ALOCAR: AMBIENTE DE LÓGICA PARA OTIMIZAÇÃO E CONSULTA DE ALOCAÇÃO DE RESERVATÓRIOS

Reginaldo Moura Brasil Neto[1]; Celso Augusto Guimarães Santos[2] & Richarde Marques da Silva[3]

RESUMO – A gestão de recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas demanda ferramentas que unam rigor técnico e clareza para tomada de decisão. Este trabalho apresenta o ALOCAR (Ambiente de Lógica para Otimização e Consulta de Alocação de Reservatórios), uma plataforma interativa de suporte à decisão desenvolvida para simular o balanço hídrico de reservatórios superficiais em regiões semiáridas. A proposta baseia-se em uma arquitetura que integra modelagem morfométrica, análise de agrupamento hierárquica e simulação de cenários de demanda hídrica. Para avaliar a aplicabilidade da plataforma, os reservatórios do estado da Paraíba foram utilizados como estudo de caso. A análise expôs padrões de vulnerabilidade evaporativa locais e os cálculos realizados com a ferramenta foram validados por cenários reais de alocação negociada de água. Os resultados mostram que a eficiência de armazenamento está intimamente ligada à geometria do reservatório, com perdas evaporativas que podem exceder 20% do volume em um único ciclo anual. A inovação do ALOCAR não reside apenas no cálculo das perdas, mas na democratização do acesso à informação. Como um protótipo escalável, a plataforma apresenta-se como um instrumento para modernizar a governança hídrica, promovendo transparência e equidade na partilha da água em sistemas hídricos sob estresse.

ABSTRACT – Water resources management in arid and semi-arid regions demands tools that combine technical rigor and clarity for decision-making. This work presents ALOCAR (*Ambiente de Lógica para Otimização e Consulta de Alocação de Reservatórios*), an interactive decision support platform developed to simulate the water balance of surface reservoirs in semi-arid regions. The proposal is based on an architecture that integrates morphometric modeling, hierarchical cluster analysis, and water demand scenario simulations. To evaluate the platform's applicability, reservoirs from the state of Paraíba were used as a case study. The analysis exposed local evaporative vulnerability patterns, and the calculations performed with the tool were validated using real scenarios of negotiated water allocation. The results show that storage efficiency is closely linked to reservoir geometry, with evaporative losses that can exceed 20% of the volume in a single annual cycle. The innovation of ALOCAR lies not only in calculating losses but in democratizing access to information. As a scalable prototype, the platform stands as an instrument to modernize water governance, promoting transparency and equity in water sharing across water systems under stress.

Palavras-Chave – Suporte à decisão, Gestão hídrica, Alocação negociada.

INTRODUÇÃO

Em regiões áridas e semiáridas, a gestão de recursos hídricos impõe desafios complexos devido à escassez hídrica estrutural, à elevada variabilidade espaço-temporal das precipitações e aos efeitos das mudanças climáticas (Valipour *et al.*, 2024; Yang *et al.*, 2025). No Semiárido brasileiro, um dos

[1]) Agência Executiva de Gestão de Águas da Paraíba, Gerência de Planejamento, AESA, João Pessoa – PB, reginaldo@aesa.pb.gov.br
[2]) Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, CT, João Pessoa – PB, celso@ct.ufpb.br
[3]) Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Geociências, CCEN, João Pessoa – PB, richarde@geociencias.ufpb.br

mais povoados e suscetíveis à desertificação do planeta, a alocação de água constitui um instrumento essencial para conciliar as demandas conflitantes, assegurar o abastecimento humano e animal e mitigar os impactos de secas prolongadas e severas (Lee *et al.*, 2023). Assim, apesar dos reservatórios superficiais representarem infraestrutura estratégica para a segurança hídrica regional, sua operação requer o equilíbrio entre demandas múltiplas e perdas naturais críticas, especialmente como é o caso da evaporação.

Para mediar a distribuição da água em cenários de escassez e prevenir conflitos, são realizadas reuniões de alocação negociada de água. Esse processo decisório, que é pautado na descentralização, na participação social e no uso múltiplo da água, estabelece regras e procedimentos para a distribuição coletiva dos recursos hídricos (Roa-García, 2014; Recio-Villa *et al.*, 2018). A alocação de água busca compatibilizar oferta e demanda, assegurando o atendimento aos usuários atuais, às demandas futuras e às necessidades ambientais (Lopes e Freitas, 2007). De todo modo, sua execução ainda é bastante complexa. Entre outros, envolve incertezas associadas à variabilidade do escoamento, ocorrência de eventos climáticos extremos e heterogeneidade dos usos locais da água (Silva *et al.*, 2021). Embora sua relevância seja reconhecida, a implementação dessas ações ainda enfrenta diferentes obstáculos metodológicos e técnicos.

A dificuldade de visualizar como os diferentes horizontes temporais e as condições de demanda afetam a resiliência de um reservatório, por exemplo, pode limitar a transparência e a efetividade das decisões. Nesse sentido, ferramentas que integrem inteligência territorial, modelagem hidrológica e interatividade digital tornam-se cada vez mais necessárias para modernizar a governança hídrica. É nesse contexto que este trabalho descreve o desenvolvimento e a aplicação do ALOCAR, Ambiente de Lógica para Otimização e Consulta de Alocação de Reservatórios. O objetivo central é apresentar uma plataforma interativa que permite: (i) a visualização espacial dos mananciais e de suas principais características; (ii) a integração de dados mensais de precipitação, evaporação e as curvas cota-área-volume (CAV); (iii) a projeção da evolução volumétrica em horizontes temporais e cenários distintos; e (iv) a quantificação do impacto evaporativo, com suporte à formulação de estratégias operacionais associadas às características morfológicas e à eficiência de armazenamento de cada reservatório.

A relevância deste estudo, que teve como estudo de caso o Estado da Paraíba, reside na tradução de parâmetros hidrológicos complexos em uma interface acessível e operacional, contribuindo para reduzir a lacuna entre a análise técnica especializada e a tomada de decisão coletiva. A inovação do ALOCAR está na capacidade de processar e representar, de forma visual e intuitiva, variáveis críticas como eficiência morfológica, perdas evaporativas e evolução volumétrica sob diferentes cenários de

demanda. Dessa forma, a plataforma transforma dados hidrológicos e morfométricos em informações úteis para técnicos e tomadores de decisão. Como contribuição principal, o ALOCAR amplia o acesso à informação técnica, confere maior agilidade às instâncias de governança e favorece processos de alocação de água mais transparentes, equitativos e resilientes no Semiárido brasileiro.

MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo de caso e a base de dados

O estudo de caso compreendeu 130 reservatórios superficiais localizados no estado da Paraíba, Nordeste do Brasil, entre coordenadas 6°00′S e 8°15′S de latitude e 34°40′W e 38°50′W de longitude. Foram analisados dados das curvas cota-área-volume (CAV) dos reservatórios, disponibilizados pela Agência Executiva de Gestão das Águas da Paraíba (AESA). Essa base de dados permitiu caracterizar a geometria dos reservatórios e estimar relações entre cota, área superficial e volume armazenado, essenciais para a simulação das perdas evaporativas e da evolução volumétrica sob diferentes cenários de demanda e tempo.

Modelagem morfométrica e variáveis climatológicas

Para a modelagem de cada reservatório, foram considerados os intervalos compreendidos entre o volume morto, correspondente ao limite mínimo operacional, e a cota de soleira do vertedouro. O ajuste das curvas CAV foi realizado separadamente para cada reservatório, por meio da aplicação de funções polinomiais aos dados observados, resultando em modelos com elevada aderência estatística, com coeficiente de correlação superior a 0,95. Com base nas equações polinomiais ajustadas, foram geradas curvas refinadas para os 130 reservatórios, contendo 500 pontos por curva.

Os reservatórios foram categorizados em cinco grupos distintos a partir de métodos de análise de agrupamento hierárquico (*Hierarchical Cluster Analysis*), conforme detalhado por Brasil Neto *et al*. (2026). Em relação às variáveis climatológicas, foram utilizadas séries climatológicas mensais de precipitação e evaporação referentes ao período de 1994 a 2024, obtidas junto ao Sistema Estadual de Informações de Riscos Agrohidroclimáticos (SEIRA), disponível em https://seira.aesa.pb.gov.br/. Para cada reservatório, foi selecionada a estação meteorológica mais próxima e representativa, a partir da qual foram calculadas as médias mensais utilizadas nas simulações hidrológicas (Figura 1).

Arquitetura e funcionalidades da Plataforma ALOCAR

A plataforma ALOCAR foi estruturada em quatro módulos principais, projetados para integrar processamento de dados, simulação hidrológica e suporte visual à tomada de decisão.

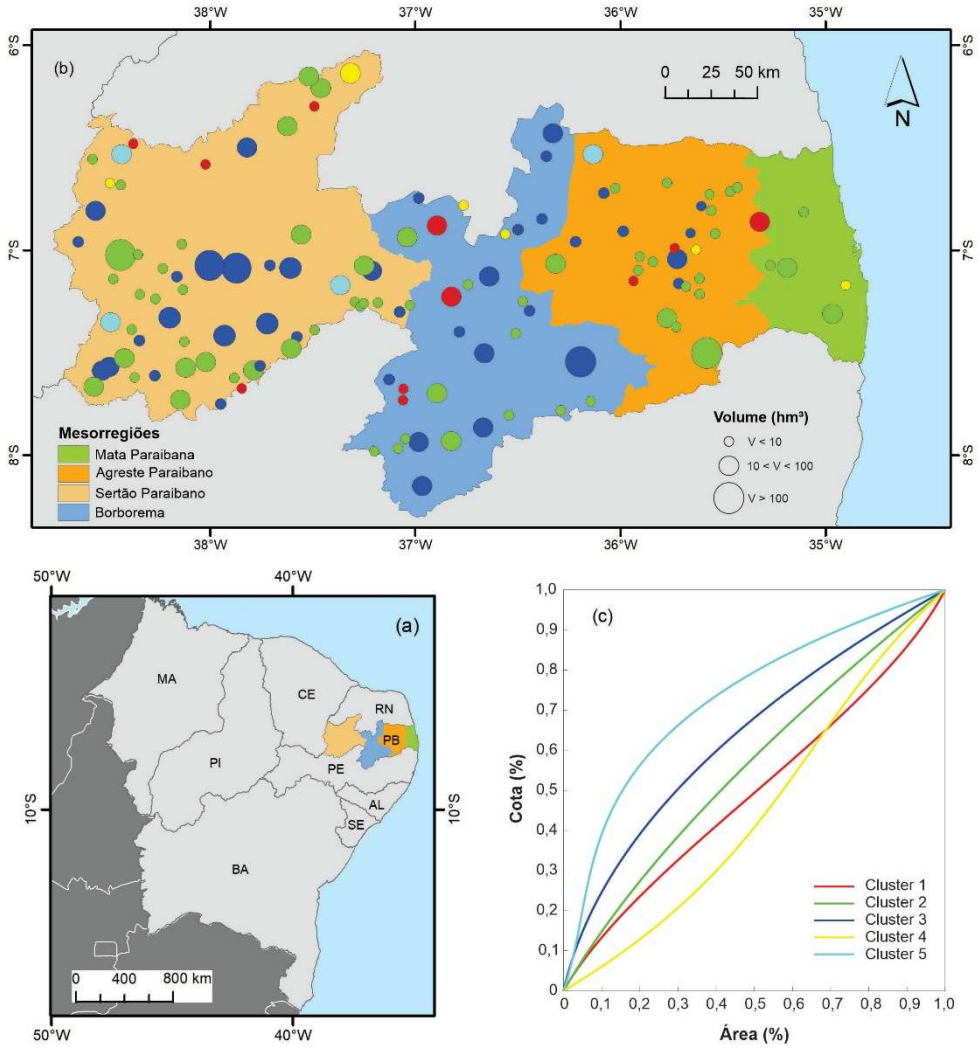


Figura 1 – Localização do estado da Paraíba e dos reservatórios utilizados neste estudo. As cores internas dos círculos representam os *clusters* ao qual eles estão classificados.

<u>Interface Cartográfica e inteligência territorial</u>: este módulo permite a visualização espacial dos reservatórios analisados. A interface oferece filtros por tipologia de agrupamento, definida pelos clusters morfométricos, e por classe de capacidade de armazenamento, classificando os reservatórios em: Classe 1, com volume máximo superior a 100 hm³; Classe 2, com volume máximo entre 10 e 100 hm³; e Classe 3, com volume máximo inferior a 10 hm³. A seleção de um reservatório, por meio do mapa ou de lista, desencadeia a atualização dinâmica de toda a plataforma com os dados da unidade escolhida.

Diagnóstico morfométrico e climatológico: ao selecionar um reservatório, o sistema apresenta suas principais características, incluindo coordenadas geográficas, níveis operacionais, capacidade de armazenamento e atributos morfométricos. Além disso, gráficos exibem as normais climatológicas de precipitação e evaporação, bem como as curvas CAV modeladas a partir dos ajustes polinomiais. Essa interatividade permite a consulta pontual de valores e favorece a interpretação técnica dos dados.

Módulo de simulação de alocação negociada: a base de simulação do ALOCAR fundamenta-se nas diretrizes da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), especialmente na Nota Técnica nº 10/2015/COMAR/SER, que disciplina a alocação de água em sistemas isolados (ANA, 2015). A plataforma adota discretização mensal, buscando maior adequação à variabilidade sazonal da evaporação e das demandas. O balanço hídrico simplificado é processado tal como a Equação 1:

$$V_{i+1} = V_i - V_E - V_D \quad (1)$$

em que V_i é o volume inicial no mês i; V_E é o volume evaporado, calculado pelo produto entre a área do espelho d'água e a lâmina de evaporação mensal; V_D é o somatório das demandas mensais; e V_{i+1} é o volume final do mês, utilizado como dado de entrada para o mês subsequente.

A Equação 1 desconsidera as parcelas de precipitação direta e afluência da bacia, configurando-se como um balanço simplificado de depleção volumétrica. Essa modelagem conservadora adota o princípio preconizado pela ANA, assumindo um cenário de salvaguarda operacional (pior caso) em que não há recargas ao longo do horizonte de simulação. Ademais, o uso de dados pluviométricos na plataforma atua estritamente como elemento de diagnóstico visual, respaldado por um estudo prévio (Brasil Neto *et al*., 2026) que notou que a evaporação supera a precipitação na maior parte do ano.

A plataforma permite que o usuário configure: (i) o volume real observado no momento mais próximo da reunião de alocação negociada de água; (ii) o mês de início da simulação, o que garante melhor ajuste às taxas evaporativas sazonais; e (iii) até cinco demandas distintas, com possibilidade de ativação ou desativação em meses específicos. Essa funcionalidade é relevante para representar, a suspensão da irrigação durante meses chuvosos, quando pode ocorrer agricultura de sequeiro.

Análise de eficiência e regras de operação: este módulo avalia a vulnerabilidade evaporativa dos reservatórios. O sistema gera simulações automáticas considerando volumes iniciais entre 40% e 100% da capacidade total, permitindo avaliar perdas absolutas e relativas por evaporação. Com base nos resultados, o ALOCAR sugere regras para a operação dos reservatórios, indicando períodos mais favoráveis ao armazenamento, condições de maior exposição evaporativa e riscos de exaustão hídrica associados à relação entre volume armazenado e área superficial exposta.

RESULTADOS

A Figura 2 apresenta a interface do ALOCAR configurada para o reservatório Araçagi, unidade estratégica do estado da Paraíba localizada na transição entre a Mata Paraibana e o Agreste Paraibano. O reservatório é enquadrado no Cluster 1 do ponto de vista morfométrico e na Classe 2 (médio porte), do ponto de vista da dimensão, com capacidade máxima de 63,2 hm³ e volume morto de 2,5 hm³. O balanço climatológico mensal evidencia um contraste sazonal acentuado. O trimestre de maio a julho concentra o pico pluviométrico, com valores superiores a 200 mm por mês, enquanto o período de setembro a novembro apresenta precipitações médias quase nulas. Em contrapartida, a evaporação apresenta menor variabilidade sazonal, com valores médios próximos de 140 mm por mês nos meses secos. Esse déficit hídrico persistente impõe pressão significativa sobre o manancial, uma vez que a evaporação média mensal, de aproximadamente 132 mm, supera a precipitação média mensal, de 98 mm, resultando em perda volumétrica mesmo na ausência de demandas consuntivas.

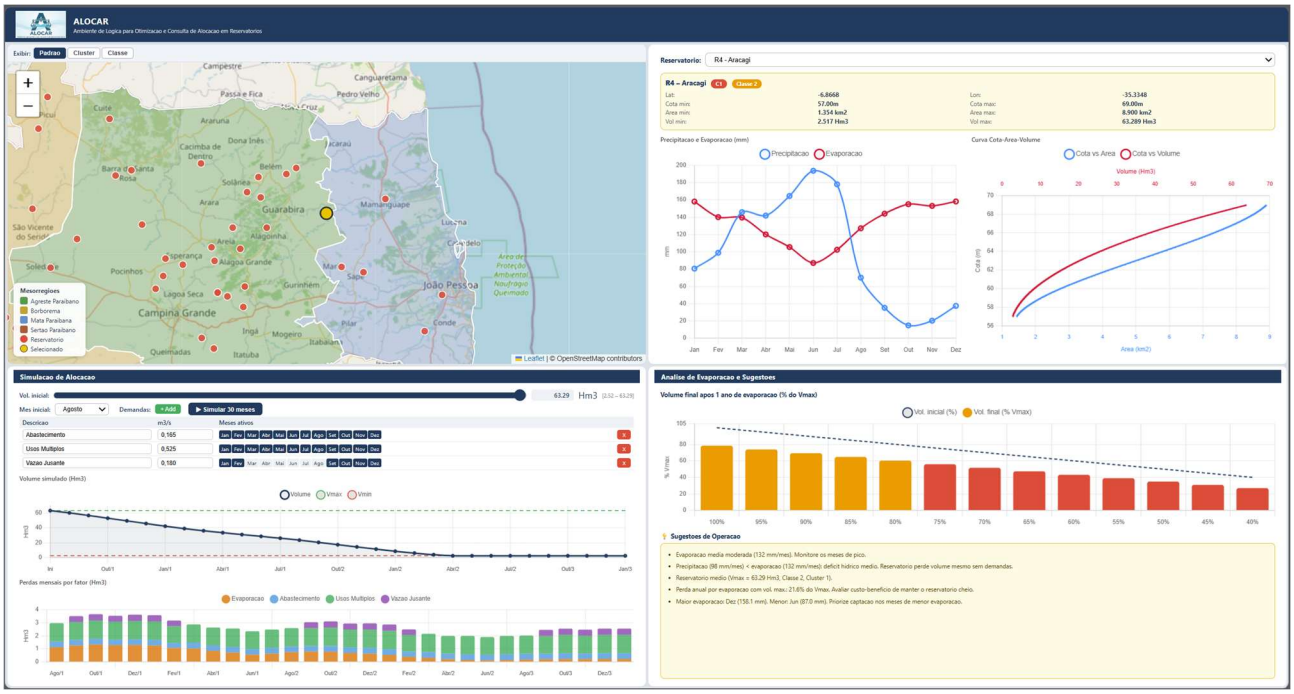


Figura 2 – Interface do ALOCAR aplicada ao reservatório Araçagi, com visualização integrada dos dados morfométricos, climatológicos e operacionais.

Para verificar a aplicabilidade da plataforma, foi reproduzido o cenário oficial da última reunião de alocação do reservatório Araçagi, realizada com volume inicial equivalente a 100% da capacidade máxima e início da simulação em agosto (AESA, 2025). Foram inseridas três demandas principais: abastecimento humano, com vazão constante de 165 L/s; usos múltiplos, com vazão constante de 525 L/s; e vazão de regularização a jusante, com 180 L/s, considerada sazonal e ativa entre setembro e fevereiro. A simulação projetou volume final de 23,5 hm³ após 12 meses, correspondente a cerca de

37% da capacidade total do reservatório, o que coincide com o valor real estimado. Além disso, com o uso da plataforma o impacto de cada componente de demanda foi discriminado, indicando que usos múltiplos representam a maior retirada mensal, com cerca de 1,4 hm³ por mês. Observou-se, ainda, a redução progressiva das perdas evaporativas absolutas ao longo do tempo, uma vez que a diminuição do volume armazenado reduz a área do espelho d'água exposta à evaporação.

A análise automatizada das perdas evaporativas indicou que, sob a condição de reservatório cheio, a evaporação pode consumir mais de 20% do volume armazenado em um ciclo anual. Quando a simulação é iniciada com 40% da capacidade, a perda proporcional diminui para aproximadamente 13%. Esse resultado é relevante para a gestão operacional, pois indica que a eficiência relativa de armazenamento aumenta em níveis mais baixos, embora a segurança hídrica absoluta seja reduzida. O ALOCAR indicou três diretrizes operacionais para o reservatório Araçagi: (i) intensificar a atenção durante os meses de maior pressão evaporativa, especialmente entre setembro e fevereiro; (ii) avaliar o custo-benefício de manter o reservatório em cotas próximas à capacidade máxima, devido à maior exposição superficial e à consequente penalização evaporativa; e (iii) manter a suspensão da vazão de regularização a jusante durante o período chuvoso, como estratégia para favorecer a recuperação do volume armazenado.

A Figura 3 sintetiza a vulnerabilidade evaporativa da rede de reservatórios do estado da Paraíba, considerando a variação percentual do volume perdido por evaporação ao longo de um ciclo anual. A análise foi organizada por formato morfométrico, representado pelos *clusters*, por classe de porte e por distribuição espacial. Na condição de reservatório cheio, correspondente a 100% do volume máximo, as medianas de perda evaporativa anual por *clusters* situaram-se em níveis altos, variando de aproximadamente 25%, no Cluster 5, a quase 40%, no Cluster 1. No Cluster 1, o terceiro quartil indicou perdas próximas de 50%, evidenciando a elevada vulnerabilidade evaporativa desse conjunto de reservatórios. Quando a simulação foi iniciada com 40% do volume máximo, a ordem de eficiência relativa passou a ser representada pela sequência Cluster 5, Cluster 3, Cluster 2, Cluster 4 e Cluster 1, da menor para a maior perda relativa. Nessa condição, todas as medianas ficaram abaixo de 20%

Os resultados evidenciam que os reservatórios dos Clusters 1 e 4 apresentam as maiores perdas relativas. Esse comportamento está associado à geometria desses reservatórios, que tende a manter área superficial elevada mesmo com a redução do nível d'água, ampliando a exposição à evaporação. Em contraste, o Cluster 5 apresenta maior eficiência hídrica em níveis baixos, pois sua forma mais irregular e afunilada nas proximidades do volume morto reduz a área exposta à medida que o volume armazenado diminui. A análise por porte demonstrou que reservatórios menores são mais sensíveis à

variabilidade evaporativa. Quando cheios, esses sistemas apresentam medianas de perda superiores a 20%, com casos críticos que podem atingir valores próximos de 70% de exaustão volumétrica anual apenas por evaporação.

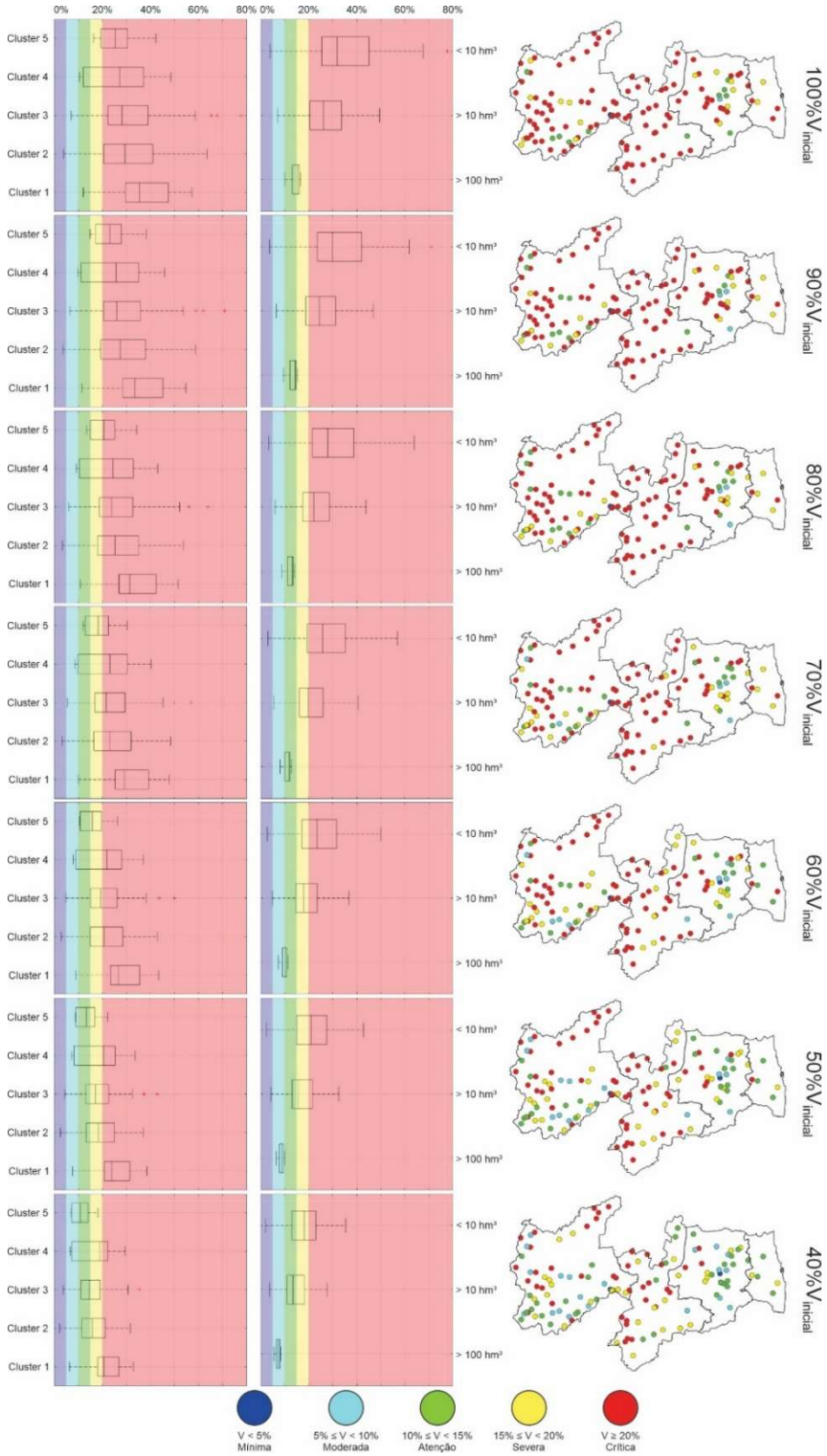


Figura 3 – Vulnerabilidade evaporativa da rede de reservatórios do estado da Paraíba, expressa pela variação percentual do volume absoluto perdido por evaporação em um ciclo anual.

Os grandes reservatórios, embora apresentem perdas absolutas mais elevadas, exibem menor dispersão e perdas relativas inferiores a 20% quando iniciam a simulação em condição de volume máximo. Com volume inicial equivalente a 40% da capacidade, a vulnerabilidade relativa é atenuada em função da redução da área inundada. Nessa situação, os pequenos reservatórios passam a apresentar medianas de perdas inferiores a 20%, enquanto os grandes reservatórios registram perdas relativas entre 5% e 10%. Esses resultados demonstram que a tomada de decisão em processos de alocação de água não deve considerar apenas o volume disponível, mas também a interação entre a geometria do reservatório, a área superficial exposta e a taxa evaporativa local. Ao integrar essas variáveis, o ALOCAR permite identificar se determinado manancial apresenta proteção morfológica natural ou se requer estratégias operacionais específicas para reduzir perdas evaporativas e aumentar a eficiência do uso da água armazenada.

CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento e a aplicação do ALOCAR, uma plataforma interativa concebida para aproximar a modelagem hidrológica das necessidades práticas de suporte à decisão em processos de alocação de água. O objetivo de fornecer um ambiente mais intuitivo para a visualização da resiliência de reservatórios no Semiárido brasileiro foi alcançado, demonstrando que a integração entre inteligência territorial, modelagem morfométrica e interatividade digital constitui uma alternativa promissora para modernizar a gestão de recursos hídricos. Os resultados reforçaram a influência da morfometria na eficiência de armazenamento, indicando que reservatórios de pequeno porte e com elevada área superficial relativa são mais vulneráveis às perdas evaporativas, as quais podem atingir valores próximos de 70% do volume armazenado em ciclos anuais críticos. A aplicação ao reservatório Araçagi demonstrou a consistência operacional da plataforma ao reproduzir cenários oficiais de alocação e permitir a discriminação dos impactos associados a diferentes usos da água.

O ALOCAR é um protótipo funcional com amplo potencial de aprimoramento. Versões futuras poderão incorporar funcionalidades adicionais, como emissão automatizada de relatórios técnicos e pareceres, módulos para registro de atas e execução de Termos de Alocação assinados digitalmente, inclusão de séries históricas de volumes, integração com redes de monitoramento e refinamento dos algoritmos de sugestão operacional com apoio de inteligência artificial. A principal contribuição deste trabalho não se limita à estimativa das perdas evaporativas ou a evolução dos volumes em diferentes cenários, mas especialmente na organização e disponibilização dessas informações em uma interface acessível, visual e orientada à tomada de decisão. Desse modo, o ALOCAR pode contribuir para uma

governança hídrica mais transparente, equitativa e fundamentada em critérios técnicos, que é aspecto essencial para o enfrentamento da escassez hídrica no Semiárido brasileiro.

AGRADECIMENTOS – Os autores agradecem a Agência Executiva de Gestão das Águas da Paraíba (AESA) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio.

REFERÊNCIAS

LOPES, A. V.; FREITAS, M. A. S. (2007). "*A alocação de água como instrumento de gestão de recursos hídricos: experiências brasileiras*". Revista de Gestão de Água da América Latina, v. 4, n.1, p. 5-28.

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2015). "*Nota Técnica nº 10/2015/COMAR/SER Metodologia para Alocação de Água em Açudes Isolados – Meta Institucional da Superintendência de Regulação - 01/10/2014 e 30/09/2015*". Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/todos-os-documentos-do-portal/documentos-sre/alocacao-de-agua/oficina-alocacao-de-agua-1/metodologia-da-ana-para-alocacao-de-agua-em-acudes-isolados.pdf.

AESA – Agência Executiva de Gestão das Águas da Paraíba (2026). "*Boletim de acompanhamento da alocação de água do sistema hídrico*". Disponível em: https://www.aesa.pb.gov.br/biblioteca/alocacoes-de-agua/.

BRASIL NETO, R. M., PINHEIRO, A. R. S., SILVA, R. M., ARAÚJO, L. P. S., SANTOS, C. A. G. "*From situation to decision: a transferable graphical decision-support framework for water allocation in arid and semiarid reservoir systems*". Water Resources Management. (no prelo)

LEE, E.; JI, J.; LEE, S.; YOON, J.; YI, S.; YI, J. (2023). "*Development of an optimal water allocation model for reservoir system operation*. Water, v.15, n.20, p.3555.

RECIO-VILLA, I.; MARTÍNEZ RODRÍGUEZ, J. B.; MOLINA, J. L.; PINO TARRAGÓ, J. C. (2018). "*Multiobjective optimization modeling approach for multipurpose single reservoir operation*". Water, v.10, p.427.

ROA-GARCÍA, M. C. (2014). "*Equity, efficiency and sustainability in water allocation in the Andes: Trade-offs in a full world*". Water Alternatives, v.7, n.2, p.298-319.

SILVA, A. M., SILVA, R. M., SANTOS, C. A. G. (2019). "*Automated surface energy balance algorithm for land (ASEBAL) based on automating endmember pixel selection for evapotranspiration calculation in MODIS orbital images*". International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, v.79, n.1, p.1-11.

VALIPOUR, E.; KETABCHI, H.; SHALI, R. S.; MORID, S. (2024). "*Water resources allocation: interactions between equity/justice and allocation strategies*". Water Resources Management, v.38, p.505–535.

YANG, Q.; BAI, T.; LIU, D.; SUN, X. (2025). "*Optimal allocation and evaluation of regional water resources integrated with rural revitalization strategy*". Water Resources Management, v.39, p.4869–4892.