

---

## Seasonal Assessment of Water Quality and Eutrophication of the Tucuruí Hydroelectric Plant Reservoir, Pará, Brazil

### Avaliação Sazonal da Qualidade da Água e da Eutrofização do Reservatório da Usina Hidrelétrica de Tucuruí, Pará, Brasil

Received: 2023-09-03 | Accepted: 2023-10-05 | Published: 2023-10-10

---

#### **Valeria de Figueiredo Botelho**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0760-9284>

Universidade do Estado do Pará, Brasil

E-mail: [botelho.airelav@gmail.com](mailto:botelho.airelav@gmail.com)

#### **Gundisalvo Piratoba Morales**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5930-7053>

Universidade do Estado do Pará, Brasil

E-mail: [gundymorales@gmail.com](mailto:gundymorales@gmail.com)

#### **Altem Nascimento Pontes**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9001-4603>

Universidade do Estado do Pará, Brasil

E-mail: [altempontes@gmail.com](mailto:altempontes@gmail.com)

---

#### ABSTRACT

When a river is dammed, local hydrology undergoes changes in the physical-chemical and biological conditions of the aquatic environment, which can generate significant environmental impacts. Therefore, this study aimed to evaluate the water quality of the reservoir of the Tucuruí Hydroelectric Plant (UHT) located in the state of Pará, using the Water Quality Index (IQA) and the Trophic State Index (IET). Data collection was carried out in the database of the Secretariat of Environment and Sustainability of the State of Pará. The data was collected for the year 2022, in two distinct periods, rainy and dry. The data were analyzed using descriptive statistics and subsequent creation of graphs and tables, non-parametric Wilcoxon test and spatial interpolation. Data analysis allowed the creation of maps identifying the level of quality and trophy of monitoring points upstream, downstream and in the UHT reservoir. The results indicated that the AQI determined in the two periods analyzed (rainy and dry) presented higher values at the sampling points inside the reservoir and the lowest value at the upstream point. The environment can be classified as oligotrophic, characterized by nutrient poverty and a low rate of organic matter production.

**Keywords:** IQA; Physicochemical parameters; Water resources.

---

## RESUMO

No represamento de um rio, a hidrologia local sofre mudanças nas condições físico-químicas e biológica do meio aquático, podendo gerar significativos impactos ambientais. Dessa forma, este estudo teve por objetivo avaliar a qualidade da água do reservatório da Usina Hidrelétrica de Tucuruí (UHT) localizada no estado do Pará, a partir da utilização do Índice de Qualidade da Água (IQA) e do Índice de Estado Trófico (IET). A coleta de dados foi realizada no banco de dados da Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Estado do Pará. Os dados foram coletados para o ano de 2022, em dois períodos distintos, chuvoso e seco. Os dados foram analisados por meio de estatística descritiva e posterior elaboração de gráficos e tabelas, teste não paramétrico de Wilcoxon e interpolação espacial. A análise dos dados permitiu a elaboração de mapas com a identificação do nível de qualidade e trofia dos pontos de monitoramento a montante, a jusante e do reservatório da UHT. Os resultados indicaram que o IQA determinado nos dois períodos analisados (chuvoso e seco) apresentou maiores valores nos pontos amostrais dentro do reservatório e o menor valor no ponto a montante. O ambiente pode ser classificado como oligotrófico, caracterizado pela pobreza em nutrientes e por uma baixa taxa de produção de matéria orgânica.

**Palavras-chave:** IQA; Parâmetros físico-químicos; Recursos hídricos.

---

## INTRODUÇÃO

A Usina Hidrelétrica de Tucuruí (UHT) possui um dos maiores reservatórios de água já construídos, com 175 km de extensão e volume de 50,3 bilhões de metros cúbicos e área de 2.917 km<sup>2</sup> (Silva *et al.*, 2021). No represamento de um rio, a hidrologia local sofre mudanças nas condições químicas e físicas da água e nas relações tróficas (Rick *et al.*, 2020), bem como, forçam o deslocamento de grupamentos humanos (Kircherr; Charles, 2016), afetando os meios de subsistência de várias famílias (Doria *et al.*, 2020). Daí a importância de estudos sobre qualidade da água e estado trófico, pois contribuem com a preservação dos recursos hídricos e dos ecossistemas, bem como, da gestão da saúde pública, permitindo a implementação de ações corretivas e preventivas.

A água é um dos elementos naturais mais impactados negativamente pela ação antrópica, em decorrência de suas atividades em prol do desenvolvimento econômico de um lugar, região e/ou país (Ribeiro *et al.*, 2020). Essas ações alteram as características físico-químicas e biológicas da água, provocando danos à saúde humana e do ecossistema (Souto *et al.*, 2019). Nesse sentido, a Lei das Águas nº 9.433/1997 é o instrumento para gestão dos recursos hídricos no Brasil e estabelece a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), mecanismo que orienta a gestão das águas no país determinando fundamentos que asseguram a água como um bem de domínio público, recurso natural limitado, dotado de valor econômico (Capellari; Capellari, 2018).

Situada no rio Tocantins, estado do Pará, a UHT possui capacidade de geração de 8.375 MW e é atualmente a quinta maior hidrelétrica do mundo, com fornecimento de energia para

nove estados brasileiros (Silva *et al.*, 2021). A hidrelétrica de Tucuruí foi a primeira barragem desse porte a ser construída em uma área de floresta tropical úmida, se tornando a principal usina geradora do subsistema Norte do Sistema Interligado Nacional de energia (Oliveira, 2020). Para esse autor, uma megabarragem sempre transforma radicalmente o ambiente e a paisagem onde se implanta, e essas transformações incluíram, por exemplo, a inundação de nada menos que 2.430 km<sup>2</sup> para a formação do reservatório e cerca de 170 km de rio tornaram-se ambientes lacustres o que alterou fundamentalmente a dispersão dos sedimentos e a distribuição da fauna aquática ao longo do rio Tocantins.

Os parâmetros da qualidade de água funcionam como uma ferramenta para a gestão de recursos hídricos que possibilitam identificar o processo de uso dos corpos d'água, mostrando seus efeitos sobre as características qualitativas dos recursos hídricos, com objetivo de garantir a proteção da comunidade sem riscos a sua saúde (Santos *et al.*, 2017). A avaliação do parâmetro que determina a qualidade da água é principalmente baseada em variáveis matemáticas padronizadas que unificam a qualidade biológica, física, e química da mesma facilitando a comunicação em fatores numéricos determinando seu objetivo, tanto como método avaliativo como controle de qualidade para a vida aquática e consumo humano (Silva *et al.*, 2022).

Desta maneira, os índices que permitem a avaliação da qualidade das águas que empregam atributos físico-químicos e biológicos representam uma importante ferramenta no monitoramento da qualidade dos corpos hídricos, com os limites de seus parâmetros estabelecidos em legislação específica (Bello, 2021).

O Índice de Qualidade da Água (IQA) é no Brasil o padrão mais utilizado que possibilita a comparação de diferentes áreas analisadas através de estudos já realizados que utilizaram estes índices em locais distintos (Menezes *et al.*, 2018). A mensuração dos parâmetros pode ser feita por meio do cálculo do IQA que é composto por nove parâmetros, a saber: oxigênio dissolvido (OD), coliformes termotolerantes, potencial hidrogeniônico (pH), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), temperatura, nitrogênio total, fósforo total, turbidez e sólidos (CETESB, 2017a).

Outro índice utilizado é o Índice de Estado Trófico (IET), que visa classificar os corpos d'água em diferentes graus de trofia, quanto ao enriquecimento por nutrientes e seu reflexo na biomassa fitoplanctônica (CETESB, 2020). O IET, desenvolvido por Lamparelli (2004), tem sido empregado como referência no monitoramento das massas de água paulistas e brasileiras, com índices próprios para rios e reservatórios (CETESB, 2020). Rocha Junior et al. (2018) enfatizam que o processo de eutrofização provoca desequilíbrios nos sistemas aquáticos, agravados pela degradação progressiva dos corpos hídricos causando mudanças drásticas na cadeia alimentar aquática.

Índices como o IQA e o IET foram elaborados para facilitar uma melhor compreensão sobre a qualidade ambiental de um corpo hídrico, diante das diferentes possibilidades de uso

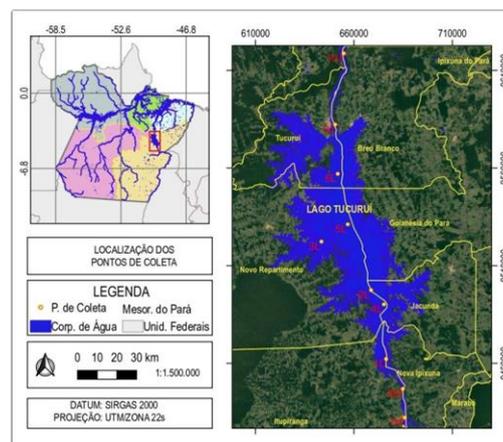
(Viscard Junior; Campos, 2022). Dentro desse contexto, este estudo visa aplicar os índices ambientais IQA e IET no reservatório da UHT, e em seus pontos a montante e a jusante. Considerando que o reservatório possui variadas finalidades, este trabalho objetiva avaliar a qualidade da água, buscando verificar o atendimento aos padrões normativos para os seus usos e seu índice de eutrofização.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Área de estudo

A área de estudo está localizada no município Tucuruí, no estado do Pará. A cidade se localiza às margens do trecho a jusante e a montante da barragem (ecossistemas lóticos), conforme lago artificial originado pela construção da UHT com uma extensão de 2.875 km<sup>2</sup>, e possui em seus territórios várias sub-bacias e tributários da região hidrográfica Tocantins-Araguaia (Silva *et al.*, 2018). O rio Tocantins foi seccionado em três ecossistemas: o lago (ecossistema lêntico) e os indica a Figura 1.

**Figura 1** – Mapa da área de estudo e pontos de coleta.



**Fonte:** Autores, 2023

A montante da barragem localizam-se os municípios de Itupiranga e Marabá, pertencentes à mesorregião sudeste paraense; no reservatório situam-se: Nova Ipixuna, Jacundá, Novo Repartimento, Goianésia do Pará, Breu Branco e parte do município de Tucuruí (sudeste do estado). A jusante se localiza nos municípios de Baião, Mocajuba e Cametá, pertencentes ao nordeste paraense e parte do município de Tucuruí (mesorregião sudeste), além dos municípios de Limoeiro do Ajuru e Igarapé-Miri.

### Coleta, amostragem e análise da qualidade da água

A coleta de dados foi realizada no banco de dados da Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Estado do Pará (PARÁ, 2022). Os procedimentos de amostragem e

preservação das amostras adotados seguiram os critérios estabelecidos na 23ª edição do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* e as diretrizes exigidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) previstas na norma NBR 9898 – Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores (ABNT, 1987). Foram amostrados seis pontos no reservatório da UHT, bem como dois pontos amostrais a montante e dois pontos a jusante do reservatório da UHT, de modo a obter uma visão geral da qualidade da água, conforme Tabela 1.

**Tabela 1** – Localização dos pontos de amostragem, reservatório UHT, montante e jusante.

Pontos	Município	Curso D'água	Característica	Latitude	Longitude
P1 Montante	Itupiranga	Tocantins	Lótico	-5,00186	-49.33239
P2 Montante	Itupiranga	Tocantins	Lótico	-5,13494	-49.32390
P1 Jusante	Breu Branco	Tocantins	Lótico	-3,77783	-49.64470
P2 Jusante	Breu Branco	Tocantins	Lótico	-3,44809	-49.60632
Lago 1	Itupiranga	Tocantins	Lêntico	-4,86365	-49.40939
Lago 2	Novo Repartimento	Tocantins	Lêntico	-4,54507	-49.47898
Lago 3	Novo Repartimento	Tocantins	Lêntico	-4,32030	-49.70663
Lago 4	Novo Repartimento	Tocantins	Lêntico	-4,61072	-49.41986
Lago 5	Novo Repartimento	Tocantins	Lêntico	-4,24012	-49.58617
Lago 6	Tucuruí	Tocantins	Lêntico	-4,00639	-49.63245

**Fonte:** Autores, 2023.

O estudo foi conduzido em dois períodos distintos – seco e chuvoso. Desse modo, foi possível a avaliação sazonal da qualidade da água na área de estudo. A aferição dos resultados das análises das variáveis físico-químicas e biológicas seguiu as metodologias descritas em procedimentos experimentais, conforme descrito na Tabela 2.

**Tabela 2** – Variáveis físico-químicas e biológicas de campo e de laboratório com suas respectivas metodologias de análise.

Parâmetros	Sigla	Unidade	Método
Oxigênio Dissolvido	OD	mg/L O <sub>2</sub>	Sonda multiparamétrica AK88 - ASKO
pH	pH		
Temperatura	Temp.	°C	
Turbidez	Turb	UNT	
Demanda Bioquímica de Oxigênio	DBO	mg/L O <sub>2</sub>	SMEWW (2017)
Fósforo total	PT	mg/L	POP 036
Nitrogênio total	NT	mg/L	SMEWW (2017)
Sólidos Dissolvidos totais	SDT	mg/L	SMEWW (2017)
Coliformes termotolerantes	Coli	NMP.100 mL-1	SMEWW (2017)
Clorofila-a	Cl-a	µg/L	CETESB (2014)

**Fonte:** Autores, 2023.

### Cálculo dos índices para avaliação da qualidade da água

Para avaliação da qualidade da água nos pontos monitorados a montante, reservatório e a jusante, foram determinados os seguintes índices IQA e IET, ambos calculados de acordo com CETESB (2019a).

O IQA foi desenvolvido a partir de um estudo desenvolvido nos Estados Unidos em 1970, e adaptado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), incorporando variáveis consideradas importantes para a determinação da qualidade da água destinada ao

abastecimento público. O cálculo do IQA é realizado através do produtório ponderado das qualidades de água das variáveis que compõem o índice, aplicando a seguinte fórmula:

$$IQA = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i}$$

Onde: IQA = Índice de Qualidade das Águas, um número entre 0 e 100;

$q_i$  = qualidade do i-ésimo parâmetro, um número entre 0 e 100, obtido da respectiva “curva média de variação de qualidade”, em função de sua concentração ou medida;

$w_i$  = peso correspondente ao i-ésimo parâmetro, um número entre 0 e 1, atribuído em função da sua importância para a conformação global de qualidade;

n = número de variáveis que entram no cálculo do IQA.

Os parâmetros utilizados para o cálculo deste índice são: coliformes termotolerantes, pH, DBO, nitrogênio total, fósforo total, temperatura, turbidez, sólidos totais e oxigênio dissolvido. A ausência de qualquer uma dessas variáveis inviabiliza a realização do cálculo do IQA. O peso atribuído a cada parâmetro de acordo com sua importância relativa no cálculo do IQA é especificado na Tabela 3.

**Tabela 3** – Parâmetros de qualidade da água do IQA e seus pesos.

Parâmetros de qualidade da água	Peso (w)
Oxigênio dissolvido	0,17
Coliformes termotolerantes	0,15
Potencial hidrogeniônico – pH	0,12
Demanda Bioquímica de Oxigênio – DBO <sub>5</sub>	0,10
Temperatura da água	0,10
Nitrogênio total	0,10
Fósforo total	0,10
Turbidez	0,08
Sólidos totais	0,08

Fonte: CETESB (2019a).

A partir do cálculo efetuado, o IQA indica um valor numa escala de 0 a 100 que representa a qualidade da água bruta em cinco categorias, representadas na Tabela 4.

**Tabela 4** – Categorias e valores de ponderação resultantes do cálculo do Índice de Qualidade da Água.

Categoria	Ponderação
ÓTIMA	79 < IQA ≤ 100
BOA	51 < IQA ≤ 79
REGULAR	36 < IQA ≤ 51
RUIM	19 < IQA ≤ 36
PÉSSIMA	IQA ≤ 19

Fonte: CETESB (2019a).

### Cálculo do Índice de Estado Trófico

O IET é aplicado para indicar o grau de trofia do corpo d'água, avaliando a qualidade da água em relação à presença de nutrientes e seus efeitos quanto ao crescimento excessivo de algas e cianobactérias, ou seja, o potencial de eutrofização do meio analisado. Para este cálculo são utilizadas as variáveis clorofila-a e fósforo total.

O fósforo é considerado por ser um nutriente relevante, que atua como agente causador da eutrofização, enquanto os dados de clorofila-a indicam o nível de crescimento de algas, resultante do excesso de nutrientes. Corpos hídricos em processo de eutrofização tendem a apresentar valores mais elevados destas variáveis.

O cálculo de IET possui variações em suas fórmulas entre os ambientes lóticos (Eqs. 1 e 2) e lênticos (Eqs. 3 e 4).

**Rios:**

$$IET (CL) = 10 \times (6 - ((-0,7 - 0,6 \times (\ln CL))/ \ln 2)) - 20 \tag{1}$$

$$IET (PT) = 10 \times (6 - ((0,42 - 0,36 \times (\ln PT))/ \ln 2)) - 20 \tag{2}$$

**Reservatórios:**

$$IET (CL) = 10 \times (6 - ((0,92 - 0,34 \times (\ln CL))/ \ln 2)) \tag{3}$$

$$IET (PT) = 10 \times (6 - (1,77 - 0,42 \times (\ln PT)/ \ln 2)) \tag{4}$$

Onde: PT = concentração de fósforo total medida à superfície da água, em µg.L-1;

CL = concentração de clorofila a medida à superfície da água, em µg.L-1;

ln = logaritmo natural.

O valor final no IET é resultante de uma média aritmética simples dos índices obtidos para o fósforo total e a clorofila-a, e está descrito na Eq. 5.

$$IET = [IET(PT) + IET (CL)]/2 \tag{5}$$

Os valores do IET encontrados serão enquadrados nos limites estabelecidos para as diferentes classes de trofia para rios e reservatórios, descritos nas Tabelas 5 e 6.

**Tabela 5 – Classificação do Estado Trófico para rios.**

Categoria (Estado Trófico)	Ponderação
Ultraoligotrófico	IET ≤ 47
Oligotrófico	47 < IET ≤ 52
Mesotrófico	52 < IET ≤ 59
Eutrófico	59 < IET ≤ 63
Supereutrófico	63 < IET ≤ 67
Hipereutrófico	IET > 67

Fonte: CETESB (2019a).

**Tabela 6 – Classificação do Estado Trófico para reservatórios.**

Categoria (Estado Trófico)	Ponderação
Ultraoligotrófico	IET ≤ 47
Oligotrófico	47 < IET ≤ 52
Mesotrófico	52 < IET ≤ 59
Eutrófico	59 < IET ≤ 63
Supereutrófico	63 < IET ≤ 67
Hipereutrófico	IET > 67

Fonte: CETESB (2019a).

Com os resultados dos índices IQA e IET é possível inferir qual a melhor classificação da qualidade da água presente nos pontos de coleta ao longo do reservatório e em seus pontos a montante e a jusante e explicitar quais os possíveis motivos para as alterações desta qualidade no rio.

**Análise estatística**

Para avaliar diferenças estatisticamente significativas entre os grupos amostrais, foi utilizado o teste não paramétrico de Wilcoxon. Esse teste foi escolhido devido à natureza não normal dos dados coletados. O teste de Wilcoxon é uma técnica estatística não paramétrica que

permite comparar duas amostras pareadas ou independentes. Neste estudo, aplicou-se o teste de Wilcoxon para avaliar a diferença nos valores de IQA e IET entre as estações chuvosa e seca, com nível de significância  $\alpha = 0,05$ .

Além disso, os resultados foram interpretados considerando o valor crítico de Wilcoxon obtido a partir das tabelas de distribuição ou por meio de software estatístico. Caso o valor de teste seja menor que o valor crítico, rejeitamos a hipótese nula e concluimos que existe uma diferença estatisticamente significativa entre os grupos comparados. Para a interpretação dos resultados, também consideramos a estatística de teste W e o p-valor correspondente. Um p-valor menor que o nível de significância ( $\alpha$ ) indica uma diferença estatisticamente significativa. Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o *software* estatístico BioEstat 5.0 e Minitab 21.4.1.0.

### **Interpolação Espacial**

Com o objetivo de obter a distribuição espacial dos resultados encontrados de IQA e IET para a região determinada nos períodos chuvoso e seco, tais resultados foram utilizados na confecção dos mapas. Estes foram produzidos no software *Surfer education* (versão 25) da Golden Software. Um programa que, dentre outras utilidades, faz mapeamento de curvas de contorno a partir de processos de interpolação em malha regular dos dados de campo. Com base no método da Krigagem o *software* interpolou os índices de qualidade da água e os índices de estado trófico partindo do princípio de que os pontos próximos no espaço tendem a ter valores mais parecidos que os pontos mais afastados.

Miranda *et al.* (2018) definem “interpolação espacial como o procedimento para se estimar valores de propriedades de locais não amostrados, baseando-se em valores de dados observados em locais conhecidos”. A interpolação espacial possui métodos que realizam a transformação de um conjunto de valores pontuais a partir de amostra de uma população, em uma superfície contínua na mesma escala dos valores da grandeza em análises. Interpoladores são utilizados para a espacialização de dados pontuais, uma vez que um conjunto de dados discretos é transformado para uma superfície contínua onde é possível obter valores onde não se possui observações.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **Índice de Qualidade da Água**

O IQA, desenvolvido pela *National Sanitation Foundation* (NSF), dos Estados Unidos, e adaptado no Brasil pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), do estado de São Paulo, é calculado pelo produto ponderado de cada um de seus nove parâmetros.

Para esse estudo, foi calculado o IQA de 10 pontos de monitoramento realizado em dois períodos distintos (chuvoso e seco) campanhas realizadas, respectivamente, em janeiro, fevereiro e abril (chuvoso) e julho, agosto e outubro de 2022 (seco), gerando 20 resultados de IQA conforme demonstrado na Tabela 7.

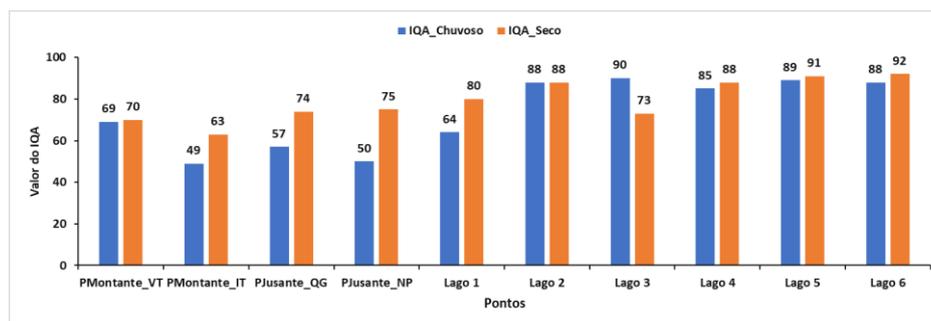
**Tabela 7** – Classificação Índice de Qualidade da Água nos pontos de amostragem nos períodos chuvoso e seco.

Pontos	Valor de IQA Chuvoso	Classificação	Valor de IQA Seco	Classificação
PMontante_VT	69	BOA	70	BOA
PMontante_IT	49	REGULAR	63	BOA
PJusante_QG	57	BOA	74	BOA
PJusante_NP	50	BOA	75	BOA
Lago 1	64	BOA	80	OTIMA
Lago 2	88	OTIMA	88	OTIMA
Lago 3	90	OTIMA	73	BOA
Lago 4	85	OTIMA	88	OTIMA
Lago 5	89	OTIMA	91	OTIMA
Lago 6	88	OTIMA	92	OTIMA

Fonte: Autores, 2023.

Para todos os pontos amostrais, o comportamento dos resultados de IQA foi semelhante nas duas estações, chuvoso e seco (Figura 2), porém verifica-se que há diferença na faixa dos resultados encontrados e conseqüentemente na classificação das águas entre os pontos amostrais. Os valores de IQA sofreu uma variação entre de 49 a 90 no período chuvoso e de 63 a 92 no seco. O IQA determinado nos dois períodos analisados (chuvoso e seco) apresentou maiores valores nos pontos amostrais dentro do reservatório e o menor valor no ponto PMontante\_IT de 49.

**Figura 2** – Gráfico do valor do IQA nos períodos chuvoso e seco.



Fonte: Autores, 2023.

O IQA é um indicador importante para a caracterização e avaliação da qualidade do corpo hídrico cujos valores variam entre 0 a 100 em que são atribuídos pesos para cada parâmetro de acordo com a sua importância em relação a qualidade da água (IGAM, 2020). Conforme apresentado, houve pouca diferença nos valores médios indicados nos pontos de amostragem em termos de IQA. Entretanto, foi possível verificar mudanças quanto a

sazonalidade (50%). Estes valores indicaram que os trechos do rio Tocantins apresentaram boa qualidade da água, com baixo potencial de desenvolvimento de processo de eutrofização.

Rangel e Queiroz (2020) encontraram resultados nos reservatórios Itaparica e Moxotó, juntamente com o complexo Paulo Afonso (bacia do São Francisco) o qual 20% das amostras apresentaram o indicativo de qualidade “ótima”, com as demais em qualidade de “boa”, sendo semelhantes aos encontrados neste trabalho. Observa-se também que no período chuvoso o IQA no ponto a PMontante\_IT apresentou um índice “Regular”. Em contraponto a isso, nos demais pontos, o IQA se manteve de Bom a Ótimo, podendo estar relacionado a deposição de materiais oriundos de efluentes sanitários, da agropecuária, e dessedentação de animais, assim como de processos erosivos (Sperling, 2018).

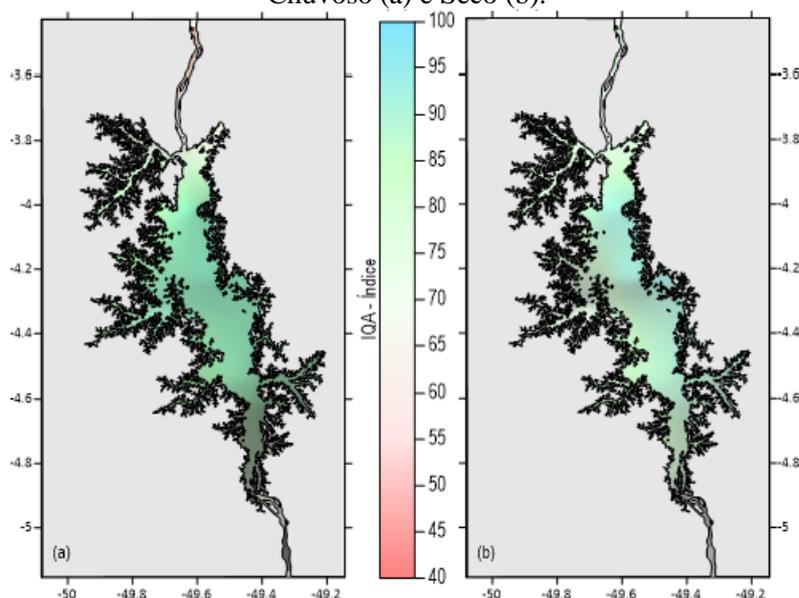
Com base nos resultados obtidos, foi realizada uma análise comparativa do IQA e do IET entre o período chuvoso e seco. Utilizando o teste não paramétrico de Wilcoxon para avaliar a diferença estatística entre as duas estações. No caso do IQA, o teste de Wilcoxon resultou em um p-valor = 0,0756. Considerando o nível de significância adotado de  $\alpha = 0,05$ , assim considerando que não há diferença estatisticamente significativa entre as médias do IQA no período chuvoso e seco.

### **Interpolação Espacial do IQA**

A Figura 3 representa a interpolação dos dados de IQA estimados para os períodos chuvoso e seco. Percebeu-se que os resultados tiveram pouca variação, contudo os melhores resultados são apresentados no período seco (Figura 3a) os resultados estimados para esses pontos encontram-se entre 63 a 92, quanto que no período chuvoso (Figura 3b), os mesmos variaram entre 49 a 90. De um modo geral, o IQA mais baixo no período chuvoso significa maior influência das cargas poluidoras difusas em relação às cargas pontuais, devido à lixiviação de uma maior quantidade poluentes pelo escoamento superficial.

O lançamento de cargas pontuais ocorre nos dois períodos do ano, sendo que estas sofrem menos variação ao longo do tempo, mas mesmo com menores vazões e menor diluição dos poluentes na estiagem, os impactos sobre o corpo d'água, no caso, se mostraram ainda inferiores aos das cargas difusas. O que se observa também é que a sazonalidade interfere nos pontos tanto dentro do reservatório como nos demais pontos, o que pode ter influência da vazão.

**Figura 3** – Mapa da interpolação dos resultados de IQA na área de estudo para os períodos Chuvoso (a) e Seco (b).



Fonte: Autores, 2023.

### Índice de Estado Trófico

A determinação do índice para classificar o estado trófico do corpo hídrico é uma importante fonte de informação para gestão, monitoramento e ações corretivas ou preventivas, além de simplificar a interpretação de inúmeras variáveis e ser mais acessível ao entendimento da comunidade não científica (Adamovich *et al.*, 2016). Nessa mesma campanha foram coletadas a variável clorofila *a* e fósforo total que é o objeto também deste trabalho para quantificar o IET. Neste sentido, os resultados do IET para o Reservatório e Rio acompanharam a classificação proposta por Lamparelli (2004) e os padrões recomendados pelo CONAMA 357/05 para Fósforo Total e Clorofila *a* obtidos de Ribeiro *et al.* (2014), conforme Tabela 8.

**Tabela 8** – Classificação Índice de Estado Trófico nos pontos de amostragem nos períodos chuvoso e seco.

Pontos	Valor de IET Chuvoso	Classificação	Valor de IET Seco	Classificação
PMontante_VT	51	Oligotrófico	49	Oligotrófico
PMontante_IT	52	Oligotrófico	49	Oligotrófico
PJusante_QG	49	Oligotrófico	48	Oligotrófico
PJusante_NP	49	Oligotrófico	44	Ultraoligotrófico
Lago 1	47	Ultraoligotrófico	47	Ultraoligotrófico
Lago 2	49	Oligotrófico	42	Ultraoligotrófico
Lago 3	53	Mesotrófico	49	Oligotrófico
Lago 4	49	Oligotrófico	50	Oligotrófico
Lago 5	53	Mesotrófico	53	Mesotrófico
Lago 6	49	Oligotrófico	47	Ultraoligotrófico

Fonte: Autores, 2023.

O IET estabelece o grau de trofia dos cursos d’água, ou seja, avalia como a presença de nutrientes na água compromete a sua qualidade e contribui para o desenvolvimento de algas e cianobactérias (IGAM, 2020). Na tabela 8, que representa os valores de IET, os pontos Lago 3 (chuvoso) e Lago 5 (chuvoso e seco) classificado como “mesotrófico”, indica que o reservatório

apresenta concentração moderada de nutrientes, que podem acarretar prejuízos à qualidade da água (Braga *et al.*, 2005).

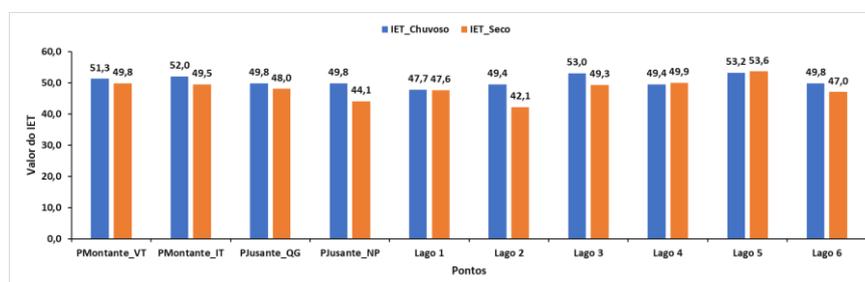
Os pontos a montante, jusante (chuvoso e seco) e os demais pontos dentro do reservatório foi categorizado como “oligotrófico”, que corresponde às águas que apresentam baixa concentração de nutrientes e elevada diversidade biológica (Braga *et al.*, 2005). Já o ponto Lago 1 (chuvoso e seco) obteve o melhor resultado dentre os pontos analisados, correspondendo à classe de trofia “ultraligotrófico”, indicando corpos d’águas que apresentam concentrações desprezíveis de nutrientes (Libânio, 2016).

Tais resultados corroboram com encontrados por César *et al.* (2020) ao realizar uma avaliação da água de reservatórios de uma usina hidrelétrica em Minas Gerais, observaram que houve classificações de “oligotrófico” e “ultraligotrófico”, associados à menor concentração de fósforo e, por serem lóticos, possuem maior concentração de oxigênio dissolvido, baixa taxa de produção de matéria orgânica. Outrora, alguns pontos também foram classificados como “mesotrófico”, de moderadas concentrações de nutrientes, o que remete a possíveis contaminações no corpo hídrico.

Ambientes com nível de trofia mesotrófico apresentam produtividade intermediária com possível modificação na qualidade da água (CETESB, 2017). Esta classificação é considerada como uma trofia com possível prejuízo aos usos múltiplos da água, pois já pode proporcionar uma elevada biomassa local (Von Sperling, 2014).

A Figura 4 demonstra a variação do IET nos pontos analisados em dois períodos distintos (chuvoso e seco) campanhas realizadas, respectivamente, em janeiro, fevereiro e abril (chuvoso) e julho, agosto e outubro de 2022 (seco). O menor valor de IET foi encontrado no ponto Lago 2 durante o período chuvoso, no valor de 42,1. Enquanto o maior valor de IET foi da ordem de 53,60, referente ao ponto Lago 5, durante o período seco.

**Figura 4** – Gráfico do valor do IET nos períodos chuvoso e seco.



Fonte: Autores, 2023.

O ambiente lótico apresenta particularidades em comparação ao lêntico, principalmente relacionada à turbidez, taxa de sedimentação, vazão e velocidade da água (Lamparelli, 2004). Com isso, fatores naturais e antrópicos podem influenciar nas propriedades física, química e

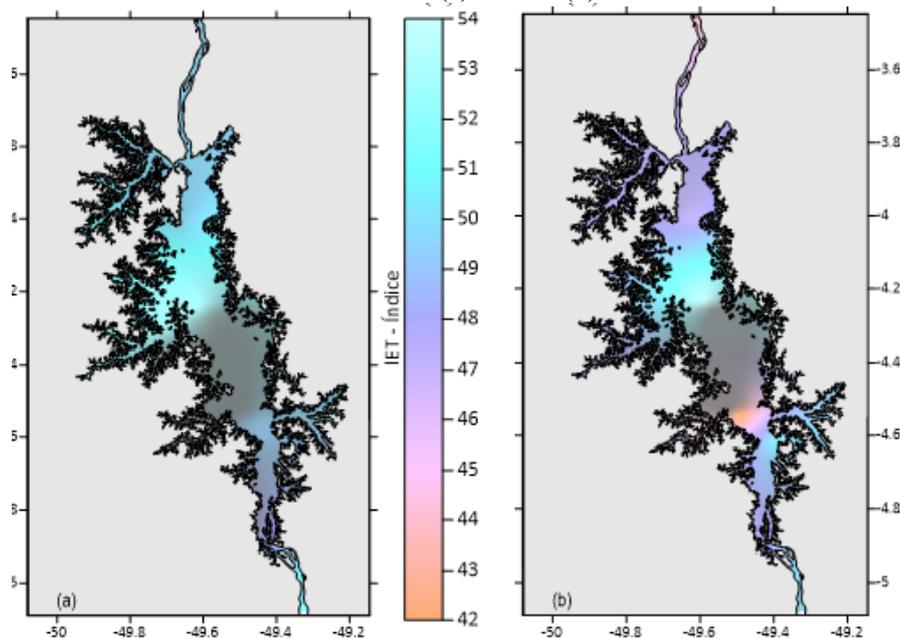
biológica da água promovendo mudanças, por exemplo, na composição do fitoplâncton, por isso a necessidade de quantificar a carga de nutrientes e a resposta ao agente causador (Rocha-Neto; Silva; Paiva, 2016; CETESB, 2017).

Ao analisar o IET, o teste de Wilcoxon resultou em um  $p\_valor = 0,0218$ . Neste caso, o valor é inferior ao nível de significância de  $\alpha = 0,05$ , concluindo que há diferença estatisticamente significativa entre as médias do IET no período chuvoso e seco. Esses resultados sugerem que, enquanto o estado trófico da água no reservatório de Tucuruí varia significativamente entre as estações chuvosa e seca, não foi encontrado diferenças estatisticamente significativas em relação à qualidade da água, conforme avaliado pelo IQA.

### Interpolação Espacial do IET

A Figura 5 representa a interpolação dos dados de IET estimados para os períodos chuvoso e seco. Percebeu-se que os resultados no período chuvoso e seco nos pontos a montante e a jusante apresentaram índice “Oligotrófico”, visto que dentro do reservatório tiveram pequenas variações, apresentando em alguns pontos índices como “Mesotrófico” nos dois períodos chuvoso e seco e nos demais “Oligotrófico/Ultraligotrófico”. Estudo realizado por Farias et al. (2022) a jusante da barragem em 2019, em dois períodos sazonais, classificou a água do rio Tocantins como Oligotrófico, sendo semelhante a este estudo.

**Figura 5** – Mapa da interpolação dos resultados de IET na área de estudo para os períodos Chuvoso (a) e Seco (b).



Fonte: Autores, 2023.

Os resultados de IET demonstraram que as águas do rio Tocantins, no trecho à jusante e a montante da Usina Hidrelétrica de Tucuruí-PA, ainda mantêm um padrão de qualidade, no

entanto, é necessário aplicação de medidas de gestão e o controle dos corpos d'água para preservação dos ecossistemas existentes, bem como para garantir a balneabilidade.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O reservatório da Usina Hidrelétrica de Tucuruí foi construído com a finalidade de ampliar a geração de energia elétrica para suprir as demandas do município de Tucuruí. Contudo, as águas do reservatório possuem usos múltiplos, dentre os quais podem ser destacadas as atividades recreativas. Em síntese, os resultados dos índices IQA apontam que as águas do reservatório possuem qualidade boa. Os resultados podem ser atribuídos à presença de vegetação e ao efeito de diluição motivado pelo acréscimo de tributários ao longo do rio.

Os resultados de IET evidenciam um risco mediano de eutrofização, uma vez o IET alguns pontos excederam o limite de 47. O ambiente pode ser classificado como oligotrófico, caracterizado pela pobreza em nutrientes e por uma baixa taxa de produção de matéria orgânica. A análise de variância dos parâmetros monitorados demonstrou que o acompanhamento da qualidade da água pode ser realizado considerando-se apenas duas coletas anuais, uma no período de seca e outra no período de chuva, sendo essas suficientes para descrever o comportamento da qualidade da água UHT da maior parte dos parâmetros.

Essas contradições reforçam a dinâmica do processo de variação da qualidade das águas, sujeito à imprevisibilidade das precipitações/cargas poluidoras difusas e do lançamento de cargas pontuais. Recomenda-se a continuidade do monitoramento ambiental e avaliação da qualidade das águas. A realização de campanhas de amostragem de contemplem as estações chuvosas e secas e é primordial para que seja possível compreender as interferências sazonais no reservatório, principalmente após eventos de precipitação.

Para estudos futuros sugere-se, uma análise espaço-temporal do reservatório da usina de Tucuruí na tentativa de relacionar o uso e ocupação do solo com as faixas do IQA visto que o mesmo é utilizado como ferramenta de gestão, porém é necessário dar atenção a cada um dos nove parâmetros que compõem este, já que devido as faixas do IQA terem um extenso intervalo entre elas, muitas vezes, não é possível caracterizar a qualidade da água com êxito. Assim, com o intuito de melhor caracterização é importante a análise de cada parâmetro separadamente e comparação destes com a legislação vigente.

Desta forma este estudo teve como objetivo avaliar a qualidade das águas e os níveis de trofia do reservatório da UHE de Tucuruí assim como seus pontos a montante e a jusante.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, S. G. D. S.; ATAIDE, C. D. G.; SILVA, J. X. D. Análise microbiológica de coliformes totais e termotolerantes em água de bebedouros de um parque público de Brasília. **REVISA** (Online), 18-22, 2018.
- BELLO, I. P. et al. QUALIDADE DE ÁGUA E DE ESTADO TRÓFICO DO RIBEIRÃO VERMELHO EM LAVRAS, MG. **Sustentare**, v. 5, n. 1, p. 32-48, 2021.
- CAPELLARI, A.; CAPELLARI, M. B. A água como bem jurídico, econômico e social. A necessidade de proteção das nascentes. **Cidades. Comunidades e Territórios**, n. 36, 2018.
- CENTRAIS ELÉTRICAS DO NORTE DO BRASIL. **Manual do sistema de gestão ambiental UHE Tucuruí**. [s.l.; s.n.], 2018.
- CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Apêndice D: Índices de Qualidade das Águas. In: CETESB. **Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paulo 2018**. São Paulo: CETESB, 2019. p. 1-32.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). **Relatório de qualidade das águas interiores no Estado de São Paulo 2019**, São Paulo: CETESB, 2020.
- DORIA, C. R. C.; CATÂNEO, D. T. B. S.; TORRENTE-VILARA, G.; VITULE, J. R. S. Is there a future for artisanal fishing in the Amazon? The case of Arapaima gigas. **Management of Biological Invasions**, vol. 11, nº 1, p. 1-8, 2020.
- FARIAS, D. M. et al. Índice de estado trófico do rio Tocantins a margem direita a jusante da usina hidrelétrica de Tucuruí/PA/Tocantins river trophic state index on the right margin downstream of the Tucuruí hydroelectric plant/PA. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 5, p. 35161-35169, 2022.
- LAMPARELLI, M. C. **Graus de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento**. 238f. Tese (Doutorado em Ecologia: Ecossistemas Terrestres e Aquáticos). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- LIMA, M. A. L.; DORIA, C. R.; CARVALHO, A. R.; ANGELINI, R. Fisheries and trophic structure of a large tropical river under impoundment. **Ecological Indicator**, vol. 113, p. 1-15, 2020.
- MENEZES, J. M.; SABINO, H.; CRISTO, V.; PRADO, R. B.; LIMA, L. A.; DI LULO, L. B.; JR, G. C. S. Comparação entre os Índices de Qualidade de Água Cetesb e Bascarán. **Anuário do instituto de geociência**, V. 41, n.1, p. 194-202, 2018.
- MIRANDA, Gisele Horta Barroso et al. Análise de Qualidade de Amostragem e Interpolação na Geração de MDE. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 70, n. 1, p. 226-257, 2018.
- NERI, P. P. S. et al. Atributos de solos in situ e ex situ da Ilha de Germoplasma, uma reserva ambiental em Tucuruí (PA). **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 15, n. 3, p. 1-15, 2022.

- OLIVEIRA, C.; CAPELLIN, N. Cidade-empresa e controle da mão de obra na construção da usina hidrelétrica de Tucuruí (1974-1984). **Revista Mundos do Trabalho**, v. 20, 2020.
- RANGEL, G. S.; QUEIROZ, L. M., 2020. Análise a partir de indicadores nos reservatórios Itaparica e Moxotó e Complexo Paulo Afonso. In: Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, XV, Caruaru: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2020.
- RIBEIRO, H. M. C. et al. Índice do Estado Trófico (IET) em águas amazônicas: baía do Marajó e baía do Guajará. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, p. e547997376-e547997376, 2020.
- ROCHA JUNIOR, C. A. N.; COSTA, M. R. A.; MENEZES, R. F.; ATTAYDE, J. L.; BECKER, V. Water volume reduction increases eutrophication risk in tropical semi-arid reservoirs. **Acta Limnológica Brasiliense**, v.30, e106, 2018.
- SANTOS SILVA, H. R. et al. Impactos socioambientais da construção da usina hidrelétrica no município de Tucuruí e seus reflexos sobre a malária. **Revista Eletrônica Acervo Saúde**, v. 12, n. 10, p. e3945-e3945, 2020.
- SANTOS, G. O.; RIBEIRO, R. L.; PARREIRA, T. P.; SILVA, D. F.; SILVA, K. A.; AZEREDO, C. F. Monitoramento da água em bacia hidrográfica com diferentes usos do solo no município de Rio Verde (GO). **Rev Agronegócio Meio Ambiente**. 12(1):249-271, 2019.
- SERRA, A. B.; MATOS, L. S.; DE OLIVEIRA, A. M. Sistemas Agroflorestais como geração de renda complementar para pescadores do Lago de Tucuruí, Pará. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 15, n. 3, p. 292-299, 2020.
- SILVA, J. C.; SOARES, E. A.; CORTEZ, S. A. M. Avaliação da qualidade da água em área de preservação permanente pela obtenção do IQA Assessment of water quality in permanent preservation areas by obtaining IQA. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 4, p. 22988-22997, 2022.
- SILVA, L. M. et al. Avaliações diretas e indiretas da erodibilidade de solos do reservatório da usina hidrelétrica de Tucuruí. **Revista de Geociências do Nordeste**, p. 215-229, 2021.
- SILVA, R. A. S.; MAYNARD, I. N. F.; BARBOSA, A. Q.; TOLLE, E. C.; CAVALCANTE, E. B.; MARQUES, M. N. Aplicação de um Índice de Qualidade de Água para o sistema de abastecimento público. **Sci Plena**. 13(10):1-7, 2017.
- SOUTO, C. K. B.; TELES, A. I. L.; ANDRADE, A. A.; XAVIER, B. V. M. P.; TORRES, E. E. S. A.; DIAS, E. C.; SILVA, G. P. C.; BARROS, K. C.; SOUZA, L. P.; PRATA, L. K. F. Fatores antrópicos de poluição hídrica na bacia do Tucunduba em Belém-PA. **Brazilian Journal Of Development**, v. 5, n. 9, p. 13824-13834, 2019.
- VISCARD JUNIOR, K. O.; CAMPOS, V. P. Avaliação da qualidade das águas da bacia do rio Joanes (Bahia), ao longo de 10 anos e identificação de fontes poluidoras. **Meio ambiente (Brasil)**, 4(1), 45–66, 2022.