PRIORIZAÇÃO DE BARRAGENS BASEADA NA VULNERABILIDADE AO GALGAMENTO SOB CENÁRIOS CLIMÁTICOS FUTUROS

Taylon Alves da Silva [1] ; Ticiana Marinho de Carvalho Studart [2]& Francisco de Assis de Sousa Filho [3]

Palavras-Chave – CMIP6; Segurança de Barragens; Priorização.

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas figuram entre os maiores desafios globais da atualidade em razão de seus impactos sobre os sistemas naturais e as atividades humanas. Dentre os efeitos mais significativos, destaca-se a modificação dos regimes hidrológicos, que pode afetar o desempenho e a segurança de infraestruturas hídricas, como barragens de reservação, elevando o risco de falhas e rompimentos dessas estruturas (QIN *et al*., 2022).

Nesse sentido, os estudos, planejamento e gerenciamento dessas estruturas devem ser avaliadas inserindo a informação de projeções climáticas, não somente registros hidrológicos históricos. Dessa forma, a utilização de modelos chuva-vazão conectados a cenários futuros climáticos se torna um grande aliado ao entendimento do comportamento hidrológico das bacias e os seus reflexos sobre a segurança de barragens.

As projeções climáticas futuras utilizadas são disponibilizadas por meio dos Modelos Climáticos Globais (GCMs) desenvolvidos no contexto do *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP6). Esses modelos contemplam tanto simulações históricas, fundamentadas em registros observacionais, quanto cenários futuros construídos a partir da combinação das Trajetórias Socioeconômicas Compartilhadas (SSPs) com diferentes níveis de forçamento radiativo, representando distintas possibilidades de emissões de gases de efeito estufa (WU *et al*., 2021).

Dessa forma, este trabalho tem por objetivo propor uma metodologia de priorização de barragens quanto à vulnerabilidade dessas estruturas ao galgamento na Região Hidrográfica do Alto Jaguaribe, no Ceará, diante dos impactos das mudanças climáticas, considerando diferentes cenários climáticos futuros. Para isso, são avaliados os efeitos das alterações hidrológicas projetadas sobre os níveis d'água dos reservatórios, por meio do software HEC-HMS, e sua influência sobre a ocorrência de galgamento das barragens. Os resultados buscam fornecer subsídios para a definição de prioridades na gestão e no planejamento da segurança dessas infraestruturas.

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: pos@deha.ufc.br

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 (in memoriam).

METODOLOGIA

O estudo utilizou a Região Hidrográfica do Alto Jaguaribe, no estado do Ceará, como área de estudo, abrangendo 24 reservatórios monitorados. A pesquisa empregou dados observados de precipitação máxima diária anual e projeções de 25 modelos climáticos globais do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*, considerando os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, dados esses disponibilizados pelo Copernicus Climate Change Service (2021), um dos serviços do programa Copernicus de observação da Terra da União Europeia, implementado pelo Centro Europeu de Previsões Meteorológicas a Médio Prazo (ECMWF). Em seguida, aplicou o método *Quantile Delta Mapping* para realizar o *downscaling* das projeções climáticas e ajustou os valores máximos anuais à distribuição de Gumbel, estimando precipitações associadas aos tempos de retorno de 1.000 e 10.000 anos. Posteriormente, realizou a desagregação temporal das chuvas pelo método de Taborga Torrico (Torrico, 1974) e elaborou os hietogramas pelo método dos Blocos Alternados (Benfica *et al*. 2000), utilizados como dados de entrada no modelo hidrológico HEC-HMS.

A modelagem hidrológica simulou o comportamento dos reservatórios sob diferentes cenários de mudanças climáticas, estimando as lâminas máximas d'água e verificando a ocorrência ou não de galgamento. Para representar condições hidrológicas mais críticas, a pesquisa selecionou os quartis 50 (Q50) e 75 (Q75) das projeções climáticas em cada cenário e tempo de retorno, totalizando oito combinações de precipitação utilizadas nas simulações.

Com base nos resultados obtidos, o estudo propôs uma metodologia de priorização dos reservatórios quanto à vulnerabilidade ao galgamento. A classificação considerou o cenário em que cada barragem apresentou o primeiro galgamento, assumindo que estruturas suscetíveis a falhas sob condições menos severas demandam maior prioridade de intervenção. Assim, a metodologia definiu quatro níveis de vulnerabilidade: nível 0, para reservatórios que não apresentaram galgamento em nenhum cenário; nível 1, para aqueles que galgaram apenas em eventos com tempo de retorno de 10.000 anos; nível 2, para reservatórios que galgaram em eventos com tempo de retorno de 1.000 anos; e nível 3, para aqueles que já apresentaram galgamento nas condições climáticas atuais.

Por fim, a pesquisa espacializou os níveis de vulnerabilidade em ambiente SIG, gerando um mapa de priorização da segurança de barragens. A análise também estabeleceu um ranking dos reservatórios mais críticos, permitindo identificar as estruturas que demandam maior atenção e fornecendo subsídios para o planejamento de ações de monitoramento, adaptação e gestão da segurança de barragens frente aos impactos das mudanças climáticas.

RESULTADOS

Com os valores de precipitação obtidos do pluviômetro e dos GCM's após o *downscaling* foi obtido as precipitações máximas anuais após a aplicação de uma distribuição de probabilidade do tipo "Gumbel" e assim adquirindo as chuvas para os Tempos de Retorno (TR) de 1.000 e 10.000 anos. Para os cenários climáticos foram obtidas todas as precipitações máximas anuais de cada modelo e TR. Como critério de seleção foi adotado os quartis 50 e 75 das precipitações estimadas A fim de avaliar cenários mais críticos e conservadores para a análise da segurança das barragens.

Com as chuvas de projeto determinadas elaborou-se os hietogramas de entrada no modelo hidrológico "HEC-HMS" após a desagregação da chuva em intervalos menores de até 6 minutos de duração. Em sequência o modelo foi executado e as lâminas máximas de água para cada cenário foram obtidas. Com base nesses resultados, foi elaborado um mapa de priorização, apresentado na Figura 1, a partir de critérios de vulnerabilidade que permitem identificar os reservatórios com maior risco de ocorrência de galgamento e, consequentemente, maior prioridade para intervenção.

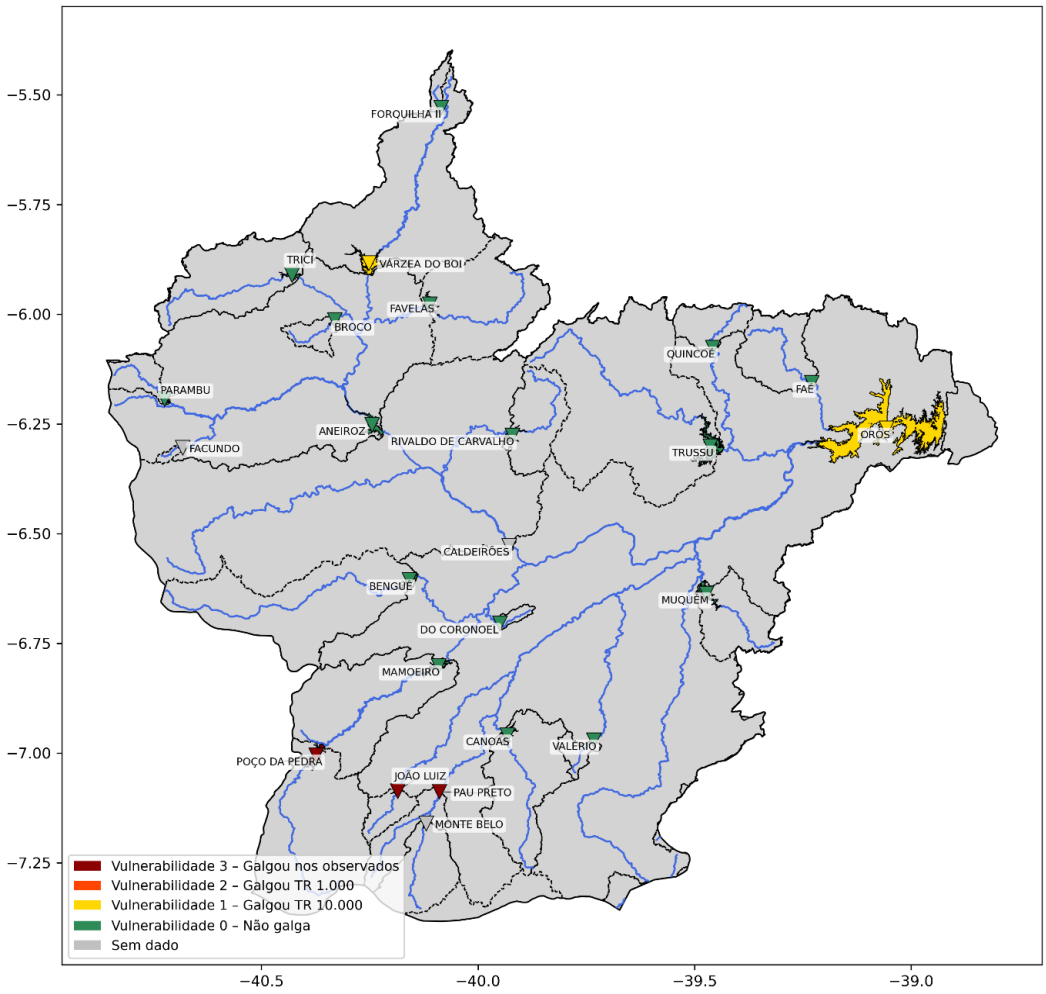


Figura 1. Mapa de priorização utilizando o critério de vulnerabilidade. Fonte: autoria própria.

Em sequência foi montado o Quadro 1 que apresenta os reservatórios com mais atenção e estabeleceu-se uma escalação de prioridade.

Quadro 1 – Priorização dos reservatórios mais impactados

Prioridade	Reservatório	Nível de Vulnerabilidade	Primeiro cenário com galgamento
1	Poço da Pedra	3	Observado
1	João Luiz	3	Observado
1	Pau Preto	3	Observado
2	Orós	1	SSP5-8.5/TR10.000/Q75
2	Várzea do Boi	1	SSP2-4.5/TR10.000/Q50

A metodologia de priorização identificou cinco reservatórios suscetíveis ao galgamento. Poço da Pedra, João Luiz e Pau Preto foram classificados como prioridade 1 por apresentarem galgamento nas condições climáticas atuais, enquanto Orós e Várzea do Boi foram classificados como prioridade 2, com ocorrência apenas em cenários futuros extremos. Esses resultados corroboram os encontrados

por Furtado (2024) para a barragem Banabuiú, em que não foi identificado galgamento para o tempo de retorno de 1.000 anos, mas a maioria dos cenários de 10.000 anos resultou em extravasamento.

Embora o reservatório Orós apresente menor vulnerabilidade, sua importância estratégica, por ser o segundo maior reservatório do Ceará, justifica atenção prioritária nas ações de monitoramento e gestão. Dessa forma, a metodologia proposta constitui uma ferramenta de apoio à tomada de decisão, permitindo direcionar ações de segurança para os reservatórios mais críticos frente às mudanças climáticas.

CONCLUSÕES

A metodologia proposta permitiu priorizar os reservatórios da Região Hidrográfica do Alto Jaguaribe quanto à vulnerabilidade ao galgamento sob diferentes cenários de mudanças climáticas, identificando as estruturas que demandam maior atenção para ações de monitoramento e gestão. Os resultados demonstram que a integração entre projeções climáticas e modelagem hidrológica constitui uma ferramenta promissora para apoiar a tomada de decisão na segurança de barragens e no planejamento de medidas de adaptação frente aos impactos das mudanças climáticas.

Como perspectiva de aprimoramento, em adição, recomenda-se a ampliação da base de dados observacionais por meio da inclusão de um maior número de postos pluviométricos distribuídos na região de estudo, permitindo representar de forma mais adequada a variabilidade espacial da precipitação e reduzir as incertezas associadas às projeções hidrológicas. Além disso, a incorporação de outros critérios de priorização, como o potencial de dano associado e a importância estratégica dos reservatórios, pode tornar a metodologia ainda mais robusta para subsidiar a gestão da segurança de barragens.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao professor Assis de Sousa Filho pela contribuição significativa para a concepção, desenvolvimento e orientação deste estudo antes de seu falecimento.

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.

COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE (C3S). CMIP6 climate projections. Climate Data Store, 2021. DOI: 10.24381/cds.c866074c. Disponível em: https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/projections-cmip6?tab=overview.

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.

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).

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.