

INTERAÇÃO SERES HUMANOS – ÁGUA E DEGRADAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA EM REDE DE AÇUDES

Josiana do Nascimento Alves Feitosa¹, Pedro Henrique Augusto Medeiros²,
Antônio Alves Meira Neto³

RESUMO: A expansão da infraestrutura hídrica foi uma estratégia de adaptação às secas no semiárido brasileiro, mas trouxe impactos negativos a médio e longo prazo. O objetivo do trabalho foi identificar os efeitos sócio-hidrológicos da expansão dos reservatórios na qualidade da água da Bacia do Alto Jaguaribe (BAJ), Ceará. Com base em referências bibliográficas e relatórios técnicos, observou-se um pico de construção de açudes na década de 1990, com uma média anual de 0,7 reservatórios (1980–2004) caindo para 0,1 entre 2005 e 2015. Essa expansão resultou na estabilização da capacidade de armazenamento, em quase o dobro do escoamento médio anual, contribuindo para a degradação da qualidade da água, especialmente em períodos secos. Entre 2012 e 2017, por exemplo, houve um aumento considerável das concentrações de fósforo total nos açudes, ultrapassando o limite de 0,05 mg L⁻¹ (limite superior ao estado mesotrófico). Portanto, o adensamento da rede de reservatórios na BAJ agravou a degradação da qualidade da água à medida que aumentou a retenção de nutrientes e intensificou o fenômeno da eutrofização.

PALAVRAS-CHAVE: seca, socio-hidrologia, poluição hídrica.

HUMAN-WATER INTERACTION: WATER QUALITY DEGRADATION IN A RESERVOIR NETWORK

ABSTRACT: The expansion of water infrastructure was a strategy for adapting to droughts in the Brazilian semiarid, but it had negative impacts in the medium and long term. The objective of this study was to identify the socio-hydrological effects of reservoir expansion on the water quality in the Upper Jaguaribe Basin (BAJ), Ceará. Based on bibliographic references and

¹ Doutoranda, Universidade Federal do Ceará (UFC), CEP 60.455-760, Fortaleza, CE. Fone (86) 99591-8111. Email: josinascimento1997@gmail.com

² Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), Fortaleza.

³ Professor da Colorado State University, Fort Collins, Colorado, EUA.

technical reports, a peak in dam construction was observed in the 1990, with an annual average of 0.7 reservoirs (1980–2004) falling to 0.1 between 2005 and 2015. This expansion resulted in the stabilization of storage capacity at almost 2-fold the average annual runoff, contributing to the degradation of water quality, especially in dry periods. Between 2012 and 2017, for example, there was a considerable increase in the concentrations of total phosphorus in the reservoirs, exceeding the limit of 0.05 mg L^{-1} (upper limit for mesotrophic status). Therefore, the growth of the reservoir network in the BAJ aggravated the degradation of water quality as it increased nutrient retention and intensified the phenomenon of eutrophication.

KEYWORDS: drought, socio-hydrology, water pollution

INTRODUÇÃO

A seca é um fenômeno natural que ocasiona impactos adversos aos seres humanos, bem como dificulta o alcance dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável – ODSs (Di Baldassarre et al., 2019). Para reduzir as vulnerabilidades humanas, várias adaptações foram feitas, como a implementação de uma rede de reservatórios na região semiárida do Nordeste do Brasil desde o início do século XX, o que ajudou a promover a segurança hídrica. (Meira Neto et al., 2024). No entanto, a evolução do armazenamento de água resultou em consequências indesejadas devido às interações entre os seres humanos e a água, como a retenção de nutrientes e a degradação da qualidade hídrica devido à eutrofização, impactando negativamente a disponibilidade desse recurso (Medeiros & Sivapalan, 2020).

Esse processo de eutrofização tem como fator primordial o elevado aporte de fósforo, nutriente carregado no fluxo de sedimentos, que alcança os corpos hídricos lânticos, como os reservatórios (Wang; Wang, 2009; Lima Neto et al., 2022). Portanto, analisar a carga total de fósforo é essencial para o controle da eutrofização nesses ambientes (Rattan et al., 2017; Le Moal et al., 2019; Silva et al., 2025) e para o gerenciamento sustentável da água. Nesse contexto ganha destaque a socio-hidrologia, uma ciência interdisciplinar que analisa as interações recíprocas entre as sociedades e a água e resulta de uma variedade de eventos em diversas regiões do planeta e em contextos variados (Sivapalan et al., 2012; Pereira et al., 2025). Nesse sentido, este trabalho tem o objetivo de identificar os efeitos sócio-hidrológico da expansão da infraestrutura hídrica na bacia do Alto Jaguaribe, Ceará, sobre a qualidade da água na densa rede de reservatórios.

MATERIAL E MÉTODOS

A Bacia do Alto Jaguaribe (BAJ, com 24.500 km²) está localizada no estado do Ceará, na região Nordeste do Brasil, e possui 24 açudes monitorados pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará – COGERH (Figura 1) e 3478 não estratégicos. Conforme classificação climática de Köppen, a bacia apresenta clima do tipo BSh' – semiárido quente (Medeiros et al., 2014) com precipitação média anual de 700 mm ano⁻¹ e evaporação potencial média anual de 2100 mm ano⁻¹ de acordo com médias de 30 anos das Normais Climatológicas do INMET (Meira Neto et al., 2024). A precipitação da região tem significativa variabilidade interanual e intranual (concentrada nos meses de janeiro a março). Os coeficientes de escoamento na região costumam variar entre 5% e 10%, podendo ser menores que 1% (Figueiredo et al., 2016), enquanto os rios são, em sua maioria, efêmeros ou intermitentes (Mamede et al., 2018; Lima et al., 2022).

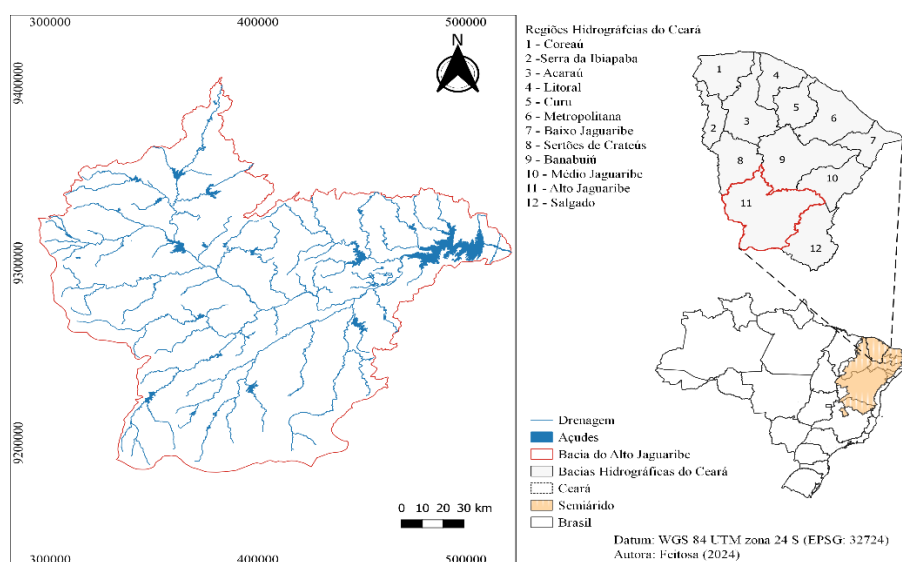


Figura 1. Localização da Bacia do Alto Jaguaribe e dos açudes monitorados pela COGERH

Este trabalho possui caráter teórico qualitativo e quantitativo, desenvolvido por meio de revisão bibliográfica. O objetivo foi identificar evidências do efeito sócio-hidrológico da expansão da infraestrutura hídrica na qualidade da água da BAJ, Ceará. Para este estudo foram consultadas publicações científicas, artigos de periódicos e relatórios técnicos da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH) relacionados a seca, interação ser humano e recursos hídricos, e a qualidade da água. A seleção das fontes priorizou revistas nas áreas de ciências ambientais e hidrológicas, bem como estudos publicados nos últimos 15 anos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Historicamente, os reservatórios foram construídos para reduzir as vulnerabilidades das sociedades às secas (Di Baldassarre et al., 2019). Essas infraestruturas hídricas tiveram notável crescimento, em escala global, nas décadas de 1960 (300%) e 1970 (130%) com o intuito de atender a população que aumentou em 15% e 25% nesses períodos, respectivamente (Di Baldassarre et al., 2018), gerando extensas redes de reservatórios. No entanto, nas últimas décadas, observa-se um aumento da demanda de água em detrimento da estabilização da capacidade de armazenamento dos reservatórios, bem como da redução da disponibilidade de água dos açudes em razão do assoreamento e da eutrofização provenientes do modo de uso e cobertura do solo e das medidas de adaptação da sociedade (Gohari et al., 2013; Di Baldassarre et al., 2018; Medeiros & Sivapalan, 2020).

No que se refere à BAJ, Figura 2, constatou-se que de 1940 (implementação do primeiro reservatório estratégico, Do Coronel com capacidade de armazenamento de $0,002 \cdot 10^9 \text{ m}^3$) até 1970, a taxa de construção de açudes correspondeu a 0,2 reservatórios por ano. Essa taxa atingiu o pico na década de 1990 com 0,7 reservatórios por ano, em média, implementados de 1980 a 2004. Contudo, no período de 2005 a 2015, a taxa caiu para 0,1 barragens por ano. A capacidade de armazenamento de água também aumentou ao longo do tempo: em 1940 correspondia a $0,002 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ e em 2015 alcançou $2,77 \cdot 10^9 \text{ m}^3$. Ressalta-se que na década de 1960 houve considerável aumento da capacidade devido à implementação do reservatório Orós ($1,94 \cdot 10^9 \text{ m}^3$).

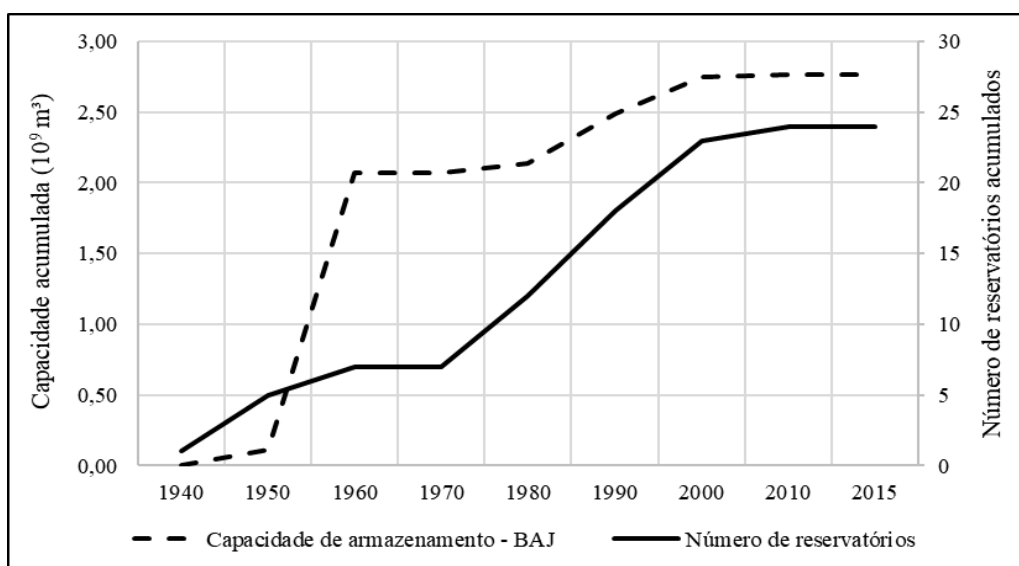


Figura 2. Evolução do número de reservatórios estratégicos e da capacidade de armazenamento da Bacia do Alto Jaguaribe

A expansão dos reservatórios na BAJ acarretou dois efeitos: i) a estabilização da capacidade de armazenamento devido a afluência limitada, ou seja, restrição hidrológica; e ii) a degradação da qualidade da água em razão do acúmulo de nutrientes, acelerando o processo de eutrofização e provocando uma maior deterioração da água. Isso levou à implementação de novos reservatórios (efeito oferta-demanda), o que reforçou um ciclo de feedback negativo (Figura 3).

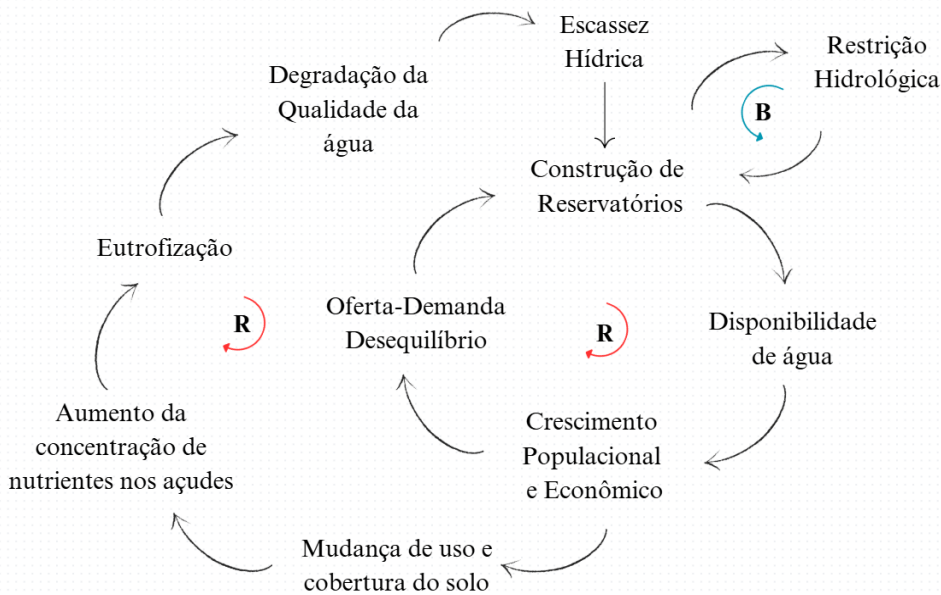


Figura 3. Diagrama causal de laço: R: laço de reforço; B: laço de balanço

Essa degradação é significativa e mais pronunciada durante os períodos de baixo armazenamento de água (Wiegand et al., 2021). A Figura 4 apresenta valores de fósforo (mgL^{-1}) de 2008 a 2025 para diferentes tamanhos de reservatórios, conforme classificação proposta por Meira Neto et al. (2024). Observa-se que de 2012 a 2017 (período de seca), ocorreu um significativo aumento de fósforo total (P_T), especialmente para os reservatórios com menores capacidades de armazenamento, impactando negativamente a disponibilidade hídrica.

Segundo Silva et al. (2025), valores de P_T que ultrapassem o limite de $0,05 \text{ mg/L}$ (linha vermelha na Figura 4), o qual corresponde ao limite superior do estado mesotrófico, pode ser considerada condição de indisponibilidade hídrica para abastecimento humano devido a qualidade ruim. Desse modo, em quase todo o período e para quase todos os reservatórios, há água inadequada para consumo humano em alguns dos reservatórios da rede.

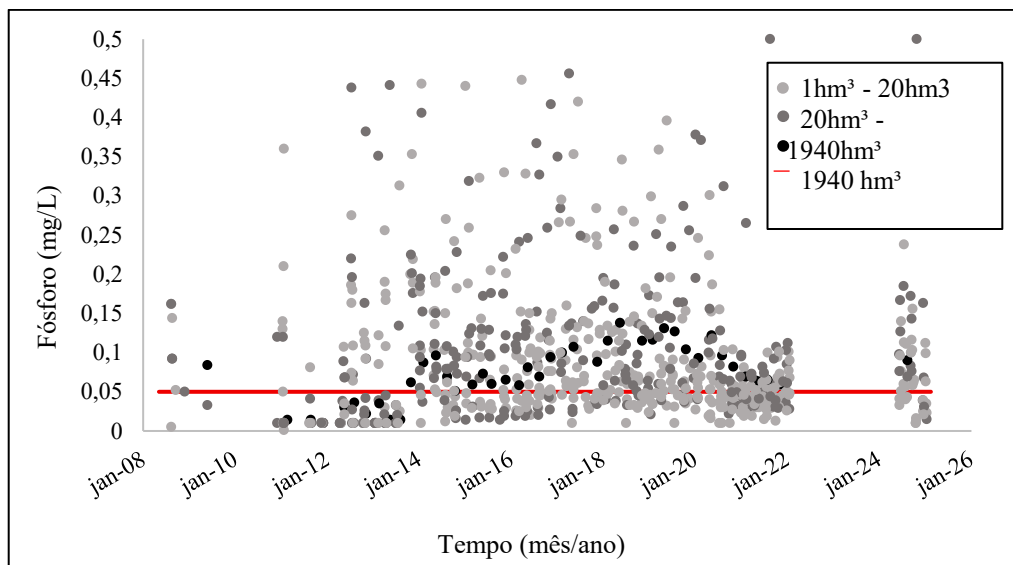


Figura 4. Valores de fósforo total para diferentes capacidades de armazenamento dos reservatórios da Bacia do Alto Jaguaribe no período de 2008 a 2025

CONCLUSÕES

As mudanças induzidas pelo ser humano sobre os sistemas hidrológicos permitiram enfrentar a variabilidade temporal da ocorrência de água e sua escassez. Contudo, a intensificação dessas interferências ocasionou efeitos indesejados, gerando feedbacks não intencionais e produzindo efeitos socio-hidrológicos. Entre os impactos negativos das medidas de gestão hídrica sobre o sistema hidrológico, analisou-se neste estudo o efeito da qualidade da água. Verificou-se que a degradação da qualidade hídrica se agravou na Bacia do Alto Jaguaribe com o adensamento da rede de reservatórios, que provocou aumento do tempo de residência da água nas estruturas de acumulação hídrica e, conseqüentemente, maior retenção de nutrientes e a aceleração da eutrofização. Nesse sentido, é fundamental a compreensão das interações bidirecionais entre seres humanos e água, buscando medidas sustentáveis focadas na recuperação da qualidade hídrica dos açudes, em detrimento de medidas exclusivamente estruturais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH). **Portal Hidrológico do Ceará.** Disponível em: <http://www.hidro.ce.gov.br/>. Acesso em: 21 jun. 2025.

Di Baldassarre, G.; Sivapalan, M.; Rusca, M.; Cudennec, C.; Garcia, M.; Kreibich, H.; Konar, M.; Mondino, E.; Mard, J.; Pande, S.; Sanderson, M. R.; Fugiangtian; Viglione, A.; Wei, J.; Wei, Y.; Yu, D. J.; Srinivasan, V. & Blöschl, G. Sociohydrology: Scientific challenges in addressing the sustainable development goals. **Water Resources Research**, [s.l.], v. 55, p. 6327-6355, 2019. <https://doi.org/10.1029/2018WR023901>

Di Baldassarre, G.; Wanders, N.; AghaKouchak, A.; Kuil, L.; Rangelcroft, S.; Veldkamp, T. I. E.; Garcia, M.; Van Oel, P. R.; Breinl, K. & Van Loon, A. F. Water shortages worsened by reservoir effects. **Nature Sustainability**, [s.l.], v. 1, p. 617-622, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0159-0>

Figueiredo, J. V.; De Araújo, J. C.; Medeiros, P. H. A. & Costa, A. C. Runoff initiation in a preserved semiarid Caatinga small watershed, Northeastern Brazil. **Hydrological Processes**, [s.l.], v. 30, n. 13, p. 2390 – 2400, 2016. <https://doi.org/10.1002/hyp.10801>

Gohari, A.; Eslamian, S.; Mirchi, A.; Abedi-Koupaei, J.; Bavani, A. M. & Madani, K. Water transfer as a solution to water shortage: A fix that can Backfire. **Journal of Hydrology**, [s.l.], v. 491, p. 23-39, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.03.021>

Le Moal, M.; Gascuel-Oudou, C.; Ménesguen, A.; Souchon, Y.; Étrillard, C.; Levain, A.; Moatar, F.; Pannard, A.; Souchu, P.; Lefebvre, A. & Pinay, G. Eutrophication: A new wine in an old bottle? **Science of the Total Environmental**, [s.l.], v. 651, p. 1-11, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.139>

Lima Neto, I. E.; Medeiros, P. H. A.; Costa, A. C.; Wiegand, M. C.; Barros, A. R. M. & Barros, M. U. G. Assessment of phosphorus loading dynamics in a tropical reservoir with high seasonal water level changes. **Science of The Total Environmental**, [s. l.], v. 815, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152875>

Mamede, G. L.; Guentner, A.; Medeiros, P. H. A.; De Araújo, J. C. & Bronstert, A. Modeling the effect of multiple reservoirs on water and sediment dynamics in a semiarid catchment in Brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**, [s. l.], v. 23, n.12, 05018020, 2018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001701](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001701)

Medeiros, P. H. A.; De Araújo, J. C.; Mamede, G. L.; Creutzfeldt, B. Güntner, A. & Bronstert, A. Connectivity of sediment transport in a semiarid environment: a synthesis for the Upper Jaguaribe Basin, **Brazil. Journal of Soils and Sediments**, [s. l.], v. 14, p. 1938-1348, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0988-z>

- Medeiros, P. H. A. & Sivapalan, M. From hard-path to soft-path solutions: slow–fast dynamics of human adaptation to droughts in a water scarce environment. **Hydrological Sciences Journal**, [s. l.], v. 65, 2020. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1770258>
- Meira Neto, A. A.; Medeiros, P. H. A.; De Araújo, J. C.; Pereira, B. S. & Sivapalan, M. Evolution of Drought Mitigation and Water Security Through 100 Years of Reservoir Expansion in Semi-Arid Brazil. **Water Resources Research**, [s. l.], v. 60, n. 9, 2024. <https://doi.org/10.1029/2023WR036411>
- Pereira, B. S.; Uchôa, J. G. S. M.; Freitas, G. S.; Meira Neto, A. A.; Anache, J. A. A.; Wendland, E. C.; Mediondo, E. M. & Medeiros, P. H. A. Hydrological heritage: a historical exploration of human–water dynamics in northeast Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, [s. l.], v. 70, 2025. <https://doi.org/10.1080/02626667.2024.2446272>
- Rattan, K. J.; Corriveau, J. C.; Brua, R. B.; Culp, J. M.; Yates, A. G. & Chambers, P. A. Quantifying seasonal variation in total phosphorus and nitrogen from prairie streams in the Red River Basin, Manitoba Canada. **Science of The Total Environmental**, [s. l.], v. 575, p. 649-659, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.073>
- Silva, E. M. R.; De Almeida, L. G.; Medeiros, P. H. A.; Lima, G. D.; De Andrade, E. M. & De Araújo, J. C. Reservoir eutrophication in the Brazilian semiarid: modeling of sediment removal and control of external loads as remediation measures. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 32, p. 7663-7679, 2025. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36183-z>
- Sivapalan, M.; Savenije H. H. G. & Blöschl, G. Socio-hydrology: A new science of people and water. **Hydrological Processes**, [s. l.], v. 26, p. 1270-1276, 2012. <https://doi.org/10.1002/hyp.8426>
- WANG, H. & WANG, H. Mitigation of lake eutrophication: Loosen nitrogen control and focus on phosphorus abatement. **Progress in Natural Science**, China, v. 19, p. 1445-1451, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2009.03.009>
- Wiegand, M. C.; Nascimento, A. T. P.; Costa, A. C. & Lima Neto, I. E. Trophic state changes of semi-arid reservoirs as a function of the hydro-climatic variability. **Journal of Arid Environments**, v. 184, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104321>