

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE ÍNDICES DE ESTADO TRÓFICO EM RESERVATÓRIOS DA BACIA DO CURU: UMA ANÁLISE BASEADA EM CLOROFILA-A E FÓSFORO TOTAL

Alana Jade de Lima Bezerra¹ & Fernando José Araújo da Silva²

Abstract: The classification of the trophic state of reservoirs is an essential tool for water quality monitoring and management, especially in semi-arid regions where hydrological variability and eutrophication processes are intensified. This study aimed to compare the trophic classification of reservoirs in the Curu Basin, Ceará, using two distinct methods: the Trophic Level Index of Burns (B-IET) and the Index modified by Cunha (2013) and adapted by Lamparelli (2004) (C-IET), focusing on total phosphorus and chlorophyll-a concentrations. The data used was obtained from water quality monitoring campaigns carried out in the region. The agreement analysis between the methods was performed using Cohen's Kappa coefficient, allowing for the evaluation of the degree of consistency between the obtained classifications. The results showed significant variations in classifications between the methods, highlighting the influence of the adopted criteria and reinforcing the importance of choosing indices appropriate to the environmental reality of Brazilian Semiarid reservoirs. This comparison provides important technical subsidies for selecting more representative methodologies in water quality management and control actions in the region.

Resumo: A classificação do estado trófico de reservatórios é uma ferramenta essencial para o monitoramento e a gestão da qualidade da água, especialmente em regiões semiáridas, onde a variabilidade hidrológica e os processos de eutrofização são intensificados. Este trabalho teve como objetivo comparar a classificação trófica de reservatórios da Bacia do Curu, no Ceará, utilizando dois métodos distintos: o Índice de Estado Trófico de Burns (B-IET) e o Índice modificado por Cunha (2013) e adaptado por Lamparelli (2004) (C-IET), com foco nas concentrações de fósforo total e clorofila-a. Os dados utilizados foram provenientes de campanhas de monitoramento de qualidade da água realizadas na região. A análise de concordância entre os métodos foi realizada utilizando o coeficiente *Kappa* de *Cohen*, permitindo avaliar o grau de consistência entre as classificações obtidas. Os resultados mostraram variações significativas nas classificações entre os métodos, evidenciando a influência dos critérios adotados e reforçando a importância de escolher índices adequados à realidade ambiental dos reservatórios do Semiárido brasileiro. Esta comparação fornece subsídios técnicos importantes para a seleção de metodologias mais representativas nas ações de gestão e controle da qualidade da água na região.

Palavras-Chave – Estado trófico; coeficiente *Kappa*; qualidade da água.

1) Universidade Federal do Ceará, alanajade15@gmail.com
2) Universidade Federal do Ceará, fjas@deha.ufc.br

INTRODUÇÃO

O monitoramento da qualidade da água e a avaliação do estado trófico de corpos hídricos são fundamentais para a gestão sustentável dos recursos hídricos, especialmente diante dos impactos causados pela eutrofização. Esses processos permitem identificar alterações na qualidade da água ao longo do tempo, subsidiando ações de controle, recuperação e planejamento ambiental. Os parâmetros físicos, químicos e biológicos podem ser integrados em diferentes índices, convertendo a complexidade do ambiente aquático em informações acessíveis para cientistas, gestores e tomadores de decisão (Li et al., 2021; Zhang et al., 2021).

No semiárido brasileiro, a gestão da qualidade da água dos reservatórios é um desafio constante devido às condições climáticas adversas, à alta variabilidade hidrológica e aos processos acelerados de eutrofização. No Semiárido brasileiro, o desafio da gestão da qualidade da água se intensifica devido às condições climáticas extremas, como altas temperaturas e baixos índices pluviométricos, e à elevada variabilidade hidrológica, com períodos prolongados de seca seguidos de eventos de recarga concentrada. Essa dinâmica acarreta oscilações significativas no volume dos reservatórios, aumentando a concentração de nutrientes e favorecendo a ocorrência de processos de eutrofização. Além disso, o crescimento populacional, a intensificação das atividades agropecuárias e o lançamento de efluentes domésticos e industriais contribuem para o enriquecimento artificial dos recursos hídricos (Cunha et al., 2013; Gasparini et al., 2013; Smith & Schindler, 2009).

Ao longo das últimas décadas, diversos índices foram desenvolvidos para a classificação do estado trófico de ambientes aquáticos. O Índice de Estado Trófico de Carlson (1977) é um dos mais utilizados em escala mundial, devido à sua simplicidade operacional e à possibilidade de comparação entre diferentes corpos d'água. Este índice baseia-se principalmente em três variáveis: fósforo total, clorofila-a e a transparência da água, medida pelo disco de *Secchi*. No entanto, por ter sido desenvolvido originalmente para lagos de regiões temperadas, sua aplicação direta em ecossistemas tropicais e semiáridos pode não refletir com precisão as condições locais, dada as diferenças climáticas, hidrológicas e limnológicas (Burns et al., 2005).

Com o objetivo de superar essas limitações, adaptações metodológicas foram propostas por diversos autores. Burns et al. (2005) propuseram uma versão modificada do IET para lagos da Nova Zelândia, ajustando as faixas de classificação para melhor refletir as características de lagos rasos e ambientes mais produtivos. No Brasil, Cunha et al. (2013) desenvolveram um índice específico para reservatórios tropicais, incluindo ambientes do Semiárido, com critérios de classificação baseados em ampla base de dados nacional e adaptados às condições limnológicas brasileiras. Essas iniciativas reforçam a importância de considerar as especificidades regionais ao aplicar índices de estado trófico, uma vez que diferentes contextos ambientais podem influenciar diretamente os limites e interpretações das classes tróficas.

A Bacia do Rio Curu, localizada no estado do Ceará, é um exemplo típico de região que reúne todas essas complexidades. Seus reservatórios desempenham papel estratégico para o abastecimento humano, irrigação e manutenção das atividades econômicas locais. Contudo, a intensificação das pressões antrópicas e a crescente ocorrência de eventos de eutrofização reforçam a necessidade de uma avaliação detalhada e comparativa do estado trófico desses corpos hídricos.

Apesar da relevância socioambiental da Bacia do Curu, são escassos os estudos que avaliam a aplicabilidade e a sensibilidade dos diferentes índices de estado trófico disponíveis para essa realidade regional. A maioria dos monitoramentos ainda utiliza critérios genéricos, muitas vezes desconsiderando adaptações metodológicas mais adequadas às condições tropicais e semiáridas (Carlson, 1977; Cunha et al., 2013; Osgood, 1984; Sruthy et al., 2021). A comparação entre métodos internacionais, adaptações regionais e índices específicos para o Semiárido pode oferecer uma visão mais precisa sobre a qualidade trófica dos reservatórios da região, além de fornecer subsídios técnicos importantes para gestores e órgãos de controle ambiental.

Além disso, a utilização de ferramentas estatísticas como o coeficiente Kappa de Cohen permitirá quantificar a concordância entre os diferentes métodos de classificação, proporcionando uma avaliação objetiva da consistência entre as abordagens e identificando possíveis divergências críticas que poderiam influenciar nas decisões de gestão da água.

Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo principal comparar a classificação do estado trófico de reservatórios da Bacia do Rio Curu, Ceará, utilizando três metodologias distintas: o Índice de Estado Trófico de Carlson (1977), a adaptação de Burns et al. (2005) e o índice proposto por Cunha et al. (2013). Para isso, serão utilizadas as concentrações de fósforo total e clorofila-a como parâmetros base de análise. Complementarmente, será aplicada a análise estatística de concordância (coeficiente Kappa de Cohen) com o intuito de avaliar a consistência entre os métodos e discutir as implicações práticas dessas diferenças na gestão da qualidade da água em regiões semiáridas.

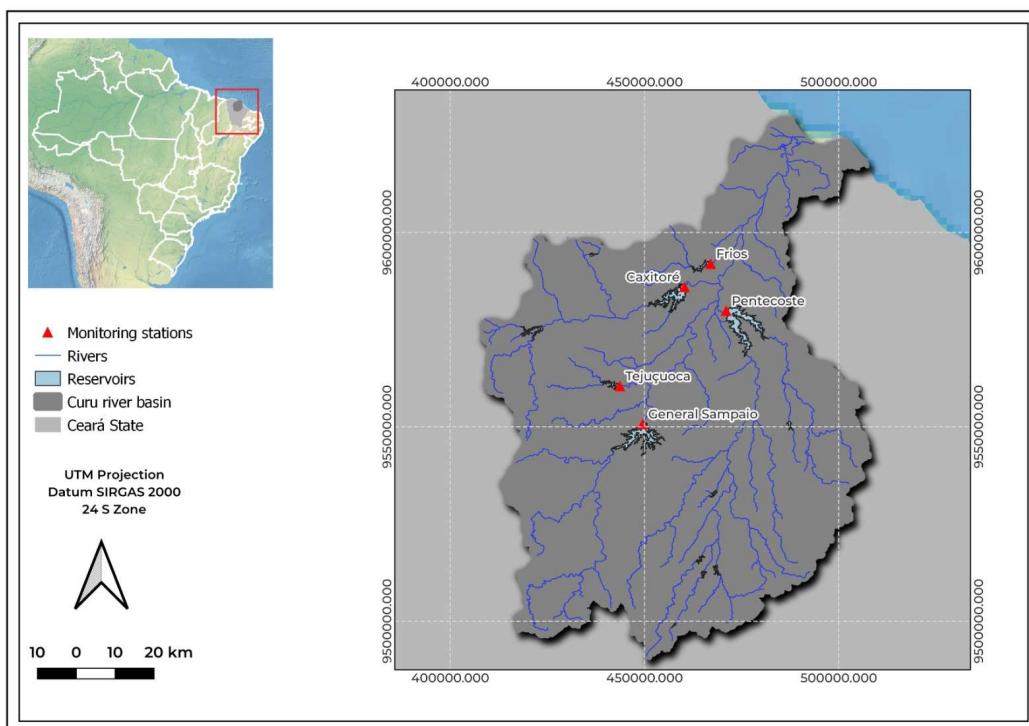
MATERIAL E MÉTODOS

Área de Estudo

A pesquisa foi conduzida na Bacia Hidrográfica do Rio Curu (Figura 1), situada no estado do Ceará, região semiárida do Brasil. A bacia abrange diversos municípios e apresenta grande importância socioeconômica, sendo responsável pelo abastecimento de água, irrigação agrícola e suporte a atividades econômicas locais. Caracteriza-se por um clima semiárido quente, com chuvas concentradas entre os meses de fevereiro e maio, e por um regime hídrico intermitente que influencia diretamente a qualidade da água nos reservatórios locais (COGERH, 2020).

Foram compilados os dados de cinco reservatórios da bacia do Curu, monitorados do ano de 2018 ao ano de 2023, na maioria das vezes trimestralmente, no ponto de amostragem da COGERH. Foram utilizadas as concentrações de fósforo total (P) e clorofila-a (Chla) ($\mu\text{g/L}$) nas análises demonstradas.

Figura 1: Mapa da bacia do Curu



Análise de Dados

As séries temporais de cada parâmetro foram organizadas e submetidas a análises exploratórias, a fim de lidar com incertezas inerentes à variabilidade natural e aos dados ausentes ou imprecisos. Verificou-se as médias anuais dos dados das concentrações de fósforo total (P) e clorofila-a (Chla) e o resultado obtido foi submetido ao cálculo dos Índices de Estado Trófico de Cunha (C-IET) e de Burns (B-IET) de acordo com as equações (1-4) a seguir:

$$B\text{-IET Chla} = 2.22 + 2.54 \log(Chla) \quad (1)$$

$$B\text{-IET P} = 0.218 + 2.92 \log(P) \quad (2)$$

$$C\text{-IET P} = 10 \left[6 - \left(\frac{-0.27637 \ln P + .329766}{\ln 2} \right) \right] \quad (3)$$

$$C\text{-IET Chla} = 10 \left[6 - \left(\frac{-0.2512 \ln Chla + 0.842257}{\ln 2} \right) \right] \quad (4)$$

Os índices finais foram, posteriormente, calculados por meio de suas médias. Esses resultados podem ser observados – com suas respectivas classificações – na Tabela 1.

Com o objetivo de minimizar os efeitos de valores extremos nos cálculos, foi aplicada uma função de suavização de outliers, baseada no intervalo interquartil (IQ). Valores fora de $1,5 \times \text{IQ}$ foram identificados como outliers e suavizados utilizando a média dos vizinhos dentro do intervalo de $3,0 \times \text{IQ}$. O processo de suavização foi implementado no Python, assim como os demais cálculos. Após o cálculo dos índices contínuos, os resultados foram classificados em categorias tróficas discretas com base nas faixas de classificação de cada método:

- ✓ Cunha et al. (2013): Ultraoligotrófico (OLI), oligotrófico (OLI), mesotrófico (MESO), eutrófico (EUT), supereutrófico (SUPER) e hipereutrófico (HIPER);
- ✓ Burns et al. (2005): Oligotrófico (OLI), mesotrófico (MESO), eutrófico (EUT), supereutrófico (SUPER) e hipereutrófico (HIPER);

Para avaliar a concordância entre as classificações obtidas pelos diferentes índices, foi utilizado o Coeficiente de Kappa de Cohen, que quantifica o grau de concordância entre dois classificadores além do que seria esperado pelo acaso (Landis & Koch, 1977). O cálculo do Kappa foi realizado no ambiente *Python*, utilizando a biblioteca *scikit-learn*.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta a comparação das classificações do estado trófico de cinco reservatórios da Bacia do Rio Curu (Caxitoré, Frios, General Sampaio, Pentecoste e Tejuçuoca), no período de 2018 a 2023, utilizando dois métodos distintos: o de Cunha et al. (2013) – que considera os índices IET-Cla e IET-P, resultando em uma média e classificação final – e o de Burns et al. (2005) – que utiliza os índices INTCla e INTP, também com média e classificação final.

De acordo com os resultados apresentados, observa-se que, independentemente do método utilizado, os reservatórios analisados foram classificados predominantemente nas faixas EUT, SUPER ou HIPER, indicando altos níveis de produtividade biológica e possíveis impactos ambientais relacionados à eutrofização. No entanto, apesar de ambos os métodos indicarem estados tróficos elevados, não houve uma concordância consistente entre as classificações geradas. Essa falta de concordância é evidenciada pelo coeficiente de Kappa de Cohen obtido ($\approx 0,19$), o que, segundo a escala de Landis e Koch (1977) apresentada na Tabela 2, representa um nível de concordância “muito fraco”.

Tabela 1: Comparativo de Classificação Trófica entre Índices de Cunha et al. (2013) e Burns et al. (2005)

Reservatório	Ano	Cunha et al. (2013)				Burns et al. (2005)			
		C-IET Cla	C-IET P	C-IET Cla, P	Classificação	B-IET Cla	B-IET P	B-IET Cla, P	Classificação
Caxitore	2018	61,0	58,3	59,6	HIPER	6,2	5,8	6,0	SUPER
Caxitore	2019	57,5	57,4	57,5	EUT	5,2	5,5	5,3	SUPER
Caxitoré	2020	58,0	54,9	56,4	EUT	5,3	4,7	5,0	EUT
Caxitoré	2021	58,7	55,3	57,0	EUT	5,5	4,8	5,2	SUPER
Caxitoré	2022	58,1	56,0	57,1	EUT	5,3	5,1	5,2	SUPER
Caxitoré	2023	55,5	58,5	57,0	EUT	4,5	5,8	5,2	SUPER
Frios	2018	61,3	60,3	60,8	HIPER	6,3	6,4	6,4	HIPER
Frios	2019	57,8	57,9	57,9	EUT	5,3	5,7	5,5	SUPER
Frios	2020	57,0	56,4	56,7	EUT	5,0	5,2	5,1	SUPER
Frios	2021	57,6	55,1	56,4	EUT	5,2	4,8	5,0	EUT
Frios	2022	58,2	57,0	57,6	EUT	5,4	5,4	5,4	SUPER
Frios	2023	56,2	58,2	57,2	EUT	4,8	5,7	5,3	SUPER
General Sampaio	2018	58,6	56,8	57,7	EUT	5,5	5,3	5,4	SUPER
General Sampaio	2019	60,4	57,0	58,7	SUPER	6,0	5,4	5,7	SUPER
General Sampaio	2020	61,5	58,8	60,1	HIPER	6,4	5,9	6,2	HIPER
General Sampaio	2021	62,0	58,4	60,2	HIPER	6,5	5,8	6,2	HIPER
General Sampaio	2022	61,0	58,9	59,9	HIPER	6,2	6,0	6,1	HIPER
General Sampaio	2023	59,5	59,5	59,5	HIPER	5,8	6,2	6,0	HIPER
Pentecoste	2018	58,3	59,0	58,6	SUPER	5,4	6,0	5,7	SUPER
Pentecoste	2019	59,3	57,4	58,4	SUPER	5,7	5,5	5,6	SUPER
Pentecoste	2020	61,8	57,3	59,6	HIPER	6,5	5,5	6,0	SUPER
Pentecoste	2021	62,9	57,8	60,3	HIPER	6,8	5,6	6,2	HIPER
Pentecoste	2022	62,8	58,8	60,8	HIPER	6,8	5,9	6,4	HIPER
Pentecoste	2023	60,6	57,7	59,2	HIPER	6,1	5,6	5,8	SUPER
Tejuçuoca	2018	59,6	56,8	58,2	SUPER	5,8	5,3	5,5	SUPER
Tejuçuoca	2019	59,3	57,7	58,5	SUPER	5,7	5,6	5,6	SUPER
Tejuçuoca	2020	56,3	56,1	56,2	EUT	4,8	5,1	4,9	EUT
Tejuçuoca	2021	59,0	55,2	57,1	EUT	5,6	4,8	5,2	SUPER
Tejuçuoca	2022	59,6	57,3	58,4	SUPER	5,8	5,4	5,6	SUPER
Tejuçuoca	2023	58,6	56,6	57,6	EUT	5,5	5,2	5,4	SUPER

Tabela 2: Níveis de concordância conforme a escala de Landis e Koch (1977)

Valor de Kappa	Grau de Concordância
< 0	Concordância inferior ao acaso
0.00 – 0.20	Muito fraca
0.21 – 0.40	Fraca
0.41 – 0.60	Moderada
0.61 – 0.80	Substancial
0.81 – 1.00	Quase perfeita

Em diversos anos e reservatórios, um mesmo corpo hídrico foi enquadrado como EUT por um método e SUPER ou HIPER por outro. Isso sugere que os dois índices respondem de forma distinta às variáveis ambientais, indicando que não se trata apenas de uma diferença de terminologia, mas de uma divergência na interpretação ecológica dos dados. Desta forma, essas discrepâncias podem decorrer das diferenças nos critérios de categorização, pesos atribuídos às variáveis, e faixas de corte entre classes tróficas.

As variações nas classificações não são apenas discrepâncias metodológicas: elas representam interpretações distintas da condição ambiental dos reservatórios. Um enquadramento como EUT pode indicar um sistema impactado, mas ainda com certo equilíbrio ecológico; já uma classificação SUPER ou HIPER sugere um estado crítico de eutrofização, com risco iminente de floração de cianobactérias, anoxia, mortandade de peixes e comprometimento do abastecimento humano.

Em cenários onde a classificação varia de EUT para HIPER entre métodos, gestores e tomadores de decisão podem adotar estratégias conflitantes — por exemplo, optar por intervenções mais brandas quando, na verdade, a situação exige ações emergenciais.

As divergências observadas reforçam a necessidade de aprimorar os sistemas de classificação trófica existentes, especialmente quando aplicados a ambientes complexos e altamente variáveis como os do semiárido brasileiro. A adoção de escalas tróficas desenvolvidas em contextos temperados ou generalistas pode não refletir de maneira acurada os processos ecológicos que ocorrem em ambientes tropicais intermitentes.

Há também a questão da relevância ecológica das categorias: atualmente, as faixas EUT, SUPER e HIPER são definidas com base em faixas numéricas fixas que nem sempre refletem o real impacto sobre o ecossistema aquático ou sobre os usos da água. Em reservatórios sujeitos a ciclos de seca e cheia, como os da Bacia do Curu, essa abordagem pode simplificar demais um sistema altamente dinâmico.

Nesse sentido, surge a necessidade de desenvolver ou adaptar índices regionais, baseados em dados históricos locais, integrando também variáveis hidrológicas e climáticas, como tempo de residência da água, volume útil e variação do nível do reservatório.

Assim, diante da evidência de baixa concordância, recomenda-se que a avaliação do estado trófico dos reservatórios da Bacia do Curu e, de forma geral, de corpos hídricos no semiárido, seja conduzida com o apoio de múltiplos indicadores. A integração dos métodos de Cunha e Burns, aliada à análise de parâmetros adicionais, como oxigênio dissolvido, transparência da água (disco de Secchi), composição da comunidade fitoplânctonica e macroinvertebrada, pode fornecer um diagnóstico mais robusto e confiável. Alternativamente, análises multivariadas e de agrupamento podem ajudar a identificar padrões e divergências sistemáticas entre os métodos, favorecendo a seleção de índices mais adequados às condições locais (Gorczyca, 2024; Mamun et al., 2021).

CONCLUSÕES

A divergência entre os métodos reforça a importância da escolha criteriosa do índice de estado trófico mais adequado às condições ambientais locais. As diferenças observadas podem estar relacionadas às particularidades limnológicas da região Semiárida, como a elevada variabilidade hidrológica, os altos níveis de evaporação e o regime intermitente de chuvas, além das diferenças metodológicas intrínsecas a cada índice, como os critérios de classificação e os parâmetros considerados.

Os índices de Burns (2005) e Cunha et al. (2013) incorporam adaptações regionais que buscam refletir melhor as condições de ambientes mais produtivos ou tropicais. Por isso mesmo, a concordância permaneceu limitada, indicando que fatores locais específicos da Bacia do Curu podem exigir um maior refinamento dos critérios de classificação trófica.

Os resultados deste trabalho sugerem que a utilização direta de índices desenvolvidos em outras regiões pode gerar interpretações conflitantes sobre a qualidade trófica dos reservatórios da bacia, o que pode comprometer a tomada de decisão em termos de gestão ambiental.

Diante disso, recomenda-se que futuras pesquisas considerem a calibração local de índices tróficos, incorporando séries temporais mais longas, análises multivariadas e, se possível, o desenvolvimento de um índice específico para os reservatórios do Semiárido cearense. Além disso, a inclusão de outros parâmetros de qualidade da água e a análise de suas relações com os usos múltiplos da água podem contribuir para uma avaliação mais representativa da realidade ambiental da Bacia do Curu.

REFERÊNCIAS

- Burns, N., McIntosh, J., & Scholes, P. (2005). Strategies for managing the lakes of the rotorua district, New Zealand. *Lake and Reservoir Management*, 21(1), 61–72. <https://doi.org/10.1080/07438140509354413>
- Carlson, R. E. (1977). A trophic state index for lakes1. *Limnology and Oceanography*, 22(2), 361–369.
- COGERH. (2020). *Ficha Técnica dos Açudes*. <https://portal.cogerh.com.br/ficha-tecnica-dos-acudes-158/>
- Cunha, D. G. F., Calijuri, M. do C., & Lamparelli, M. C. (2013). A trophic state index for tropical/subtropical reservoirs (TSItsr). *Ecological Engineering*, 60, 126–134. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.07.058>
- Gasparini, D., Cunha, F., Calijuri, C., & Condé, M. (2013). A trophic state index for tropical / subtropical reservoirs (TSI tsr). *Ecological Engineering*, 60, 126–134. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.07.058>
- Gorczyca, B. (2024). *Science of the Total Environment Rapid assessment of surface water quality using statistical multivariate analysis approach : Oder River system case study Gra z*. 912(June 2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168754>
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). *This content downloaded from 128.230.234.162 on Fri* (Vol. 33, Issue 1).
- Li, M., Dong, J., Zhang, Y., Yang, H., Van Zwieten, L., Lu, H., Alshameri, A., Zhan, Z., Chen, X., Jiang, X., Xu, W., Bao, Y., & Wang, H. (2021). A critical review of methods for analyzing freshwater eutrophication. In *Water (Switzerland)* (Vol. 13, Issue 2). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/w13020225>
- Mamun, M., Kim, J. Y., & An, K. G. (2021). Multivariate statistical analysis of water quality and trophic state in an artificial dam reservoir. *Water (Switzerland)*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/w13020186>
- Osgood, R. (1984). Who needs trophic state indices? *Lake and Reservoir Management*, 1(1), 431–434. <https://doi.org/10.1080/07438148409354551>
- Smith, V. H., & Schindler, D. W. (2009). Eutrophication science: where do we go from here? *Trends in Ecology and Evolution*, 24(4), 201–207. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.11.009>
- Sruthy, G. S., Priya, K. L., Madhu, A. M., Chellappan, S., Adarsh, S., & Haddout, S. (2021). Fuzzy logic approach for the assessment of trophic state of water bodies. *Ecological Engineering*, 169(May), 106314. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106314>
- Zhang, Y., Li, M., Dong, J., Yang, H., Zwieten, L. Van, & Lu, H. (2021). A Critical Review of Methods for Analyzing Freshwater. *Water*, 13(225), 1–20. <https://doi.org/10.3390/w13020225>