

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA E ESTADO TRÓFICO DA LAGUNA DA JANSEN – SÃO LUÍS -MARANHÃO

**ASSESSMENT OF WATER QUALITY AND TROPHIC STATE OF JANSEN
LAGOON – SÃO LUÍS -MARANHÃO**

Ciências Biológicas, Engenharias • 11/08/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/786389838](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/786389838)

Antonio Idenilson Ferreira do Carmo

Chrystian Braga Carvalho

Gislayne Santana Santos Jacinto

Saulo Pereira Arouche

Flávia Helena Cabral Silva Reis

Jéssica dos Passos Barbosa Ericeira

Caio Brandão e Vasconcelos

Katia Fernanda da Silva e Silva

Aurea Lucia de Sousa Barros

Jeovani Machado Rodrigues

Fabiane Barbosa de Castro Lima Santos

Cleoner Uchôa Araujo

José Sérgio Macedo Coelho

Victoria Sena Martins de Sousa

Eduardo Henrique Costa Rodrigues

RESUMO

A crescente urbanização, expansão das atividades econômicas e deficiência nos sistemas de saneamento têm intensificado a degradação dos recursos hídricos, especialmente em ambientes costeiros urbanos, devido ao aumento do aporte de nutrientes e matéria orgânica. Esse processo favorece a eutrofização, caracterizada pelo enriquecimento excessivo de fósforo e nitrogênio, resultando no aumento da produtividade primária, proliferação de algas e cianobactérias, redução do oxigênio dissolvido e comprometimento da qualidade ambiental dos ecossistemas aquáticos. A Lagoa da Jansen, localizada em São Luís – Maranhão, representa um ambiente costeiro urbano altamente vulnerável às pressões antrópicas, decorrentes da ocupação do entorno, alterações na dinâmica hidrológica e aporte contínuo de poluentes. Nesse contexto, o estudo teve como objetivo avaliar a qualidade da água e o estado trófico da lagoa durante os períodos chuvoso e de estiagem de 2021, utilizando variáveis limnológicas e o Índice de Estado Trófico (IET). Foram realizadas coletas em cinco pontos amostrais, contemplando os períodos de abril (chuvoso) e dezembro (estiagem). Foram analisados parâmetros físicos, químicos e biológicos, incluindo temperatura, pH, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica, transparência, turbidez, sólidos dissolvidos, nitrito, nitrato, fósforo total e clorofila-a. A avaliação do estado trófico foi realizada conforme a metodologia proposta por Lamparelli (2004), complementada por análises estatísticas, como Análise de Componentes Principais (PCA) e teste t de Student. Os resultados indicaram influência da sazonalidade sobre alguns parâmetros, principalmente condutividade elétrica e salinidade, que apresentaram maiores valores no período de estiagem devido à menor entrada de água doce e maior concentração de sais dissolvidos. Durante o período chuvoso, observou-se maior

influência do escoamento superficial, contribuindo para o transporte de sedimentos e matéria orgânica. As concentrações de nutrientes, especialmente fósforo total, nitrato e nitrito, apresentaram valores elevados, indicando significativo enriquecimento nutricional do ambiente. A aplicação do Índice de Estado Trófico classificou a Lagoa da Jansen como hipereutrófica nos dois períodos avaliados, evidenciando um estágio avançado de eutrofização associado ao aporte contínuo de nutrientes provenientes das atividades urbanas. Esse cenário demonstra comprometimento da qualidade da água, com riscos de redução do oxigênio dissolvido, alterações na biodiversidade e ocorrência de florações algais. Conclui-se que a Lagoa da Jansen apresenta elevada vulnerabilidade ambiental, sendo necessária a adoção de medidas integradas de gestão, incluindo melhorias no saneamento básico, controle das fontes de poluição, monitoramento contínuo da qualidade da água e ações de recuperação ambiental. O acompanhamento dos parâmetros limnológicos e do estado trófico constitui ferramenta essencial para subsidiar estratégias de conservação e uso sustentável desse importante ecossistema costeiro urbano.

Palavras-chave: Parâmetros físico-químicos; Variabilidade sazonal; Índice de Estado Trófico; Resolução CONAMA nº 357/2005; Limnologia urbana.

ABSTRACT

The increasing urbanization, expansion of economic activities, and deficiencies in sanitation systems have intensified the degradation of water resources, especially in urban coastal environments, due to the increased input of nutrients and organic matter. This process favors eutrophication, characterized by excessive enrichment of phosphorus and nitrogen, resulting in increased primary productivity, proliferation of algae and cyanobacteria, reduction of

dissolved oxygen, and compromised environmental quality of aquatic ecosystems. The Jansen Lagoon, located in São Luís – Maranhão, represents an urban coastal environment highly vulnerable to anthropogenic pressures resulting from the occupation of the surrounding area, alterations in hydrological dynamics, and continuous input of pollutants. In this context, the study aimed to evaluate the water quality and trophic state of the lagoon during the rainy and dry seasons of 2021, using limnological variables and the Trophic State Index (TSI). Samples were collected at five sampling points, covering the periods of April (rainy) and December (dry season). Physical, chemical, and biological parameters were analyzed, including temperature, pH, dissolved oxygen, electrical conductivity, transparency, turbidity, dissolved solids, nitrite, nitrate, total phosphorus, and chlorophyll-a. The trophic state assessment was performed according to the methodology proposed by Lamparelli (2004), complemented by statistical analyses such as Principal Component Analysis (PCA) and Student's t-test. The results indicated the influence of seasonality on some parameters, mainly electrical conductivity and salinity, which showed higher values during the dry season due to lower freshwater inflow and higher concentration of dissolved salts. During the rainy season, a greater influence of surface runoff was observed, contributing to the transport of sediments and organic matter. Nutrient concentrations, especially total phosphorus, nitrate, and nitrite, showed high values, indicating significant nutritional enrichment of the environment. The application of the Trophic State Index classified the Jansen Lagoon as hypereutrophic in both periods evaluated, evidencing an advanced stage of eutrophication associated with the continuous input of nutrients from urban activities. This scenario demonstrates compromised water quality, with risks of reduced dissolved oxygen, alterations in biodiversity,

and the occurrence of algal blooms. It is concluded that the Jansen Lagoon presents high environmental vulnerability, requiring the adoption of integrated management measures, including improvements in basic sanitation, control of pollution sources, continuous monitoring of water quality, and environmental recovery actions. Monitoring limnological parameters and trophic state is an essential tool to support conservation and sustainable use strategies for this important urban coastal ecosystem.

Keywords: Physicochemical parameters; Seasonal variability; Trophic State Index; CONAMA Resolution No. 357/2005; Urban limnology.

INTRODUÇÃO

O aumento da população mundial, associado ao crescimento das atividades urbanas, industriais e agrícolas, tem intensificado a pressão sobre os recursos hídricos, contribuindo para o lançamento de elevadas cargas de nutrientes e matéria orgânica nos ecossistemas aquáticos (Carpenter *et al.*, 1998; Smith; Schindler, 2009). Esse cenário é observado principalmente em ambientes costeiros e lagunares inseridos em regiões metropolitanas, onde a expansão urbana desordenada, a impermeabilização do solo e a deficiência dos sistemas de saneamento favorecem a deterioração da qualidade da água (Le Moal *et al.*, 2019; Paerl; Otten, 2013). Segundo Schindler (2012), a intensificação das atividades antrópicas promove alterações significativas na dinâmica ecológica dos corpos hídricos, comprometendo sua capacidade de autodepuração e reduzindo sua resiliência ambiental.

A principal consequência desse enriquecimento nutricional é a eutrofização, processo caracterizado pelo aumento da disponibilidade de nutrientes, especialmente fósforo e nitrogênio,

capazes de estimular o crescimento acelerado de algas, macrófitas aquáticas e cianobactérias (Hasler, 1947; Davis *et al.*, 2010; Le Moal *et al.*, 2019). Embora esse processo possa ocorrer naturalmente durante a evolução dos ecossistemas aquáticos, sua aceleração em decorrência das atividades humanas é denominada eutrofização cultural ou artificial (Smith; Schindler, 2009; Schindler, 2012). Conforme (Carpenter *et al.*, 1998), o fósforo representa, na maioria dos ambientes lênticos, o principal nutriente limitante da produtividade primária, tornando-se um importante indicador da evolução do processo eutrófico.

O aumento das concentrações de nutrientes promove alterações nas características físicas, químicas e biológicas da água, modificando o equilíbrio ecológico dos ecossistemas aquáticos (Esteves; Amado, 2011). Entre essas alterações destacam-se a redução da transparência da água, o aumento da turbidez, as variações do potencial hidrogeniônico (pH), a diminuição das concentrações de oxigênio dissolvido e o aumento da biomassa fitoplanctônica, frequentemente representada pela concentração de clorofila-a (Lamparelli, 2004; Fia *et al.*, 2009). Segundo Mota (2006), essas modificações comprometem significativamente a qualidade da água destinada ao abastecimento público, às atividades recreativas e aos demais usos múltiplos previstos na legislação brasileira.

Entre os efeitos mais preocupantes da eutrofização destaca-se a ocorrência de florações de cianobactérias potencialmente tóxicas, capazes de produzir metabólitos secundários conhecidos como cianotoxinas (Paerl; Otten, 2013). Essas substâncias representam riscos à saúde humana e animal, podendo ocasionar problemas hepáticos, neurológicos e gastrointestinais, além de comprometerem o abastecimento de água para consumo humano

(Paerl; Otten, 2013; Le Moal *et al.*, 2019). Simultaneamente, a decomposição da elevada biomassa algal intensifica o consumo de oxigênio dissolvido, favorecendo condições de hipóxia e anoxia que resultam na mortandade de peixes e na redução da biodiversidade aquática (Schindler, 2012; Smith; Schindler, 2009).

Além dos impactos ecológicos, a eutrofização produz importantes consequências econômicas e sociais (Le Moal *et al.*, 2019). A degradação da qualidade da água eleva os custos dos sistemas de tratamento destinados ao abastecimento público, reduz o potencial turístico dos corpos hídricos e compromete atividades relacionadas ao lazer, à pesca e à aquicultura (Carpenter *et al.*, 1998; Paerl; Otten, 2013). Em ambientes urbanos, onde lagoas e reservatórios desempenham funções ecológicas e paisagísticas relevantes, a deterioração da qualidade ambiental reduz significativamente os serviços ecossistêmicos oferecidos à população (Le Moal *et al.*, 2019).

Diante desse cenário, o monitoramento sistemático da qualidade da água tornou-se uma importante ferramenta para subsidiar ações de planejamento e gestão ambiental (Lamparelli, 2004). A utilização de indicadores limnológicos possibilita compreender a dinâmica dos ecossistemas aquáticos, identificar alterações ambientais e avaliar os efeitos decorrentes das pressões antrópicas (Esteves; Amado, 2011). Entre os parâmetros mais empregados destacam-se a transparência da água, medida pelo Disco de Secchi, as concentrações de fósforo total, nitrogênio total, clorofila-a, oxigênio dissolvido, temperatura, condutividade elétrica, turbidez e potencial hidrogeniônico, variáveis consideradas fundamentais para caracterizar o estado ecológico dos ambientes aquáticos (Lamparelli, 2004; Fia *et al.*, 2009).

Nesse contexto, o Índice de Estado Trófico (IET) constitui um dos instrumentos mais utilizados para avaliar o grau de enriquecimento por nutrientes em corpos hídricos (Carlson, 1977). O índice originalmente desenvolvido por Carlson (1977) foi posteriormente adaptado por Lamparelli (2004) para ecossistemas tropicais brasileiros, considerando as particularidades climáticas, hidrológicas e ecológicas desses ambientes. A metodologia utiliza principalmente as concentrações de fósforo total e clorofila-a para classificar os corpos hídricos em diferentes categorias tróficas, variando de ultraoligotrófico a hipereutrófico (Lamparelli, 2004). Diversos estudos realizados em reservatórios, rios, lagoas e ambientes estuarinos brasileiros demonstram a eficiência do IET na identificação dos níveis de eutrofização e no acompanhamento das alterações ambientais ao longo do tempo (Fia *et al.*, 2009; Maranhão *et al.*, 2017).

No Brasil, o monitoramento da qualidade das águas superficiais encontra respaldo na Resolução CONAMA nº 357/2005, que estabelece a classificação dos corpos de água e define padrões de qualidade compatíveis com seus usos preponderantes (Brasil, 2005). Complementarmente, a Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei nº 9.433/1997, estabelece que a gestão dos recursos hídricos deve assegurar a disponibilidade de água em padrões adequados de qualidade para as presentes e futuras gerações (Brasil, 1997). Nesse sentido, a utilização de indicadores como o Índice de Estado Trófico fornece informações essenciais para programas de monitoramento ambiental, subsidiando ações de controle da poluição hídrica, recuperação de ecossistemas degradados e planejamento do uso sustentável dos recursos hídricos (Lamparelli, 2004; Esteves; Amado, 2011).

Considerando a elevada vulnerabilidade das lagoas urbanas aos impactos decorrentes da ocupação antrópica, a avaliação do estado trófico da Lagoa da Jansen torna-se fundamental para compreender sua dinâmica limnológica e identificar os principais fatores associados à degradação da qualidade da água (Braz; Mello, 2006; Maranhão *et al.*, 2017). Os resultados obtidos por meio da aplicação do Índice de Estado Trófico permitem diagnosticar o nível de enriquecimento nutricional do ecossistema, subsidiando estratégias de manejo, recuperação ambiental e conservação desse importante ambiente costeiro da Ilha do Maranhão (Lamparelli, 2004; Fia *et al.*, 2009).

Objetivo Geral

Avaliar a qualidade das águas superficiais e o estado trófico da Lagoa da Jansen, em São Luís, Maranhão, durante os períodos chuvoso e de estiagem do ano de 2021, por meio da análise de variáveis limnológicas e da aplicação do Índice de Estado Trófico (IET).

Objetivos Específicos

- Caracterizar as variáveis físicas, químicas e biológicas da água da Lagoa da Jansen nos períodos chuvoso e de estiagem;
- Determinar o Índice de Estado Trófico (IET) e classificar o grau de trofia da lagoa;
- Comparar as variações dos parâmetros limnológicos entre os períodos chuvoso e de estiagem;

- Avaliar a relação entre as variáveis limnológicas e os pontos amostrais por meio da Análise de Componentes Principais (PCA).

REFERENCIAL TEÓRICO

Qualidade da Água e Recursos Hídricos

A água constitui um dos recursos naturais mais importantes para a manutenção da vida, do equilíbrio dos ecossistemas e do desenvolvimento das atividades humanas, desempenhando funções essenciais nos processos ecológicos, econômicos e sociais (Tundisi; Tundisi, 2011). Além de sua importância para o abastecimento público, a água é indispensável para a produção de alimentos, geração de energia, atividades industriais, recreação e conservação da biodiversidade, sendo considerada um recurso estratégico para o desenvolvimento sustentável (Unesco, 2024). Entretanto, o crescimento populacional, a urbanização acelerada e a intensificação das atividades produtivas têm provocado alterações significativas na disponibilidade e na qualidade dos recursos hídricos em diferentes regiões do mundo (Vörösmarty *et al.*, 2010; Wwap, 2024).

A qualidade da água pode ser definida como o conjunto de características físicas, químicas e biológicas que determinam sua adequação para determinados usos, variando de acordo com as condições naturais do ambiente e com as influências decorrentes das atividades antrópicas (Esteves; Amado, 2011). Essas características sofrem modificações em função de fatores naturais, como clima, geologia, hidrologia e cobertura vegetal, bem como em decorrência do lançamento de efluentes domésticos e industriais,

da expansão agrícola, da mineração e da ocupação desordenada do solo (Chapman, 1996; Tundisi; Tundisi, 2011).

Nas últimas décadas, a degradação da qualidade das águas superficiais tornou-se uma das principais preocupações ambientais em escala global, principalmente devido ao aumento das cargas de nutrientes, sedimentos, metais pesados, pesticidas, resíduos sólidos e contaminantes emergentes lançados nos ecossistemas aquáticos (Vörösmarty *et al.*, 2010; Le Moal *et al.*, 2019). Segundo (Carpenter *et al.*, 1998), as fontes difusas de poluição representam um dos maiores desafios para a gestão dos recursos hídricos, uma vez que estão diretamente relacionadas ao escoamento superficial proveniente de áreas urbanas e agrícolas. Da mesma forma, Smith e Schindler (2009) destacam que o enriquecimento por nutrientes constitui um dos principais responsáveis pela deterioração da qualidade da água em lagos, reservatórios e lagoas costeiras.

Os ambientes aquáticos inseridos em áreas urbanizadas apresentam maior vulnerabilidade aos processos de degradação ambiental devido à elevada densidade populacional e à intensa modificação da paisagem natural (Paerl; Otten, 2013). A impermeabilização do solo reduz a infiltração da água da chuva e aumenta o escoamento superficial, favorecendo o transporte de sedimentos, matéria orgânica e nutrientes para os corpos hídricos (Tucci, 2012). Além disso, a deficiência dos sistemas de coleta e tratamento de esgotos contribui para o lançamento contínuo de compostos nitrogenados e fosfatados, alterando a dinâmica limnológica desses ecossistemas (Le Moal *et al.*, 2019).

Entre os principais impactos decorrentes da deterioração da qualidade da água destacam-se a redução da transparência,

alterações no potencial hidrogeniônico (pH), diminuição da concentração de oxigênio dissolvido, aumento da turbidez, elevação da condutividade elétrica e modificações na composição das comunidades aquáticas (Esteves; Amado, 2011). Essas alterações comprometem não apenas a biodiversidade aquática, mas também diversos serviços ecossistêmicos, incluindo abastecimento público, irrigação, recreação, pesca e turismo (Tundisi; Tundisi, 2011). Em consequência, observa-se aumento dos custos de tratamento da água e redução da disponibilidade de recursos hídricos com qualidade compatível para os diferentes usos (Unesco, 2024).

No Brasil, a gestão da qualidade das águas superficiais está fundamentada na Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei nº 9.433/1997, que estabelece a água como um bem de domínio público e um recurso natural limitado, dotado de valor econômico (Brasil, 1997). Complementarmente, a Resolução CONAMA nº 357/2005 estabelece a classificação dos corpos de água e define padrões de qualidade compatíveis com seus usos preponderantes, constituindo um importante instrumento para o monitoramento e o enquadramento ambiental dos recursos hídricos (Brasil, 2005). Essas diretrizes permitem avaliar alterações na qualidade da água e subsidiar ações voltadas à conservação e ao uso sustentável dos ecossistemas aquáticos.

A avaliação da qualidade da água é realizada por meio da análise integrada de variáveis físicas, químicas e biológicas, que refletem as condições ambientais dos ecossistemas aquáticos (Chapman, 1996). Parâmetros como temperatura da água, pH, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica, transparência, turbidez, sólidos totais, nutrientes e clorofila-*a* são amplamente utilizados em estudos limnológicos por fornecerem informações sobre os processos

ecológicos e o grau de impacto ambiental dos corpos hídricos (Esteves; Amado, 2011; Lamparelli, 2004). A análise conjunta dessas variáveis possibilita compreender a dinâmica dos ambientes aquáticos, identificar alterações espaciais e temporais e subsidiar programas de monitoramento ambiental.

No contexto das lagoas costeiras urbanas, o monitoramento da qualidade da água torna-se ainda mais relevante devido à elevada pressão exercida pelas atividades humanas (Braz; Mello, 2006). Esses ecossistemas apresentam grande importância ecológica por atuarem como áreas de reprodução e alimentação de diversas espécies, além de desempenharem funções relacionadas ao controle hidrológico, à ciclagem de nutrientes e à manutenção da biodiversidade (Esteves; Amado, 2011). Entretanto, quando submetidos ao lançamento contínuo de efluentes e ao crescimento urbano desordenado, esses ambientes tornam-se suscetíveis à eutrofização, comprometendo sua integridade ecológica e seus múltiplos usos (Smith; Schindler, 2009; Le Moal *et al.*, 2019).

Dessa forma, o monitoramento sistemático da qualidade da água constitui uma ferramenta indispensável para compreender os processos ambientais que ocorrem nos ecossistemas aquáticos e subsidiar estratégias de gestão, recuperação e conservação dos recursos hídricos (Lamparelli, 2004; Tundisi; Tundisi, 2011). Em ambientes urbanos como a Lagoa da Jansen, a avaliação integrada dos parâmetros limnológicos permite identificar os efeitos da ocupação antrópica sobre a qualidade da água e fornece informações fundamentais para o planejamento ambiental e para a implementação de políticas públicas voltadas ao uso sustentável desse importante ecossistema costeiro (Braz; Mello, 2006).

Lagoas Costeiras e Ambientes Urbanos

As lagoas costeiras constituem ecossistemas de transição entre os ambientes continentais e marinhos, caracterizando-se por elevada complexidade ecológica, intensa dinâmica hidrológica e elevada produtividade biológica (Kjerfve, 1994; Esteves; Amado, 2011). Esses sistemas desempenham importantes funções ambientais, como retenção de sedimentos, ciclagem de nutrientes, manutenção da biodiversidade, proteção contra eventos extremos e suporte às atividades pesqueiras e recreativas (Kennish, 2002; Costanza *et al.*, 2014). Em razão dessas características, as lagoas costeiras são consideradas ecossistemas estratégicos para a conservação ambiental e para a manutenção dos serviços ecossistêmicos em regiões costeiras.

A dinâmica ecológica desses ambientes é influenciada por fatores naturais, incluindo precipitação, evaporação, regime de marés, descarga fluvial, ventos e características geomorfológicas da bacia de drenagem (Kjerfve, 1994; Miranda; Castro; Kjerfve, 2012). As variações nesses fatores modificam a salinidade, a temperatura, a disponibilidade de nutrientes, a circulação da água e a produtividade biológica, refletindo diretamente na qualidade ambiental do ecossistema (Esteves; Amado, 2011). Em regiões tropicais, onde predominam elevadas temperaturas ao longo do ano e forte sazonalidade pluviométrica, essas alterações tendem a ser ainda mais pronunciadas (Tundisi; Tundisi, 2011).

Apesar de sua elevada importância ecológica, as lagoas costeiras estão entre os ecossistemas mais vulneráveis às pressões antrópicas, principalmente quando localizadas em regiões metropolitanas (Kennish, 2002). O crescimento urbano desordenado promove a

supressão da vegetação natural, a impermeabilização do solo, alterações no sistema de drenagem e o lançamento contínuo de efluentes domésticos e industriais, fatores que comprometem a qualidade da água e aceleram os processos de degradação ambiental (Braz; Mello, 2006; Le Moal *et al.*, 2019). Como consequência, esses ambientes apresentam maior suscetibilidade ao acúmulo de nutrientes, sedimentos e matéria orgânica, favorecendo o desenvolvimento de processos eutróficos (Carpenter *et al.*, 1998; Paerl; Otten, 2013).

Entre os impactos mais frequentes observados em lagoas urbanas destacam-se o aumento da concentração de fósforo e nitrogênio, a redução da transparência da água, o incremento da biomassa fitoplanctônica, a diminuição do oxigênio dissolvido e a ocorrência de florações de cianobactérias (Smith; Schindler, 2009; Schindler, 2012). Esses processos alteram a estrutura das comunidades aquáticas, comprometem a biodiversidade e reduzem a capacidade do ecossistema de fornecer serviços ambientais essenciais à população (Le Moal *et al.*, 2019; Paerl; Otten, 2013). Além disso, a degradação da qualidade da água pode limitar atividades recreativas, esportivas e turísticas, reduzindo o valor paisagístico e econômico desses ambientes (Costanza *et al.*, 2014).

No Brasil, diversas lagoas costeiras localizadas em centros urbanos apresentam histórico de degradação ambiental decorrente da intensa ocupação do entorno e da deficiência dos sistemas de saneamento básico (Esteves; Amado, 2011). Entre esses ambientes destaca-se a Lagoa da Jansen, situada na Ilha do Maranhão, no município de São Luís, que ao longo das últimas décadas passou por profundas modificações em sua configuração natural em decorrência da expansão urbana e da construção de obras de

infraestrutura (Braz; Mello, 2006). Essas intervenções alteraram a circulação da água, modificaram a dinâmica hidrossedimentológica da lagoa e favoreceram o aporte contínuo de poluentes provenientes da drenagem urbana (Maranhão *et al.*, 2017).

A Lagoa da Jansen apresenta características peculiares por manter comunicação indireta com o sistema estuarino da Baía de São Marcos, estando sujeita à influência das marés e às variações sazonais de precipitação características da região amazônica maranhense (Miranda; Castro; Kjerfve, 2012). Entretanto, a intensa urbanização observada em sua área de influência promove alterações significativas na qualidade da água, tornando esse ecossistema um importante modelo para estudos relacionados à limnologia, à poluição hídrica e à eutrofização (Braz; Mello, 2006; Maranhão *et al.*, 2017).

Diversos estudos desenvolvidos em lagoas costeiras brasileiras demonstram que as condições hidrológicas e a sazonalidade exercem influência direta sobre a distribuição espacial dos parâmetros limnológicos (Esteves; Amado, 2011). Durante o período chuvoso, o aumento do escoamento superficial favorece o transporte de sedimentos, nutrientes e matéria orgânica para o interior das lagoas, modificando variáveis como turbidez, sólidos suspensos, fósforo total e nitrogênio dissolvido (Carpenter *et al.*, 1998; Le Moal *et al.*, 2019). Em contrapartida, no período de estiagem, a redução da renovação da água pode favorecer o aumento da salinidade, da condutividade elétrica e da concentração de determinados íons dissolvidos, fenômenos frequentemente observados em lagoas costeiras tropicais (Kjerfve, 1994; Miranda; Castro; Kjerfve, 2012).

Essas variações temporais justificam a realização de estudos comparativos entre diferentes períodos hidrológicos, permitindo compreender a dinâmica ambiental desses ecossistemas e identificar os fatores responsáveis pelas alterações na qualidade da água (Lamparelli, 2004). Além disso, a avaliação integrada de parâmetros físicos, químicos e biológicos fornece informações essenciais para programas de monitoramento ambiental e para a definição de estratégias voltadas à recuperação e conservação das lagoas urbanas (Esteves; Amado, 2011; Tundisi; Tundisi, 2011).

Nesse contexto, a Lagoa da Jansen representa um importante laboratório natural para investigações relacionadas aos impactos da urbanização sobre ecossistemas costeiros. A análise de suas características limnológicas, associada à determinação do Índice de Estado Trófico, permite compreender a magnitude das alterações ambientais decorrentes das atividades antrópicas, subsidiando ações de gestão ambiental, controle da poluição e planejamento urbano sustentável (Lamparelli, 2004; Maranhão *et al.*, 2017).

Eutrofização em Ecossistemas Aquáticos

A eutrofização é um dos principais processos responsáveis pela degradação da qualidade das águas superficiais em ecossistemas lênticos e semilênticos, sendo caracterizada pelo enriquecimento excessivo de nutrientes, principalmente compostos de fósforo e nitrogênio, que estimulam o crescimento acelerado do fitoplâncton, de macrófitas aquáticas e de cianobactérias (Hasler, 1947; Schindler, 2012; Le Moal *et al.*, 2019). Embora a eutrofização possa ocorrer naturalmente ao longo da evolução dos ecossistemas aquáticos, esse processo desenvolve-se lentamente em escala geológica. Entretanto, a intensificação das atividades humanas acelerou

significativamente esse fenômeno, originando a denominada eutrofização cultural ou antrópica, atualmente considerada um dos maiores problemas ambientais relacionados aos recursos hídricos (Carpenter *et al.*, 1998; Smith; Schindler, 2009).

O enriquecimento nutricional dos corpos hídricos decorre principalmente do lançamento de esgotos domésticos sem tratamento, efluentes industriais, drenagem agrícola, criação intensiva de animais, deposição atmosférica de compostos nitrogenados e escoamento superficial urbano (Carpenter *et al.*, 1998; Paerl; Otten, 2013). Em regiões metropolitanas, onde predominam elevadas taxas de impermeabilização do solo e deficiência dos sistemas de saneamento básico, a entrada contínua desses nutrientes favorece alterações significativas na dinâmica limnológica dos ecossistemas aquáticos (Le Moal *et al.*, 2019). Nessas condições, a disponibilidade de fósforo e nitrogênio deixa de representar um fator limitante para a produção primária, promovendo sucessivas florações algais e modificando profundamente a estrutura ecológica do ambiente (Schindler, 2012).

Entre os nutrientes responsáveis pelo desencadeamento da eutrofização, o fósforo é considerado o principal elemento limitante da produtividade primária em ecossistemas de água doce, sendo frequentemente utilizado como indicador da qualidade ambiental e do potencial de enriquecimento trófico dos corpos hídricos (Carpenter *et al.*, 1998; Lamparelli, 2004). O nitrogênio também exerce papel fundamental nesse processo, especialmente em ambientes estuarinos e costeiros, onde diferentes formas nitrogenadas, como nitrato, nitrito e amônio, contribuem para o aumento da biomassa fitoplanctônica (Smith; Schindler, 2009; Paerl; Otten, 2013). A interação entre esses nutrientes e fatores ambientais,

como temperatura, luminosidade e tempo de residência da água, determina a intensidade e a velocidade do desenvolvimento da eutrofização (Le Moal *et al.*, 2019).

A elevada disponibilidade de nutrientes provoca alterações significativas nas características físicas, químicas e biológicas da água (Esteves; Amado, 2011). Inicialmente observa-se aumento da produtividade primária, refletido pelo crescimento da concentração de clorofila-*a* e pela redução da transparência da água em decorrência da elevada biomassa fitoplanctônica (Carlson, 1977; Lamparelli, 2004). Posteriormente, a decomposição da matéria orgânica produzida intensifica o consumo de oxigênio dissolvido pelas bactérias decompositoras, favorecendo o estabelecimento de condições de hipóxia ou anoxia, principalmente nas camadas mais profundas dos corpos hídricos (Schindler, 2012; Le Moal *et al.*, 2019). Esse processo compromete o metabolismo da biota aquática e reduz significativamente a capacidade de suporte do ecossistema.

A redução do oxigênio dissolvido representa uma das principais consequências ecológicas da eutrofização, podendo ocasionar mortandade de peixes, moluscos, crustáceos e diversos organismos bentônicos sensíveis à deficiência de oxigênio (Esteves; Amado, 2011). Além disso, ambientes submetidos à eutrofização intensa apresentam alterações na estrutura das comunidades aquáticas, favorecendo espécies oportunistas e reduzindo a diversidade biológica (Smith; Schindler, 2009). A simplificação das cadeias alimentares compromete o funcionamento ecológico do ecossistema e reduz sua capacidade de recuperação frente a novas perturbações ambientais (Schindler, 2012).

Outro efeito amplamente documentado da eutrofização é a ocorrência de florações de cianobactérias potencialmente tóxicas (Paerl; Otten, 2013). Diversas espécies produzem metabólitos secundários, denominados cianotoxinas, capazes de provocar efeitos hepatotóxicos, neurotóxicos e dermatotóxicos em seres humanos e animais (Chorus; Bartram, 1999; Paerl; Otten, 2013). A presença dessas toxinas compromete a utilização da água para abastecimento público, recreação e aquicultura, além de aumentar significativamente os custos operacionais dos sistemas de tratamento de água (Le Moal *et al.*, 2019).

Sob o ponto de vista econômico, a eutrofização também produz impactos expressivos sobre diferentes setores produtivos (Dodds *et al.*, 2009). A deterioração da qualidade da água reduz o potencial turístico de lagoas, rios e reservatórios, compromete atividades pesqueiras, aumenta os custos relacionados ao tratamento de água para consumo humano e reduz a disponibilidade de recursos hídricos para usos múltiplos (Carpenter *et al.*, 1998). Em áreas urbanas, onde lagoas desempenham funções paisagísticas e recreativas, a proliferação de algas, a geração de odores desagradáveis e a mortandade de organismos aquáticos contribuem para a perda do valor ambiental desses ecossistemas (Le Moal *et al.*, 2019).

Em regiões tropicais, a elevada incidência de radiação solar, associada às altas temperaturas durante grande parte do ano, favorece o crescimento acelerado do fitoplâncton e potencializa os efeitos da eutrofização (Esteves; Amado, 2011). No Brasil, esses processos são frequentemente intensificados durante períodos de baixa renovação da água e elevados tempos de residência hidráulica, especialmente em lagoas urbanas e reservatórios submetidos à

intensa pressão antrópica (Lamparelli, 2004). Dessa forma, a sazonalidade climática exerce papel determinante na dinâmica dos nutrientes e na intensidade das florações algais observadas nesses ecossistemas (Tundisi; Tundisi, 2011).

Considerando a crescente degradação dos ambientes aquáticos urbanos, diversos indicadores limnológicos passaram a ser utilizados para diagnosticar o grau de eutrofização dos corpos hídricos (Carlson, 1977). Entre esses indicadores destacam-se as concentrações de fósforo total, nitrogênio, clorofila-*a*, transparência da água e oxigênio dissolvido, parâmetros amplamente empregados em programas de monitoramento ambiental por refletirem diretamente as alterações promovidas pelo enriquecimento nutricional (Lamparelli, 2004; Fia *et al.*, 2009). A integração dessas variáveis possibilita avaliar a evolução temporal da qualidade da água e subsidiar ações voltadas ao controle da poluição difusa e pontual.

No contexto da Lagoa da Jansen, o processo de eutrofização está diretamente relacionado à intensa urbanização de seu entorno, ao aporte contínuo de efluentes domésticos e à modificação da dinâmica hidrológica provocada pelas intervenções antrópicas realizadas nas últimas décadas (Braz; Mello, 2006). Essas condições favorecem o acúmulo de nutrientes e contribuem para a manutenção de elevados níveis de produtividade biológica, justificando a utilização do Índice de Estado Trófico como ferramenta para diagnosticar a qualidade ambiental desse ecossistema (Lamparelli, 2004; Maranhão *et al.*, 2017). Dessa forma, a compreensão dos mecanismos envolvidos na eutrofização constitui etapa fundamental para interpretar os resultados obtidos neste

estudo e subsidiar estratégias voltadas à recuperação e ao manejo sustentável da Lagoa da Jansen.

Parâmetros Limnológicos Utilizados na Avaliação da Qualidade da Água

A avaliação da qualidade da água fundamenta-se na análise integrada de variáveis físicas, químicas e biológicas que refletem o funcionamento dos ecossistemas aquáticos e permitem identificar alterações decorrentes de processos naturais e de atividades antrópicas (Esteves; Amado, 2011; Chapman, 1996). A interpretação conjunta desses parâmetros possibilita compreender a dinâmica limnológica dos corpos hídricos, identificar fontes de poluição e subsidiar programas de monitoramento e gestão ambiental (Tundisi; Tundisi, 2011). Dessa forma, estudos limnológicos utilizam diferentes indicadores ambientais para avaliar o estado ecológico de rios, lagos, reservatórios e lagoas costeiras (Lamparelli, 2004).

A temperatura da água representa uma das variáveis limnológicas mais importantes por influenciar diretamente os processos físicos, químicos e biológicos dos ecossistemas aquáticos (Wetzel, 2001). Alterações na temperatura modificam a velocidade das reações químicas, a solubilidade dos gases, a atividade metabólica dos organismos aquáticos e a taxa de decomposição da matéria orgânica (Esteves; Amado, 2011). Em regiões tropicais, como o litoral maranhense, a temperatura apresenta menor amplitude anual quando comparada às regiões temperadas, porém pode sofrer variações sazonais relacionadas à precipitação, à radiação solar e ao tempo de residência da água (Tundisi; Tundisi, 2011).

O potencial hidrogeniônico (pH) constitui outro importante indicador da qualidade da água, expressando a concentração de íons hidrogênio presentes no meio aquático (Apha, 2017). O pH influencia diretamente a disponibilidade de nutrientes, a solubilidade de metais, a atividade microbiológica e a sobrevivência dos organismos aquáticos (Esteves; Amado, 2011). Valores elevados podem estar associados à intensa atividade fotossintética promovida pelo fitoplâncton, enquanto valores reduzidos geralmente estão relacionados à decomposição da matéria orgânica e ao aumento da concentração de dióxido de carbono dissolvido (Wetzel, 2001).

O oxigênio dissolvido é considerado um dos principais indicadores da qualidade ambiental dos ecossistemas aquáticos por refletir o equilíbrio entre os processos de produção e consumo de oxigênio no ambiente (Esteves; Amado, 2011). As concentrações desse parâmetro dependem da temperatura da água, da circulação hidráulica, da atividade fotossintética e da decomposição da matéria orgânica (Chapman, 1996). Em ambientes submetidos ao processo de eutrofização, a decomposição da elevada biomassa algal provoca intenso consumo de oxigênio, podendo estabelecer condições de hipóxia e anoxia que comprometem a sobrevivência da fauna aquática (Schindler, 2012; Le Moal *et al.*, 2019).

A transparência da água, normalmente determinada por meio do disco de Secchi, constitui um importante indicador indireto da concentração de partículas em suspensão e da biomassa fitoplanctônica (Carlson, 1977). A redução da transparência está frequentemente associada ao aumento da turbidez, da concentração de sedimentos e do crescimento de algas microscópicas, sendo considerada uma das primeiras evidências do

processo de eutrofização (Lamparelli, 2004). Além disso, a penetração da luz influencia diretamente a profundidade da zona fótica e, conseqüentemente, a distribuição dos organismos fotossintetizantes no corpo hídrico (Wetzel, 2001).

A condutividade elétrica representa a capacidade da água em conduzir corrente elétrica e está diretamente relacionada à concentração de íons dissolvidos presentes no ambiente aquático (Esteves; Amado, 2011). Esse parâmetro sofre influência da geologia local, da salinidade, do aporte de nutrientes e da descarga de efluentes domésticos e industriais (Chapman, 1996). Em lagoas costeiras, a condutividade também pode variar em função da influência das marés e da mistura entre águas continentais e marinhas, constituindo importante indicador da dinâmica hidrológica desses ecossistemas (Miranda; Castro; Kjerfve, 2012).

A turbidez corresponde à redução da transparência provocada pela presença de partículas minerais, matéria orgânica e organismos em suspensão (Apha, 2017). Valores elevados podem resultar do transporte de sedimentos durante eventos de precipitação, da ressuspensão do material depositado no fundo ou da intensa produção fitoplanctônica decorrente da eutrofização (Esteves; Amado, 2011). A elevada turbidez reduz a penetração da luz na coluna d'água, interfere na fotossíntese e altera significativamente a produtividade primária dos ecossistemas aquáticos (Wetzel, 2001).

Os sólidos totais dissolvidos e suspensos constituem importantes indicadores da composição físico-química da água, refletindo tanto características naturais quanto fontes de poluição antrópica (Chapman, 1996). A presença de sólidos orgânicos está relacionada principalmente à decomposição da matéria vegetal e ao

lançamento de esgotos domésticos, enquanto os sólidos inorgânicos geralmente são provenientes da erosão, do intemperismo das rochas e do transporte de sedimentos (Esteves; Amado, 2011). Alterações nessas frações podem modificar a transparência da água, favorecer o transporte de contaminantes e interferir na dinâmica ecológica do ambiente aquático (Tundisi; Tundisi, 2011).

Os compostos nitrogenados desempenham papel fundamental na dinâmica biogeoquímica dos ecossistemas aquáticos, participando diretamente da produção primária e da ciclagem de nutrientes (Wetzel, 2001). Entre as formas inorgânicas dissolvidas, destacam-se o nitrito e o nitrato, frequentemente utilizados como indicadores da influência de efluentes domésticos, fertilizantes agrícolas e processos de nitrificação (Mackereth *et al.*, 1978). Em ambientes eutrofizados, concentrações elevadas dessas formas nitrogenadas podem estimular o crescimento excessivo do fitoplâncton, contribuindo para o agravamento da degradação ambiental (Smith; Schindler, 2009).

O fósforo total é reconhecido como um dos principais indicadores da qualidade da água e do estado trófico de ambientes lênticos (Carpenter *et al.*, 1998). Em ecossistemas de água doce, esse nutriente normalmente representa o fator limitante da produtividade primária, de modo que pequenas elevações em sua concentração podem desencadear intenso crescimento algal (Schindler, 2012). Por esse motivo, a determinação do fósforo total é amplamente utilizada em programas de monitoramento ambiental e na aplicação de índices de estado trófico (Lamparelli, 2004).

A clorofila-*a* constitui o principal pigmento fotossintético presente nas algas e no fitoplâncton, sendo amplamente empregada como indicador da biomassa algal e da produtividade primária dos ecossistemas aquáticos (Lorenzen, 1967). Em ambientes submetidos ao enriquecimento nutricional, observa-se aumento significativo da concentração de clorofila-*a*, refletindo a intensificação da atividade fotossintética e o desenvolvimento de florações algais (Carlson, 1977; Lamparelli, 2004). Dessa forma, esse parâmetro apresenta elevada sensibilidade às alterações promovidas pelo processo de eutrofização, sendo um dos componentes utilizados na determinação do Índice de Estado Trófico.

A análise integrada desses parâmetros permite compreender a dinâmica ecológica dos ecossistemas aquáticos, identificar alterações espaciais e temporais e avaliar os impactos decorrentes das atividades antrópicas sobre a qualidade da água (Esteves; Amado, 2011). Em lagoas urbanas, como a Lagoa da Jansen, a interpretação conjunta das variáveis limnológicas torna-se essencial para diagnosticar os processos de degradação ambiental e subsidiar estratégias de manejo, recuperação e conservação desse importante ecossistema costeiro (Lamparelli, 2004; Tundisi; Tundisi, 2011).

Índice de Estado Trófico (IET): Conceitos, Evolução e Aplicação em Ecossistemas Aquáticos

A crescente degradação da qualidade das águas superficiais decorrente do enriquecimento por nutrientes impulsionou o desenvolvimento de indicadores capazes de sintetizar as condições ecológicas dos ecossistemas aquáticos em um único índice numérico (Carlson, 1977; Lamparelli, 2004). Entre esses indicadores, o Índice de Estado Trófico (IET) destaca-se como uma das ferramentas

mais utilizadas em estudos limnológicos por permitir a classificação do grau de enriquecimento nutricional dos corpos hídricos, constituindo importante instrumento para o monitoramento ambiental e para o gerenciamento dos recursos hídricos (Carlson, 1977; Fia *et al.*, 2009). A aplicação desse índice facilita a interpretação de dados limnológicos complexos, fornecendo informações objetivas sobre a qualidade ambiental dos ecossistemas aquáticos (Esteves; Amado, 2011).

O conceito de estado trófico está relacionado à capacidade de produção biológica de um ecossistema aquático, sendo diretamente influenciado pela disponibilidade de nutrientes essenciais ao crescimento do fitoplâncton, principalmente fósforo e nitrogênio (Wetzel, 2001; Schindler, 2012). Ambientes com baixas concentrações desses nutrientes apresentam reduzida produtividade primária e elevada transparência da água, sendo classificados como oligotróficos. Em contrapartida, corpos hídricos com elevadas concentrações de nutrientes apresentam intensa produção de biomassa algal, menor transparência e maior consumo de oxigênio dissolvido, sendo classificados como eutróficos ou hipereutróficos (Carlson, 1977; Lamparelli, 2004).

O primeiro índice amplamente utilizado para avaliar o estado trófico de lagos foi proposto por Carlson (1977), a partir da relação existente entre a transparência da água, medida pelo disco de Secchi, a concentração de clorofila-*a* e o fósforo total. Segundo Carlson (1977), esses parâmetros apresentam elevada correlação com a produtividade primária dos ambientes lênticos, permitindo estimar o grau de eutrofização por meio de equações matemáticas padronizadas. O índice tornou-se referência internacional devido à sua simplicidade de aplicação, facilidade de interpretação e ampla

utilização em programas de monitoramento ambiental (Wetzel, 2001).

Apesar de sua ampla aceitação, o índice originalmente proposto por Carlson (1977) foi desenvolvido com base em lagos de regiões temperadas, cujas características climáticas e limnológicas diferem significativamente daquelas observadas em ecossistemas tropicais (Lamparelli, 2004). Em regiões tropicais, fatores como temperaturas elevadas durante todo o ano, maior intensidade da radiação solar, diferenças na dinâmica hidrológica e maior velocidade dos processos biogeoquímicos influenciam diretamente o comportamento dos parâmetros limnológicos utilizados no cálculo do estado trófico (Esteves; Amado, 2011; Tundisi; Tundisi, 2011). Dessa forma, tornou-se necessária a adaptação do índice às condições ambientais brasileiras.

Nesse contexto, Lamparelli (2004) desenvolveu uma adaptação do Índice de Estado Trófico específica para ambientes tropicais brasileiros, considerando as características ecológicas de reservatórios, lagos, rios e demais ecossistemas aquáticos do país. A proposta ajustou as equações originalmente desenvolvidas por Carlson, utilizando principalmente as concentrações de fósforo total e clorofila-*a* como variáveis representativas da produtividade biológica dos corpos hídricos (Lamparelli, 2004). Essa adaptação tornou-se uma das metodologias mais empregadas no Brasil para avaliação da qualidade da água e classificação do estado trófico de ecossistemas aquáticos.

Segundo Lamparelli (2004), os corpos hídricos podem ser classificados em seis categorias tróficas: ultraoligotrófico, oligotrófico, mesotrófico, eutrófico, supereutrófico e hipereutrófico.

Os ambientes ultraoligotróficos apresentam baixíssima disponibilidade de nutrientes, elevada transparência e reduzida produção de biomassa fitoplanctônica. Os ambientes oligotróficos caracterizam-se por boa qualidade da água e baixa produtividade biológica. Já os ambientes mesotróficos representam uma condição intermediária entre sistemas preservados e ambientes enriquecidos por nutrientes. Por outro lado, os ambientes eutróficos, supereutróficos e hipereutróficos apresentam elevadas concentrações de nutrientes, intensa produção de algas, redução da transparência da água e maior probabilidade de ocorrência de florações de cianobactérias (Lamparelli, 2004; Schindler, 2012).

A utilização do IET apresenta diversas vantagens em programas de monitoramento ambiental, uma vez que permite acompanhar a evolução temporal da qualidade da água e comparar diferentes ecossistemas por meio de uma metodologia padronizada (Fia *et al.*, 2009). Além disso, o índice constitui importante ferramenta para identificar tendências de degradação ambiental, subsidiando a elaboração de políticas públicas voltadas ao controle da poluição hídrica e ao manejo sustentável dos recursos hídricos (Tundisi; Tundisi, 2011). A simplicidade de aplicação e a facilidade de interpretação também favorecem sua utilização por órgãos ambientais responsáveis pelo monitoramento da qualidade da água.

Diversos estudos realizados em ambientes aquáticos brasileiros demonstram a eficiência da metodologia proposta por Lamparelli (2004) na classificação do estado trófico de reservatórios, rios, lagoas e estuários (Fia *et al.*, 2009; Cunha; Calijuri; Lamparelli, 2013). Esses trabalhos evidenciam que o índice apresenta elevada sensibilidade às alterações provocadas pelo enriquecimento nutricional, permitindo identificar processos de eutrofização mesmo em

estágios iniciais. Além disso, a associação do IET com análises estatísticas multivariadas, como a Análise de Componentes Principais (PCA), amplia a capacidade de interpretação das relações entre os parâmetros limnológicos e os fatores ambientais responsáveis pela degradação da qualidade da água (Hammer *et al.*, 2001).

No Brasil, o Índice de Estado Trófico tem sido amplamente utilizado em programas estaduais de monitoramento da qualidade das águas superficiais e em pesquisas acadêmicas voltadas à avaliação ambiental de ecossistemas aquáticos (Lamparelli, 2004). Sua aplicação permite identificar áreas críticas sujeitas ao aporte excessivo de nutrientes, avaliar a eficiência de programas de recuperação ambiental e subsidiar o enquadramento dos corpos hídricos conforme os usos previstos na Resolução CONAMA nº 357/2005 (Brasil, 2005). Dessa forma, o índice representa uma ferramenta indispensável para o planejamento e a gestão integrada dos recursos hídricos.

Na Lagoa da Jansen, a utilização do Índice de Estado Trófico mostra-se particularmente relevante em razão da intensa ocupação urbana de sua bacia de drenagem e da influência contínua de fontes difusas e pontuais de poluição (Braz; Mello, 2006). A determinação do IET possibilita avaliar o grau de comprometimento da qualidade da água, identificar a intensidade do processo de eutrofização e fornecer subsídios técnicos para ações de recuperação ambiental, monitoramento contínuo e gestão sustentável desse importante ecossistema costeiro (Lamparelli, 2004; Maranhão *et al.*, 2017). Nesse contexto, a aplicação do IET associada à análise das variáveis limnológicas constitui uma abordagem robusta para compreender a

dinâmica ecológica da Lagoa da Jansen e orientar estratégias voltadas à conservação de seus recursos naturais.

Estudos Sobre a Lagoa da Jansen e Implicações para a Gestão Ambiental

A Lagoa da Jansen constitui um dos mais importantes ecossistemas costeiros urbanos do município de São Luís, Maranhão, apresentando elevada relevância ambiental, paisagística, social e econômica para a população local (Braz; Mello, 2006). Localizada em uma área intensamente urbanizada da capital maranhense, a lagoa desempenha funções ecológicas relacionadas à retenção de sedimentos, ciclagem de nutrientes, manutenção da biodiversidade e regulação hidrológica, além de representar importante espaço destinado ao lazer, turismo e práticas esportivas (Esteves; Amado, 2011). Entretanto, o intenso processo de ocupação urbana ocorrido nas últimas décadas modificou significativamente suas características naturais, comprometendo a qualidade da água e a estabilidade ecológica desse ambiente (Braz; Mello, 2006).

Historicamente, a Lagoa da Jansen apresentava estreita relação com os sistemas estuarinos da Baía de São Marcos, sofrendo influência direta da dinâmica das marés e da circulação das águas costeiras (Miranda; Castro; Kjerfve, 2012). Contudo, sucessivas intervenções antrópicas, incluindo aterros, obras de infraestrutura urbana, impermeabilização do entorno e alterações na drenagem natural, modificaram a conectividade hidrológica do sistema, reduzindo sua capacidade de renovação da água e favorecendo o acúmulo de sedimentos e nutrientes (Braz; Mello, 2006). Essas alterações intensificaram a vulnerabilidade da lagoa aos processos de degradação ambiental e eutrofização.

O crescimento populacional observado na área de influência da Lagoa da Jansen também contribuiu para o aumento da carga de poluentes lançados no ambiente aquático (Carpenter *et al.*, 1998). A deficiência histórica dos sistemas de coleta e tratamento de esgotos favoreceu o aporte contínuo de matéria orgânica, compostos nitrogenados, fósforo e resíduos sólidos, alterando significativamente as características físico-químicas da água (Le Moal *et al.*, 2019). Como consequência, observam-se elevadas concentrações de nutrientes, redução da transparência da água, alterações nas concentrações de oxigênio dissolvido e aumento da produtividade fitoplanctônica, características frequentemente associadas a ambientes eutrofizados (Smith; Schindler, 2009; Schindler, 2012).

Estudos limnológicos realizados na Lagoa da Jansen evidenciam que as variações sazonais exercem importante influência sobre os parâmetros físico-químicos da água (Maranhão *et al.*, 2017). Durante o período chuvoso, o aumento do escoamento superficial intensifica o transporte de sedimentos, matéria orgânica e nutrientes provenientes da bacia hidrográfica, promovendo alterações na turbidez, transparência, concentração de sólidos suspensos e disponibilidade de fósforo e nitrogênio (Esteves; Amado, 2011). No período de estiagem, por outro lado, a redução do aporte de água doce favorece o aumento da salinidade, da condutividade elétrica e do tempo de residência da água, influenciando diretamente a dinâmica limnológica do ecossistema (Miranda; Castro; Kjerfve, 2012).

A resposta da Lagoa da Jansen às alterações sazonais demonstra que esse ecossistema apresenta elevada sensibilidade às pressões ambientais impostas pela urbanização (Tundisi; Tundisi, 2011). A associação entre elevada disponibilidade de nutrientes,

temperaturas características de ambientes tropicais e reduzida renovação da água favorece o desenvolvimento de florações fitoplanctônicas, aumento da concentração de clorofila-*a* e redução dos níveis de oxigênio dissolvido, intensificando o processo de eutrofização (Paerl; Otten, 2013; Le Moal *et al.*, 2019).

Nesse contexto, a aplicação de índices limnológicos, como o Índice de Estado Trófico (IET), representa importante ferramenta para o acompanhamento da qualidade ambiental da Lagoa da Jansen (Lamparelli, 2004). O emprego desse indicador possibilita sintetizar informações provenientes de diferentes variáveis ambientais, permitindo avaliar o grau de enriquecimento nutricional e acompanhar a evolução temporal das condições ecológicas do ecossistema (Carlson, 1977). Além disso, o IET facilita a comparação entre diferentes campanhas de monitoramento e fornece subsídios técnicos para a tomada de decisões relacionadas ao gerenciamento ambiental (Fia *et al.*, 2009).

A utilização integrada de análises estatísticas multivariadas, como a Análise de Componentes Principais (PCA), complementa a interpretação dos dados limnológicos ao identificar padrões espaciais e temporais entre os pontos amostrais e as variáveis ambientais (Hammer *et al.*, 2001). Essa abordagem permite compreender os principais fatores responsáveis pelas alterações observadas na qualidade da água, favorecendo a identificação das áreas mais impactadas e subsidiando estratégias de monitoramento mais eficientes (Lamparelli, 2004).

A conservação da Lagoa da Jansen depende da implementação de ações integradas envolvendo planejamento urbano, saneamento básico, recuperação da vegetação ciliar, controle do lançamento de

efluentes domésticos e monitoramento contínuo da qualidade da água (Brasil, 1997; Brasil, 2005). Medidas voltadas à redução do aporte de nutrientes representam uma das estratégias mais eficientes para minimizar os processos de eutrofização e promover a recuperação gradual das condições ecológicas do ecossistema (Carpenter *et al.*, 1998; Schindler, 2012). Paralelamente, programas permanentes de educação ambiental podem contribuir para reduzir os impactos provocados pelas atividades humanas e estimular a participação da sociedade na conservação desse importante patrimônio ambiental.

Os resultados obtidos em estudos de monitoramento limnológico da Lagoa da Jansen fornecem informações essenciais para a gestão dos recursos hídricos e para o planejamento ambiental do município de São Luís (Tundisi; Tundisi, 2011). A integração entre indicadores limnológicos, análises estatísticas e índices de estado trófico permite compreender a dinâmica ecológica da lagoa, identificar tendências de degradação ambiental e subsidiar políticas públicas voltadas à recuperação da qualidade da água e à conservação dos ecossistemas costeiros urbanos (Lamparelli, 2004; Le Moal *et al.*, 2019).

Dessa forma, considerando a elevada vulnerabilidade da Lagoa da Jansen às pressões antrópicas, o monitoramento contínuo dos parâmetros limnológicos e do estado trófico constitui uma ferramenta indispensável para avaliar a efetividade das ações de gestão ambiental e garantir a conservação desse importante ecossistema costeiro. A utilização de metodologias padronizadas, como o Índice de Estado Trófico de Lamparelli, associada à análise integrada das variáveis físicas, químicas e biológicas da água, fornece uma base científica consistente para subsidiar estratégias de

recuperação ambiental e promover o uso sustentável dos recursos hídricos (Lamparelli, 2004; Fia *et al.*, 2009).

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de Estudo

O município de São Luís está inserido em uma região de clima tropical, classificado como Am segundo a tipologia de Köppen, caracterizado por apresentar um período chuvoso bem definido (de janeiro a junho) e um período seco (de julho a dezembro).

Figura 1. Mapa de Localização



Fonte: Dados da pesquisa (2022)

Coleta de Dados

A coleta de dados foi realizada no ano de 2021, contemplando dois períodos hidrológicos distintos da região de estudo: o período chuvoso, representado pelo mês de abril, e o período de estiagem, correspondente ao mês de dezembro. A avaliação em diferentes

períodos sazonais teve como finalidade verificar possíveis alterações nas características limnológicas da laguna decorrentes das variações ambientais associadas ao regime pluviométrico, como o aumento do escoamento superficial, aporte de nutrientes, diluição dos compostos dissolvidos e alterações na dinâmica da coluna d'água.

Foram definidos cinco pontos de amostragem distribuídos ao longo do espelho d'água da laguna (Figura 1), buscando representar diferentes condições ambientais do sistema aquático e possibilitar uma avaliação espacial das variáveis limnológicas analisadas. A distribuição dos pontos considerou a heterogeneidade do ambiente, permitindo a identificação de possíveis variações relacionadas às características físicas, químicas e biológicas da água.

Durante as campanhas de campo, foram realizadas medições in situ de parâmetros físicos e químicos da água. A profundidade da coluna d'água foi determinada com auxílio de prumo e fita métrica, sendo os valores registrados em metros (m). A transparência da água foi avaliada utilizando-se o disco de Secchi, método amplamente aplicado em estudos limnológicos para estimar a penetração da luz na coluna d'água e auxiliar na avaliação da disponibilidade de radiação para os processos fotossintéticos.

As variáveis físico-químicas da água foram determinadas diretamente em campo utilizando uma sonda multiparâmetros (YSI, modelo 556 MPS). Foram obtidos os valores de temperatura da água (°C), oxigênio dissolvido (mg L^{-1}), condutividade elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) e potencial hidrogeniônico (pH). Esses parâmetros foram selecionados por apresentarem influência direta sobre os processos ecológicos do ambiente aquático, estando relacionados à disponibilidade de nutrientes, metabolismo dos organismos aquáticos, solubilidade dos

gases e condições favoráveis ou limitantes ao desenvolvimento da comunidade fitoplanctônica.

Para as análises laboratoriais, foram coletadas amostras de água superficial em cada ponto de amostragem, totalizando um volume de 2 L por ponto. Após a coleta, as amostras foram acondicionadas em recipientes apropriados, armazenadas em caixa térmica sob condições refrigeradas e encaminhadas ao laboratório para realização das análises químicas e biológicas. O procedimento de transporte e armazenamento teve como objetivo preservar as características originais das amostras e minimizar possíveis alterações nas concentrações dos parâmetros analisados.

No laboratório, foram determinadas as concentrações de clorofila-a, nitrito (N-NO_2^-), nitrato (N-NO_3^-) e fósforo total (PT). A concentração de clorofila-a foi utilizada como indicador da biomassa fitoplanctônica e do nível de produtividade primária da laguna, sendo determinada conforme o método espectrofotométrico proposto por Lorenzen (1967). Para a extração dos pigmentos fotossintéticos, incluindo clorofila-a e feopigmentos, utilizou-se acetona a 90% como solvente extrator, seguida da determinação espectrofotométrica conforme metodologia descrita por Lorenzen (1967) e Wetzel e Likens (1991).

As formas nitrogenadas inorgânicas, representadas pelo nitrito (N-NO_2^-) e nitrato (N-NO_3^-), foram determinadas segundo os procedimentos analíticos descritos por (Mackereth *et al.*, 1978), enquanto a concentração de fósforo total (PT) foi obtida conforme a metodologia proposta por Valderrama (1981). A análise desses nutrientes permitiu avaliar a disponibilidade de compostos

essenciais para a produção primária e identificar possíveis alterações associadas ao enriquecimento nutricional do ambiente aquático.

Os dados obtidos durante as campanhas de campo e análises laboratoriais foram utilizados para caracterizar as condições ambientais da laguna, avaliar a influência da sazonalidade sobre os parâmetros limnológicos e subsidiar a interpretação do estado trófico do ecossistema estudado.

Análise de Dados

A avaliação do estado trófico da laguna foi realizada por meio do Índice de Estado Trófico (IET), seguindo a metodologia proposta por Lamparelli (2004). Esse índice foi utilizado como uma ferramenta integradora das condições ambientais do sistema aquático, permitindo avaliar o grau de enriquecimento por nutrientes, principalmente em relação às concentrações de fósforo total e clorofila-*a*, parâmetros diretamente associados à produtividade primária e aos processos de eutrofização.

Os valores obtidos para o IET foram classificados conforme as categorias estabelecidas por Lamparelli (2004), sendo definidos os seguintes níveis tróficos: ultraoligotrófico ($IET \leq 47$), caracterizado por ambientes com baixa disponibilidade de nutrientes e reduzida produtividade biológica; oligotrófico ($47 < IET \leq 52$), associado a baixos níveis de enriquecimento nutricional; mesotrófico ($52 < IET \leq 59$), representando ambientes com produtividade intermediária; eutrófico ($59 < IET \leq 63$), indicando maior disponibilidade de nutrientes e aumento da produtividade primária; supereutrófico ($63 < IET \leq 67$), relacionado a condições de elevada concentração de nutrientes; e hipereutrófico ($IET > 67$), correspondente a ambientes

altamente enriquecidos, com intenso processo de eutrofização e possíveis alterações na qualidade da água.

Para avaliar a relação entre os pontos de amostragem e as variáveis ambientais analisadas, foi aplicada a Análise de Componentes Principais (PCA), utilizando o software estatístico PAST (Hammer *et al.*, 2001). Essa análise multivariada foi empregada com o objetivo de reduzir a dimensionalidade do conjunto de dados e identificar os principais gradientes ambientais responsáveis pela variação das características limnológicas da laguna, permitindo verificar padrões de associação entre as variáveis físico-químicas e biológicas e os pontos amostrais avaliados.

Antes da realização da PCA, as variáveis limnológicas foram submetidas à padronização por transformação Z-score, procedimento utilizado para eliminar diferenças de escala e permitir a comparação entre variáveis com diferentes unidades de medida. Foram incluídas na análise as variáveis abióticas, como temperatura da água, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica, pH, transparência, profundidade e nutrientes, além das variáveis bióticas relacionadas à produtividade fitoplanctônica, como a concentração de clorofila-*a*.

Adicionalmente, foi aplicado o teste estatístico *t* de Student, com o objetivo de verificar a existência de diferenças significativas entre os períodos amostrais (chuvoso e estiagem) em relação às variáveis limnológicas analisadas. Esse teste permitiu avaliar se as alterações observadas entre as campanhas estavam associadas à sazonalidade ambiental ou se representavam variações naturais do sistema. O nível de significância adotado para as análises estatísticas foi de 5% ($p < 0,05$).

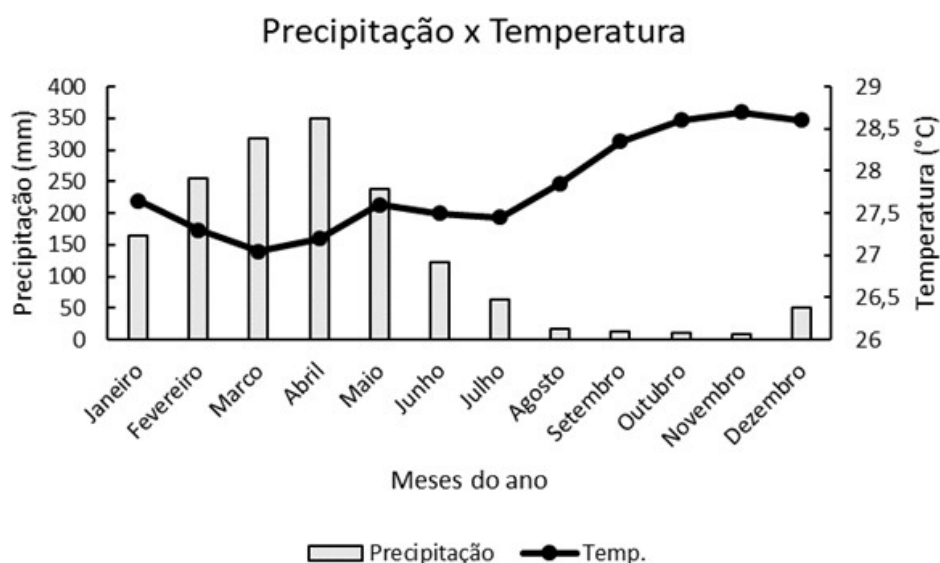
Dessa forma, a integração entre o Índice de Estado Trófico, a análise multivariada e os testes estatísticos possibilitou uma interpretação mais abrangente da dinâmica ambiental da laguna, permitindo identificar padrões de variação espacial e temporal, bem como avaliar possíveis processos associados ao enriquecimento nutricional e à alteração da qualidade da água.

RESULTADOS

O estudo contemplou dois períodos amostrais representativos da dinâmica climática da região de São Luís – Maranhão, correspondentes ao período chuvoso (abril) e ao período de estiagem (dezembro). A definição desses períodos permitiu avaliar a influência da sazonalidade sobre as características limnológicas da Lagoa da Jansen, considerando que as variações no regime pluviométrico e na temperatura atmosférica exercem influência direta sobre processos como diluição dos compostos dissolvidos, aporte de nutrientes, circulação da coluna d'água e disponibilidade de luz para a produção primária.

A Figura 2 apresenta a variação da precipitação pluviométrica e da temperatura registrada para a região durante o período avaliado. Observa-se que as condições meteorológicas apresentaram comportamento sazonal característico do clima tropical, com maior ocorrência de precipitação durante os meses que antecedem a campanha realizada no período chuvoso e redução significativa dos volumes pluviométricos durante o período de estiagem. Essas alterações climáticas são fatores determinantes para a dinâmica dos ambientes aquáticos costeiros urbanos, pois modificam o balanço hídrico, o tempo de residência da água e o transporte de materiais provenientes da bacia de drenagem.

Figura 2. Variação da precipitação e temperatura em São Luís – Maranhão



Fonte: Dados da pesquisa (2022)

A análise das condições meteorológicas é fundamental para a interpretação dos resultados limnológicos, uma vez que períodos com maior precipitação tendem a favorecer o carreamento de matéria orgânica, sedimentos e nutrientes para os corpos hídricos, enquanto períodos de menor disponibilidade hídrica podem favorecer a concentração de sais dissolvidos, aumento da condutividade elétrica e alterações na disponibilidade de nutrientes na coluna d'água.

Os valores mínimos, máximos, médios e respectivos desvios-padrão dos parâmetros físico-químicos avaliados na Lagoa da Jansen, incluindo temperatura da água, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica, pH, transparência e profundidade, estão apresentados na Tabela 1. A análise desses parâmetros possibilita compreender a variabilidade espacial e temporal das condições ambientais da laguna, bem como identificar possíveis alterações associadas às diferenças sazonais entre o período chuvoso e o período de estiagem.

Tabela 1. Resultados coletados

Parâmetros	Valor	Abril (chuvoso)	Dezembro (estiagem)	Teste T
Profundidade (m)	Média	1,18	1,18	p > 0,05
	Mínimo	1,35	1,35	
	Máximo	0,98	0,98	
	DP	0,15	0,15	
Transparência (m)	Média	0,91	0,84	p > 0,05
	Mínimo	1,05	1,02	
	Máximo	0,63	0,6	
	DP	0,16	0,2	
Temperatura da água (°C)	Média	31,1	31,24	p > 0,05
	Mínimo	31,52	32,1	
	Máximo	30,58	30,1	
	DP	0,38	0,8	
pH	Média	8,7	8,51	p > 0,05
	Mínimo	9,3	9,17	
	Máximo	7,24	7,9	
	DP	0,85	0,5	
Condutividade (mS.cm ⁻¹)	Média	24	44,42	p < 0,05
	Mínimo	24,5	45,8	
	Máximo	23,3	42,6	
	DP	0,57	1,5	

Oxigênio dissolvido (mg. L ⁻¹)	Média	4,34	4,8	p > 0,05
	Mínimo	5,5	6,12	
	Máximo	2,82	3,3	
	DP	1,02	1,1	
Turbidez (NTU)	Média	5,92	4,04	p > 0,05
	Mínimo	9	7,4	
	Máximo	3	2,5	
	DP	2,36	1,9	
TDS	Média	14,9	22,52	p > 0,05
	Mínimo	15,2	22,9	
	Máximo	14,5	21,8	
	DP	0,33	0,5	
Salinidade	Média	14,52	27,94	p > 0,05
	Mínimo	14,9	28,8	
	Máximo	14,1	26,8	
	DP	0,36	0,9	
Material ST (mg. L ⁻¹)	Média	44,63	37,12	p > 0,05
	Mínimo	55,2	42,5	
	Máximo	36,86	30,8	
	DP	7,72	5,4	
Material SI (mg. L ⁻¹)	Média	18,55	15,9	p > 0,05
	Mínimo	29,6	32,94	
	Máximo	8,29	5	

	DP	8,34	10,4	
Material SO (mg. L ⁻¹)	Média	26,08	21,23	p > 0,05
	Mínimo	32,33	32,5	
	Máximo	18,57	9,4	
	DP	5,06	9	
Nitrito (mg. L ⁻¹)	Média	0,61	0,68	p > 0,05
	Mínimo	0,77	0,99	
	Máximo	0,31	0,5	
	DP	0,21	0,3	
Nitrato (mg. L ⁻¹)	Média	11,82	20,1	p > 0,05
	Mínimo	18,4	22,9	
	Máximo	6,8	11,6	
	DP	4,81	4,8	
Fósforo Total (mg. L ⁻¹)	Média	1,74	1,42	p > 0,05
	Mínimo	2,3	1,8	
	Máximo	1	1,2	
	DP	0,63	0,3	
IET- Lamparelli	Média	76,84	73,08	p > 0,05
	Mínimo	77,67	74,28	
	Máximo	75,99	72,1	
	DP	0,61	0,9	

Fonte: Dados da pesquisa (2022)

A profundidade da coluna d'água da laguna apresentou baixa variação entre os períodos avaliados, oscilando entre 0,98 e 1,35 m durante as campanhas realizadas. A reduzida amplitude desse parâmetro evidencia a característica de um ambiente aquático raso, condição que pode favorecer maior interação entre a coluna d'água e o sedimento, influenciando processos como a ressuspensão de nutrientes e a dinâmica da produtividade primária. A transparência da água apresentou comportamento semelhante à profundidade, com valores médios ligeiramente superiores durante o período de estiagem (0,90 m) em comparação ao período chuvoso (0,83 m). Os maiores e menores valores de transparência foram registrados durante a estiagem, nos pontos 04 ST e 02 ST, respectivamente. Apesar das diferenças observadas entre os períodos, não foram identificadas diferenças estatisticamente significativas para profundidade e transparência (Tabela 1), indicando relativa estabilidade desses parâmetros ao longo do período estudado.

A temperatura superficial da água apresentou pequena variação espacial e temporal, mantendo valores relativamente constantes entre os pontos amostrados, com média de 31,17 °C. Esse comportamento é esperado para ambientes tropicais rasos, onde a elevada incidência de radiação solar contribui para o aquecimento homogêneo da coluna d'água. Temperaturas elevadas podem influenciar diretamente processos metabólicos dos organismos aquáticos, além de interferir na solubilidade do oxigênio dissolvido e na dinâmica dos processos biogeoquímicos.

O potencial hidrogeniônico (pH) apresentou comportamento predominantemente alcalino durante as campanhas de monitoramento. No período chuvoso, o maior valor foi registrado no ponto 04 CH (9,30), enquanto o menor valor ocorreu no ponto 05 CH

(7,24). Durante a estiagem, os valores variaram entre 7,86 (ponto 03 ST) e 9,17 (ponto 05 ST). A predominância de valores elevados de pH pode estar relacionada à intensa atividade fotossintética da comunidade fitoplanctônica, responsável pelo consumo de dióxido de carbono dissolvido e consequente aumento da alcalinidade da água. Esse comportamento também foi observado em estudos realizados em ambientes costeiros tropicais, que associam valores alcalinos à elevada produtividade primária e à influência de processos biológicos sobre a química da água.

A condutividade elétrica apresentou marcada variação sazonal, com aumento expressivo durante o período de estiagem. Na campanha chuvosa, os valores variaram entre 23,30 mS cm⁻¹ (ponto 01 CH) e 24,50 mS cm⁻¹ (pontos 03 CH e 05 CH). Durante a estiagem, foram observados valores superiores, variando entre 42,60 mS cm⁻¹ (ponto 04 ST) e 45,80 mS cm⁻¹ (ponto 01 ST). O aumento da condutividade no período seco está relacionado à menor entrada de água doce no sistema e à concentração dos íons dissolvidos devido à redução do volume hídrico, além da possível influência da conexão da laguna com ambientes estuarinos adjacentes.

Os valores de oxigênio dissolvido (OD) apresentaram variação entre os períodos amostrais, indicando diferenças na dinâmica metabólica do sistema. Durante o período chuvoso, as concentrações oscilaram entre 2,82 mg L⁻¹ (ponto 02 ST) e 5,50 mg L⁻¹ (ponto 05 CH). Na estiagem, os valores variaram de 4,10 mg L⁻¹ (ponto 03 ST) a 6,12 mg L⁻¹ (ponto 05 ST). A distribuição espacial observada demonstra a presença de heterogeneidade no corpo hídrico, possivelmente associada às diferenças locais na produção fotossintética, circulação da água e aporte de matéria orgânica.

A turbidez apresentou variações entre os períodos avaliados, indicando maior influência dos processos de transporte e ressuspensão de partículas no sistema. Durante a campanha chuvosa, os valores variaram de 3,00 UNT (ponto 02 CH) a 9,00 UNT (ponto 03 CH), enquanto na estiagem oscilaram entre 2,50 UNT (ponto 03 ST) e 7,40 UNT (ponto 05 ST). O aumento da turbidez observado no período chuvoso pode estar associado ao maior escoamento superficial e ao transporte de sedimentos e matéria orgânica provenientes da área de drenagem urbana.

A salinidade apresentou comportamento sazonal evidente, com maiores valores registrados durante o período de estiagem. Os valores máximos ocorreram nos pontos 01 ST e 05 ST (28,8), enquanto o menor valor foi observado no ponto 01 CH (14,1). Esse padrão indica maior influência marinha durante o período seco, quando a menor precipitação reduz a entrada de água continental e favorece a concentração de sais dissolvidos no sistema lagunar.

Os sólidos dissolvidos totais (SDT) também apresentaram variação entre os períodos analisados. Na campanha chuvosa, os valores oscilaram entre 36,86 mg L⁻¹ (ponto 05 CH) e 55,20 mg L⁻¹ (ponto 01 CH). Durante a estiagem, os valores variaram entre 30,77 mg L⁻¹ (ponto 02 ST) e 42,50 mg L⁻¹ (ponto 05 ST). A variação observada evidencia alterações na concentração de materiais dissolvidos associadas às mudanças hidrológicas sazonais.

As concentrações de sólidos orgânicos dissolvidos apresentaram elevada variabilidade espacial. No período chuvoso, os valores variaram entre 8,29 mg L⁻¹ (ponto 05 CH) e 29,60 mg L⁻¹ (ponto 01 CH). Durante a estiagem, as concentrações oscilaram entre 5,00 mg L⁻¹ (ponto 04 ST) e 32,94 mg L⁻¹ (ponto 03 ST). Essa variação pode

estar relacionada ao aporte de matéria orgânica proveniente de fontes antrópicas e à decomposição de material biológico dentro do sistema.

Os sólidos inorgânicos dissolvidos apresentaram comportamento semelhante entre os períodos avaliados. Na campanha chuvosa, os valores variaram entre 18,32 mg L⁻¹ (ponto 02 CH) e 32,33 mg L⁻¹ (ponto 04 CH), enquanto na estiagem oscilaram entre 9,41 mg L⁻¹ (ponto 03 ST) e 32,50 mg L⁻¹ (ponto 04 ST). A manutenção de valores elevados no ponto 04 entre os períodos sugere influência localizada de fontes permanentes de aporte de materiais dissolvidos.

As concentrações de nitrato (N-NO₃⁻) apresentaram diferenças entre os períodos sazonais. Durante a campanha chuvosa, os valores variaram entre 6,80 mg L⁻¹ (ponto 05 CH) e 18,40 mg L⁻¹ (ponto 04 CH). Na estiagem, observaram-se concentrações superiores e menor variação espacial, com valores entre 11,60 mg L⁻¹ (ponto 01 ST) e 22,90 mg L⁻¹ (ponto 05 ST). O aumento das concentrações durante o período seco pode estar associado à menor diluição da água e ao acúmulo de nutrientes no sistema.

O fósforo total (PT) apresentou concentrações elevadas nos dois períodos avaliados. Durante a campanha chuvosa, os valores variaram entre 1,00 mg L⁻¹ (ponto 05 CH) e 2,30 mg L⁻¹ (ponto 01 CH), enquanto na estiagem oscilaram entre 1,20 mg L⁻¹ (ponto 04 ST) e 1,80 mg L⁻¹ (ponto 05 ST). As elevadas concentrações de fósforo indicam significativo enriquecimento nutricional da laguna, podendo estar relacionadas ao lançamento de efluentes domésticos e ao aporte difuso proveniente da área urbana de influência.

A avaliação do Índice de Estado Trófico (IET), conforme a classificação proposta por Lamparelli (2004), indicou condições de elevado enriquecimento nutricional em todos os pontos amostrados. Durante o período chuvoso, os valores variaram entre 75,99 (ponto 05 CH) e 77,67 (ponto 01 CH), enquanto na estiagem os valores permaneceram elevados, variando entre 72,14 (ponto 04 ST) e 74,28 (ponto 05 ST). Dessa forma, a Lagoa da Jansen foi classificada como **hipereutrófica** em ambos os períodos avaliados.

A condição hipereutrófica observada evidencia o elevado grau de alteração ambiental do sistema, associado principalmente ao aporte contínuo de nutrientes, especialmente fósforo e nitrogênio, que favorecem o aumento da produtividade primária e podem contribuir para eventos de redução do oxigênio dissolvido e desequilíbrio ecológico. Esses resultados reforçam a necessidade de monitoramento contínuo e adoção de medidas de controle das fontes de nutrientes como estratégia para a recuperação da qualidade ambiental da laguna.

DISCUSSÃO

A análise integrada dos parâmetros limnológicos evidencia que a Lagoa da Jansen apresenta forte influência da sazonalidade climática e das pressões antrópicas decorrentes da ocupação urbana no seu entorno. As variações observadas entre o período chuvoso (abril) e o período de estiagem (dezembro) refletem alterações no balanço hídrico, na dinâmica de circulação da água, no aporte de nutrientes e nos processos biogeoquímicos que controlam a qualidade ambiental do sistema lagunar.

Os valores de profundidade apresentaram baixa variação entre os períodos avaliados, caracterizando a Lagoa da Jansen como um ambiente raso, condição comum em sistemas lagunares costeiros urbanos. Ambientes com pequena profundidade apresentam maior interação entre a coluna d'água e o sedimento, favorecendo processos como ressuspensão de partículas, liberação interna de nutrientes e alterações rápidas nas condições físico-químicas da água. A transparência apresentou comportamento semelhante à profundidade, com redução no período chuvoso, provavelmente associada ao maior aporte de materiais particulados provenientes do escoamento superficial urbano. O aumento da entrada de sedimentos e matéria orgânica durante eventos pluviométricos reduz a penetração da luz na coluna d'água, podendo interferir diretamente na produtividade fitoplanctônica e na dinâmica do ecossistema.

As concentrações de sólidos dissolvidos totais (SDT), sólidos orgânicos dissolvidos e sólidos inorgânicos dissolvidos permaneceram abaixo do limite máximo estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para corpos hídricos enquadrados nessa classe. Entretanto, apesar de os valores encontrados não indicarem comprometimento relacionado exclusivamente aos sólidos dissolvidos, sua presença está associada à dinâmica natural do ambiente estuarino e também ao aporte de materiais provenientes das áreas urbanizadas adjacentes. A Lagoa da Jansen apresenta características próprias de ambientes costeiros, com elevada produtividade natural e influência das trocas com águas salobras, porém o incremento de matéria orgânica decorrente do lançamento de efluentes domésticos contribui para a alteração do equilíbrio ecológico do sistema.

A temperatura da água apresentou pequena amplitude de variação entre os períodos avaliados, mantendo valores característicos de ambientes tropicais. A estabilidade térmica observada está relacionada às condições climáticas da região, marcada por elevada radiação solar e reduzida variação anual de temperatura. Esse comportamento exerce influência direta sobre processos metabólicos dos organismos aquáticos, uma vez que temperaturas elevadas favorecem maior atividade biológica e reduzem a solubilidade do oxigênio dissolvido na água, podendo intensificar condições de estresse ambiental quando associadas ao elevado aporte de matéria orgânica.

A condutividade elétrica apresentou comportamento sazonal evidente, com aumento expressivo durante o período de estiagem. Esse padrão está relacionado principalmente à redução da entrada de água doce no sistema e ao processo de concentração dos sais dissolvidos devido à evaporação elevada durante os meses secos. Além disso, a influência das águas costeiras sobre a laguna contribui para o aumento da concentração iônica, especialmente em períodos de menor precipitação. Segundo Alves (2016), ambientes costeiros submetidos a períodos de estiagem tendem a apresentar aumento da condutividade devido à maior concentração de íons dissolvidos na coluna d'água.

O pH apresentou comportamento predominantemente alcalino durante os dois períodos analisados. Valores elevados de pH em ambientes lagunares podem estar relacionados ao efeito tamponante proporcionado pelas trocas com águas marinhas, bem como pela intensa atividade fotossintética do fitoplâncton, que promove o consumo de dióxido de carbono dissolvido e elevação do pH da água. Embora a Resolução CONAMA nº 357/2005 estabeleça a

faixa de 6,0 a 9,0 para proteção da vida aquática, valores superiores podem ocorrer naturalmente em ambientes com elevada produtividade primária. Entretanto, a ocorrência frequente de valores alcalinos elevados também pode indicar intensa atividade fotossintética associada ao processo de eutrofização.

A salinidade apresentou forte variação sazonal, com aumento expressivo durante o período seco. Esse comportamento acompanha a variação da condutividade elétrica e demonstra a influência direta do regime pluviométrico sobre a dinâmica hidrológica da laguna. Durante o período chuvoso, o maior aporte de água continental promove diluição dos sais dissolvidos, reduzindo a salinidade. Em contrapartida, durante a estiagem, a menor contribuição pluvial associada à evaporação favorece a concentração salina. Esse padrão é característico de sistemas lagunares costeiros submetidos à alternância entre períodos de maior aporte continental e maior influência marinha.

As concentrações de oxigênio dissolvido apresentaram variações espaciais e temporais, evidenciando heterogeneidade dentro do sistema lagunar. Os maiores valores observados em determinados pontos podem estar associados à maior circulação da água e às trocas com o ambiente costeiro, favorecendo a renovação hídrica e a incorporação de oxigênio atmosférico. Entretanto, os menores valores registrados indicam a ocorrência de áreas submetidas a maior consumo de oxigênio, provavelmente relacionadas à decomposição da matéria orgânica acumulada no ambiente. A redução do oxigênio dissolvido constitui um dos principais efeitos associados ao processo de eutrofização, podendo comprometer a sobrevivência de organismos aquáticos.

A turbidez apresentou aumento durante o período chuvoso, comportamento esperado em função do maior transporte de sedimentos, matéria orgânica e partículas suspensas provenientes do escoamento superficial. Esse processo reduz a transparência da água e limita a disponibilidade de luz para os organismos fotossintetizantes. Durante a estiagem, a menor contribuição continental e a redução do transporte superficial favoreceram a diminuição da turbidez, indicando menor entrada de materiais particulados no sistema.

As concentrações de nutrientes nitrogenados evidenciaram forte alteração na qualidade da água da Lagoa da Jansen. Os valores elevados de nitrato e nitrito indicam aporte significativo de compostos nitrogenados, possivelmente associado ao lançamento contínuo de efluentes domésticos e à decomposição da matéria orgânica acumulada no ambiente. O nitrito, por ser um composto intermediário do processo de nitrificação, pode indicar intensa atividade microbiana relacionada à degradação de matéria orgânica. As concentrações observadas ultrapassaram os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005, evidenciando condição de enriquecimento nutricional acima dos padrões recomendados para manutenção da qualidade ambiental.

O fósforo total apresentou concentrações elevadas em ambos os períodos analisados, representando um dos principais indicadores do processo de eutrofização da laguna. Os valores encontrados foram superiores ao limite estabelecido pela legislação ambiental para águas salobras de Classe II, demonstrando a existência de aporte significativo desse nutriente no sistema. O fósforo é considerado um dos principais elementos limitantes da produtividade em ambientes aquáticos e seu aumento favorece a

proliferação excessiva de algas e cianobactérias, podendo ocasionar redução do oxigênio dissolvido e alterações na estrutura da comunidade aquática.

A classificação do Índice de Estado Trófico (IET), conforme metodologia proposta por Lamparelli (2004), indicou condição **hipereutrófica** em todos os pontos amostrados e períodos avaliados. Esse resultado confirma o elevado grau de enriquecimento nutricional da Lagoa da Jansen, associado principalmente às elevadas concentrações de fósforo total e clorofila-a. A condição hipereutrófica evidencia um estágio avançado de degradação ambiental, caracterizado pelo excesso de nutrientes, elevada produtividade primária e risco de ocorrência de processos como florações algais e redução da qualidade da água.

Dessa forma, os resultados demonstram que a Lagoa da Jansen apresenta um quadro ambiental influenciado tanto pelas características naturais de um sistema costeiro raso quanto pelas pressões antrópicas decorrentes da urbanização e do lançamento de cargas orgânicas. A predominância do estado hipereutrófico reforça a necessidade de ações integradas de gestão ambiental, incluindo melhoria dos sistemas de saneamento, controle do lançamento de efluentes, monitoramento contínuo da qualidade da água e medidas de recuperação ecológica do ecossistema lagunar

CONCLUSÃO

O presente estudo permitiu avaliar a qualidade da água da Lagoa da Jansen, localizada no município de São Luís – Maranhão, por meio da análise integrada de parâmetros físico-químicos, nutrientes e do Índice de Estado Trófico (IET). Os resultados evidenciaram que o

sistema lagunar apresenta significativa influência da sazonalidade climática, com alterações associadas aos períodos chuvoso e de estiagem, principalmente em parâmetros relacionados à salinidade, condutividade elétrica, turbidez e disponibilidade de nutrientes.

As variações observadas demonstram que, embora a dinâmica natural de um ambiente costeiro exerça influência sobre as características limnológicas da lagoa, as principais alterações ambientais estão relacionadas ao intenso processo de urbanização do entorno e ao aporte contínuo de cargas orgânicas provenientes de fontes antrópicas. Esses fatores contribuem diretamente para o enriquecimento nutricional do sistema, favorecendo a intensificação dos processos de eutrofização.

As concentrações de fósforo total, nitrato e nitrito apresentaram valores superiores aos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para águas salobras de Classe II, indicando comprometimento da qualidade ambiental do corpo hídrico. Além disso, os baixos valores de oxigênio dissolvido observados em determinados pontos evidenciam condições de estresse ambiental, podendo afetar a manutenção da biodiversidade aquática e o equilíbrio ecológico do sistema.

A aplicação do Índice de Estado Trófico (IET), conforme metodologia proposta por Lamparelli (2004), classificou a Lagoa da Jansen como hipereutrófica em todos os pontos amostrais e períodos avaliados, confirmando o elevado grau de enriquecimento por nutrientes e o avançado estágio de degradação ambiental do ecossistema. Esse cenário demonstra a necessidade de ações contínuas de monitoramento e gestão ambiental, com prioridade para medidas

voltadas à redução do lançamento de efluentes, ampliação da eficiência do saneamento básico e controle das fontes de nutrientes.

Dessa forma, conclui-se que a Lagoa da Jansen apresenta elevada vulnerabilidade ambiental, sendo essencial a implementação de estratégias integradas de recuperação e conservação, associando medidas de controle da poluição, planejamento urbano, educação ambiental e acompanhamento sistemático da qualidade da água. O monitoramento contínuo dos parâmetros limnológicos e do estado trófico constitui uma ferramenta fundamental para subsidiar políticas públicas e garantir a manutenção dos serviços ecossistêmicos proporcionados por esse importante ambiente costeiro urbano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, I. C. C.; EL-ROBRINI, M.; SANTOS, M. L. S.; MONTEIRO, S. M.; BARBOSA, L. P. F.; GUIMARÃES, J. T. F. Qualidade das águas superficiais e avaliação do estado trófico do Rio Arari (Ilha de Marajó, norte do Brasil). **Acta Amazonica**, v. 42, n. 1, p. 115-124, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672012000100014>.

ANGONESI, L. G.; BEMVENUTI, C. E.; GANDRA, M. S. Effects of dredged sediment disposal on the coastal marine macrobenthic assemblage in southern Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, v. 66, n. 2A, p. 413-420, 2006. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842006000300007>.

APHA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23. ed. Washington: American Public Health Association, 2017.

BAUMGARTEN, M. G. Z.; PAIXÃO, B. E. G. Uso do Índice do Estado Trófico para avaliar a qualidade das águas do estuário da Lagoa dos Patos (RS). **Atlântica**, Rio Grande, v. 35, n. 1, p. 5-22, 2013. <https://doi.org/10.5088/atlanti.v35i1.2646>.

BERTOSSI, A. P. A.; CECÍLIO, R. A.; NEVES, M. A.; GARCIA, G. O. Qualidade da água em microbacias hidrográficas com diferentes coberturas do solo no sul do Espírito Santo. **Revista Árvore**, v. 37, n. 1, p. 107-117, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000100012>.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. Brasília, DF: Diário Oficial da União, n. 53, p. 58-63, 18 mar. 2005.

BRASIL. **Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)**. Resolução nº 237, de 19 de dezembro de 1997. Dispõe sobre procedimentos e critérios utilizados no licenciamento ambiental. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 22 dez. 1997.

BRASIL. **Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)**. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 18 mar. 2005.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005**.

BRAZ, R. F.; MELLO, J. S. **Caracterização ambiental da Lagoa da Jansen, São Luís – Maranhão: aspectos físicos, químicos e biológicos.** São Luís: Universidade Federal do Maranhão, 2006.

BRAZ, V. M. N.; MELLO, V. A. A temporal study of water quality in the Guamá river (Belém-Pará). **Traços**, v. 6, p. 31-38, 2006.

BRAZ, V. N.; MELLO, J. A. G. *Ecosystemas costeiros e impactos ambientais*, 2006.

CARLSON, R. E. *A trophic state index for lakes.* **Limnology and Oceanography**, 22(2):361–369, 1977. DOI: <https://doi.org/10.4319/lm.1977.22.2.0361>.

CARMOUZE, J. P. **O metabolismo dos ecossistemas aquáticos: fundamentos teóricos, métodos de estudo e análises químicas.** São Paulo: Edgard Blücher/FAPESP, 1994. 254 p.

CARPENTER, S. R.; CARACO, N. F.; CORRELL, D. L.; HOWARTH, R. W.; SHARPLEY, A. N.; SMITH, V. H. **Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen.** *Ecological Applications*, v. 8, n. 3, p. 559-568, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1998\)008\[0559:NPOSWW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1998)008[0559:NPOSWW]2.0.CO;2).

CASTELAO, R. M.; JUNIOR, O. O. M. A modeling study of Patos Lagoon (Brazil) flow response to idealized wind and river discharge: dynamical analysis. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 54, n. 1, p. 1-17, 2006. <https://doi.org/10.1590/S1679-87592006000100001>.

CHAPMAN, D. *Water Quality Assessments*. 2. ed. London: Chapman & Hall, 1996.

COSTA, M. S.; MENDONÇA, R. S.; PEREIRA, S. M. B. Avaliação dos parâmetros físico-químicos e contaminação bacteriológica na Lagoa da Jansen, São Luís - MA. **Cadernos de Pesquisa**, São Luís, v. 10, n. 2, p. 45-53, 1999.

COSTANZA, R. et al. *Changes in the global value of ecosystem services*. **Global Environmental Change**, 2014. **DOI:** 10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002.

CUNHA, D. G. F.; CALIJURI, M. C.; LAMPARELLI, M. C. *A trophic state index for tropical/subtropical reservoirs (TSItsr)*. **Ecological Engineering**, v. 60, p. 126–134, 2013. **DOI:** <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.07.058>.

DAVIS, J. M.; ROSEMOND, A. D.; EGGERT, S. L.; CROSS, W. F.; WALLACE, J. B. Long-term nutrient enrichment decouples predator and prey production. **Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)**, v. 107, n. 1, p. 121-126, 2010. <https://doi.org/10.1073/pnas.0908497107>.

ESTEVEES, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998. 602 p.

ESTEVEES, F. A.; AMADO, A. M. **Fundamentos de limnologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011.

FIA, R.; MATOS, A. T.; CORADI, P. C.; PEREIRA-RAMIREZ, O. Estado trófico da água na bacia hidrográfica da Lagoa Mirim, RS, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 2, p. 131-137, 2009.

FIA, R.; MATOS, A. T.; CORADI, P. C.; RAMIREZ, O. P. Estado trófico da água na bacia hidrográfica da Lagoa Mirim, RS, Brasil. **Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 4, n. 1, p. 132-141, 2009. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.79>.

FREITAS, M. B.; BRILHANTE, O. M.; ALMEIDA, L. M. Importância da análise de água para a saúde pública em duas regiões do Estado do Rio de Janeiro: enfoque para coliformes fecais, nitrato e alumínio. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 17, n. 3, p. 651-660, 2001. <https://doi.org/10.1590/S0102-311X2001000300018>.

HAMMER, Ø.; HARPER, D. A. T.; RYAN, P. D. **PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis**. *Palaeontologia Electronica*, v. 4, n. 1, p. 1-9, 2001.

HASLER, A. D. Eutrophication of lakes by domestic drainage. **Ecology**, v. 28, n. 4, p. 383-395, 1947. <https://doi.org/10.2307/1931228>.

KENNISH, M. J. *Environmental threats and environmental future of estuaries*. **Environmental Conservation**, 2002. **DOI:** <https://doi.org/10.1017/S0376892902000218>.

KJERFVE, B. *Coastal Lagoon Processes*. Elsevier, 1994.

LAMPARELLI, M. C. **Graus de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento**. 2004. 191 f. Tese (Doutorado em Ecologia Aplicada) – Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. <https://doi.org/10.11606/T.41.2004.tde-20032006-075813>.

LAMPARELLI, M. C. **Graus de trofia em corpos d'água do Estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento**. São Paulo:

Universidade de São Paulo, 2004. 235 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo.

LE MOAL, M.; GÉRARD, F.; MAXIME, R.; et al. **Eutrophication: a new wine in an old bottle?** *Science of the Total Environment*, v. 651, p. 1-11, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.139>.

LOGAN, N. A. Survey of some early studies of the scattering of plane waves by a sphere. **Proceedings of the IEEE**, v. 53, n. 8, p. 773-785, 1965. <https://doi.org/10.1109/PROC.1965.4063>.

LORENZEN, C. J. Determination of chlorophyll and pheo-pigments: spectrophotometric equations. **Limnology and Oceanography**, v. 12, n. 2, p. 343-346, 1967. <https://doi.org/10.4319/lo.1967.12.2.0343>.

MACKERETH, F. J. H.; HERON, J.; TALLING, J. F. **Water analysis: some revised methods for limnologists**. Ambleside: Freshwater Biological Association, 1978. 120 p. (FBA Scientific Publication, n. 36).

MALUTTA, S.; KOBIYAMA, M.; FUERST, L. Análise da qualidade de água dos principais rios do município de Rio Negrinho (SC). **Ambiência**, v. 9, n. 1, p. 173-188, 2013. <https://doi.org/10.5777/ambiencia.2013.01.12>.

MARANHÃO, D. D. C. et al. 2017.

MARANHÃO, L. A.; BOTELHO, R. G.; NOGUEIRA, L. A.; TORNISIELO, V. L. Avaliação da qualidade da água do Ribeirão Samambaia (São Pedro, São Paulo, Brasil) através de parâmetros físicos e químicos, índice de estado trófico e teste de toxicidade com *Daphnia magna*. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 1, p. 195-201, 2017. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522016143977>.

MARANHÃO, R. A.; et al. Avaliação da qualidade da água e estado trófico da Lagoa da Jansen, São Luís – Maranhão. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, 2017.

MENDES, L. F. S.; ALMEIDA, J. R. S. Eutrofização induzida pelo homem e suas consequências dentro de um ecossistema aquático. **SABIOS: Revista de Saúde e Biologia**, v. 3, n. 1, p. 38-46, 2008.

MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; KJERFVE, B. **Princípios de oceanografia física de estuários**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2012.

MOTA, S. **Introdução à engenharia ambiental**. 4. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2006. 388 p.

PAERL, H. W.; OTTEN, T. G. *Harmful cyanobacterial blooms: causes, consequences, and controls*. **Microbial Ecology**, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00248-012-0159-y>.

POWER, M.; ATTRILL, M. J. Factors affecting long-term trends in the estuarine abundance of pogge (*Agonus cataphractus*). **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 54, n. 5, p. 941-949, 2002. <https://doi.org/10.1006/ecss.2001.0867>.

ROJAS, M. O. A. I.; COSTA, M. S. Avaliação físico-química da água da Laguna da Jansen, São Luís, MA. **Acta Tecnológica**, v. 8, n. 2, p. 19-24, 2013.

SCHINDLER, D. W. **The dilemma of controlling cultural eutrophication of lakes**. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 279, p. 4322-4333, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspb.2012.1032>.

SMITH, V. H.; SCHINDLER, D. W. **Eutrophication science: where do we go from here?** *Trends in Ecology & Evolution*, v. 24, n. 4, p. 201-207, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.11.009>.

TREVISAN, G. V.; JARDIM-LIMA, D. J. Relationship between water transparency and physical-chemical variables in lakes of the western Amazon, Brazil. **Acta Scientiarum. Biological Sciences**, v. 34, n. 1, p. 13-20, 2012. <https://doi.org/10.4025/actascibiolsci.v34i1.7371>.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. **Recursos hídricos no século XXI**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

UNESCO. *United Nations World Water Development Report 2024: Water for Prosperity and Peace*. Paris: UNESCO, 2024.

VALDERRAMA, J. C. The simultaneous determination of total nitrogen and total phosphorus in natural waters. **Marine Chemistry**, v. 10, n. 2, p. 109-122, 1981. [https://doi.org/10.1016/0304-4203\(81\)90027-X](https://doi.org/10.1016/0304-4203(81)90027-X).

VÖRÖSMARTY, C. J. et al. Global threats to human water security and river biodiversity. **Nature**, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature09440>.

WETZEL, R. G.; LIKENS, G. E. **Limnological Analyses**. 2. ed. New York: Springer-Verlag, 1991. 391 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-4098-1>.

World Water Assessment Programme (WWAP). *The United Nations World Water Development Report 2024*. UNESCO, 2024.