

## **INTERAÇÕES ENTRE SERES HUMANOS – RECURSOS HÍDRICOS E A DEGRADAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA EM UMA DENSA REDE DE RESERVATÓRIOS**

**JOSIANA DO NASCIMENTO ALVES FEITOSA<sup>1</sup>; PEDRO HENRIQUE AUGUSTO MEDEIROS<sup>2</sup> E ANTÔNIO ALVES MEIRA NETO<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, UFC, Brasil, josinascimento1997@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-7695-2280>*

<sup>2</sup>*Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, IFCE Fortaleza, Brasil, [phamedeiros@ifce.edu.br](mailto:phamedeiros@ifce.edu.br), <https://orcid.org/0000-0002-4879-3148>*

<sup>3</sup>*Professor da Colorado State University, Fort Collins, Colorado, EUA, [A.Alves\\_Meira\\_Neto@colostate.edu](mailto:A.Alves_Meira_Neto@colostate.edu), <https://orcid.org/0000-0002-7508-8241>*

### **1 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 mgL<sup>-1</sup> (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.

**FEITOSA, J. do N. A.; MEDEIROS, P. H. A.; MEIRA NETO, A. A.  
INTERACTIONS BETWEEN HUMANS-WATER RESOURCES AND WATER  
QUALITY DEGRADATION IN A DENSELY POPULATED NETWORK OF  
RESERVOIRS**

### **2 ABSTRACT**

The expansion of water infrastructure was a strategy for adapting to droughts in the semiarid region of Brazil, but it had negative effects in the medium and long term. The objective of this study was to identify the sociohydrological effects of reservoir expansion on the water quality in the Upper Jaguaribe Basin (BAJ), Ceará. On the basis of bibliographic references and technical reports, a peak in dam construction was observed in the 1990s, 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 during 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  $0.05 \text{ mg L}^{-1}$  (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.

### 3 INTRODUÇÃO

A seca é um fenômeno natural que ocasiona impactos adversos aos seres humanos e dificulta o cumprimento dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável – ODSs (Di Baldassarre *et al.*, 2019). Para reduzir as vulnerabilidades humanas, diversas estratégias de adaptações foram implementadas ao longo do tempo, destacando-se a construção e a expansão de uma rede de reservatórios no semiárido do Nordeste do Brasil desde o início do século XX, medida que contribuiu para promover segurança hídrica. (Meira Neto *et al.*, 2024). No entanto, a evolução do armazenamento de água resultou em consequências indesejadas decorrentes das interações entre sociedade e os recursos hídricos, como a retenção de nutrientes e a degradação da qualidade da água devido à eutrofização, impactando negativamente a disponibilidade desse recurso (Medeiros; Sivapalan, 2020).

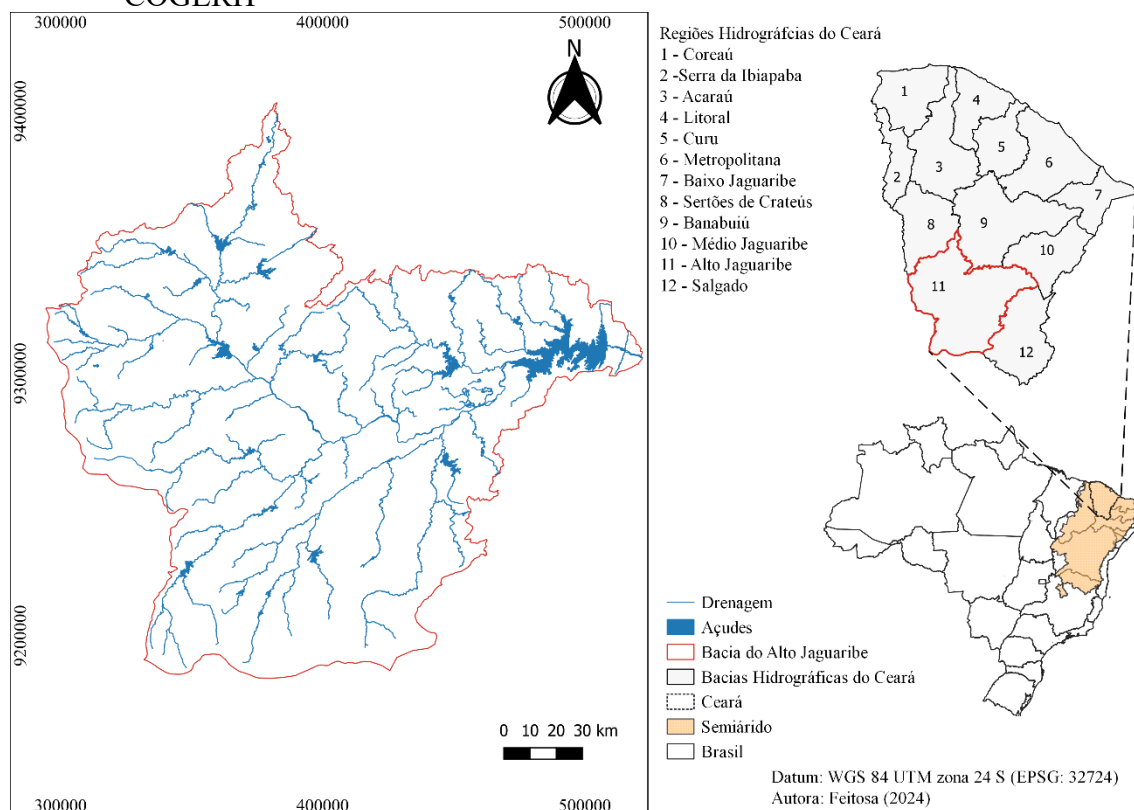
Esse processo de eutrofização tem como fator primordial o elevado aporte de fósforo, nutriente carregado no fluxo de sedimentos, que alcança os corpos hídricos (Lima Neto *et al.*, 2022; Wang; Wang, 2009), Assim, a análise da carga total de fósforo é essencial tanto para o controle da eutrofização nesses ambientes (Le Moal *et al.*, 2019; Rattan *et al.*, 2017; Silva *et al.*, 2025) quanto para o gerenciamento sustentável dos recursos hídricos. Nesse contexto, destaca-se 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 (Pereira *et al.*, 2025; Sivapalan; Savenije; Blöschl, 2012). Portanto, este trabalho tem o objetivo de identificar os efeitos sócio-hidrológicos da expansão da infraestrutura hídrica na bacia do Alto Jaguaribe, Ceará, com ênfase na qualidade da água da extensa e densa rede de reservatórios.

### 4 MATERIAL E MÉTODOS

A Bacia do Alto Jaguaribe (BAJ, com  $24.500 \text{ km}^2$ ) 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 (2025), 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  $700 \text{ mm ano}^{-1}$  e evaporação potencial média anual de  $2.100 \text{ mm ano}^{-1}$  de acordo com médias de 30 anos das Normais Climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia – 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 (Lima Neto *et al.*, 2022; Mamede *et al.*, 2018).

**Figura 1.** Localização da Bacia do Alto Jaguaribe (BAJ) e dos açudes monitorados pela COGERH



Este trabalho apresenta abordagem teórica qualitativa e quantitativa, desenvolvida por meio de uma 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 (2025) relacionados à seca, à interação ser humano-recursos hídricos e à qualidade da água. A seleção das fontes priorizou revistas nas áreas de ciências ambientais e hidrológicas, bem como estudos publicados nos últimos 15 anos.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

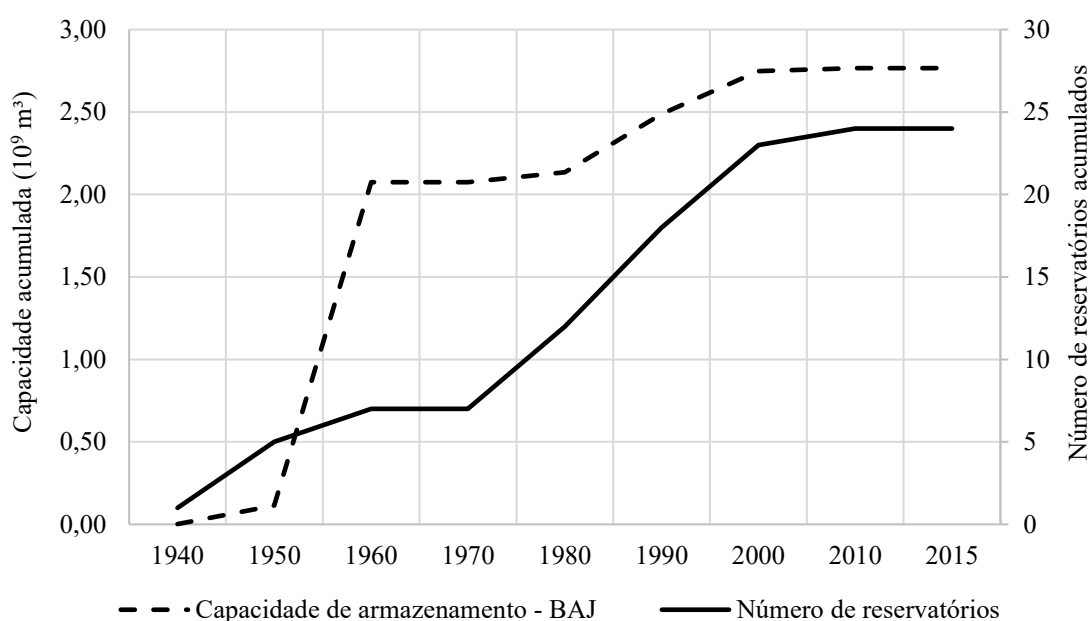
Historicamente, os reservatórios foram construídos para reduzir a vulnerabilidade da sociedade às secas (Di Baldassarre *et al.*, 2019). Essas infraestruturas hídricas tiveram notável crescimento, em escala global, nas décadas de 1960 (300%) e 1970 (130%) com o intuito de atender a população que aumentou 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 (Di Baldassarre *et*

al., 2018; Gohari *et al.*, 2013; Medeiros; Sivapalan, 2020).

No que se refere à BAJ (Figura 2), constatou-se que de 1940 – quando foi implantado o 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,

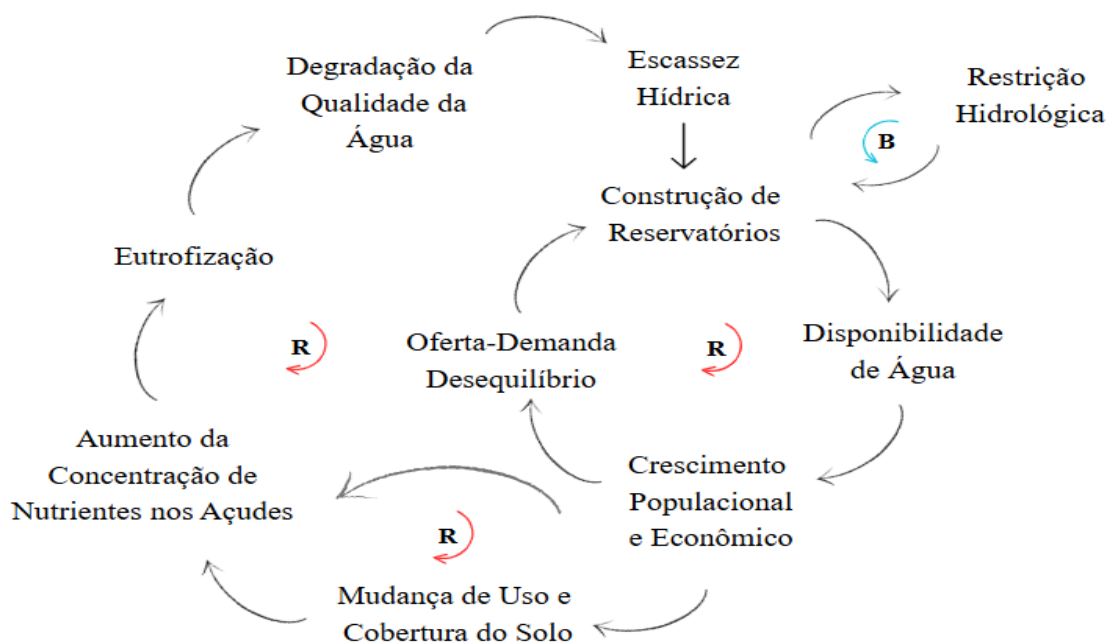
implementados de 1980 a 2004. Contudo, no período de 2005 a 2015, a taxa caiu para 0,1 barragens por ano. Além disso, a capacidade de armazenamento de água aumentou ao longo do tempo: em 1940 correspondia a  $0,002 \cdot 10^9 \text{ m}^3$  e em 2015 alcançou  $2,77 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ . Ressalta-se que na década de 1960 ocorreu um incremento substancial 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



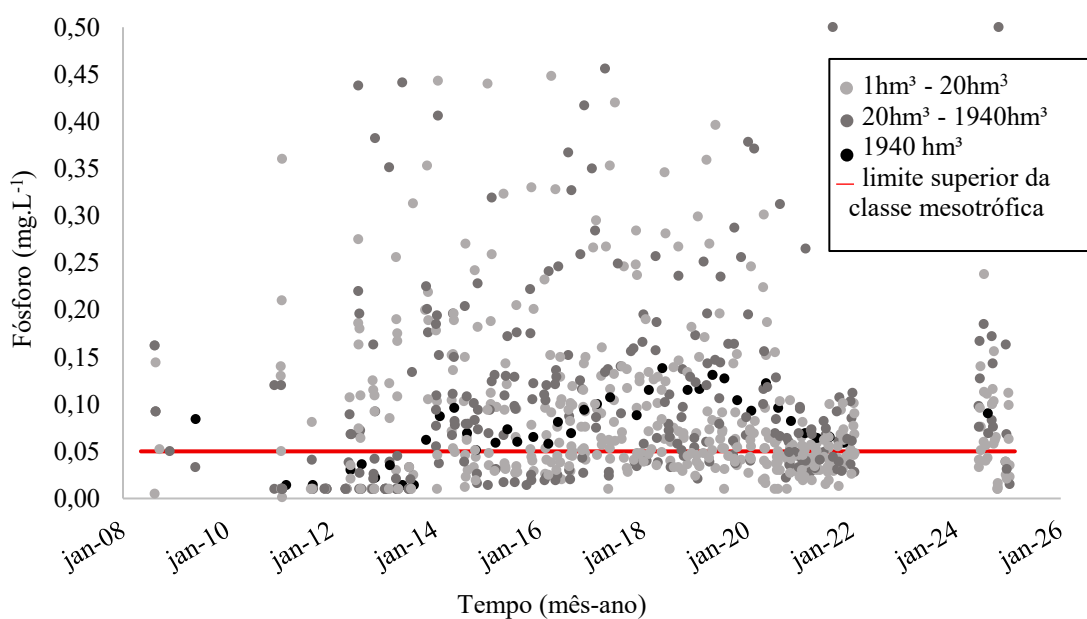
A expansão dos reservatórios na BAJ acarretou dois efeitos: i) a estabilização da capacidade de armazenamento (em quase o dobro do escoamento médio anual) devido à afluência limitada, ou seja, restrição hidrológica; e ii) a degradação da qualidade da água em razão do acúmulo de nutrientes, intensificado pelo aumento do tempo de residência da água nas estruturas de

acumulação hídrica, 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. A Figura 3 apresenta um diagrama de laço que permite visualizar esses efeitos.

**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 ( $\text{mgL}^{-1}$ ) 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 (PT), especialmente para os reservatórios com menores capacidades de armazenamento, impactando negativamente a disponibilidade hídrica.

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

Segundo Silva *et al.* (2025), valores de PT que ultrapassem o limite de 0,05 mg.L<sup>-1</sup> (linha vermelha na Figura 4), o qual corresponde ao limite superior do estado mesotrófico – corpos hídricos com produtividade intermediária, com possíveis impactos na qualidade da água, mas em níveis aceitáveis na maioria dos casos, conforme Projeto Brasil das Águas (2013) – pode ser considerada condição de indisponibilidade hídrica para abastecimento humano em razão da qualidade ruim. Desse modo, em quase todo o período e para quase todos os reservatórios, há água inadequada para consumo humano.

## 6 CONCLUSÃO

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 sócio-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.

## 7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de doutorado à primeira autora, subsídio 140976/2024-8.

## 8 REFERÊNCIAS

- COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS. **Portal Hidrológico do Ceará**. Fortaleza: COGERH, 2025. 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, T.; 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**, Washington, DC, v. 55, n. 8, p. 6327-6355, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018WR023901>. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2018WR023901>. Acesso em: 20 jun. 2025.
- DI BALDASSARRE, G.; WANDERS, N.; AGHAKOUCHAK, A.; KUIL, L.; RANGECROFT, 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**, Londres, v. 1, n. 11, p. 617-622, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0159-0>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41893-018-0159-0>. Acesso em: 02 jun. 2025.

FIGUEIREDO, J. V.; ARAÚJO, J. C. de; MEDEIROS, P. H. A.; COSTA, A. C. Runoff initiation in a preserved semiarid Caatinga small watershed, Northeastern Brazil. **Hydrological Processes**, Hoboken, v. 30, n. 13, p. 2390-2400, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.10801>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.10801>. Acesso em: 15 maio 2025.

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**, Amsterdam, v. 491, n. 1, p. 23-39, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.03.021>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169413002217?via%3Dihub>. Acesso: 21 maio 2025.

LE MOAL, M.; GASCUEL-ODOUX, 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 Environment**, Amsterdam, v. 651, n. 1, p. 1-11, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.139>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969718335836?via%3Dihub>. Acesso em: 31 maio 2025.

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 Environment**, Amsterdam, v. 815, n. 152875, p. 1-10, 2022. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152875>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721079547?via%3Dihub>. Acesso em: 10 maio 2025.

MAMEDE, G. L.; GUENTNER, A.; MEDEIROS, P. H. A.; ARAÚJO, J. C. de; BRONSTERT, A. Modeling the effect of multiple reservoirs on water and sediment dynamics in a semiarid catchment in Brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**, Reston, v. 23, n. 12, p. 05018020-1-05018020-13, 2018. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001701](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001701). Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29HE.1943-5584.0001701>. Acesso em: 12 ago. 2025.

MEDEIROS, P. H. A.; ARAÚJO, J. C. de; 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**, Heidelberg, v. 14, n. 12, p. 1938-1348, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0988-z>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11368-014-0988-z>. Acesso em: 20 ago. 2025.

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**, Abingdon, v. 65, n. 11, p. 1803-1814, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1770258>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02626667.2020.1770258>. Acesso em: 26 jun. 2025.

MEIRA NETO, A. A.; MEDEIROS, P. H. A.; ARAÚJO, J. C. de; 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**, Washington, v. 60, n. 9, p. 1-23, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1029/2023WR036411>. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2023WR036411>. Acesso em: 26 maio 2025.

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**, Abingdon, v. 70, n. 4, p. 546–558, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1080/02626667.2024.2446272>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02626667.2024.2446272>. Acesso em: 05 out. 2025.

PROJETO BRASIL DAS ÁGUAS. *Pesquisa*. Disponível em: <https://brasildasaguas.com.br/projetos/sete-rios-2006-2007/pesquisa/>. Acesso em: 15 jan. 2026.

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 Environment**, Amsterdam, v. 575, p. 649-659, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.073>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969716319921?via%3Dihub>. Acesso em: 15 maio 2025.

SILVA, E. M. R.; ALMEIDA, L. G. de; MEDEIROS, P. H. A.; LIMA, G. D.; ANDRADE, E. M. de; ARAÚJO, J. C. de. Reservoir eutrophication in the Brazilian semiarid: modeling of sediment removal and control of external loads as remediation measures. **Environmental Science and Pollution Research**, Heidelberg, v. 32, n. 12, p. 7663-7679, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36183-z>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-025-36183-z>. Acesso em: 18 maio 2025.

SIVAPALAN, M.; SAVENIJE H. H. G.; BLÖSCHL, G. Socio-hydrology: A new science of people and water. **Hydrological Processes**, Hoboken, v. 26, n. 8, p. 1270-1276, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.8426>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.8426>. Acesso em: 21 maio 2025.

WANG, H.; WANG, H. Mitigation of lake eutrophication: Loosen nitrogen control and focus on phosphorus abatement. **Progress in Natural Science**, Beijing, v. 19, n. 10, p. 1445-1451, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2009.03.009>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1002007109002391?via%3Dihub>. Acesso em: 23 jun. 2025.

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**, Amsterdam, v. 184, article 104321, p. 1-9, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104321>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140196320302202?via%3Dihub>. Acesso em: 05 jul. 2025.