



## Avaliação multimodelo IET para a caracterização da eutrofização em um reservatório do semiárido tropical: estudo de caso do Reservatório Araras

*Multimodel TSI Evaluation to Characterize Eutrophication in a Tropical Semi-Arid*

*Reservoir: a case study of the Araras Reservoir*

Raimundo Nonato Sousa Raulino<sup>1</sup>  Marcus Vinicius Freire Andrade<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental (IFCE). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia

do Ceará (IFCE). Sobral, Ceará – Brasil



<sup>2</sup> Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento (USP). Instituto Federal de Educação, Ciência e

Tecnologia do Ceará (IFCE). Sobral, Ceará, Brasil.



[marcus.andrade@ifce.edu.br](mailto:marcus.andrade@ifce.edu.br)

### Notas dos Autores

Os autores declaram que não há conflitos de interesse

Correspondências referentes a este artigo podem ser enviadas para o e-mail de Marcus Vinicius

Freire Andrade

*Cite as - American Psychological Association (APA)*

Raulino, R. N. S., & Andrade, M. V. F. (2024). Multimodel TSI Evaluation to Characterize

Eutrophication in a Tropical Semi-Arid Reservoir: a case study of the Araras Reservoir. *J.*

*Environ. Manag. & Sust.*, 13(1), 1-35, e25183. <https://doi.org/10.5585/2024.25183>





## Resumo

**Objetivo:** Avaliar diferentes modelos para a caracterização da eutrofização em um reservatório localizado na região semiárida de Araras.

**Metodologia:** A avaliação do estado e do risco de eutrofização foi realizada mediante a utilização de cinco modelos de Índice de Estado Trófico. O cálculo de risco de eutrofização pela Função Densidade de Probabilidade foi aplicado à avaliação multimodelo IET para gerar o valor representativo do Estado Trófico.

**Originalidade/Relevância:** O desenvolvimento da pesquisa e o tratamento de dados corroboram a necessidade de monitorar os reservatórios, aliada à gestão integrada das águas como forma de permitir os usos múltiplos e esclarecer a influência dos parâmetros hidrológicos e de qualidade de água no Índice de Estado Trófico.

**Resultados:** Os resultados apontaram que, no período de 2009 a 2022, a variável Volume do Reservatório influenciou a qualidade de água, especificamente em seus níveis de nitrogênio total, fósforo total e clorofila, indicando o aumento do risco de eutrofização conforme o esvaziamento do reservatório. Todos os modelos utilizados mostraram divergências quanto à classificação do Estado Trófico, todavia, a avaliação multimodelo associada ao cálculo de risco de eutrofização demonstrou-se uma ferramenta consistente para a avaliação da eutrofização do reservatório Araras.

**Contribuições sociais para a gestão:** O monitoramento dos reservatórios e a avaliação multimodelo fornecem informações confiáveis e consistentes para o adequado gerenciamento da qualidade da água de reservatórios do semiárido tropical brasileiro.

*Palavras-chaves:* estado trófico, nutriente limitante, risco, semiárido

### Multimodel TSI Evaluation to Characterize Eutrophication in a Tropical Semi-Arid

### Reservoir: a case study of the Araras Reservoir

### Abstract





**Objective:** To evaluate different models for characterizing eutrophication in a reservoir located in the semi-arid region of Araras.

**Methodology:** The assessment of the Trophic Status Index and the risk of eutrophication was carried out using five Trophic Status Index models. The calculation of eutrophication risk using the Probability Density Function was applied to the TSI multi-model assessment to generate the representative value of the Trophic State.

**Originality/Relevance:** The development of the research and the data processing corroborate the need for monitoring reservoirs, combined with integrated water management as a way to allow multiple uses and clarify the influence of hydrological and water quality parameters of water on the Trophic Status Index.

**Results:** The results indicated that, in the period from 2009 to 2022, the Reservoir Volume variable influenced water quality, specifically in its levels of nitrogen, total phosphorus, and chlorophyll, indicating an increased risk of eutrophication as the reservoir emptied. All models used showed discrepancies in the classification of the Trophic State; however, the multi-model assessment associated with the calculation of eutrophication risk proved to be a consistent tool for evaluating the eutrophication of the Araras reservoir.

**Social/Management Contributions:** The monitoring of reservoirs and the multi-model assessment provide reliable and consistent information for the adequate management of water quality in reservoirs in the tropical semi-arid region of Brazil.

*Keywords:* trophic state, limiting nutrient, risk, semi-arid

### **Evaluación multimodelo IET para la caracterización de la eutrofización en un embalse tropical semiárido: estudio de caso del Embalse de Araras**

#### **Resumen**

**Objetivo:** Evaluar diferentes modelos para la caracterización de la eutrofización en un embalse ubicado en la región semiárida de Araras.





**Metodología:** La evaluación del estado y del riesgo de eutrofización se realizó mediante cinco modelos de Índice de Estado Trófico. El cálculo del riesgo de eutrofización a través de la Función de Densidad de Probabilidad se aplicó a la evaluación multimodelo del IET para generar el valor representativo del Estado Trófico.

**Originalidad/Relevancia:** El desarrollo de la investigación y el tratamiento de datos corroboran la necesidad de monitorear los embalses, combinada con la gestión integrada del agua como una forma de permitir usos múltiples y aclarar la influencia de los parámetros hidrológicos y de calidad del agua en el Índice de Estado Trófico.

**Resultados:** Los resultados indicaron que, en el periodo 2009 al 2022, la variable Volumen del Embalse influyó en la calidad del agua, específicamente en sus niveles de nitrógeno total, fósforo total y clorofila, lo que indica un aumento del riesgo de eutrofización a medida que el embalse se vaciaba. Todos los modelos utilizados mostraron divergencias en cuanto a la clasificación del Estado Trófico; sin embargo, la evaluación multimodelo asociada con el cálculo del riesgo de eutrofización demostró ser una herramienta consistente para la evaluación de la eutrofización del embalse de Araras.

**Contribuciones sociales/ de gestión:** El monitoreo de los embalses y la evaluación multimodelo proporcionan información confiable y consistente para la gestión adecuada de la calidad del agua en embalses de la región semiárida tropical brasileña.

*Palabras clave:* estado trófico. limitar los nutrientes. riesgo. semiárido.

## Introdução

A eutrofização é o enriquecimento das águas superficiais com nutrientes vegetais, normalmente associado a fontes antropogênicas de nutrientes. O estado trófico dos lagos e dos reservatórios, por sua vez, é o conceito central da gestão de eutrofização, pois descreve a relação entre o estado nutricional e o aumento da matéria orgânica (Misha, 2023).





A eutrofização é um problema global recorrente em lagos e reservatórios. Em ambientes acometidos por grande variedade climática espaço-temporal, como a região semiárida do Brasil, esses reservatórios superficiais representam a fonte principal de abastecimento durante a maior parte do ano e são mais suscetíveis aos processos de eutrofização devido à grande variação de nível, aos longos períodos de baixa recarga e às altas taxas de evaporação a que estão submetidos (Guimarães, 2023).

Dentre os seus efeitos negativos, como a degradação da qualidade da água para o abastecimento humano, a depleção de oxigênio dissolvido e o uso recreativo limitado, a eutrofização promove a proliferação de cianobactérias potencialmente produtoras de toxinas que são nocivas para a saúde humana. Esse fenômeno demanda o aumento no custo de tratamento de água e, por consequência, coloca em risco os seus usos (Geletu, 2023). A eutrofização, ainda, impede a utilização múltipla dos sistemas aquáticos, altera diretamente o componente biótico dos recursos hídricos, aumenta de modo acentuado a biomassa de algas e as florações de cianobactérias e macrófitas aquáticas e afeta o componente socioeconômico. Há, também, uma série de resultados indiretos, dos quais se pode citar: alterações na estrutura das comunidades aquáticas, redução das concentrações de oxigênio dissolvido, produção de odores, elevação da turbidez, formação de gás sulfídrico e mortandades de peixes (Júlio-Júnior, 2005; Sardinha et al., 2018).

O Índice de Estado Trófico (IET), com isso em vista, tem por finalidade classificar os corpos d'água em diferentes graus de trofia. Em outras palavras, objetiva avaliar a qualidade da água quanto ao enriquecimento por nutriente e seu efeito sobre o crescimento excessivo de algas e cianobactérias, segundo a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2017). Os IETs frequentemente utilizados, no entanto, não foram desenvolvidos para águas de regiões tropicais e merecem cuidadosa interpretação quando seus dados, por exemplo, foram obtidos de sistemas localizados na região semiárida do nordeste brasileiro (Rolim et al., 2019).

Para remediar esse e outros problemas, uma melhor compreensão da classificação trófica





de reservatórios, com base em estudos comparativos e ao longo de tendências temporais, pode facilitar o desenvolvimento de métricas de fácil cálculo e divulgação, além de fortalecer a previsão e a gestão da eutrofização (Klippel, 2020). Há intenso debate entre os pesquisadores sobre qual índice utilizar para sistemas aquáticos tropicais, resultando no uso de diferentes índices e, conseqüentemente, de classificações para o mesmo ecossistema aquático (Pomari et al., 2018).

A utilização do IET para caracterizar as condições tróficas de reservatórios do semiárido tem apresentado consideráveis limitações, principalmente devido ao clima semiárido determinar as condições que controlam a dinâmica da eutrofização, como consequência das secas e estiagens. A aplicação de uma abordagem multimodelo IET, associada ao cálculo probabilístico de risco de eutrofização com o conceito da Função Densidade de Probabilidade (FDP), no entanto, apresenta-se como metodologia consistente para a caracterização da eutrofização de reservatórios do semiárido brasileiro.

A utilização de índices tróficos orienta a prioridade na tomada de decisões sobre a gestão dos recursos hídricos, tanto em suas políticas públicas para o meio ambiente quanto na disponibilização de informações ao público sobre a qualidade das águas. Sua aplicação é facilitada pela praticidade das determinações analíticas que a compõem, sendo, portanto, uma ferramenta para tornar os estudos relativos à eutrofização mais objetivos. A utilização do IET sintetiza as informações sobre os parâmetros físico-químicos e biológicos e agiliza, em casos de conflitos e crises (Bem et al., 2009; Ana, 2017), a comunicação com os públicos usuários da água.

Dessa forma, o emprego da avaliação multimodelo IET para caracterizar a eutrofização de reservatório do semiárido tropical vê-se justificado. Objetiva-se, aqui, contornar as deficiências que podem afetar a aplicabilidade do IET em um reservatório da região semiárida tropical, considerando as diferentes estruturas e condições de construção dos modelos desenvolvidos para outras regiões.

Os principais modelos de determinação do IET utilizados em regiões brasileiras são os



de: Carlson (1977); Kratzer & Brezonik (1981); Toledo Júnior et al. (1983); Lamparelli (2004); e Cunha et al. (2013). O modelo de Carlson (1977) para ambientes temperados leva em consideração o cálculo do fósforo total, da clorofila-a e da transparência da água medida pelo disco de Secchi. O cálculo da média desses três parâmetros configura o IET médio, com o qual se classifica o grau trófico do reservatório. O IET com base no nitrogênio total, desenvolvido por Kratzer & Brezonik (1981), considera a concentração crítica de clorofila-a de 10µg/L como a concentração verificada no início das condições tróficas em corpo hídrico, utilizando a relação do nitrogênio total com clorofila-a.

O modelo proposto por Toledo Júnior et al. (1983) é uma modificação matemática do modelo de Carlson (1977) que visa sua adequação a ambientes subtropicais. Aplica, para tal fim, uma análise de regressão linear aos valores das concentrações de fósforo total, clorofila-a e transparência do disco de Secchi em uma pesquisa realizada no reservatório de Barra Bonita-SP (Moura Filho; Araújo, 2020). Em outro estudo, Lamparelli (2004), considerando o IET de Toledo Júnior et al., (1983), modifica-o para obter um IET baseado nas determinações de fósforo total e clorofila-a. Cunha (2012), por sua vez, propõe um índice para avaliação do estado trófico em reservatórios subtropicais com dados bimestrais de reservatórios de São Paulo no período de 1996 a 2009. Cunha, Calijuri e Lamparelli (2013), ainda, adicionaram a classe hipereutrófico aos níveis de trofia de Cunha (2012), aumentando a amplitude de classificação de estado trófico (Araújo et al., 2018).

O reservatório Araras, quarto maior do Estado do Ceará, é estrategicamente relevante para a região Norte. Tendo sido escolhido para este estudo de caso, será caracterizado quanto ao estado trófico em análise comparativa, com base na classificação trófica da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos (COGERH) e nos dados dos últimos treze anos das campanhas de monitoramento.



## Metodologia

### Área de estudo

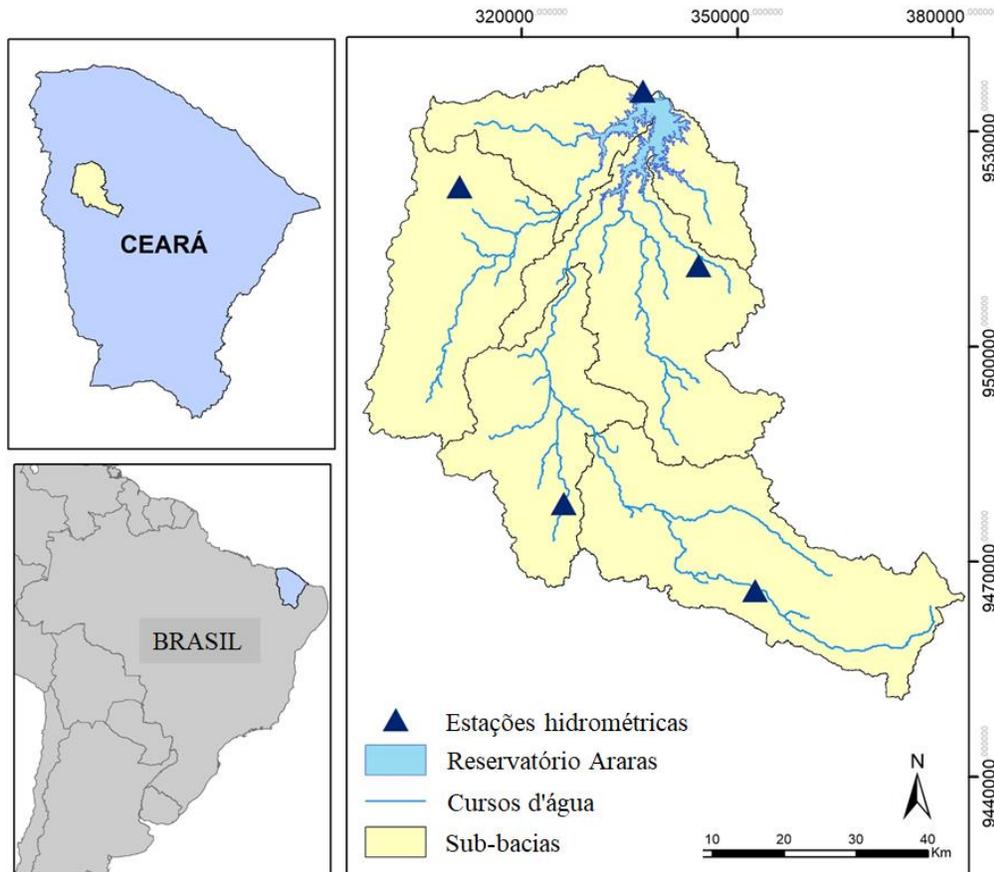
O reservatório Araras, localizado na sub-bacia hidrográfica do Rio Acaraú, foi selecionado para a aplicação da metodologia desenvolvida em virtude dos seus aspectos relevantes (Figura 01). Trata-se do quarto maior reservatório público federal do Estado do Ceará e é importante estrategicamente para o abastecimento humano, a agricultura, a irrigação, as indústrias do norte do estado do Ceará e, em geral, para o desenvolvimento socioeconômico da região. Sua finalidade é a perenização e o controle das cheias do rio Acaraú, a irrigação de 14.000 ha nas várzeas do rio, o desenvolvimento da piscicultura e o aproveitamento de culturas na área de montante (Meiros et al., 2017).

Esse reservatório está sob contínuo monitoramento da COGERH por meio do seu Programa da Rede de Monitoramento de Qualidade da Água, em campanhas de coletas trimestrais. Realiza-se coletas e análises de diversos parâmetros de qualidade da água: Fósforo Total, Nitrogênio Total, Clorofila (Chl-a) e Profundidade (Disco de Secchi). Aspectos quantitativos do reservatório também são monitorados continuamente, como: vazão afluente, lâmina líquida, evaporação, vazão de retira e volume percentual. Os dados físico-químicos foram cedidos pela COGERH e as amostras foram coletadas considerando as coordenadas UTM, zona 24M, 9533796mN e 339926mE. As coletas são realizadas a 0,3m de profundidade e as determinações físico-químicas são determinadas *in loco*, utilizando aparelhos portáteis ou encaminhando as amostras coletadas a laboratórios responsáveis (Guimarães, 2023).



## Figura 01

### Localização do reservatório Araras



Fonte: Elaboração própria.

### Determinação do Índice de Estado Trófico (IET)

Foram empregados, neste estudo, cinco diferentes modelos de IET para a determinação do estado de trofia do reservatório Araras. A seleção deles seguiu a investigação da leitura referente ao diagnóstico e à indicação do estado trófico de reservatórios do semiárido tropical brasileiro. A avaliação multimodelo IET do grau de eutrofização do corpo hídrico constituiu-se, aqui, dos seguintes modelos: Carlson (1977); Kratzer & Brezonik (1981); Toledo Júnior et al. (1984); Lamparelli (2004); Cunha et al. (2013). A aplicação foi dirigida à sequência temporal do



levantamento de dados do monitoramento da qualidade da água, conforme a disponibilidade das campanhas de coletas trimestrais de agosto de 2009 a janeiro de 2022.

### ***Determinação do nutriente limitante***

Foram aplicados três diferentes modelos para a determinação do fator responsável pela produção primária do reservatório Araras. No cálculo de nutriente limitante, recorreu-se a Kratzer & Brezonik (1981) e Carlson (1991), e à razão NT/PT de Redfield (1958).

### ***Avaliação multimodelo da Eutrofização***

A abordagem combinada da avaliação multimodelo IET e do método probabilístico do cálculo de risco de eutrofização, utilizando o conceito de FDP, foi desenvolvida e aplicada com o objetivo de caracterizar a eutrofização em reservatórios do semiárido tropical. O reservatório Araras, localizado na sub-bacia hidrográfica do Acaraú, Ceará, Brasil, é o caso estudado nesta pesquisa.

Utilizou-se a base de dados das concentrações de Fósforo Total (PT), Nitrogênio Total (NT), Clorofila-a (Chl-a) e a medida do Disco de Secchi (DS), organizada e disponibilizada pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos (COGERH). Selecionaram-se, para este estudo, as amostras que apresentaram dados simultâneos de PT, NT, Chl-a e DS.

Determinou-se o nutriente limitante para o reservatório Araras por meio dos três principais modelos da literatura: Kratzer & Brezonik (1981), Carlson (1991) e Redfield (1958). Empregou-se cinco modelos de determinação de IET – Carlson (1977), Kratzer & Brezonik (1981), Toledo Júnior et al. (1983), Lamparelli (2004) e Cunha et al. (2013) – na classificação do estado trófico do reservatório. Com o conjunto de dados resultante dessa avaliação, aplicou-se o método probabilístico do cálculo de risco com a FDP para determinar o risco de eutrofização do reservatório.

Mediante a estatística descritiva, tratou-se as variáveis limnológicas e hidroclimáticas e analisou-se as correlações entre PT, NT, Chl-a e DS e o coeficiente de determinação. Analisou-



se, também, as correlações entre o volume percentual e a precipitação média diária com os IETs calculados na metodologia multimodelo.

### ***Incertezas e risco de eutrofização***

Embora a avaliação multimodelo de IET possa fornecer uma faixa de atuação para o gerenciamento da eutrofização de corpos hídricos (Klippel, 2020), as possíveis divergências entre os resultados finais podem ocasionar a inação do tomador de decisão. Nesse sentido, é possível considerar o conjunto de *outputs* dos modelos de IET para calcular o risco de eutrofização do reservatório por meio do conceito de FDP. O valor do risco é uma informação mais conveniente para a tomada de decisão, além de considerar a incerteza estrutural dos modelos de IET (Chang et al., 2015; Alves et al., 2020; Carneiro et al., 2022).

Neste trabalho, é assumido que a falha (eutrofização do reservatório) ocorre quando o estado trófico excede a capacidade do sistema. Esta é tomada como o limite do estado eutrófico, uma vez que, quando esse valor é ultrapassado, o reservatório é considerado eutrofizado. O risco de eutrofização, portanto, é definido como a probabilidade de excedência de nível eutrófico ( $IET_{eutrófico}$ ), conforme Alves et al.(2020), como pode ser visto a seguir:

$$\text{Risco de eutrofização} = P [IET > IET_{eutrófico}]$$

O IET de referência ( $IET_{eutrófico}$ ) para a caracterização da condição de eutrofização é  $IET = 54$ . Com o conjunto de resultados de valores de IETs gerados na avaliação multimodelo IET. Determina-se o risco de eutrofização do reservatório utilizando a FDA na operação:

$$P = \frac{x}{N}$$

Para o cálculo, considera-se:

P = probabilidade associada ao número de ordem do IET;

x = número de modelos cujo IET foi maior do que 54;

N = número total de modelos IET.





Quando a avaliação multimodelo IET utiliza um único modelo, o que ocorre quando a avaliação do nutriente limitante aponta para o NT, o resultado restringe-se à probabilidade de 0 ou 100% do risco de eutrofização em função de exceder ou não o valor de referência de eutrofização (IET = 54).

## Resultados e Discussão

### *Avaliação das variáveis limnológicas, volume percentual e precipitação diária*

As características limnológicas e hidroclimáticas do reservatório Araras foram avaliadas pela análise estatística descritiva (média, mínimo, máximo, desvio padrão) dos dados obtidos do histórico de monitoramento dos parâmetros de qualidade da água (PT, NT, Chl-a e DS) de 2009 a 2022. A Tabela 01 contém o resumo estatístico dos resultados dessas variáveis.

Observa-se que a média do volume percentual foi de 41,62% do reservatório Araras ao longo do período avaliado, constatação feita, também por Araújo e Bronstert (2016) e Wiegand et al. (2021). Estes dois estudos afirmam que, devido ao longo período de seca enfrentado no estado do Ceará no período que este estudo foi realizado, percentuais volumétricos inferiores a 50% foram registrados para a maioria das bacias hidrográficas.

### Tabela 01

#### *Resumo das variáveis limnológicas e hidroclimáticas*

	NT (mg/L)	PT (mg/L)	Chl-a (µg/L)	D. S. (m)	Volume (%)	Precipitação média diária (mm)
Mínimo	0,152	0,023	3,75	0,20	3,40	0,00
Máximo	5,412	0,358	219,62	3,10	100	44,0
Média	1,744	0,103	61,015	1,03	41,62	3,03
Des. Padrão	1,387	0,075	68,235	0,750	33,07	7,89
N	33	33	33	33	33	33

Fonte: Elaboração própria.

Os resultados indicaram que quando o reservatório alcançou os menores volumes percentuais, as variáveis limnológicas NT, PT, Chl-a e DS tiveram seus piores resultados. Os



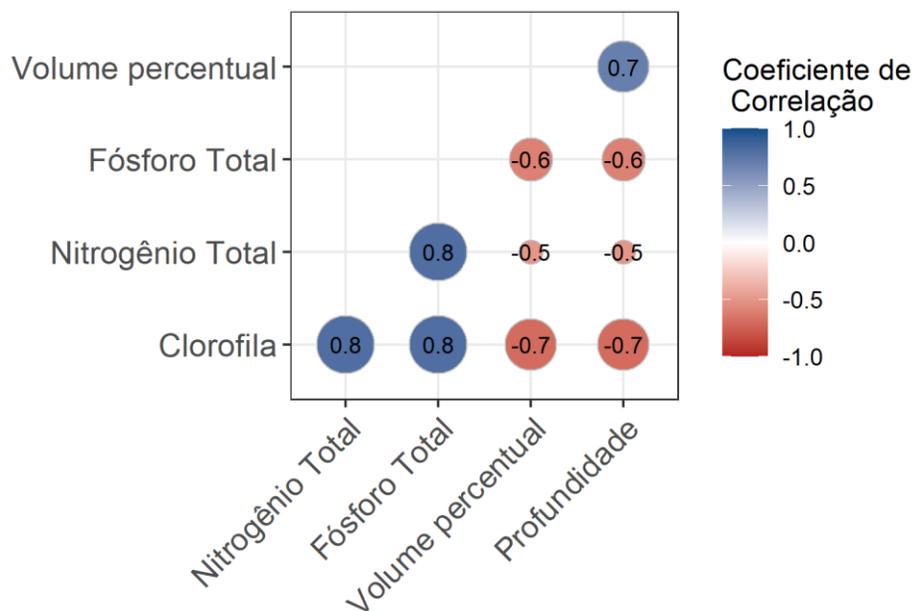
parâmetros Chl-a e PT estavam, respectivamente, em 42% e 91%, em desacordo com os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA N° 357/2005, que recomenda, para ambientes lênticos de água classe II,  $P < 0,03 \text{ mg/L}$  e  $\text{Chl-a} < 30 \text{ } \mu\text{g/L}$  (Brasil, 2005).

### ***Correlações empíricas dos parâmetros de qualidade da água do reservatório Araras***

A Figura 02 exibe as correlações empíricas dos parâmetros NT, PT, Chl-a e profundidade (DS). Os valores de cada correlação estão alocados no centro do círculo, considerando o período monitorado de 2009 a 2022.

**Figura 02**

*Correlação empírica entre as variáveis*



Fonte: Elaboração própria.

Observa-se, na Figura 02, que as variáveis NT e PT têm uma correlação direta e positiva, com tendência ao aumento da concentração de NT conforme o aumento da concentração de PT. Similarmente, observa-se uma associação direta entre o NT e a Chl-a, uma vez que a concentração deste segundo parâmetro tende a aumentar com a elevação da concentração de NT.



Quanto à concentração de NT, apresenta uma correlação negativa com o DS, pois o aumento do valor dessa primeira variável implica a redução do valor da segunda, ou seja, pioram os valores de DS à medida que aumenta a concentração de NT. Infere-se que o aumento da concentração de PT implica a elevação da concentração de Chl-a.

A correlação entre a concentração de PT e o DS também apresenta valor similar, mas com correlação negativa, pois o aumento da concentração dessa primeira variável limnológica implica a redução do valor da segunda variável, pois a transparência da água diminui com o aumento da concentração do PT. Quanto à Chl-a e aos nutrientes PT e NT, os resultados corroboram os de Rocha et al. (2019), no que se refere à análise das relações entre as concentrações de PT e NT e fitoplâncton em reservatórios do Ceará e à observação de que os valores de Chl-a seguiam a mesma tendência de variação da concentração de PT. Diferentemente aconteceu, todavia, com o NT, pois este não afetou significativamente a dinâmica fitoplanctônica no açude.

Ao associar a concentração de Chl-a com os valores do DS, constata-se que existe uma forte correlação linear inversa entre essas duas variáveis. O aumento da concentração de Chl-a implica a redução da transparência medida pelo DS, confirmada pelo alto valor do coeficiente.

Os critérios de avaliação de desempenho estatístico de correlações de NT classificam os resultados em quatro grupos: Muito Bom ( $R^2 > 0,7$ ), Bom ( $0,6 < R^2 \leq 0,7$ ), Satisfatório ( $0,3 < R^2 \leq 0,6$ ), Insatisfatório ( $R^2 \leq 0,3$ ). Tais critérios também avaliam o desempenho estatístico do PT, classificando-o em quatro grupos: Muito Bom ( $R^2 > 0,8$ ), Bom ( $0,65 < R^2 \leq 0,8$ ), Satisfatório ( $0,4 < R^2 \leq 0,65$ ), Insatisfatório ( $R^2 \leq 0,4$ ) (Moriasi et al., 2015). De forma geral, observou-se que todas as variáveis de qualidade de água guardam relações de causa e efeito importantes entre si, demonstradas pelo comportamento matemático apresentado nas figuras, pelos valores relativamente altos dos  $R^2$  e pelas fortes correlações. Os dados corroboram também com Bilgin (2020) que, utilizando o método da análise de correlação, demonstrou a relação entre os parâmetros. No seu estudo, a análise de regressão foi usada para investigar a relação entre NT,



PT, DS e Chl-*a*. Ainda segundo Bilgin (2020), uma alta correlação positiva foi encontrada entre PT e DS e uma correlação comparativamente baixa foi observada entre NT e DS.

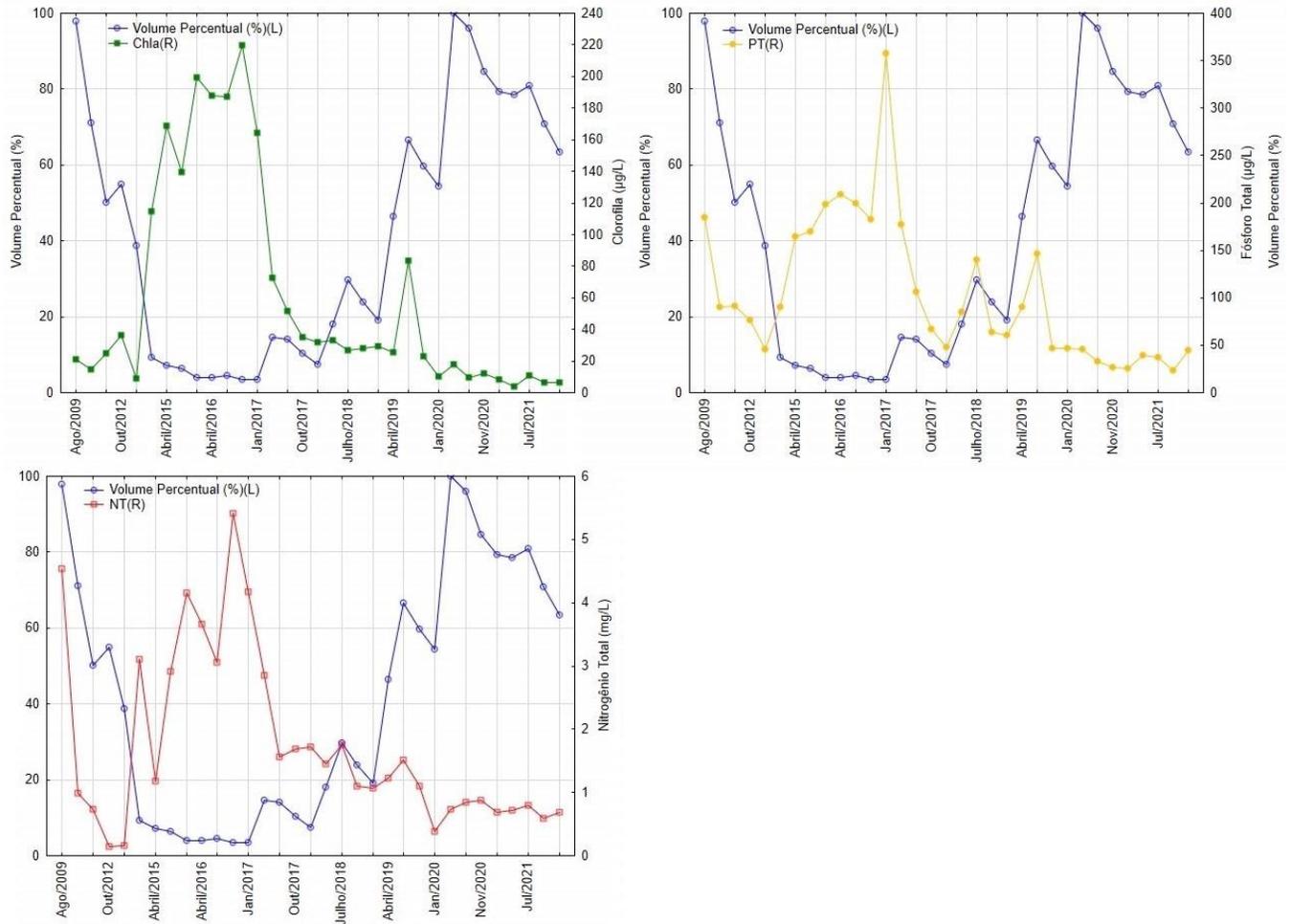
Os achados deste trabalho apontam fortes relações entre as variáveis, constatação também feita com os resultados encontrados por Freire e Sousa Filho (2022). Isso fica evidente ao constatar que eles identificaram que clorofila-*a*, nitrogênio, fósforo e disco de *Secchi* estão intrinsecamente relacionados entre si, especialmente as concentrações de clorofila-*a* com as demais variáveis.

### ***Correlações empíricas entre o volume percentual e os parâmetros de qualidade***

As relações empíricas da evolução temporal do volume percentual de armazenamento do manancial associado às concentrações dos parâmetros de qualidade da água (NT, PT, Chl-*a*) do reservatório Araras estão ilustradas na Figura 03:

Figura 03

Evolução temporal do volume percentual do reservatório associado aos parâmetros nitrogênio total (a), clorofila (b) e fósforo total (c)



Fonte: Elaboração própria

Constata-se que se efetua uma relação inversa entre o parâmetro de qualidade NT e o volume percentual do reservatório. Embora exista variabilidade, observa-se que quando o volume decresce, a concentração de NT aumenta. O período de menor volume percentual correspondeu às maiores concentrações de NT e os volumes percentuais elevados corresponderam às menores concentrações de NT.



Comportamento similar é observado entre o fósforo total e o volume percentual. Com certa variabilidade, observa-se que, quando o volume diminui, a concentração de PT aumenta. Ressalta-se que os períodos de menores volumes percentuais do reservatório correspondem às maiores concentrações de PT e que volumes percentuais elevados, de forma geral, implicaram concentrações menores de PT, especialmente no final do período avaliado.

De forma similar, infere-se que existe uma relação inversa entre a Chl-a e o volume percentual. Embora com considerável variabilidade, observa-se que quando o volume decresce, a concentração de Chl-a aumenta, e que o período de menor volume percentual do reservatório corresponde às maiores concentrações de Chl-a. Por outro lado, quando notou-se volumes percentuais elevados, de forma geral, observou-se, também, menores concentrações de Chl-a, especialmente no final do período avaliado.

Resultado semelhante é encontrado por Magalhães (2023), que realizou um estudo de análise e predição de Chl-a em 155 reservatório do Ceará. Seu trabalho demonstra como a dinâmica sazonal induz mudanças significativas na qualidade da água na maioria dos reservatórios, de modo que as concentrações de Chl-a mostraram tendência crescente quando houve redução do volume de acumulação e que cresceu a concentração de NT e PT no período de seca.

Esse resultado está em consonância com o de Markad et al. (2019). Em seu estudo de modelagem de estado trófico, considerando Chl-a, PT e DS, os pesquisadores concluíram que esses parâmetros pioram gradativamente conforme diminui-se o nível da água do reservatório. Os piores resultados, assim, foram constatados no verão, de forma que se atribui a melhora da qualidade da água à diluição, provocada pelo aumento do volume percentual.

Este trabalho identifica vulnerabilidade similar à avaliada pelos estudos de Wiegand et al. (2020, 2021) ao citarem que a seca prolongada no estado do Ceará, com redução drástica do volume de água, contribuiu para o aumento da concentração de nutrientes no corpo hídrico. A concentração de PT também pode elevar-se em função da carga interna do sedimento e das

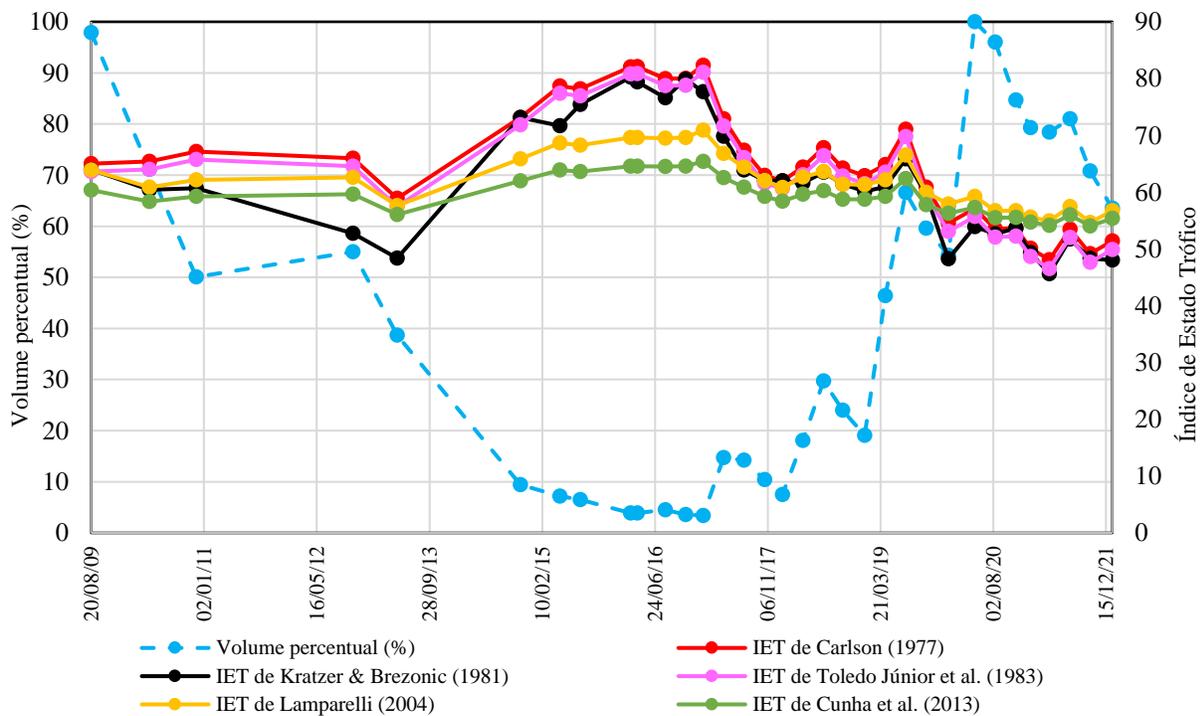
baixas afluências ocorridas nesse período. A concentração de NT pode ter sido oriunda de atividades (como plantio e dessedentação de animais) desenvolvidas na bacia hidráulica do reservatório (Braga et al., 2019; Rocha; Lima Neto, 2021).

### Correlações empíricas entre o volume percentual e os IETs calculados

A Figura 04 exibe a associação da evolução temporal do volume percentual de armazenamento do reservatório Araras aos valores dos IETs da avaliação multimodelo, a partir dos dados de monitoramento da série histórica das campanhas de 2009 a 2022.

**Figura 04**

*Evolução temporal do volume percentual associada aos IETs calculados*



Fonte: Elaboração própria.

Observa-se relação inversa entre o conjunto de resultados dos valores de IET e os valores do volume percentual do manancial. À medida que o volume de água armazenada decresce, as condições tróficas do reservatório intensificam-se.



As divergências entre os modelos corroboram os achados de Araújo et al. (2018). Os pesquisadores aplicaram os IETs de Carlson (1977), Lamparelli (2004) e Cunha et al. (2013) a dois reservatórios no Espírito Santo, de 2008 a 2014. As análises indicaram que as classes resultantes podem ser muito diferentes, mesmo com valores de parâmetros registrados em um mesmo ponto e em uma mesma campanha. Em alguns casos, as classes escolhidas pelos diferentes modelos variaram, no mesmo ponto e na mesma campanha, entre oligotrófico e hipereutrófico.

Os cinco modelos IET seguem uma tendência trófica influenciada pela oscilação do volume ao longo do período estudado. Todos os modelos apresentam os piores valores quando o volume percentual do reservatório está mais baixo (menos de 10%) e os melhores valores quando o volume percentual está mais alto, início e final do período investigado.

Os modelos de Lamparelli (2004) e Cunha et al. (2013) indicaram valores de IET mais conservadores. O primeiro, todavia, teve valores maiores que o segundo. Constata-se, também, que eles seguem linhas de evolução similares ao longo da série temporal, evidenciando forte grau de relação entre os resultados calculados. O IET calculado pelo modelo de Lamparelli (2004), que segue a tendência de oscilação em relação ao volume percentual e é menos conservador que o modelo de Cunha et al. (2013), apresentou maior discrepância em comparação aos demais IETs calculados. Esta tendência também foi verificada por Cunha et al. (2021), em estudo sobre reservatórios da região sudeste que compara o modelo de Lamparelli (2004) com o de Carlson (1977). Este último mostrou-se o mais conservador.

O modelo de Cunha et al. (2013), assim, foi o mais conservador e teve os piores resultados no período de seca. Semelhante constatação é encontrada por Beghelli et al. (2016) que, utilizando a classificação do estado trófico descrita por Cunha et al. (2013), verificaram a ocorrência de um processo de eutrofização ao longo dos anos, com os valores mais altos de PT registrados no período mais seco.

O presente estudo constatou que o volume percentual de armazenamento influencia a



qualidade da água. Observação similar foi feita por Santos et al. (2017) que, usando o IET desenvolvido por Cunha et al. (2013) para estimar o estado trófico do Castanhão, de 2011 a 2014, demonstraram que, à medida que a seca prolongava-se, intensificava-se a eutrofização no reservatório. Os pesquisadores demonstraram, também, que a estratificação na coluna d'água ocorreu nos períodos de maior volume, mas que se interrompeu à medida que o volume do reservatório diminuiu, alterando a dinâmica dos nutrientes.

Os modelos de Carlson (1977), Toledo Júnior et al. (1983) e Krazter & Brezonic (1981) indicam valores mais elevados de IET calculados para o reservatório Araras. De maneira geral, também verifica-se que as linhas de evolução desses modelos são equiparáveis, o que mostra a convergência entre eles no que diz respeito à influência do volume percentual na piora do estado de trofia no período de seca. Os resultados dos estudos de Batista et al. (2014), que utilizaram o IET de Toledo Júnior et al. (1983) no reservatório Orós e concluíram que o grau de trofia durante o período de estiagem era mais intenso em decorrência da redução do volume armazenado no reservatório, estão em concordância com os resultados encontrados no reservatório Araras. Ambos os estudos estão em concordância com os dados processados por Chaves et al. (2013), os quais observaram que o estado trófico dos reservatórios está relacionado com as flutuações sazonais na hidrologia do sistema controlado pelas chuvas, que é uma característica comum de em regiões semiáridas.

### ***Determinação do nutriente limitante pela técnica multimodelo***

A Tabela 02 exibe os resultados em termos percentuais de determinação do nutriente ou fator limitante da eutrofização encontrado mediante a aplicação dos respectivos modelos para o reservatório Araras do período de 2009 a 2022.

**Tabela 02***Determinação do nutriente limitante no reservatório Araras*

<b>Modelo</b>	<b>Nitrogênio</b>	<b>Fósforo</b>	<b>Outro fator</b>
Kratzer & Brezonic (1981)	91%	09%	
Carlson (1991)	51%	39%	10%
Redfield (1958)	09%	91%	

*Fonte:* Elaboração própria.

O modelo de Carlson (1991) aponta o nitrogênio como o principal fator limitante da eutrofização no reservatório Araras (cerca de 51%). Indica, ainda, que o fósforo é o nutriente limitante em 39% do período avaliado e que outros fatores (10%) estariam limitando a eutrofização, como, por exemplo, a turbidez abiótica.

Segundo Freire e Souza Filho (2022), a redução do volume nos reservatórios facilita a elevação das concentrações de fósforo e nitrogênio. A partir de concentrações de 5 mg/L de nitrogênio, conforme Freire e Souza Filho (2022), ocorre elevação das concentrações de clorofila-a, o que pode reduzir a zona eufótica para cerca de 0,30 m, acelerando o agravamento dos processos de eutrofização. Essas constatações são endossadas pelo trabalho de Rocha Júnior et al. (2018), no qual os pesquisadores estudam 16 reservatórios da bacia hidrográfica Piranhas-Açu, registrando as disparidades de precipitação pluviométrica entre duas sub-bacias e como isso influencia a qualidade da água e o estado trófico dos reservatórios, com efeitos intensificados devido à redução do volume de água.

A razão de Redfield (1958) sugere que a causa preponderante da condição de eutrofização do reservatório investigado é o Fósforo (91%). Em 9% do período avaliado, esse modelo apontou que o Nitrogênio seria o nutriente limitante da produção fitoplanctônica. O modelo de Kratzer & Brezonic (1981), por sua vez, indica que a eutrofização do reservatório é limitada em 91% do período avaliado pelo nutriente Nitrogênio e em 9% do período o Fósforo é



o nutriente limitante da produção primária no reservatório.

Pela razão de Redfield (1958), o PT foi majoritariamente identificado como o nutriente limitante, em consonância com diversos trabalhos semelhantes. A pesquisa de Paulino, Oliveira e Avelino (2013), estudando, no período de 2008 a 2011, diversos açudes monitorados pela COGERH, constata que o PT foi o nutriente limitante em 65% dos resultados. Wiegand et al. (2020), ao avaliarem o nutriente limitante da produção algal em reservatórios do semiárido brasileiro de 2008 a 2017, identificaram o PT como responsável pela produção primária em 69% dos resultados encontrados. O trabalho de Rocha Júnior et al. (2018) aponta o PT como fator limitante da produção de biomassa fitoplanctônica em reservatórios de regiões do semiárido tropical no Rio Grande do Norte. Rolim et al. (2019), ao determinar o nutriente limitante de 18 reservatórios do semiárido cearense, constataram, pela razão de Redfield, que o nutriente limitante foi o Fósforo em 16 reservatórios e o Nitrogênio em dois. Essa divergência entre os três modelos, quanto ao nutriente limitante, está em consonância com o que é desenvolvido por Liang et al. (2020) quando, avaliando as condições tróficas de 1382 lagos, afirmam que o PT e NT controlam o estado trófico dos lagos, indicando que a biomassa algal é limitada por esses nutrientes.

Entre os três modelos, observa-se considerável divergência de resultados quanto à indicação de qual nutriente ou fator limitante está condicionando à produção primária do reservatório Araras. O nutriente limitante coincide, em 15% dos resultados encontrados, com três campanhas, duas delas para o Fósforo e uma para o Nitrogênio. Nesse sentido, Maberly et al. (2020) relatam que lagos onde a relação de Chl-*a* com PT é mais alta são potencialmente limitados por P, porque a conversão do PT para Chl-*a* é eficiente, constatando, assim, que, dos 17 lagos avaliados em seus estudos, 5 foram limitados por P, 1 foi limitado por N, 10 apresentaram co-limitação e 1 não foi limitado por nenhum nutriente. Quanto a essa divergência do nutriente limitante, Tundisi e Tundisi (2008), afirmam que a individualidade dos reservatórios é muito característica. Em alguns casos, portanto, Nitrogênio e/ou Fósforo podem ser os



nutrientes limitantes na produção do fitoplâncton.

### ***Classificação trófica via multimodelo IET***

A Tabela 03 exibe os resultados do IET para o reservatório Araras, conforme cálculo e classificação pela metodologia multimodelo IET. Exibe-se, também, a classificação trófica realizada pela COGERH para o mesmo período, considerando a série histórica do monitoramento da qualidade da água das campanhas de coleta realizadas de agosto de 2009 a janeiro de 2022.

Nas campanhas de outubro de 2012 e maio de 2013, em que o Nitrogênio foi apontado como o nutriente limitante, utilizou-se apenas o modelo de Kratzer & Brezonic (1958). Dentre os modelos, este é o único que considera o Nitrogênio na determinação do nutriente limitante. Nessas datas, portanto, foram desconsiderados os demais modelos que utilizam o Fósforo nos cálculos do nutriente limitante (Tabela 03).

**Tabela 03***Estado trófico do reservatório Araras por meio da avaliação multimodelo IET*

DATA	Carlson (1977)	Kratzer & Brezonic (1981)	Toledo Júnior et al. (1983)	Lamparelli (2004)	Cunha et al. (2013)	COGERH
20/08/2009	65 ('HE')	64 ('HE')	64 ('E')	64 ('SE')	60 ('HE')	('E')
05/05/2010	65 ('HE')	60 ('HE')	64 ('E')	61 ('E')	58 ('SE)	('E')
29/11/2010	67 ('HE')	61 ('HE')	66 ('E')	62 ('E')	59 ('HE')	('E')
24/10/2012	-	53 ('E')	-	-	-	('O')
08/05/2013	-	48 ('M')	-	-	-	('E')
05/11/2014	73 ('HE')	73 ('HE')	72 ('E')	66 ('S')	62 ('HE')	('HE')
29/04/2015	79 ('HE')	72 ('HE')	77 ('HE')	69 ('HE')	64 ('HE')	('HE')
28/07/2015	78 ('HE')	75 ('HE')	77 ('HE')	68 ('HE')	64 ('HE')	('HE')
08/03/2016	82 ('HE')	80 ('HE')	81 ('HE')	70 ('HE')	65 ('HE')	('HE')
06/04/2016	82 ('HE')	79 ('HE')	81 ('HE')	70 ('HE')	65 ('HE')	('HE')
09/08/2016	80 ('HE')	77 ('HE')	79 ('HE')	69 ('HE')	64 ('HE')	('HE')
07/11/2016	80 ('HE')	80 ('HE')	79 ('HE')	70 ('HE')	65 ('HE')	('HE')
24/01/2017	82 ('HE')	78 ('HE')	81 ('HE')	71 ('HE')	65 ('HE')	('HE')
24/04/2017	73 ('HE')	70 ('HE')	72 ('E')	67 ('HE')	63 ('HE')	('E')
24/07/2017	67 ('HE')	64 ('HE')	66 ('E')	64 ('SE')	61 ('HE')	('E')
24/10/2017	63 ('HE')	62 ('HE')	62 ('E')	62 ('E')	59 ('HE')	('E')
11/01/2018	62 ('HE')	62 ('HE')	61 ('E')	61 ('E')	58 ('SE')	('E')
11/04/2018	64 ('HE')	62 ('HE')	63 ('E')	63 ('S')	60 ('HE')	('E')
12/07/2018	68 ('HE')	63 ('HE')	66 ('E')	64 ('S')	60 ('HE')	('E')
04/10/2018	64 ('HE')	61 ('HE')	63 ('E')	61 ('E')	59 ('HE')	('E')
10/01/2019	63 ('HE')	60 ('HE')	62 ('E')	61 ('E')	59 ('HE')	('E')
11/04/2019	64 ('HE')	61 ('HE')	63 ('E')	62 ('E')	59 ('HE')	('E')
11/07/2019	71 ('HE')	66 ('HE')	70 ('E')	67 ('HE')	62 ('HE')	('E')
10/10/2019	61 ('HE')	60 ('HE')	59 ('E')	60 ('E')	58 ('E')	('E')
16/01/2020	55 ('E')	48 ('E')	53 ('M')	58 ('M')	56 ('E')	('E')
12/05/2020	57 ('E')	54 ('E')	56 ('E')	59 ('E')	57 ('E')	('E')
11/08/2020	54 ('E')	53 ('E')	52 ('M')	57 ('M')	55 ('M')	('E')
10/11/2020	54 ('E')	54 ('E')	52 ('M)	57 ('M')	56 ('E')	('E')
14/01/2021	50 ('E')	49 ('M')	49 ('M)	56 ('M')	55 ('M')	('M')
08/04/2021	48 ('M')	46 ('M')	47 ('M)	55 ('M')	54 ('M')	('E')
08/07/2021	53 ('E')	52 ('E')	52 ('M)	57 ('M')	56 ('E')	('E')
06/10/2021	49 ('M)	48 ('M)	48 ('M)	55 ('M)	54 ('M)	('E')
12/01/2022	51 ('E')	48 ('M)	51 ('M)	57 ('M)	55 ('M)	('M')

('O'): Oligotrófico; ('M'): Mesotrófico; ('E'): Eutrófico; ('SE'): Supereutrófico; ('HE'): Hipereutrófico

Fonte: Elaboração própria.





A avaliação utilizando os cinco diferentes modelos de IET no período de agosto de 2009 a janeiro de 2022 no reservatório Araras resultou numa classificação de estado trófico com divergência entre os modelos, conforme demonstrado na Tabela 03. Os modelos de Carlson (1977), Kratzer & Brezonic (1981), Toledo Júnior et al. (1983), Lamparelli (2004) e Cunha et al. (2013) indicaram estados tróficos que coincidem com a classificação trófica da COGERH em 45%, 45%, 81%, 61% e 48%, respectivamente. O modelo que mais aproximou-se da classificação trófica realizada pela COGERH, para esse reservatório e no mesmo período, foi o de Toledo Júnior et al. (1983) (81%), enquanto os de Carlson (1977) e Kratzer & Brezonic (1981) foram os que menos coincidiram (45%). O estado trófico indicado pelo modelo de Toledo Júnior et al. (1983) corrobora os resultados de Paulino et al. (2013), em estudo do período de 2008 a 2011 em açudes monitorados pela COGERH, no qual constaram que o PT foi o nutriente limitante em 65% dos resultados. Também estão de acordo os achados de Kipplel et al. (2020), que, em estudo comparativo entre diferentes IETs Carlson (1997), Toledo Júnior et al. (1983), Lamparelli (1983) e Cunha et al. (2013), comprovaram que o modelo de Toledo Júnior (1983) foi o mais coerente com as condições tróficas dos reservatórios avaliados.

Outro ponto relevante da avaliação multimodelo IET é que, em 88% do período avaliado, pelo menos um dos modelos coincidiu com o estado trófico indicado pela COGERH, reafirmando a utilidade da metodologia proposta para caracterizar o grau de eutrofização. Do início do ano de 2015 ao início de 2017, a classificação hipereutrófica do açude Araras coincide com os cinco diferentes modelos utilizados e com a classificação trófica estabelecida pela metodologia própria da COGERH. Estes resultados estão em consonância com os de Rosendo (2022), que realizou estudo sobre PT em reservatórios da bacia hidrográfica do Rio Acaraú-CE, entre 2016 e 2021, com o IET de Lamparelli (2004) e verificou que o açude Araras foi classificado como hipereutrófico em pelo menos cinco semestre seguidos, de 2016 a 2018, e apresentou uma melhoria no seu grau de eutrofização após doze semestres de análise.

Observa-se um padrão importante na avaliação multimodelo IET: a maioria converge na



indicação da possibilidade de eutrofização até o ano de 2019. Existe, portanto, maior confiabilidade na classificação trófica do reservatório Araras nesse período. Por outro lado, do ano de 2020 ao final do período avaliado, os modelos apresentaram divergências relevantes entre si, pois, enquanto alguns modelos indicaram eutrofização do corpo hídrico (classe eutrófica), outros apontaram não eutrofização (classe mesotrófica), conforme a respectiva faixa de classificação de acordo com os critérios que cada modelo utiliza. Em aproximadamente 78% do período, pelo menos um dos cinco modelos de IET coincidiu com a classificação trófica realizada pela COGERH para o mesmo período. A avaliação multimodelo IET demonstrou ser uma ferramenta de grande utilidade para a classificação trófica do reservatório, fornecendo informações confiáveis e consistentes para o adequado gerenciamento da qualidade da água de reservatório do semiárido tropical.

### ***Risco de eutrofização***

A Tabela 04 exhibe os resultados do risco de eutrofização para o reservatório Araras de 2009 a 2022, com os valores da avaliação multimodelo que fundamentaram o cálculo probabilístico do risco de eutrofização pela abordagem de FDP.

**Tabela 04***Risco de eutrofização para o reservatório Araras*

DATA	Carlson (1977)	Kratzer & Brezonic (1981)	Toledo Júnior et al. (1983)	Lamparelli (2004)	Cunha et al. (2013)	Risco de Eutrofização (%)
20/08/2009	65	64	64	64	60	100%
05/05/2010	65	60	64	61	58	100%
29/11/2010	67	61	66	62	59	100%
24/10/2012	-	53	-	-	-	0%
08/05/2013	-	48	-	-	-	0%
05/11/2014	73	73	72	66	62	100%
29/04/2015	79	72	77	69	64	100%
28/07/2015	78	75	77	68	64	100%
08/03/2016	82	80	81	70	65	100%
06/04/2016	82	79	81	70	65	100%
09/08/2016	80	77	79	69	64	100%
07/11/2016	80	80	79	70	65	100%
24/01/2017	82	78	81	71	65	100%
24/04/2017	73	70	72	67	63	100%
24/07/2017	67	64	66	64	61	100%
24/10/2017	63	62	62	62	59	100%
11/01/2018	62	62	61	61	58	100%
11/04/2018	64	62	63	63	60	100%
12/07/2018	68	63	66	64	60	100%
04/10/2018	64	61	63	61	59	100%
10/01/2019	63	60	62	61	59	100%
11/04/2019	65	61	63	62	59	100%
11/07/2019	71	66	70	67	62	100%
10/10/2019	61	60	59	60	58	100%
16/01/2020	55	48	53	58	56	60%
12/05/2020	57	54	56	59	57	80%
11/08/2020	54	53	52	57	55	40%
10/11/2020	54	54	52	57	56	40%
14/01/2021	50	49	49	56	55	40%
08/04/2021	48	46	47	55	54	20%
08/07/2021	53	52	52	57	56	40%
06/10/2021	49	48	48	55	54	20%
12/01/2022	51	48	50	57	55	40%

Fonte: Elaboração própria.

Os resultados do cálculo do risco de eutrofização seguem a tendência da avaliação





multimodelo IET. Apresentam, portanto, os menores riscos de condição eutrófica no final do período, similarmente ao que foi encontrado pela técnica multimodelo.

A aplicação da FDA apontou majoritariamente a condição de risco total de eutrofização (100%) para o reservatório Araras do início do período de estudo até o ano de 2019. Nesse período, a maioria dos modelos IET confirma a condição de eutrofização. Duas datas investigadas apresentam a condição de não eutrofização (risco de eutrofização de 0%) e apontam como nutriente limitante a concentração de NT. São avaliadas, assim, somente pelo modelo de Kratzer & Brezonic (1981), caindo na condição de risco total de eutrofização (risco de 100%) ou condição de não eutrofização (risco de 0%).

Do ano de 2020 até o final do período do estudo, em 2022, o risco de eutrofização não atingiu 100%. No final desse período, o corpo hídrico apresentou menor chance de degradação acentuada da qualidade da água, mas continua com valores relativamente altos de risco de eutrofização (40%). Os três modelos responsáveis pelos resultados que constatarem a redução do risco de eutrofização no final do período foram os de Carlson (1977), Kratzer & Brezonic (1981) e Toledo Júnior et al. (1983).

A partir desses resultados, constata-se que a abordagem combinada entre a avaliação multimodelo IET e FDA foi satisfatória e de fácil aplicação. A grande vantagem dessa combinação é o fornecimento de um valor pontual (risco probabilístico de eutrofização), a partir de um conjunto de resultados de IET em que cada um pode ser tomado como verdade (Klippel et al., 2020).

Wiegand et al. (2016), ao compararem os riscos à eutrofização de reservatórios da região semiárida do Brasil e da região tropical úmida em Cuba, concluíram que, devido a um maior tempo de permanência de água e fósforo, os reservatórios no semiárido são potencialmente mais suscetíveis à eutrofização. Este trabalho, com uso da Função Densidade de Probabilidade, encontra dados que corroboram essa tese.

O valor pontual do risco de eutrofização facilita o gerenciamento da qualidade da água



dos reservatórios, visto que o tomador de decisão trabalha com uma informação específica (Chang et al., 2015). Cabe ressaltar que tal informação é mais confiável do que o status trófico fornecido por um tipo particular de modelo IET (Carneiro et al., 2022). Nesse sentido, a abordagem combinada constitui-se importante avanço em relação ao uso isolado de multimodelos IET (Klippel et al., 2020).

## Conclusão

As diferentes estruturas e condições de construção dos modelos de IET afetam a sua aplicabilidade em ambientes diferentes daqueles para os quais foram desenvolvidos. Essas deficiências podem ser contornadas com a avaliação multimodelo IET, o qual, por isso, foi empregado para avaliar a eutrofização do reservatório Araras.

Uma série de resultados foram obtidos da aplicação da avaliação multimodelo IET aos dados do reservatório Araras. Em primeiro lugar, os parâmetros de qualidade da água que compõem os modelos de IETs calculados têm fortes relações estatísticas entre si e o volume percentual do reservatório influencia significativamente a qualidade da água. Ainda, uma vez que o cálculo do risco de eutrofização fornece informações importantes para o gerenciamento da qualidade da água, a avaliação multimodelo IET é fundamental, pois cria faixas de estados tróficos para atuação, reduzindo as incertezas de escolhas de modelos individuais. A validade dos dados obtidos é assegurada pela congruência com os elaborados pela metodologia própria da COGERH para a classificação trófica.

As informações sucintas e precisas que a abordagem multimodelo possibilitam são importantes para o gerenciamento e o monitoramento dos reservatórios. A metodologia, sendo assim, é instrumental para as deliberações dos Comitês de Bacias para a gestão dos recursos hídricos. O caso do reservatório de Araras não é exceção, pois possui relações com o uso e a ocupação do solo pela agricultura, pecuária e piscicultura e está envolvido nas questões sanitárias do seu entorno e na bacia hidrográfica.

## Referências





- Alves, M. S., Ribeiro Lima, G. R., Araújo, A. L. C., da Silva, F. J. A., & Pereira, E. L. (2020). Monte Carlo simulation in the evaluation of failure probability in waste stabilization ponds. *Journal of Water Process Engineering*, 38, 101658. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101658>
- Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA). (2017). *Portal da Qualidade das Águas*.
- Araújo, D. R., Mendonça, A. S. F., & Reis, A. T. (2018). Análise de variação e comparação de índices de estado trófico: reservatórios dos aproveitamentos hidrelétricos de Rio Bonito e Suíça. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 23(11), 55-62. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522018162462>
- Araújo, J. C., & Bronstert, A. (2016). A method to assess hydrological drought in semi-arid environments and its application to the Jaguaribe River basin, Brazil. *Water International*, 41(2), 213–230. <https://doi.org/10.1080/02508060.2015.1113077>
- Batista, A. A., Meireles, A. C. M., Andrade, E. M., Izídio, N. S. C., & Lopes, F. B. (2014). Sazonalidade e variação espacial do índice de estado trófico do açude Orós, Ceará, Brasil. *Revista Agro@ambiental on-line*, 8(1), 39-48. <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v8i1.1362>
- Beghelli, F. G. F., Frascareli, D., Pompêo, M. L. M., & Moschini-Carlos, V. (2016). Trophic state evolution over 15 years in a tropical reservoir with low nitrogen concentrations and cyanobacteria predominance. *Water Air Soil Pollution*, 227(95). <https://doi.org/10.1007/s11270-016-2795-1>
- Bem, C. C., Rodrigues, J. C. de A., & Braga, M. C. B. (2009). Aplicação e análise dos índices de estado trófico - IET: Estudo de caso do lago Barigui. *XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*.
- Bilgin, A. (2020). Trophic state and limiting nutrient evaluations using trophic state/level index methods: A case study of Borçka Dam Lake. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(794). <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08741-0>





- Braga, G. G., Becker, V., Oliveira, J. N. P., & Mendonça Júnior, J. R. (2019). Impacts of drying and reflooding on water quality of a tropical semi-arid reservoir during an extended drought event. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 31(15). <https://doi.org/10.1590/S2179-975X6918>
- Brasil. (2005). Resolução Nº 357, de 17 de março de 2005. Brasília: Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA.
- Carneiro, B. L. D. S., Rocha, M. J. D., Barros, M. U. G., Paulino, W. D., & Lima Neto, I. E. (2023). Predicting anoxia in the wet and dry periods of tropical semiarid reservoirs. *Journal of Environmental Management*, 326(A), 116720. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116720>
- Carlson, R. E. (1991). Expanding the trophic state concept to identify non-nutrient limited lakes and reservoirs. *Enhancing the States' Lake Management Programs*, 59-71.
- Carlson, R. E. (1977). A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 22(2), 361-369. <https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.2.0361>
- Chang, C., Cai, L., Lin, T., Chung, C., Linden, L., & Burch, M. (2015). Assessment of the impacts of climate change on the water quality of a small deep reservoir in a humid-subtropical climatic region. *Water*, 7(4), 1687-1711. <https://doi.org/10.3390/w7041687>
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). (2017). *Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paulo: Apêndice D – Índices de Qualidade das Águas*. CETESB.
- Chaves, F. I. B., Lima, P. F., Leitão, R. C., Paulino, W. D., & Santaella, S. T. (2018). Influence of rainfall on the trophic status of a Brazilian semiarid reservoir. *Acta Scientiarum*, 35(4), 505-511. <https://doi.org/10.4025/actascibiolsoci.v35i4.18261>
- Cunha, D. G. F. (2012). *Heterogeneidade espacial e variabilidade temporal do reservatório de Itupararanga: Uma contribuição ao manejo sustentável dos recursos hídricos da bacia do Rio Sorocaba*. EESC-USP, 235f.





- Cunha, D. G. F., Calijuri, M. 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>
- Geletu, T. T., et al. (2023). Lake eutrophication: Control of phytoplankton overgrowth and invasive aquatic weeds. *Lakes Reservoirs: Science, Policy and Management for Sustainable Use*, 28(1), e12425. <https://doi.org/10.1111/lre.12425>
- Guimarães, B. M. D. M. (2023). *Análise e predição da concentração de clorofila A em reservatórios do semiárido*. CT-UFC, 120f.
- Klippel, G., Macedo, R. L., & Branco, C. W. C. (2020). Comparison of different trophic state indices applied to tropical reservoirs. *Lakes and Reservoirs*, 25(2), 214-229. <https://doi.org/10.1111/lre.12320>
- Kratzer, C. R., & Brezonik, P. L. (1981). Carlson type trophic state index for nitrogen in Florida lakes. *Water Resources Bulletin*, 17(4), 713-715. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1981.tb01282.x>
- Júlio-Júnior, H. F., et al. (2005). Distribuição e caracterização dos reservatórios. In L. Rodrigues, S. M. Thomaz, A. A. Agostinho, & L. C. Gomes (Eds.), *Biocenose em reservatórios: Padrões espaciais e temporais*. Rima.
- Lamparelli, M. C. (2004). *Grau de trofia em corpos d'água do Estado de São Paulo: Avaliação dos métodos de monitoramento*. IB-USP, 207f.
- Liang, Z., Soranno, P. A., & Wagner, T. (2020). The role of phosphorus and nitrogen on chlorophyll a: Evidence from hundreds of lakes. *Water Research*, 185, 116236. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116236>
- Maberly, S. C., Pitt, J. P., Davies, S., & Carvalho, L. (2020). Nitrogen and phosphorus limitation and the management of small productive lakes. *Inland Waters*, 10(2), 159-172. <https://doi.org/10.1080/20442041.2020.1714384>



- Marked, A. T., Landge, A. T., Nayak, B. B., Inamdar, A. B., & Misha, A. K. (2019). Trophic state modeling for shallow freshwater reservoir: A new approach. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(586). <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7740-5>
- Meireles, A. C. M., Andranade, E. M., Frischkorn, H., Crisostomo, L. A., & Palácio, H. A. Q. (2017). Avaliação das águas do açude Araras utilizadas para irrigação, Bacia do Acaraú – Ceará. *XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 17.
- Misha, R. K. (2023). The effect of eutrophication on drinking water. *British Journal of Multidisciplinary and Advanced Studies*, 4(1), 7-20. <https://doi.org/10.37745/bjmas.2022.0096>
- Moriasi, D. N. (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1763–1785.
- Moura Filho, H. M., & Araújo, G. M. (2020). Trophic state of the Rosary Reservoir located in the municipality of Lavras da Mangabeira-CE, northeast semiarid. *Research, Society and Development*, 9(6), e623985761. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i8.5761>
- Noronha, V. S. (2022). *Análise temporal do Índice de Estado Trófico em reservatório artificial na região semiárida do Nordeste brasileiro*. UFC, 47f.
- Paulino, W. D., Oliveira, R. R., & Avelino, F. F. (2013). Classificação do estado trófico para o gerenciamento de reservatórios no semiárido: A experiência da Cogerh no estado do Ceará. *XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 20.
- Pomari, J., Kane, D. D., & Nogueira, M. G. (2018). Application of multiple-use indices to assess reservoirs water quality and the use of plankton community data for biomonitoring purposes. *International Journal of Hydrology*, 2(2), 173-184. <https://doi.org/10.15406/ijh.2018.02.00065>
- Rocha Júnior, C. A. N., Costa, M. R. A., Menezes, R. F., Attayde, J. L., & Becker, V. (2018). Water volume reduction increases eutrophication risk in tropical semi-arid reservoirs. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 30, e106. <https://doi.org/10.1590/S2179-975X2117>



- Rocha, S. M. D., Mesquita, J. B. F., & Lima Neto, I. D. (2019). Análise e modelagem das relações entre nutrientes e fitoplâncton em reservatórios do Ceará. *Revista Brasileira De Ciências Ambientais*, 54, 134–147. <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820190536>
- Rolim, H. O., Nunes, A. B. A., Nascimento, F. J. S. C., & Chaves, J. R. (2019). Proposal of a trophic state index in semiarid reservoirs using data of the Banabuiú Basin, state of Ceará, Brazil. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 31, e26. <https://doi.org/10.1590/S2179-975X12517>
- Rosendo, E. A. A. (2022). *Análise multivariada aplicada ao estudo do fósforo total em reservatórios da bacia hidrográfica do Acaraú-Ce*. UFC, 76f.
- Santos, J. A., Marins, R. V., Aguiar, J. E., Chalar, G., Silva, A. T. F., & Lacerda, L. D. (2017). Hydrochemistry and trophic state change in a large reservoir in the Brazilian northeast region under intense drought conditions. *Journal of Limnology*, 76(1), 41-51. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2016>
- Sardinha, D. S., Souza, A. D. G., Silva, A. M. D., Libanio, C. R., Menezes, P. H. B. J., & Tiezzi, R. D. O. (2018). Índice de estado trófico para fósforo total (IET-PT) aplicado em afluente da Represa Bortolan em Poços de Caldas (MG). *Revista DAE*, 67(216), 95-108. <https://doi.org/10.4322/dae.2019.018>
- Toledo Júnior, A. P. (1990). *Informe preliminar sobre os estudos para a obtenção de um índice para avaliação do estado trófico de reservatórios de regiões quentes tropicais* (Relatório Interno). CETESB.
- Toledo Júnior, A. P., Talarico, M., Chinez, S. J., & Agudo, E. G. (1983). A aplicação de modelos simplificados para a avaliação do processo da eutrofização em lagos e reservatórios tropicais. *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*.
- Wiegand, M. C., Nascimento, A. T. P., Costa, A. C., & Lima Neto, I. E. (2020). Avaliação de nutriente limitante da produção algal em reservatórios do semiárido brasileiro. *Revista*



*Brasileira de Ciências Ambientais*, 55(4), 456-478. <https://doi.org/10.5327/Z176-947820200681>

Wiegand, M. C., Piedra, J. I. G., & Araújo, J. C. D. (2016). Vulnerabilidade à eutrofização de dois lagos tropicais de climas úmido (Cuba) e semiárido (Brasil). *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 21(2), 415-424. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016139527>