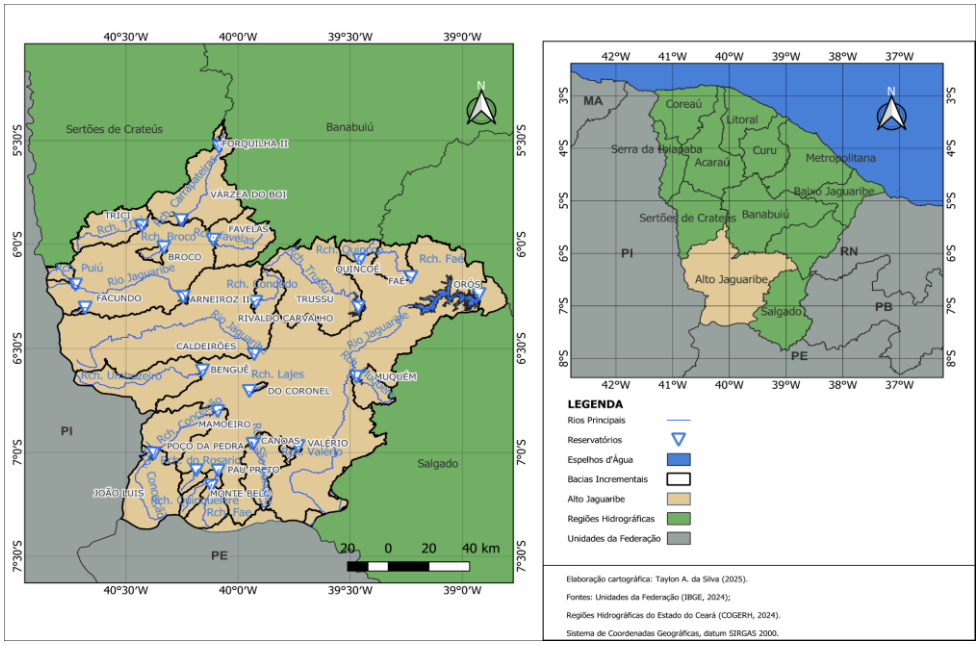


Figura 1 – Mapa de Localização da Bacia

Primeiramente foi realizado a coleta de dados observados de precipitação máxima diária de cada ano da série histórica da área de estudo através de um posto representativo para região hidrográfica (Tabela 1), localizado em Tauá na sub-bacia de Facundo (foi escolhido esse posto pela quantidade de dados disponíveis).

Tabela 1 - Posto pluviométrico utilizado

Código	Latitude	Longitude	Município	Período de observação
640002	-6.02 (S)	-40.28 (W)	Tauá	1912-2021

Em sequência, foi utilizado os dados de precipitação em formato de grade de modelos climáticos do CMIP6 no armazenamento de dados climáticos do "Copernicus", programa esse

implementado pelo Centro Europeu de Previsões Meteorológicas a Médio Prazo (ECMWF). Foi realizado um recorte espacial da região de estudo em cada modelo analisado. Dentre todos os modelos disponíveis na plataforma foram analisados quais possuem dados históricos (1912-2014), cenário intermediário (SSP2-4.5) e cenário pessimista (SSP5-8.5), restando então 25 modelos para realização das próximas etapas. O cenário SSP2-4.5 é considerado o intermediário, com estabilização de emissões de dióxido de carbono, enquanto o SSP5-8.5 é o cenário pessimista com grandes emissões de poluentes.

Para a extração dos dados de precipitação, foram considerados os pixels cujos centróides estão localizados dentro da área de estudo, sendo posteriormente calculada a média aritmética dos valores de precipitação a partir dos valores obtidos. Para os modelos de menor resolução espacial, foi identificado o pixel com centróide mais próximo da área de interesse para a obtenção dos respectivos dados de precipitação. Com esses dados foi então calculado os valores máximos anuais de cada modelo para uma análise de extremos.

Como próximo passo foi realizado então o *downscaling* estatístico dos dados utilizando o método baseado nas equações de Tong *et al*. (2021), chamado de *Quantile Delta Mapping* que é apresentado a seguir:

$$\varepsilon = F_{m,p}^{(t)}\left[x_{m,p}(t)\right] \quad (1)$$

$$X(t) = F_{o,c}^{-1}[\varepsilon(t)] \quad (2)$$

$$\Delta = \frac{F_{m,p}^{(t)-1}[\varepsilon(t)]}{F_{m,c}^{-1}[\varepsilon(t)]} = \frac{x_{m,p}(t)}{F_{m,c}^{-1}\{F_{m,p}^{(t)}[x_{m,p}(t)]\}} \quad (3)$$

$$x_{bc}(t) = X(t) * \Delta(t) \quad (4)$$

Em que $x_{m,p}(t)$ é o valor modelado no tempo t dentro do período de projeção, nomeado pelo subscrito p; $Fm{,}p\ (t)$ é a CDF dos dados do modelo; $F_{o,c}^{-1}$ é a CDF inversa dos valores observados; $\Delta(i)$ é a variação relativa nos quantis entre os períodos de calibração e o tempo t do projeto; $F_{m,c}^{-1}$ é a CDF inversa das simulações do histórico do modelo; $x_{bc}(t)$ corresponde ao valor corrigido.

Após realizar o downscaling estatístico dos dados de precipitação, aplicou-se a distribuição de Gumbel para estimar as precipitações associadas aos períodos de retorno de 1.000 e 10.000 anos, tanto para os dados observados quanto para os cenários projetado.

Como forma de considerar os cenários mais críticos de mudanças climáticas, foram ordenados e selecionados os quartis 50 (Q50) e 75 (Q75) das distribuições de probabilidades associados a cada TR e cada cenário climático. Ao todo, foram obtidas oito projeções climáticas distintas, possibilitando a análise comparativa de diferentes níveis de intensificação das chuvas e seus potenciais efeitos sobre o comportamento hidrológico da região hidrográfica estudada.

Para a elaboração dos hietogramas utilizados na modelagem hidrológica, as precipitações associadas aos diferentes períodos de retorno foram desagregadas em durações menores por meio da metodologia proposta por Torrico (1974), baseada na divisão do território brasileiro em isozonas homogêneas de chuvas intensas com comportamento estatístico regional semelhante. Considerando que a área de estudo está inserida na Isozona G, foram aplicados os coeficientes de desagregação correspondentes a essa região para as chuvas associadas aos períodos de retorno de 1.000 e 10.000 anos. Como resultado, foram estimadas precipitações para diferentes durações, alcançando intervalos mínimos de 6 minutos, possibilitando a construção dos hietogramas de projeto necessários às simulações hidrológicas.

Em sequência foi utilizado o método dos Blocos Alternados para a elaboração dos hietogramas, que, conforme Bemfica et al. (2000), se baseia na construção de blocos de chuva em que o maior valor se localize no centro do hietograma. Para a determinação da duração total das chuvas em cada sub-bacia na elaboração dos hietogramas foi utilizado o Tempo de Concentração (TC) da chuva da área incremental do maior reservatório da região em estudo, o açude Óros, com 50,1 horas, com o objetivo de facilitar a modelagem hidrológica posterior.

Na modelagem hidrológica foi utilizado o *software* HEC-HMS com a finalidade de aplicar os hietogramas elaborados para cada modelo, cenário e TR e assim analisar a resposta das bacias da região. O uso do programa tem como objetivo a estimação da variação da lâmina d'água dos reservatórios presentes na região hidrológica, observando então a ocorrência ou não de galgamento em cada um dos reservatórios da região nos cenários de mudanças climáticas.

Na utilização do *software* foram aplicadas algumas metodologias para a representação da Região Hidrográfica, como o método CN (*Curve Number*) do Soil Conservation Service (SCS) para a determinação das vazões de pico (NRCS, 1997); método de Kirpich (1940) para determinar os TC's das sub-bacias; o Método de Puls (1928) para calcular a propagação de cheias no reservatório e o método de Muskingum-Cunge (Cunge, 1969; Tucci, 2005) para determinar as vazões nos rios. Além disso, foi utilizado o *software* "QGIZ" para os cálculos de tamanhos de rios, declividades, áreas entre outros dados relevantes.

A partir das lâminas máximas simuladas para cada reservatório, foi realizada uma análise de vulnerabilidade ao galgamento (transbordamento do reservatório). A classificação adotada considerou quatro níveis de vulnerabilidade: **Nível 0**, ausência de galgamento em todos os cenários; **Nível 1**, galgamento apenas sob os cenários climáticos associados ao período de retorno de 10.000 anos; **Nível 2**, galgamento sob os cenários climáticos associados ao período de retorno de 1.000 anos; e **Nível 3**, galgamento já verificado para as condições observadas. Com base nessa classificação, foi

produzido um mapa de vulnerabilidade visando representar a distribuição espacial dos reservatórios e destacar aqueles mais suscetíveis a falhas por galgamento sob condições hidrológicas extremas.

3 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

As precipitações máximas anuais foram obtidas a partir dos dados observados no posto pluviométrico de Tauá e dos dados obtidos dos modelos climáticos avaliados.

Após a realização do downscaling estatístico dos dados de precipitação dos modelos climáticos avaliados, ajustou-se a função de distribuição cumulativa (CDF) do tipo Gumbel aos dados observados e projetados, possibilitando a estimativa das precipitações associadas aos períodos de retorno (TR) de 1.000 e 10.000 anos. Para os dados observados, foram obtidas precipitações de 202 mm e 261 mm para os TRs de 1.000 e 10.000 anos, respectivamente. Para os dados projetados, foram estimadas as precipitações correspondentes aos cenários intermediário e pessimista de cada modelo analisado, cujos resultados são apresentados a seguir.

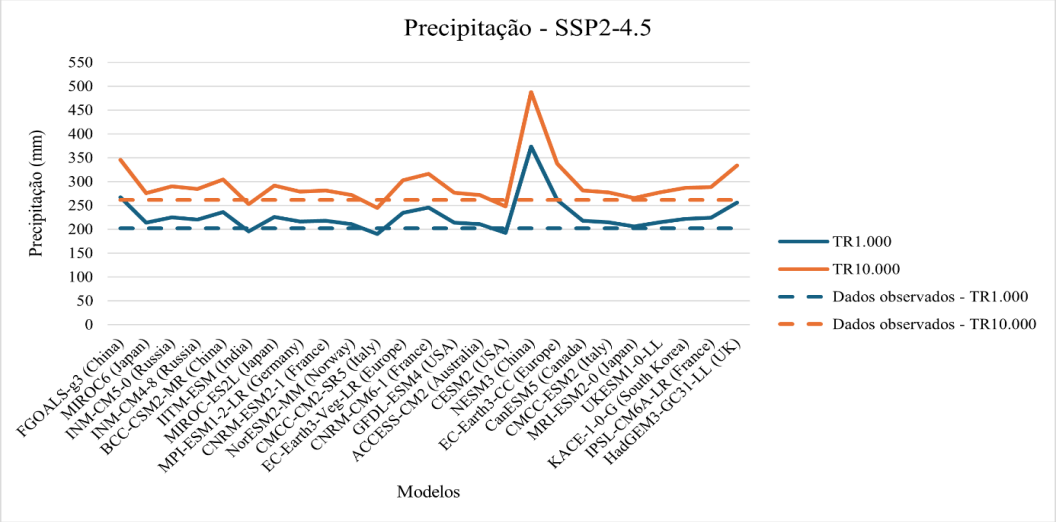


Figura 2 – Gráfico de chuvas do cenário moderado (SSP2-4.5) para cada TR.

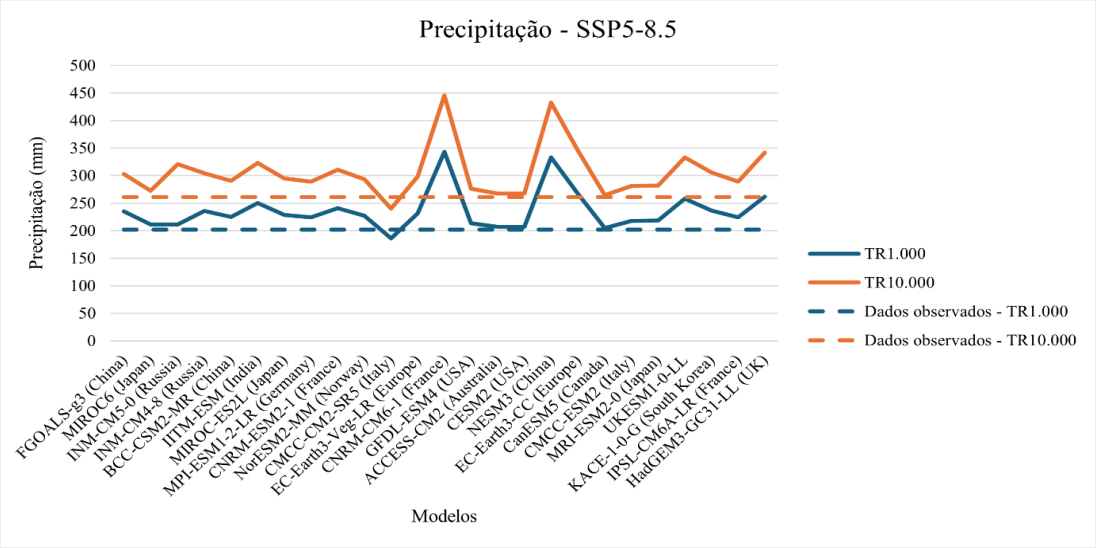


Figura 3 – Gráficos de chuvas do cenário pessimista (SSP5-8.5) para cada TR

Com base nos resultados obtidos, foram selecionados os modelos utilizados nas etapas subsequentes da modelagem hidrológica. Para avaliar cenários mais críticos à segurança das barragens, adotaram-se as precipitações correspondentes aos quartis 50 (Q50) e 75 (Q75) de cada cenário climático e período de retorno. Esses percentis representam, respectivamente, a tendência central e uma condição mais conservadora das projeções, incorporando a variabilidade entre os modelos climáticos. Os modelos selecionados e os respectivos valores de precipitação são apresentados a seguir:

Tabela 2 – Modelos climáticos e chuvas de projeto

Quartil	Modelo	Precipitação (mm)
q50_ssp245_1000	EC-Earth3-CC (Europe)	217,95
q50_ssp585_1000	NorESM2-MM (Norway)	227,17
q75_ssp245_1000	GFDL-ESM4 (USA)	234,32
q75_ssp585_1000	CNRM-ESM2-1 (France)	240,67
q50_ssp245_10000	EC-Earth3-CC (Europe)	281,30
q50_ssp585_10000	CNRM-CM6-1 (France)	294,91
q75_ssp245_10000	GFDL-ESM4 (USA)	302,46
q75_ssp585_10000	CanESM5 (Canada)	320,73

A partir das chuvas de projeto definidas para cada cenário climático e período de retorno, foram construídos os hietogramas de entrada utilizados nas simulações hidrológicas. Por meio da aplicação do modelo hidrológico, estimaram-se os níveis máximos d'água atingidos nos reservatórios

da Região Hidrográfica para cada cenário analisado. Com base nos resultados obtidos, foram elaborados mapas temáticos de vulnerabilidade ao galgamento, os quais permitem identificar os reservatórios com maior potencial de ocorrência desse processo.

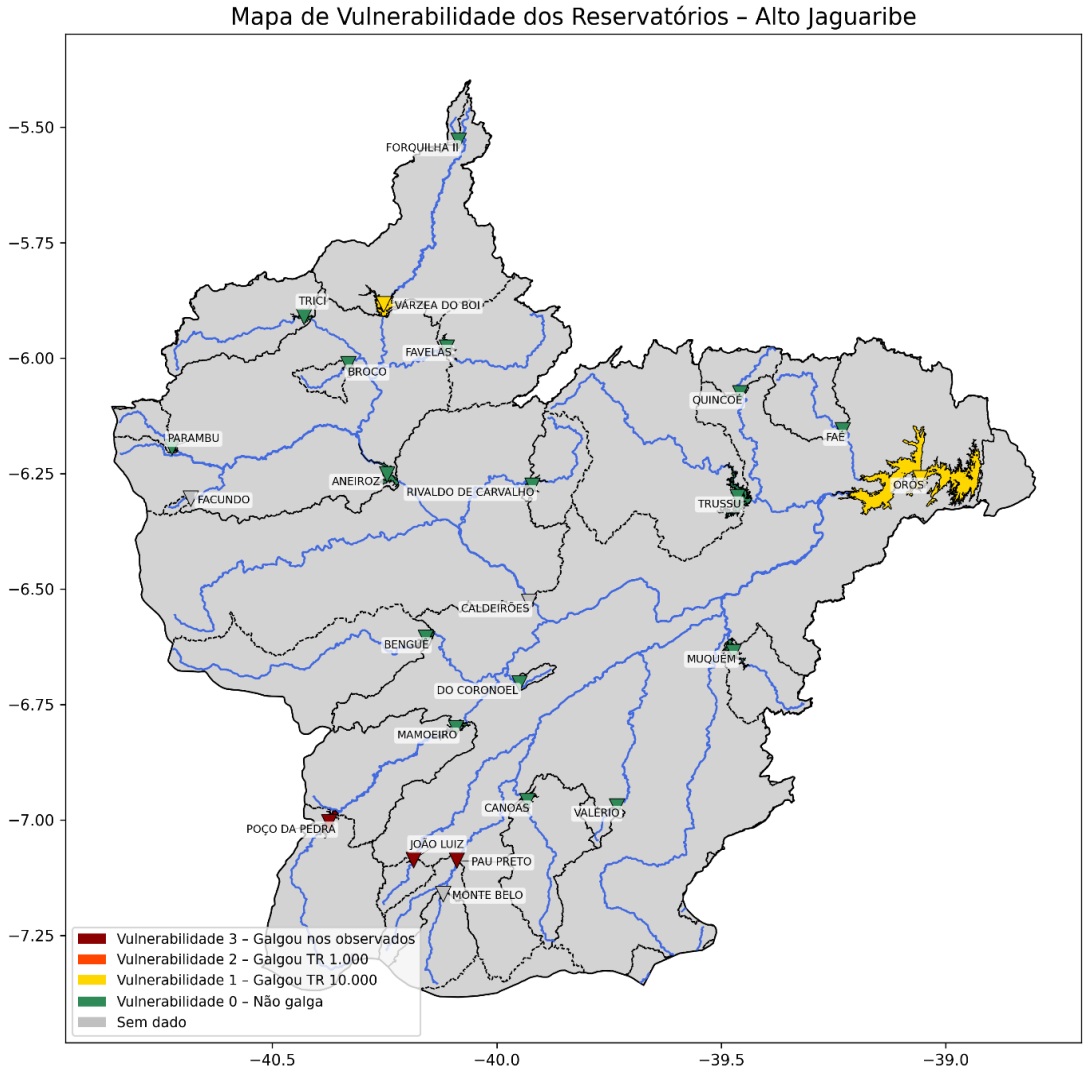


Figura 4 – Vulnerabilidades dos reservatórios do Alto Jaguaribe

A análise do mapa de vulnerabilidade indicou que os reservatórios Poço da Pedra, João Luiz e Pau Preto apresentam o maior nível de vulnerabilidade ao galgamento (nível 3), uma vez que já atingiram essa condição considerando os dados observados. Esse comportamento pode estar associado à distância em relação ao posto pluviométrico de referência, podendo indicar que as chuvas que efetivamente ocorrem nessas bacias incrementais são diferentes da que ocorrem na região do posto, já que a partir de dados disponíveis no site da COGERH observa-se temperaturas menores na

região Sul do Alto Jaguaribe em relação as do Norte, resultando em possíveis superestimações ou subestimações nas vazões calculadas nesses reservatórios.

O reservatório Várzea do Boi, localizado próximo ao posto pluviométrico de referência, apresentou vulnerabilidade 1, com ocorrência de galgamento para projeções com TR de 10.000 anos. A mesma classificação foi observada para o reservatório Orós, resultado preocupante por se tratar do principal reservatório da região. Os demais 16 reservatórios apresentaram vulnerabilidade 0, sem registro de galgamento em nenhum dos cenários simulados.

Como esperado, os cenários com período de retorno de 10.000 anos produziram impactos mais significativos nos reservatórios do Alto Jaguaribe do que aqueles associados ao TR de 1.000 anos, evidenciado pela ausência de reservatórios com vulnerabilidade nível 2. Resultado semelhante foi observado por Furtado (2024) na barragem Banabuiú (CE), onde não houve galgamento para o TR de 1.000 anos, enquanto a maioria dos cenários com TR de 10.000 anos apresentou essa condição.

4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os reservatórios Poço da Pedra, João Luiz e Pau Preto foram classificados com vulnerabilidade de nível 3, apresentando galgamento mesmo sob condições climáticas observadas. Apesar da elevada suscetibilidade indicada, esse resultado deve ser interpretado com cautela, pois esses reservatórios estão localizados no extremo sul da área de estudo, distantes do posto pluviométrico de referência, o que pode introduzir incertezas nas estimativas de precipitação e nas vazões afluentes simuladas.

Em contraste, o reservatório Várzea do Boi, situado nas proximidades do posto pluviométrico de referência, apresentou condição de galgamento apenas nos cenários mais extremos, associados ao período de retorno de 10.000 anos. A menor distância em relação à estação utilizada na caracterização das chuvas confere maior representatividade às condições hidrometeorológicas adotadas e, consequentemente, maior confiabilidade às estimativas produzidas para esse reservatório.

Destaca-se ainda o reservatório Orós, para o qual foi identificada ocorrência de galgamento em cenários extremos. Considerando sua expressiva capacidade de armazenamento e sua importância estratégica para o abastecimento hídrico regional, esse resultado evidencia a necessidade de avaliações complementares voltadas à análise de segurança da estrutura frente a condições hidrológicas severas e às possíveis alterações do regime de precipitações decorrentes das mudanças climáticas.

Os resultados evidenciam que as mudanças climáticas podem impactar significativamente a segurança de barragens, não apenas de forma individual, mas também em escala regional, afetando de maneira cumulativa o sistema de reservatórios do Alto Jaguaribe. Nesse contexto, torna-se fundamental incorporar cenários climáticos futuros às análises de segurança, subsidiando estratégias de adaptação e o aprimoramento do planejamento e da gestão dessas estruturas.

5 - REFERÊNCIAS

BEMFICA, D. C.; GOLDEFUM, J. A.; SILVEIRA, A. L. L. (2000) Análise da aplicabilidade de padrões de chuva de projeto a Porto Alegre. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 5, n. 4, pp. 5-16.

COSTA R. L. *et al.* (2020). Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014. *Weather Clim. Extrem.*28, 100254–100321. 10.1016/j.wace.2020.100254.

CUNGE, J.A. On the subject of a flood propagation method (Muskingum method). Journal of Hydraulic Research, v.7, n.2, 205-230, 1969.

DE SOUZA, E.B.; KAYANO, M.T.; AMBRIZZI, T. 2005. Intraseasonal and submonthly variability over the Eastern Amazon and Northeast Brazil during the autumn rainy season. Theoretical and Applied Climatology, 81: 177-191.

FURTADO, F. de A. Avaliação do impacto das mudanças climáticas na segurança de barragens: estudo de caso da barragem Banabuiú. 2024. 68f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Recursos Hídricos) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.

KIRPICH, Z.P. Time of concentration in small agricultural watersheds, Civil Engineering, v. 10, n. 6, p.362-, 1940.

MOHTAR, W. H. M. W. *et al*. Assessment of dam appurtenant structures under multiple flow discharge scenarios. Ain Shams Engineering Journal, v. 11, n. 4, p. 913-922, 2020.

NATIONAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE. (1997). Hydrology Nacional Engineering Handbook, USDA. Whashington DC.

Qin, P., Xu, H., Liu, M. *et al.* Impactos projetados das mudanças climáticas nas principais barragens da bacia do Alto Rio Yangtzé. *Mudanças Climáticas* **170**, 8 (2022).

TONG, Yao et al. Bias correction of temperature and precipitation over China for RCM simulations using the QM and QDM methods. Climate Dynamics, v. 57, n. 5, p. 1425–1443, 1 set. 2021.

TORRICO, J.J.T. (1974) Práticas hidrológicas. Rio de Janeiro: Transcon,120p.

Wu, Y.; Miao, C.; Sun, Y.; AghaKouchak, A.; Shen, C.; Fan, X., 2021. Global observations and CMIP6 simulations of compound extremes of monthly temperature and precipitation. GeoHealth, v. 5, (5), e2021GH000390.