

Revisão descritiva: biossensores como potencial suporte no monitoramento e gestão da qualidade da água em ecossistemas aquáticos

Descriptive review: biosensors as potential support in monitoring and management of water quality in aquatic ecosystems

Revisión descriptiva: biosensores como potencial apoyo en el monitoreo y gestión de la calidad del agua en ecosistemas acuáticos

Moisés Hamssés Sales de Sousa

Doutorando em Biotecnologia e Biodiversidade

Instituição: Universidade Federal do Amapá

Endereço: Macapá – Amapá, Brasil

E-mail: moiseshamsses@yahoo.com.br

Ayla de Assunção Neris

Graduada em Matemática

Instituição: Faculdade Madre Tereza

Endereço: Santana – Amapá, Brasil

E-mail: ayla.33neris@gmail.com

Gleyce Carvalho Gomes

Mestre em Biodiversidade Tropical da Amazônia

Instituição: Universidade Federal do Amapá

Endereço: Macapá – Amapá, Brasil

E-mail: carvalho_gomes@yahoo.com.br

Alan Cavalcanti da Cunha

Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento

Instituição: Universidade de São Paulo

Endereço: São Paulo – São Paulo, Brasil

E-mail: ala.ahnacunh@unifap.br

RESUMO

O monitoramento de parâmetros físico-químicos e microbiológicos da água são realizados para se medir, avaliar e gerir as condições do estado de equilíbrio estático ou dinâmico natural em ecossistemas aquáticos. Este estudo consiste em identificar os fundamentos científicos das principais tendências de aplicabilidade tecnológica de monitoramento da qualidade da água (QA) com uso biossensores como instrumento de coleta de dados na gestão e conservação dos ecossistemas aquáticos. Na presente pesquisa o foco principal é descrever um panorama dos indicadores de QA. As informações são discriminadas por região e períodos de coletas, tópicos estratégicos e suas especificidades, abrangência de leitura, identificação de vantagens e limitações quanto ao nível de incerteza, robustez, acurácia. Na revisão descritiva, destacam-se os tipos de sensores mais utilizados em sistemas de monitoramento físico-químicos e microbiológicos de QA nos ecossistemas aquáticos aplicados ao bioma Amazônia. O

embasamento e o arcabouço teórico acerca dos diferentes temas seguiram um recorte geográfico das aplicações em nível tropical global, com destaque às condições ambientais da Amazônia brasileira. A revisão consistiu em consulta sistemática nas principais bases científicas de dados da web of science, scopus, scielo, google scholar, além de diversas as fontes de periódicos da literatura internacional e seu contexto geográfico-temporal. Os principais resultados da pesquisa sugerem uma tendência de crescimento da demanda para o uso das tecnologias e aplicabilidade dos biossensores no monitoramento *on line* e remotamente (telemetria). Contudo, corrobora-se a hipótese de escassez de estudos sobre esse tema na literatura. Além disso, as especificidades e demandas são potencialmente desconhecidas, em especial a necessidade de mais aprofundamento direcionadas à otimização funcional desses dispositivos, em especial, os biossensores.

Palavras-chave: base de dados, evolução de sensores, trópicos, lacunas de monitoramento, inovação tecnológica.

ABSTRACT

Monitoring of physicochemical and microbiological water parameters is conducted to measure, assess, and manage the conditions of static or dynamic natural equilibrium in aquatic ecosystems. This study aims to identify the scientific foundations of the main technological applicability trends in water quality (WQ) monitoring using biosensors as data collection instruments for the management and conservation of aquatic ecosystems. The primary focus of this research is to describe an overview of WQ indicators. The information is categorized by region and sampling periods, strategic topics and their specificities, reading scope, and identification of advantages and limitations regarding uncertainty levels, robustness, and accuracy. In the descriptive review, the most commonly used types of sensors in physicochemical and microbiological WQ monitoring systems applied to the Amazon biome are highlighted. The theoretical framework and scientific basis of the different themes followed a geographical scope of applications at the global tropical level, with emphasis on the environmental conditions of the Brazilian Amazon. The review consisted of a systematic consultation of major scientific databases such as Web of Science, Scopus, SciELO, Google Scholar, as well as various sources from international literature and its geographic-temporal context. The main findings of the research suggest a growing trend in the demand for technologies and applicability of biosensors in online and remote (telemetric) monitoring. However, the hypothesis of a scarcity of studies on this topic in the literature is corroborated. Furthermore, the specificities and demands are potentially unknown, particularly the need for further research aimed at the functional optimization of these devices, especially biosensors.

Keywords: database, sensor evolution, tropics, monitoring gaps, technological innovation.

RESUMEN

El monitoreo de parámetros físicoquímicos y microbiológicos del agua se realiza con el objetivo de medir, evaluar y gestionar las condiciones del estado de equilibrio natural, ya sea estático o dinámico, en los ecosistemas acuáticos. Este estudio consiste en identificar los fundamentos científicos de las principales tendencias de aplicabilidad tecnológica en el monitoreo de la calidad del agua (CA), mediante el uso de biosensores como instrumentos de recolección de datos para la gestión y conservación de los ecosistemas acuáticos. En la presente investigación, el enfoque principal es describir un panorama de los indicadores de CA. La información se discrimina por región y períodos de muestreo, temas estratégicos y sus especificidades, alcance de lectura,

identificación de ventajas y limitaciones en cuanto al nivel de incertidumbre, robustez y precisión. En la revisión descriptiva, se destacan los tipos de sensores más utilizados en sistemas de monitoreo fisicoquímico y microbiológico de CA en ecosistemas acuáticos aplicados al bioma amazónico. El fundamento y el marco teórico de los distintos temas siguieron un recorte geográfico de aplicaciones a nivel tropical global, con énfasis en las condiciones ambientales de la Amazonía brasileña. La revisión consistió en una consulta sistemática en las principales bases científicas de datos como Web of Science, Scopus, SciELO, Google Scholar, además de diversas fuentes de revistas de la literatura internacional y su contexto geográfico-temporal. Los principales resultados de la investigación sugieren una tendencia creciente en la demanda de tecnologías y aplicabilidad de biosensores para el monitoreo en línea y remoto (telemetría). No obstante, se corrobora la hipótesis de escasez de estudios sobre este tema en la literatura. Además, las especificidades y demandas son potencialmente desconocidas, en especial la necesidad de una mayor profundización orientada a la optimización funcional de estos dispositivos, en particular los biosensores.

Palabras clave: base de datos, evolución de sensores, trópicos, brechas de monitoreo, innovación tecnológica.

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento estratégico da qualidade da água, especialmente em ecossistemas aquáticos tropicais, geralmente tem sido pouco estudado, sendo também considerado inadequado, insipiente e frágil, não atendendo eficazmente aos seus diversos objetivos de gestão e gerenciamento. E esses óbices são muito evidentes especialmente na Amazônia. Todavia, todos os sistemas necessitam ou necessitarão do uso de sensores e biosensores cada vez mais sofisticados e modernos para cumprir com esta demanda (Brasil, 2021; Singh, R., *et al.*, 2020). E esse foco tem atraído cada vez mais a atenção de pesquisadores, sendo a principal razão a crescente demanda de dados como suporte à gestão, planejamento, gerenciamento e tomada de decisão em ambientes tropicais. Com efeito, frequentemente nestas regiões estão localizadas as demandas em localidades remotas e de difícil acesso para campanhas experimentais complexas e de alto custo (Gao, H. *et al.*; Valerio, A. M., *et al.*, 2017). Além disso, séries longas de dados superiores à uma década são as mais demandantes e necessárias, pois são capazes de identificar diferentes tipos de alterações ecológicas e até impactos ambientais nos ecossistemas aquáticos tropicais (Ramamany, S. *et al.*, 2005; Lee, K., *et al.*, 2021), sendo um dos paradigmas da ciência que trata do monitoramento sistêmico na Amazônia (Giardino, C., 2014; Estrela, P., 2016).

Por outro lado, a obtenção de séries de dados implica em aumentar a resolução especial de sítios de monitoramento em grandes áreas vazias e não monitoradas, sejam sensores meteorológicos, hidrológicos, hidrossedimentométricos ou de qualidade da água (Krkļeš, D. B., *et al*, 2023; Gupta & Rani, 2020). Entretanto, tal cenário não é somente devido ao elevado custo de aquisição de equipamentos, mas também dos procedimentos de manutenção preventivos e corretivos, envolvendo esforço logístico e técnico para resolução de problemas e gerenciamento ambiental *in situ*. Na Amazônia Legal, por exemplo, este tem sido um fator histórico limitante, reduzindo sobremaneira a capacidade de observação de superfície ou através de uma rede integrada de observação (Inpe, 2020; Cprm, 2019).

A dimensão do desafio de monitoramento nos ecossistemas aquáticos tropicais brasileiros é imensa. Por exemplo, há cerca de 7.367 km de extensão da linha costeira voltada para o Atlântico, que se ampliam para mais de 8.500 km se forem considerados os recortes litorâneos, a qual abriga uma diversidade de ecossistemas de alta relevância ambiental, alternando mangues, restingas, campos de dunas, estuários, recifes, entre outros ecossistemas (Alfredini e Arasaki, 2009).

Os impactos ambientais comumente observados, somam-se aqueles agravados pelos efeitos das mudanças climáticas, poluição, construção de barragens, elevação do nível do mar, avanço de águas salobras e salgadas em estuários, variação da concentração de hidrossedimentos, dispersão de propágulos, nutrientes e micro e nanoplásticos são alguns dos mais preocupantes (Sousa *et al.*, 2024; Medeiros *et al*, 2024, v.72). Além disso, tais impactos são geralmente mal compreendidos ou têm sua abrangência e magnitude mal interpretada ou limitada pela falta de dados de monitoramento em superfície. As Plataformas Automáticas de Coleta de Dados (PCDs) (Cunha, *et al.*, 2010) seriam excelentes soluções tecnológicas para o monitoramento da qualidade da água trazendo consigo uma iminente necessidade de elevados investimentos em infraestrutura e manutenção preventiva e corretiva.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Na Amazônia, a resolução da escala regional de monitoramento é deficiente e mais grave em comparação às demais regiões brasileiras. No presente caso, o Brasil detém uma das maiores redes fluviais do mundo, com cerca de 20.000 km em condições de navegação, sendo a malha

navegável total de aproximadamente 50.000 km, destacando-se as hidroviás dos rios Madeira-Amazonas, Araguaia-Tocantins, Paraguai-Paraná e Tietê-Paraná (Alfredini e Araski, 2009). Então, se considerados apenas os potenciais impactos da navegação (hidroviás), os desafios já seriam enormes.

Mas há diversos parâmetros resultantes da demanda de impactos ambientais nos ecossistemas aquáticos tropicais, e que precisam ser monitorados, visando a conservação de ecossistemas e gestão ambiental: a) desmatamento e perdas de habitats, b) mudanças das superfícies hídricas e saneamento, c) agropecuária, d) hidrelétrica, e) mineração (incluindo-se a sondagem e exploração de petróleo e gás), f) silvicultura, g) urbanização e h) mudança do clima e enfrentamento de eventos extremos entre outros. Assim, além da importância dos indicadores físico-químicos nos ecossistemas aquáticos, tem emergido a inequívoca demanda por novos bioindicadores, sobre os quais os biossensores de baixo custo e fácil instalação em campo, e que também sejam adaptáveis, flexíveis operacionalmente e que apresentem robustez frente às condições tropicais adversas (logística, climáticas, umidade, intempéries, etc).

Nos sistemas de monitoramento destacamos os parâmetros mais relevantes utilizados para monitorar os ecossistemas aquáticos apontando, por exemplo, a biomassa fitoplanktônica na produção primária aquática como a base da estrutura da cadeia alimentar. Dentre os mais relevantes parâmetros para o monitoramento são incluídos: a clorofila-a, monitorada por sensores remotos ópticos - satélites (Kirk, 2011; Matthews, 2011), a concentração de nutrientes (Smith *et al.*, 1999), compostos orgânicos (macromoléculas) (Hedges & Oades, 1997), demanda química de oxigênio (DQO) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO) (Wetzel, R. G., 2001), fluxo de nutrientes (Schlesinger & Bernhardt, 2013), fluxos de CO₂ e CH₄ (De Araújo *et al.*, 2024) (entre outros que fundamentam o gerenciamento da qualidade da água (Unesco, 2010), biogeoquímica (Battin *et al.*, 2009), estudos de impactos ambientais (Gunkel *et al.*, 2003), e a sustentação das cadeias alimentares (Peterson *et al.*, 1985).

Neste contexto, o monitoramento da qualidade da água em reservatórios, por exemplo, tem sido fundamental para gerenciar a qualidade da água e os fluxos de gases de efeito estufa – GEE (De Araújo *et al.*, 2024; Bertolassi Jr. *et al.*, 2021), com o objetivo de apoiar tomadas de decisão e implementar intervenções de mitigação de impactos ambientais, tanto em reservatórios quanto em suas áreas diretamente afetadas (Agostinho *et al.*, 2008; Dos Santos *et al.*, 2018), sendo . Assim, o monitoramento é essencial no gerenciamento ambiental estratégico (Tundisi &

Matsumura-Tundisi, 2008), facilitando a análise de problemas emergentes associados à variação da qualidade da água com o propósito de atender aos seus múltiplos objetivos e usos. E um dos diferenciais de sua importância em escala geográfico-temporal decorrem de fatores externos aos ecossistemas, como a influência dos impactos das mudanças climáticas sobre os regimes hidrológicos e umidade do solo e do ar na Amazônia (Fearnside, 2015; Bertalossi Jr, 2021).

2.1 VISÃO GERAL DOS TIPOS DE PARÂMETROS DINÂMICOS NA QA

Os parâmetros mais comuns observados com os sistemas de monitoramento da qualidade da água em corpos naturais são: pH, turbidez, oxigênio dissolvido (ou de saturação – OD ou ODSat), condutividade elétrica (CE), sólidos dissolvidos totais (SDT), cor real e aparente, matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM), material suspenso total (MST), profundidade do disco de Secchi (SDD), fósforo total (TP), íons-amônia (NH_4), nitrito (NO_2), nitrato (NO_3) e clorofila-a (Chl-a) (Matthews, 2011).

Conforme comentado anteriormente, o Brasil, possui a maior rede hidrográfica tropical do mundo, sendo os ecossistemas aquáticos (fluviais, lacustres permanentes ou temporários) de grande representatividade dentre os ecossistemas brasileiros (Unesco, 2010), incluindo-se a imensa extensão costeira, onde ocorrem as maiores extensões de florestas contínuas de mangue do planeta (Amapá, Pará e Maranhão) (Kjerfve & Lacerda, 1993; Alfredini e Araski, 2009). Todavia, toda sua extensão e potencialidades têm sido pouco ou mal monitoradas.

As rápidas mudanças atuais dos ecossistemas aquáticos (mais vulneráveis) em detrimento das terrestres (menos vulneráveis comparativamente), têm sido causadas por diversos impactos ambientais ao redor do mundo. Cerca de 80% dos rios ao redor do mundo já foram represados por algum tipo de empreendimento, sendo que na Amazônia há projetos para pelo menos uma centena de novos empreendimentos hidrelétricos (Silva *et al.*, 2020).

Os biossensores vem sendo aplicados cada vez mais para monitorar ecossistemas aquáticos, no que tange a detecção instantânea de determinados parâmetros como: pH, OD, condutividade elétrica, clorofila-a, hidrológicos, etc. bem como em processos de calibração e validação dos biossensores remotos como satélites ambientais (Feng *et al.*, 2019; Montanari *et al.*, 2025). Algumas referências aplicadas na região quanto ao nível d'água superficial e freático têm sido destacadas (Alsdorf *et al.*, 2000; Belúcio *et al.*, 2025; Alfredini e Arasaki, 2009),

frequência e intensidade de ondas, batimetria e intensidade, direção das correntes fluviais e marítimas (Smith *et al.*, 2019; Schlesinger & Bernhardt, 2013; Tundisi & Matsumura-Tundisi, 2008; Battin *et al.*, 2009), QA em zonas costeiro-estuarinas (Cunha e Sternberg, 2018).

Os sensores são basicamente utilizados para detectar mudanças físicas, químicas e biológicas em ambientes naturais ou artificiais, convertendo essas variações em sinais elétricos, como o de tensão, corrente ou frequência elétrica. Entre os tipos mais comuns, destacam-se os sensores físicos e químicos (Arora, P., *et al.*, 2022), amplamente empregados para monitorar parâmetros ambientais e alguns especificamente na detecção de agentes químicos e biológicos tóxicos, incluindo os de interesse bélico (Bard, A.J., & Faulkner, L.R., 2001). Sensores acústicos são amplamente utilizados, nas aplicações subaquáticas, como mapeamento do fundo oceânico, monitoramento de ruído antropogênico e identificação de organismos com base em emissões sonoras (Cunha *et al.*, 2020; Abreu *et al.*, 2020, 2021 e 2024).

No que tange os sensores físicos observou-se a utilização em medições de diferentes parâmetros como temperatura (Demetillo *et al.*, 2019), umidade, pressão, velocidade e direção do vento. Os Sensores químicos são usados para medir parâmetros como salinidade, turbidez, pH (Demetillo *et al.*, 2019; Ahn, Y.-H. *et al.*, 2006), NO₃, OD (Demetillo *et al.*, 2019; Ahn, Y.-H. *et al.*, 2006), microplástico (F. Glaviano *et al.*, 2022), e biológicos como as algas e coliformes termotolerantes totais (CT) e *Echerichia Coli* (*E. coli*). Ao definir que tipo de sensor utilizar em ambientes aquáticos deve-se levar em conta preferencialmente os requisitos da área de implantação e sazonalidade anual (ou fase de marés em canais, estuários, oceanos, etc), faixa de medição, frequência de aquisição, precisão, resolução e consumo de energia (ABNT, 2004).

Um aspecto que exerce influencia na distribuição de diversos parâmetros da qualidade da água é claramente a sazonalidade em diferentes regiões ao redor do planeta. Por exemplo, além da clorofila-a, que apresenta incrementos associados às variações sazonais (Matthews, 2011; Montanari *et al.*, 2025), parâmetros como macromoléculas orgânicas (como carboidratos e proteínas dissolvidas) (Ward *et al.*, 2013), toxinas (como as microcistinas produzidas por cianobactérias) (Chorus & Bartram, 1999; Oliveira *et al.*, 2019), e metais pesados (como Hg, Cd e Pb) também têm sido monitorados devido à sua relevância para a saúde pública e saúde ambiental (Fernández *et al.*, 2013).

Entretanto, a expansão de sistemas para o monitoramento de múltiplos parâmetros físicos, químicos e biológicos permite uma visão mais integrada e estratégica, contudo de maior

complexidade e onerosa, apesar de contribuir mais efetivamente para o desenvolvimento de mecanismos mais abrangentes na gestão e conservação de recursos hídricos e ecossistemas aquáticos. Um dos principais fatores que limitam o seu uso disseminado são os custos comerciais para se adquirir equipamentos bem como o envio dos dados de coleta via telemetria e manutenção preventiva ou corretiva (Cunha *et al.*, 2010).

Um dado relevante, da década de oitenta (1984) foi o fato da Usepa (2021) ter estabelecido o uso de organismos para fins de monitoramento da qualidade da água, o chamado “Monitoramento Biológico” ou tecnicamente utilizado como “Biomonitoramento” (Barata *et al.*, 2000). Mas, ao mesmo tempo, a Organização para Cooperação Econômica e Desenvolvimento (OECD), na Europa, lançava uma série de protocolos de testes com organismos aquáticos, como algas, microcrustáceos e peixes (Oecd, 2004; Oecd 2016; Oecd, 2018).

Vale destacar que, a partir de 1975, foram desenvolvidos e adaptados vários métodos de ensaios de toxicidade aguda e crônica, de curta duração, utilizando alguns grupos e espécies de organismos, dentre os quais se destacam as algas (Bogue, R. (2017); Brezonik, *et tal.*, 2005), microcrustaceos (Boukhrissa, *et al.*, 2013; Brezonik, *et tal.*, 2005) e peixes de águas continentais e marinhas, além de testes com hidrossedimentos (Brezonik, *et tal.*, 2005). Estes são fatores críticos para a sobrevivência e saúde dos organismos aquáticos, com a supervisão dos parâmetros é possível a detecção precoce de alterações ou impactos negativos sobretudo desequilíbrios ambientais (Depledge *et al.*, 1996). No Quadro 1 abaixo, são discriminados os principais parâmetros da qualidade da água normalmente monitorados por biossensores.

Quadro 1: Descrição dos parâmetros mais comuns da qualidade da água, unidade das medidas físicas, químicas e biológicas, e detalhamento da tipologia (convencional ou remota) e biomarcadores.

Parâmetros Qualidade da Água	Unida de Medid a	Sensoriamento Convencionais	Sensoriamento Remoto	Biomarcadores	Referenci as
Temperatura	°C	Termômetros digitais e sensores de sondagem	Satélites óptico- térmicos, drones	Não se aplica	Wetzel (2001)
Oxigênio Dissolvido	mg/L	Sensores eletroquímicos	Algoritmos baseados em cor e reflectância	Atividade metabólica de microrganismos	Matthews e Odermatt (2015)
pH	Sem unida de	Eletrodos de vidro	Não aplicável	Alteração no metabolismo do fitoplâncton	OMS (2022)

Turbidez	NTU	Turbidímetros	Satélites ópticos e drones	Não se aplica	Gholizadeh <i>et al.</i> (2016)
Clorofila-a	µg/L	Fluorímetros	Satélites e drones multiespectrais	Pigmentação de fitoplâncton	Gholizadeh e outros (2016)
Condutividade Elétrica	mg/L	Condutivímetros	Não aplicável	Não se aplica	APHA (2005)
Carbono Orgânico Total	mg/L	Análises laboratoriais	Estimativas com CDOM	Indicadores bioquímicos em águas ricas em material orgânico	Gholizadeh e outros (2016)
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	mg/L	Análises laboratoriais	Não aplicável	Decomposição de matéria orgânica	USEPA (2021)
Nitrogênio Total	mg/L	Análises químicas	Estimativas a partir de índices ópticos	Alterações em comunidades de microrganismos	USEPA (2021)
Fósforo Total	mg/L	Análises químicas	Não aplicável	Concentração em biomarcadores vegetais	Wetzel (2001)

Fonte: Dados da pesquisa (2025)

Atualmente, em áreas portuárias brasileiras localizadas na zona costeira do estado do Maranhão, inclusive como parte da Amazônia Legal (Costa *et al.*, 2018), tem sido extremamente eficaz utilizar os biomarcadores com uso de inteligência artificial para o monitoramento de impactos ambientais. Nesse caso, o monitoramento ambiental nessas regiões requer as melhores tecnologias disponíveis no mercado, para que se possa coletar um maior número de informações geradas, o que tende paradoxalmente a dificultar a coleta dos dados e a análise feita por gestores ambientais, inclusive restringindo e limitando seu espectro de aplicação (Silva *et al.*, 2020). Por exemplo, glutathione, S-transferase, catalase, lesões hepáticas e brânquias em peixes são biomarcadores amplamente utilizados (Depledge *et al.*, 1996).

Outro parâmetro relevante é a escolha de biomarcadores que podem ser utilizados, diversos estudos na literatura apontam para os seguintes critérios: a) especificidade, onde o biomarcador demonstre o efeito específico de um determinado contaminante no funcionamento de um determinado órgão/alvo ou de estrutura vital; b) fácil reprodutibilidade, tendo uma metodologia e logística acessível a diferentes grupos de pesquisa; c) clareza na interpretação dos resultados, de acordo com o tipo de exposição aos contaminantes sobre as respostas e oscilações fisiológicas normais de cada espécie sob análise (Cajaraville *et al.*, 2000).

2.1.1 Monitoramento da qualidade da água por sensoramento remoto

O uso inadequado dos corpos d'água frequentemente resulta de descargas de efluentes domésticos, resíduos industriais, pesticidas, metais pesados, nutrientes, microrganismos e sedimentos, afetando significativamente a qualidade da água e a biodiversidade aquática (Jones & Roberts, 2019). Métodos convencionais de monitoramento, como coletas manuais e análises laboratoriais, embora eficazes, apresentam limitações relacionadas ao custo, tempo de resposta e cobertura espacial reduzida (Smith *et al.*, 2020).

Apesar de suas vantagens, o uso do sensoramento remoto ainda enfrenta desafios, como a necessidade de calibração com dados *in situ* e limitações em ambientes com alta carga de matéria orgânica particulada, que podem interferir na precisão das medições.

2.1.1.1 Sensores

Dentre as diferentes aplicações de sensores em ecossistemas aquáticos, será enfatizado os temas abordados mais frequentemente na literatura. Destacamos os sensores e biosensores em sistemas de monitoramento com o uso da Internet das Coisas (IoT), aprofundando alguns estudos de caso como em reservatórios de usinas hidrelétricas de ecossistemas tropicais. Assim, o monitoramento remoto inteligente de parâmetros da qualidade da água serão especialmente tratados, com destaque ao uso de telemetria e sensoramento remoto por satélite (Campos *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2019).

a) INTERNET DAS COISAS (IoT)

O desenvolvimento de sistemas com IoT para o monitoramento da qualidade da água tem se diversificado em todo o mundo. Nos estudos do rio Krishna, localizado na costa leste da Índia, nas montanhas de Mahabaleshwar e foz no Golfo de Bengala, o monitoramento é realizado em tempo real, usando diferentes parâmetros como pH, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido, temperatura, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), sólidos totais dissolvidos e condutividade elétrica (Rao *et al.*, 2020). Os dados foram coletados em seis locais diferentes do rio Krishna devido ao aumento de resíduos industriais como cascalho, resíduos de construção civil (RCC) (Patel *et al.*, 2019), sucatas metálicas (Sharma K., *et al.*, 2023), resíduos sólidos domésticos (Gupta & Rani, 2020), óleo (Singh *et al.*, 2020), produtos químicos (Yadav & Kumar, 2021),

efluentes e sólidos em suspensão (Verma *et al.*, 2020) e matérias orgânicas (Patel & Kumar, 2017) presentes ao longo do corpo d'água.

Neste caso, nas coletas nos seis locais diferentes do rio Krishna, foram utilizados dispositivos e sensores conectados a um microcontrolador Arduino Mega 2560 para o gerenciamento da coleta dos parâmetros de qualidade da água listados no Quadro 1. Temos que o Arduino Mega 2560, baseado no ATmega2560, é amplamente utilizado devido a sua dinâmica capacidade de integrar múltiplos tipos sensores, sendo equipado com 54 pinos de entrada/saída digital (incluindo 14 para saídas PWM), 16 entradas analógicas e suporte a comunicação serial com 4 UARTs. Este microcontrolador possibilitou o monitoramento contínuo de variáveis essenciais, como temperatura (T), clorofila-a (Chla-a), turbidez (TUR) e matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM). Algumas destas substâncias possuem atividades ópticas de alta relevância para a análise da qualidade da água, especialmente em ambientes aquáticos tropicais (Valério *et al.*, 2018; Montanari *et al.*, 2025).

Esse tipo de abordagem integrada destaca-se por sua capacidade de monitorar comumente uma ampla gama de parâmetros, como os contidos no Quadro 1. Estas tecnologias são acessíveis e apresentam conectividade avançada, alinhando-se à necessidade de gestão eficaz e monitoramento contínuo de corpos d'água impactados ou não por atividades humanas.

Para avaliar a eficiência do sistema, foram levantados aspectos tais como: estabilidade do sensor de nível utilizado em condições ambientais adversas — incluindo água turbulenta, elevada turbidez, fluxos variáveis da água e acréscimos de água devido às chuvas —, o consumo de energia elétrica do sistema, a eficiência na transmissão de dados e a exibição das informações via web. Esses resultados demonstram a eficabilidade do sistema para aplicações práticas em diferentes ecossistemas aquáticos, especialmente em regiões de difícil acesso.

Visando ampliar a análise e oferecer uma visão comparativa deste tipo de aplicação, no Quadro 2 observa-se sucintamente os principais estudos de caso relacionados a sistemas de monitoramento da qualidade da água. Destacam-se suas aplicações, parâmetros monitorados, tecnologias desenvolvidas em diferentes regiões do mundo, incluindo recortes específicos de ecossistemas tropicais.

Quadro 2 - Estudos de caso sobre sistemas de monitoramento da qualidade da água por região, aplicações, tecnologias e referências.

Local	País/Região	Aplicações Principais	Parâmetros Monitorados	Tecnologias Utilizadas	Referências
Rio Krishna	Índia	Monitoramento de impactos industriais	pH, temperatura, oxigênio dissolvido, sólidos totais, turbidez	IoT com Arduino e sensores múltiplos	Guntupalli et al., 2019; Shashi & Kumar, 2020
Zona Costeira do Maranhão	Brasil	Gestão ambiental portuária	Clorofila-a, condutividade, fósforo total, turbidez	Biossensores e inteligência artificial	Oliveira et al., 2020; Santos et al., 2021
Amazônia Central	Brasil	Avaliação de impacto de hidrelétricas	Carbono orgânico total, nitrogênio amoniacal, temperatura	Sensores óticos e acústicos	Valerio et al., 2021; Kampel et al., 2019
Lagos na Tanzânia	África	Controle da prevenção de algas nocivas	Clorofila-a, demanda bioquímica de oxigênio, turbidez	Monitoramento remoto via satélite	Mwita et al., 2020; Johnson et al., 2019
Lago Erie	EUA	Mitigação de poluição por nutrientes agrícolas	Fósforo total, orto-fósforo, sólidos suspensos totais	Telemetria e sensores aquáticos	Smith et al., 2017; Goldberg et al., 2022

Fonte: Dados da pesquisa (2025)

b) SENSORIAMENTO REMOTO

O sensoriamento remoto aplicado na análise da qualidade da água tem sido amplamente difundido e suas diversas possibilidades em face as demandas que surgirem no que tange a qualidade da água são corroborados para desenvolver cada vez mais sistemas eficientes sobretudo eficazes, melhorando os níveis de precisão, resposta dinâmica, acesso remoto para gestão *on line*, armazenamento de dados e históricos para leitura das tendências.

Uma das aplicações desses sistemas de monitoramento é o de captação através da observação do espectro eletromagnético (radiação, reflexão e dispersão) emitida a partir desse espectro para se obter o diagnóstico da cor da água ou líquido em analogia. Neste caso, ocorre a variação da concentração de componentes opticamente ativos como a clorofila-a da camada superior do corpo d'água e que pode ser analisada via algoritmo específico (Valério *et al* 2018; Montanari *et al.*, 2025). O sensoriamento remoto pode ser realizado principalmente via satélite ou através de veículos aéreos não tripulados para escalas maiores ou grandes regiões geográficas.

Métodos de sensoriamento remoto via satélite utilizam sensores ópticos/térmicos e de micro-ondas ativos e passivos presentes em grandes satélites (Valerio *et al.*, 2021; Valerio *et al.*, 2018). Estes métodos são considerados mais eficientes e com custo acrescido de logística para medir *in situ* bem menor ao se comparar com outros métodos, pois permitem a visualização de grandes corpos d'água com alta cobertura global e acurácia, o que fisicamente não seria possível por meio de medições *in situ* (Valerio *et al.*, 2021; Montanari *et al.*, 2025).

Como alternativa, surge o desenvolvimento de equipamentos aéreos não tripulados, como drones equipados com câmeras multiespectrais, oferecendo imagens mais nítidas e de alta resolução, com análises mais detalhadas em áreas específicas (Silva *et al.*, 2020). O processamento digital das imagens coletadas através de ambos os métodos permite a recuperação de informações sobre diversos parâmetros de qualidade da água, aplicando uma ampla gama de algoritmos e técnicas computacionais disponíveis para esse fim (Valerio *et al.*, 2018; Kampel *et al.*, 2016).

c) PRINCIPAIS PARÂMETROS NA QUALIDADE DA ÁGUA

Esses parâmetros são essenciais para monitorar a qualidade da água e com isto de forma ampla se obter as perspectivas sobre o status da água, a fim de analisar a conformidade com a legislação e a partir desta referência obter diagnósticos. Além disso, os parâmetros são fundamentados nas normas vigentes e legislações que definem as diretrizes, com destaque a Resolução CONAMA 357/2005 e suas atualizações no Brasil, e os padrões estabelecidos pela Environmental Protection Agency (EPA 2023) dos Estados Unidos.

Além disso, destaca-se também a relevância de normas internacionais, como as diretrizes europeias e asiáticas, para oferecer um panorama comparativo e global. A avaliação de tais parâmetros contidos nas normas permite compreender a influência de fatores externos sobre as diferentes demandas da qualidade da água, sobretudo na dinâmica ecológica dos ecossistemas aquáticos, garantindo maior precisão e consistência nos processos de monitoramento. No Quadro 3 são apresentados os principais parâmetros utilizados para a medição da qualidade da água, com foco em reservatórios de barragens em usinas hidrelétricas.

Quadro 3: Principais Parâmetros de Qualidade da Água em Reservatório de Barragens

Parâmetro	Valor de Referência	Descrição/Aplicação	Referências
Temperatura	20–30°C	Influencia a solubilidade de gases e a atividade biológica.	WMO (2018); Wetzel (2001)
Oxigênio Dissolvido (OD)	≥ 5 mg/L	Indicador de saúde dos ecossistemas aquáticos; essencial para organismos aquáticos aeróbicos.	APHA (2017); USEPA (2021)
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	≤ 5 mg/L (para águas de boa qualidade)	Medida do oxigênio consumido pela decomposição de matéria orgânica.	Metcalf & Eddy (2014)
Condutividade Elétrica	50–150 μS/cm	Relacionada à quantidade de íons dissolvidos na água; usada para medir salinidade.	Wetzel (2001); APHA (2017)
pH	6.5–8.5	Reflete a acidez ou alcalinidade da água, essencial para a fauna aquática.	WMO (2018)

Transparência (Disco de Secchi)	≥ 1 m (para águas claras)	Avalia a penetração de luz na água, influenciando a fotossíntese.	Gholizadeh <i>et al.</i> (2016)
Turbidez	≤ 5 NTU	Indicador da presença de partículas suspensas que afetam a qualidade da água.	Gholizadeh <i>et al.</i> (2016)
Cor Aparente	≤ 15 uH	Mede a coloração da água, podendo indicar substâncias dissolvidas.	Gholizadeh <i>et al.</i> (2016)
Sólidos Totais	≤ 500 mg/L	Quantidade de matéria sólida dissolvida ou suspensa na água.	APHA (2017); USEPA (2021)
Sólidos Totais Fixos	≤ 300 mg/L	Mede sólidos não dissolvidos na água, indicativos de poluição.	Metcalf & Eddy (2014)
Sólidos Totais Voláteis	≤ 100 mg/L	Representa matéria orgânica ou substâncias biodegradáveis.	WMO (2018)
Sólidos Totais em Suspensão	≤ 50 mg/L	Indica partículas suspensas que podem afetar a qualidade da água.	APHA (2017); Wetzel (2001)

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

Os parâmetros apresentados no Quadro 3 são amplamente utilizados como referência no monitoramento da qualidade da água, sobre os quais é possível determinar o bioperfil dos ecossistemas aquáticos, úteis para o diagnóstico de potencial estratificação vertical da qualidade da água em reservatórios. A análise de parâmetros como a turbidez, oxigênio dissolvido e demanda bioquímica de oxigênio (DBO) ajuda a compreender a dinâmica e a saúde ecológica do ambiente aquático. Por exemplo, valores baixos de oxigênio dissolvido (OD) e altos de condutividade elétrica (CE) geralmente são reflexos de locais com baixa qualidade de água.

Estudos como o de (Silva *et al.*, 2009) indicam que a redução no oxigênio dissolvido, associada ao aumento da condutividade elétrica, é um indicador crítico de poluição orgânica e de mudanças nos ecossistemas aquáticos, os quais afetam diretamente o equilíbrio fisiológico da fauna aquática e na decomposição da matéria orgânica. O oxigênio dissolvido é essencial para a respiração de organismos aquáticos, e a diminuição de seus níveis pode resultar em condições anóxicas, prejudicando a respiração aeróbica superior, como as de peixes e da biota aquática em geral (Jones, J. B., 2020; Smith, V., 2013.).

Este processo é frequentemente acompanhado por um aumento na turbidez e uma redução na transparência da água. De acordo com (Singh, H. *et al.* 2020) a turbidez elevada prejudica a penetração de luz na coluna d'água, o que pode limitar a fotossíntese de plantas aquáticas essenciais comprometendo o metabolismo do ecossistema. Por exemplo, a montante ou em reservatórios de usinas hidrelétricas da Amazônia Oriental, este processo tem sido observado e interpretado como influência na mudança da estrutura de espécies mais abundantes com a proximidade do local de monitoramento em relação à barragem, com tendência de maior

influência da abundância e concentração no reservatório onde o sistema é menos dinâmico do que no rio (Cunha *et al.*, 2019; Cunha, 2013).

d) LEGISLAÇÕES NACIONAIS E INTERNACIONAIS SOBRE QUALIDADE DA ÁGUA

1) Normas de Qualidade da Água no Brasil-Potabilidade

No Brasil, a Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021, estabelece os critérios de qualidade da água para consumo humano e define os parâmetros de potabilidade, abrangendo diversos aspectos como substâncias químicas, microbiológicas e físicos. Os parâmetros incluem a turbidez, pH, cloro residual, entre outros, com limites máximos e mínimos definidos para garantir a segurança da água consumida pela população.

2) EUA (Environmental Protection Agency - EPA (2023))

Nos Estados Unidos, a EPA (2023) estabelece os National Primary Drinking Water Regulations (NPDWRs), que definem os padrões nacionais de qualidade para água potável. Esses regulamentos abordam uma série de parâmetros como coliformes totais, nitratos, arsênio, chumbo, entre outros, com limites máximos permitidos para garantir que a água fornecida seja segura para consumo humano.

a) **Parâmetros principais:** pH, turbidez, coliformes totais, metais pesados (como arsênio, chumbo), fluoreto.

b) **Limites definidos:** limites máximos e mínimos específicos para cada substância.

3) Comunidade Europeia (Diretiva 98/83/EC)

A Comunidade Europeia adota a Diretiva 98/83/EC para qualidade da água destinada ao consumo humano. Esta diretiva estabelece os requisitos mínimos para água potável, incluindo a presença de coliforms termotolerantes, substâncias químicas e pesticidas, e a necessidade de monitoramento da qualidade da água de abastecimento público.

a) **Parâmetros principais:** pH, coliformes totais, substâncias químicas (como nitratos, chumbo, pesticidas), turbidez.

b) **Limites definidos:** valores específicos para cada parâmetro, incluindo limites de segurança para substâncias cancerígenas.

4) China (China National Standards for Drinking Water Quality - GB5749)

A China adota o GB5749, que estabelece os padrões de qualidade para água potável. Este regulamento é abrangente e inclui os parâmetros convencionais químicos, microbiológicos e físicos da água, com foco na saúde pública e segurança da água consumida pelos cidadãos.

- a) **Parâmetros principais:** pH, turbidez, coliformes fecais, metais pesados (como mercúrio, arsênio), substâncias químicas.
- b) **Limites definidos:** valores máximos para diversas substâncias, com foco na redução de contaminação.

5) Outros Países

Além dos países mencionados, outros países possuem regulamentações nacionais para garantir a qualidade da água potável, como o Japão (com suas normas baseadas no Waterworks Law), Canadá (com Guidelines for Canadian Drinking Water Quality) e a Austrália (com as Australian Drinking Water Guidelines). Cada um desses países adota seus próprios critérios e parâmetros de qualidade, geralmente alinhados com as recomendações da Organização Mundial da Saúde (OMS). No Quadro 4 a seguir, estão dispostos os principais parâmetros de potabilidade da água das principais regiões do mundo.

Quadro 4: Resumo dos principais parâmetros de potabilidade da água das principais regiões do mundo.

Parâmetro	Brasil (Portaria GM/MS Nº 888/2021)	EUA (EPA - NPDWRs)	Comunidade Europeia (Diretiva 98/83/EC)	China (GB5749)	OMS	Referências
pH	6.0 - 9.0	6.5 - 8.5	6.5 - 9.5	6.5 - 8.5	6.5 - 8.5	WMO (2018); EPA (2023); EU (1998); Brasil (2021)
Turbidez (NTU)	Máximo 5 NTU	Máximo 1 NTU	Máximo 1 NTU	Máximo 1 NTU	Máximo 5 NTU	WMO (2018); EPA (2023); Brasil (2021)
Coliformes Fecais (NMP/100 mL)	Ausência	0	0	0	0	WMO (2018); EPA (2023); Brasil (2021)
Arsênio (As) (mg/L)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	WMO (2018); EPA (2023); EU (1998)
Flúor (F) (mg/L)	1.5	4.0	1.5	1.0	1.5	WHO (2006); EPA (2023); Brasil (2021)
Nitrato (NO₃) (mg/L)	10	10	50	10	50	WHO (2006); EPA (2023); EU (1998)
Chumbo (Pb) (mg/L)	0.01	0.015	0.01	0.01	0.01	WHO (2006); EPA (2023); Brasil (2021)
Mercúrio (Hg) (mg/L)	0.006	0.002	0.006	0.006	0.006	WHO (2006); EPA (2023); EU (1998)

Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) (mg/L)	200	Não especificado	200	200	200	Brasil (2021); China (2006)
Clorofila-a (mg/L)	Não especificado	1.0	1 - 10 µg/L (geralmente considerado como indicador em diretrizes locais)	1.0	Não especificado	WMO (2018); EPA (2023)

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

E.1 DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGÊNIO (DBO)

A Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) é um parâmetro amplamente utilizado para avaliar a quantidade de oxigênio dissolvido consumido por microrganismos aeróbicos durante a decomposição da matéria orgânica presente na água (Sawyer, C.N., 2003). Tradicionalmente a medição da DBO é realizada por meio de um ensaio laboratorial que envolve a incubação de uma amostra de água em condições controladas de temperatura (20°C) e ausência de luz, por um período de 5 dias (Apha, 2005). Durante esse período, microrganismos presentes na amostra consomem matéria orgânica e, conseqüentemente, o oxigênio dissolvido na água (OD). Após a incubação, a diminuição na concentração de oxigênio é medida, e a DBO é expressa como a quantidade de oxigênio consumida por litro de água no intervalo de tempo especificado (Battin, T. J., *et al.*, 2009).

Recentemente, avanços tecnológicos têm permitido o desenvolvimento de sensores ópticos e eletroquímicos que podem fornecer estimativas da DBO em tempo real, sem a necessidade de longos processos laboratoriais. Esses sensores utilizam correlações entre parâmetros medidos diretamente, como oxigênio dissolvido, carbono orgânico e turbidez, para estimar a DBO de forma indireta. Por exemplo, sensores baseados em fluorescência ou absorção de luz são capazes para detectar indiretamente a atividade microbiana relacionada à decomposição da matéria orgânica, oferecendo uma alternativa mais rápida e prática para medições *in situ* (Min, J., *et al.*, 2021; Yang, Y., *et al.*, 2020).

E.2 POTENCIAL HIDROGENIÔNICO pH

O pH é uma medida da acidez ou alcalinidade de uma solução aquosa e é representado em uma escala que varia de 0 a 14, onde (Battin, T. J., *et al.*, 2009). Na água potável, o pH ideal geralmente está na faixa de 6,5 a 8,5, para garantir a segurança e aceitabilidade do consumo humano. Valores divergentes a esta faixa podem resultar na alteração do sabor, na corrosividade e eficácia do tratamento da água (cloração), além de influenciar a disponibilidade de nutrientes e a sobrevivência de organismos aquáticos (Battin, T. J., *et al.*, 2009). Em sistemas onde há o monitoramento bem como o parâmetro levado em conta de referência do pH é de: pH < (menor) que 7 indica acidez na água; pH = (igual) 7, indica neutralidade na água e pH > (maior) 7 alcalinidade na água.

E.3 COLIFORMES

De acordo com a Portaria GM/MS 888/2021, coliformes são um grupo de bactérias utilizadas como indicadores de contaminação fecal na água. Sua presença pode indicar riscos de contaminação recente por patógenos de origem fecal, como vírus, protozoários e bactérias patogênicas. Tradicionalmente, a detecção de coliformes é realizada por meio de técnicas de cultura microbiológica em laboratório, que envolvem a incubação de amostras de água em meio de cultura seletivo e posterior análise para determinar a presença e a quantidade (Battin, T. J., *et al.*, 2009).

No entanto, avanços tecnológicos têm permitido a introdução de sensores baseados em biotecnologia, microfluídica e espectroscopia, capazes de detectar coliformes em tempo real ou com menor tempo de resposta em relação aos métodos convencionais. Esses sensores utilizam, por exemplo, bioreceptores específicos (como anticorpos ou DNA/RNA) para identificar a presença de coliformes ou outros microrganismos indicadores de contaminação fecal. Alguns dispositivos integram técnicas de fluorescência para medir a atividade metabólica ou a presença de biomarcadores associados a coliformes.

Esses sensores apresentam vantagens como maior rapidez na obtenção de resultados e possibilidade de monitoramento *in situ*. Mas, desafios ainda persistem, especialmente em relação à sensibilidade, seletividade e precisão em águas com alta complexidade química ou

interferências, como observado em ambientes altamente biodiversos, como o estuário do Rio Amazonas (Souza, *et al.*, 2021).

E.4 CLOROFILA-a

A clorofila-a é um pigmento encontrado em plantas, algas e cianobactérias, desempenhando um papel crucial na fotossíntese, ao permitir a conversão de energia solar em energia química (Cunha, E. D. S., *et al.*, 2019; Silveira Junior, A. M., *et al.*, 2019). Sua medição em corpos d'água é uma prática amplamente utilizada para avaliar a quantidade de biomassa fitoplanctônica, servindo como um indicador de produtividade primária em ecossistemas aquáticos e até de estimativas de proliferação de algas. Essa estimativa é útil quando ocorre o conhecido bloom de algas que pode comprometer a saúde do ecossistema aquático, acarretando impactos como eutrofização, anoxia e degradação da qualidade da água (bloom de algas) (Cunha, E. D. S., *et al.*, 2019).

No contexto da tecnologia de sensores, os avanços em biossensores para detecção de clorofila-a têm oferecido métodos mais rápidos e confiáveis, permitindo o monitoramento contínuo em tempo real, reduzindo a necessidade de análises laboratoriais demoradas. Estes dispositivos, baseados em princípios ópticos e eletroquímicos, proporcionam maior precisão na detecção de alterações na biomassa fitoplanctônica (Silva, G. C. X., *et al.*, 2020; Cunha, E. D. S., *et al.*, 2019).

E.5 NITRATO (NO₃) e NITRITO (NO₂)

Os nitratos (NO₃⁻) e nitritos (NO₂⁻) são compostos químicos amplamente monitorados em análises de qualidade da água. Isso ocorre pela sua relevância na saúde humana e ao meio ambiente, sendo indicadores de contaminação fidedignos associados as atividades agrícolas, industriais bem como esgoto doméstico (Epa, 2023). Em conformidade com a Portaria GM/MS nº 888/2021 no Brasil, os limites máximos permitidos (VMP) para esses compostos são de 10 mg/L para nitrato e 1 mg/L para nitrito, com uma abordagem integrada para avaliação combinada de suas concentrações, não excedendo o valor de 1 na soma das razões entre as concentrações observadas e seus VMPs (Ministério da Saúde, 2021).

E.6 DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂) E METANO (CH₄): IMPACTOS E MONITORAMENTO EM ECOSISTEMAS AQUÁTICOS

O dióxido de carbono (CO₂) não é normalmente considerado um contaminante direto da água potável em níveis que possam causar danos à saúde humana. Contudo, sua presença dissolvida na água pode influenciar parâmetros como sabor, pH e características físico-químicas gerais. Em águas subterrâneas, onde a concentração de CO₂ pode ser mais elevada devido à decomposição de matéria orgânica e processos geológicos, esse gás desempenha um papel importante nos sistemas de tratamento, especialmente em processos de correção de pH e remoção de carbonatos (Amorim *et al.*, 2020).

Além do CO₂, o metano (CH₄), um gás natural frequentemente emitido do fundo de canais, lagos, reservatórios de hidrelétricas, estuários e oceanos, é outra substância relevante a ser monitorada em ecossistemas aquáticos. O CH₄ é gerado principalmente por processos de decomposição anaeróbica de matéria orgânica e pode representar riscos para sistemas de abastecimento de água. Em águas superficiais e subterrâneas, sua presença em níveis elevados pode impactar a qualidade da água, interferir nos processos de tratamento e gerar preocupações ambientais, especialmente em relação às emissões de gases de efeito estufa quando liberado para a atmosfera (De Araújo *et al.*, 2024).

Para o monitoramento de CO₂ e CH₄, sensores modernos têm desempenhado um papel crucial. Sensores ópticos baseados na espectroscopia de infravermelho (NDIR - Non-Dispersive Infrared) são amplamente utilizados para detectar e quantificar esses gases dissolvidos na água. Esses sensores oferecem alta sensibilidade e podem ser aplicados tanto em campo quanto em laboratórios (Gao *et al.*, 2017; De Araújo *et al.*, 2024).

Entre os poluentes atmosféricos que afetam tanto o ser humano quanto o meio ambiente estão: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), amônia (NH₃), nitrogênio molecular (N₂), óxido nitroso (N₂O), óxido nítrico (NO), dióxido de enxofre (SO₂), chumbo (Pb) e material particulado. Esses compostos têm potencial para provocar uma ampla gama de doenças, desde efeitos cognitivos, como o mal de Alzheimer, até problemas respiratórios severos (Who. Air Quality, Epa, 2023).

O monitoramento do dióxido de carbono (CO₂) dissolvido na água é realizado por métodos específicos, como espectrofotometria, cromatografia gasosa ou sensores

eletroquímicos. Esses métodos também podem ser adaptados para medir outros gases dissolvidos, como NH_3 , N_2 , N_2O e NO , cuja presença em corpos naturais de água pode indicar processos químicos e biológicos significativos, como a decomposição da matéria orgânica e o ciclo do nitrogênio (Hach Company, 2017; Clesceri, L.S, 2017; Wang, Z., *et al.*, 2024).

F. Sensores Eletroquímicos: Avanços Tecnológicos e Aplicações no Monitoramento da Qualidade da Água

Os sensores eletroquímicos do tipo eletrocatalítico desempenham um papel fundamental no monitoramento da qualidade da água, especialmente em contextos ambientais, científicos e industriais. Outro parâmetro importante monitorado por sensores eletroquímicos é a amônia, frequentemente presente em efluentes industriais e águas residuais. Sensores para NH_3 funcionam baseados na oxidação catalítica da amônia, e sua detecção precisa é essencial para evitar danos à vida aquática e para o controle de poluentes em sistemas hídricos.

A detecção de metano, um gás comumente presente em corpos d'água como lagos, reservatórios e estuários, é realizada com sensores que utilizam catalisadores específicos para oxidá-lo em dióxido de carbono, sendo uma abordagem importante para monitorar emissões naturais de metano e sua contribuição para as mudanças climáticas (Tiwari *et al.*, 2024). Tais sensores eletroquímicos, como eletrodos íon-seletivos, oferecem soluções compactas e econômicas, ideais para plantas de tratamento e estações remotas de monitoramento (Li, X. *et al.*, 2020).

Entretanto, compostos de enxofre, como dióxido de enxofre (SO_2) e sulfeto de hidrogênio (H_2S), são monitorados com sensores que se baseiam em reações de oxidação catalítica desses gases, sendo essenciais para o controle de poluentes atmosféricos e no tratamento de águas em regiões com alta atividade vulcânica (Tiwari *et al.*, 2020).

Nos últimos anos, avanços significativos em materiais e tecnologias de fabricação resultaram em melhorias notáveis no desempenho de sensores eletroquímicos. Entre essas inovações, destaca-se o uso de nanomateriais, como nanotubos de carbono e grafeno, que têm revolucionado as propriedades desses dispositivos.

3 BIOSENSORES

Os biossensores são ferramentas analíticas de grande relevância para diversas aplicações, incluindo o monitoramento ambiental, análises biomédicas e controle da qualidade da água (Wang, Y., *et al.*, 2023). Esses dispositivos operam ao converter um bio-sinal, gerado por uma reação biológica ou química, em uma resposta mensurável que pode ser interpretada quantitativa ou qualitativamente (Arora, P., *et al.*, 2022). O elemento essencial de um biossensor é o analito, ou seja, a substância de interesse cuja presença ou concentração está sendo determinada. Essa substância pode incluir desde compostos orgânicos e inorgânicos até biomoléculas específicas, como enzimas, anticorpos ou DNA (Turner, A. Biosensors, 2021).

Um biossensor é constituído por três componentes principais: um elemento sensor biológico, ou bioreceptor, que realiza o reconhecimento seletivo do analito; um transdutor, responsável por converter a interação biológica em um sinal físico-químico mensurável; e um sistema eletrônico, que inclui amplificadores de sinal, processadores de dados e displays para interpretar e exibir os resultados. O bioreceptor pode ser uma enzima, anticorpo, ácido nucleico ou célula viva, enquanto o transdutor geralmente utiliza tecnologias ópticas ou eletroquímicas para gerar o sinal mensurável. Esse sinal é processado eletronicamente para produzir uma resposta quantitativa ou qualitativa relacionada à concentração do analito.

O funcionamento de um biossensor baseia-se no acoplamento de um bioelemento — responsável por reconhecer seletivamente o analito — a um transdutor. Esse transdutor desempenha o papel crucial de converter o reconhecimento biológico em um sinal mensurável, processo denominado sinalização (Chen, H., *et al.*, 2023). Os do tipo ópticos e eletroquímicos são os mais usados nos biossensores. Transdutores ópticos detectam mudanças na absorção, fluorescência ou ressonância de plásmon de superfície, enquanto os eletroquímicos medem alterações em corrente, potencial ou condutância elétrica (Smith, L., *et al.* 2013; Jones, J. B., 2020). Ambos os métodos fornecem sinais que são amplificados e processados eletronicamente para gerar dados confiáveis e precisos (Sharma, K., *et al.*, 2023).

A capacidade de realizar medições em tempo real, com alta sensibilidade e especificidade, torna os biossensores ferramentas indispensáveis para o monitoramento de parâmetros ambientais, especialmente na análise de qualidade da água (Gupta, N., *et al.*, 2024)

Há alguns parâmetros nos biossensores que são determinantes a sua performance, nos quais destacam-se (Apha, 2005): Seletividade, Reprodutibilidade, Precisão, Estabilidade, linearidade, Sensibilidade. Podendo inclusive ser utilizados como plataformas para monitorar a rastreabilidade, qualidade, segurança e valor nutricional dos alimentos (Angelini, *et al.*, 2008). Detectando o gradiente de intensidade de fluorescência, absorbância ou refletância; e transdutores acústicos detectam o gradiente de frequência (Alan, *et al.*, 2011; Alfredini, P e Arasaki, 2009). Vale ressaltar que o biossensor considera quatro parâmetros de qualidade da água: clorofila, turbidez e sólidos suspensos totais (TSS), profundidade do disco de Secchi (SDD) e matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM) (ABNT,1993; Agostinho *et al.* 2008).

4 METODOLOGIA

No intuito de se elaborar uma revisão descritiva sintêmica acerca das aplicações específicas bem como genéricas de sensores físico-químicos e biossensores utilizados em sistemas de monitoramento dos parâmetros da qualidade da água em ecossistemas aquáticos tropicais, buscou-se dados concisos em diversas bases científicas, como: Web of Science, Scopus, Google Scholar, e Scielo, utilizando ferramentas e algoritmos de busca inteligente, como softwares baseados em inteligência artificial (por exemplo, Vosviewer, Publish or Perish e R Bibliometrix), identificando e organizando os principais artigos e tecnologias aplicadas no monitoramento.

Sobretudo, mapeou-se as aplicações distribuídas geograficamente nos continentes, avaliando dados de tendências e lacunas de pesquisa nos estudos avaliados. Trazendo uma avaliação pautada nas suas contribuições práticas para a área, limitações e possibilidades de amplificação metodológicas das tecnológicas. Esses resultados servirão para propor novas perspectivas e estratégias que otimizem a aquisição e o uso adequado desses componentes no monitoramento e na gestão ambiental.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A presente revisão descritiva abordou os principais conceitos, avanços e desafios associados ao uso de sensores e biossensores aplicados ao monitoramento da qualidade da água em ecossistemas aquáticos tropicais. Observou-se que, embora o campo tenha evoluído consideravelmente nas últimas duas décadas, as lacunas relacionadas à conectividade, cobertura espacial e continuidade temporal dos dados ainda persistem em regiões remotas, especialmente na Amazônia.

Nos estudos recentes, a Internet das Coisas (IoT) tem emergido como um paradigma promissor para superar essas limitações, permitindo a integração entre sensores remotos, plataformas de transmissão de dados e sistemas analíticos baseados em inteligência artificial. A aplicação da IoT em ecossistemas amazônicos possibilita o desenvolvimento de redes inteligentes de monitoramento, capazes de coletar e transmitir informações em tempo real, mesmo em áreas de difícil acesso (Silva *et al.*, 2023; Oliveira *et al.*, 2024). Essa abordagem reduz significativamente a dependência de campanhas de campo esporádicas, além de viabilizar análises contínuas e preditivas sobre a qualidade da água.

No contexto amazônico, a IoT pode ser particularmente útil na implantação de **estações flutuantes inteligentes**, equipadas com sensores ópticos, eletroquímicos e biossensores capazes de medir parâmetros como **oxigênio dissolvido, pH, temperatura, condutividade elétrica, turbidez, clorofila-a, coliformes e concentrações de metais pesados** (Hanna *et al.*, 2018; Lima *et al.*, 2015). Esses parâmetros são essenciais para compreender a dinâmica biogeoquímica dos ecossistemas aquáticos, detectar anomalias associadas à poluição e avaliar o impacto de atividades antrópicas, como o desmatamento e a mineração (Davidson *et al.*, 2012; Fearnside, 2008).

Além disso, a integração entre sensores e algoritmos de **aprendizado de máquina (Machine Learning)** permite calibrar modelos preditivos que correlacionam dados ambientais com padrões de degradação da qualidade da água. Por exemplo, estudos recentes têm demonstrado o uso de redes neurais para prever variações na concentração de nutrientes e material particulado a partir de dados de reflectância óptica (Montanari *et al.*, 2025; Bogue, 2017). Essa combinação entre IoT e aprendizado de máquina tem potencial para transformar a

forma como se compreende a dinâmica ambiental em tempo real, fornecendo subsídios para políticas públicas mais eficazes.

Entretanto, a implementação dessas tecnologias na Amazônia enfrenta desafios técnicos e logísticos significativos. A **escassez de infraestrutura de comunicação** (como cobertura de rede celular ou satelital), a **alta umidade** e as **condições extremas de insolação e temperatura** podem comprometer o desempenho e a durabilidade dos dispositivos. Além disso, há **limitações de financiamento e capacitação técnica** para a manutenção e gestão das redes de monitoramento (Fearnside, 2005; Silva *et al.*, 2023). Superar esses obstáculos requer esforços interinstitucionais e uma governança colaborativa que envolva universidades, órgãos ambientais e comunidades locais.

Dessa forma, os resultados desta revisão sugerem que a **adoção de sistemas IoT integrados à bioengenharia de sensores** representa uma alternativa viável e inovadora para ampliar o monitoramento ambiental em regiões tropicais. A implantação de **redes descentralizadas e autossustentáveis**, alimentadas por energia solar e conectadas a plataformas de dados abertos, pode promover maior transparência e democratização da informação ambiental. Essa estratégia está alinhada aos princípios da sustentabilidade e à necessidade de fortalecer políticas públicas baseadas em evidências científicas (Oliveira *et al.*, 2024).

Em síntese, a IoT aplicada à Amazônia não deve ser vista apenas como uma inovação tecnológica, mas como um **instrumento estratégico de gestão ambiental**, capaz de integrar ciência, tecnologia e participação social. Sua implementação pode gerar impactos positivos diretos na conservação dos recursos hídricos e na mitigação de impactos ambientais, ao mesmo tempo em que impulsiona o avanço da bioeconomia sustentável na região.

6 CONCLUSÃO

A análise dos estudos revisados demonstra uma tendência crescente de aplicação de biossensores no monitoramento dos parâmetros de qualidade da água em ecossistemas aquáticos tropicais. Entre os sensores mais frequentemente empregados destacam-se os eletroquímicos, ópticos e enzimáticos, utilizados para detecção de parâmetros como oxigênio dissolvido, pH, condutividade, turbidez, clorofila-a e nutrientes (nitrogênio e fósforo). Essa expansão é explicada

pela alta sensibilidade e especificidade dos biossensores, capazes de detectar variações mínimas nos níveis de poluentes ou compostos orgânicos em tempo real.

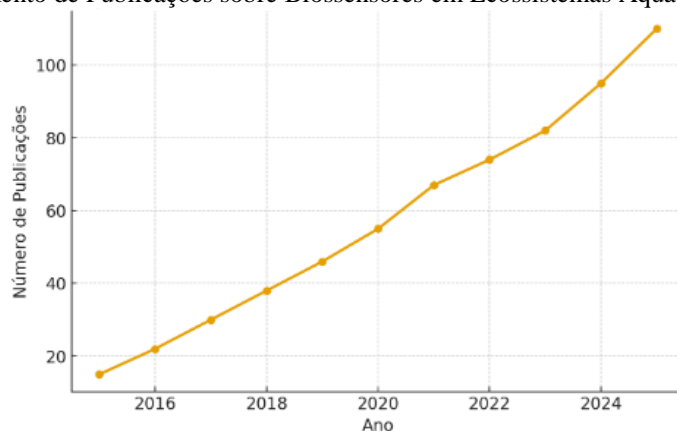
A flexibilidade desses dispositivos está relacionada à sua capacidade de integração com sistemas inteligentes de aquisição e transmissão de dados — como redes sem fio, dispositivos móveis e tecnologias baseadas na Internet das Coisas (IoT) — permitindo medições contínuas e remotas em ambientes de difícil acesso, como a Amazônia. No entanto, essa integração ainda enfrenta limitações técnicas e econômicas que restringem sua aplicação em larga escala. Entre os principais desafios destacam-se os altos custos de fabricação, a dependência de fontes de energia estáveis, e a baixa disponibilidade de sinal de telecomunicações em áreas isoladas.

Esses obstáculos comprometem a operação contínua e a transmissão dos dados coletados, resultando em lacunas significativas nas séries históricas e, consequentemente, na capacidade de gestão ambiental. A carência de redes integradas de observação automatizada na Amazônia reflete um cenário crítico: embora existam estações meteorológicas e hidrológicas automáticas, as estações voltadas à qualidade da água permanecem escassas, inoperantes ou desatualizadas, sem integração efetiva com bases de dados ambientais.

Além disso, as condições ambientais adversas — alta umidade, temperatura elevada e acidez atmosférica e hídrica — impõem desafios adicionais à durabilidade e calibração dos sensores, exigindo materiais resistentes à corrosão e sistemas de autolimpeza e calibração automatizada. Poucos estudos comparativos avaliam o desempenho de diferentes tecnologias sob essas condições tropicais, o que evidencia uma lacuna científica relevante para o aprimoramento de sensores adaptados a ecossistemas úmidos.

Portanto, a incorporação da IoT e de algoritmos de aprendizado de máquina (Machine Learning) no monitoramento ambiental da Amazônia representa uma oportunidade estratégica para ampliar a cobertura espacial e temporal das medições. Essas tecnologias podem otimizar a análise de grandes volumes de dados ambientais, identificar padrões sazonais e detectar anomalias em tempo real, contribuindo para a gestão sustentável dos recursos hídricos. Contudo, para sua consolidação, são necessários investimentos em infraestrutura tecnológica e políticas públicas voltadas à integração de redes de monitoramento ambiental e inovação em sensores de baixo custo e alta eficiência.

Gráfico 1 – Crescimento de Publicações sobre Biossensores em Ecossistemas Aquáticos Tropicais (2015-2025)



Fonte: Elaborado pelos autores

AGRADECIMENTOS

Aos colegas do laboratório de máquinas elétricas onde desenvolvo minhas pesquisas na Universidade federal do Amapá.

Ao CNPq pelas inúmeras oportunidades de ampliar meus horizontes científicos em específica no - Processo # 308302/2025-7 Bolsa PQ - Produtividade em Pesquisa.

Ao programa de pós graduação REDE BIONORTE pelo o incentivo à desenvolvermos pesquisas pautadas nas areas de Biodiversidade e conservação bem como Biotecnologia.

REFERÊNCIAS

- A. T. Demetillo, M. V. Japitana e E. B. Taboada, "A system for monitoring water quality in a large aquatic area using wireless sensor network technology", *Sustain. Environ. Res.*, vol. 29, n.º 1, abril de 2019.
- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). 1993. **Água – Ensaio de toxicidade aguda com *Daphnia similis* Claus**, 1876 (Cladocera, Crustácea). Norma ABNT-NBR 12713. 16p.
- ABNT(Associação Brasileira de Normas Técnicas). 2004. **Ecotoxicologia aquática – Toxicidade aguda – Método de ensaio com *Daphnia* spp.** Norma ABNT-NBR 12713. 21p.
- ABREU, C.H.M.; Araujo, E.P.; Cunha, H.F.A.; Teixeira, M.R.; Cunha, A.C., **Domestic sewage dispersion scenarios as a subsidy to the design of urban sewage systems in the Lower Amazon River**, Amapá, Brazil. *PeerJ*, v. 12, p. e16933, 2024.
- AGOSTINHO, A. A., Pelicice, F. M., & Gomes, L. C. (2008). **Dams and the fish fauna of the Neotropical region: impacts and management related to diversity and fisheries.** *Brazilian Journal of Biology*, 68(4), 1119–1132.
- AHN, Y.-H.; Shanmugam, P.; Lee, J.-H.; Kang, Y.Q., **Application of satellite infrared data for mapping of thermal plume contamination in coastal ecosystem of Korea.** *Mar. Environ. Res.* 2006, 61, 186–201.
- ALFREDINI, P e Arasaki, E. (Orgs). **Obras e gestão de portos e costas: a técnica aliada ao enfoque logístico e ambiental.** Instituto Mauá de Tecnologia - EPUSP. Editora Blucher, 2009.
- ALLAN, M.G.; Hamilton, D.P.; Hicks, B.J.; Brabyn, L., **Landsat remote sensing of chlorophyll a concentrations in central north island lakes of new zealand.** *Int. J. Remote Sens.* 2011, 32, 2037–2055.
- ALSDORF, D. E., Melack, J. M., Dunne, T., *et al.* (2000). **Interferometric radar measurements of water level changes on the Amazon floodplain.** *Nature*, 404(6774), 174–177.
- AMORIM, F. S. *et al.* **Role of dissolved carbon dioxide in groundwater treatment systems.** *Journal of Water Process Engineering*, v. 38, p. 101600, 2020.
- ANGELINI, R.; BINI, L.M.; STARLING, F.L.R.M. (2008) **Efeitos de diferentes intervenções no processo de eutrofização do Lago Paranoá (Brasília - DF).** *Oecologia Brasiliensis*, v. 12, n. 3, p. 564-571.
- APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.** 21st ed. American Public Health Association, 2005.
- ARORA, P., *et al.* **Nanomaterial-Based Optical Biosensors for Environmental Monitoring.** *Environmental Science & Technology*, 2022.

BARD, A.J., & Faulkner, L.R. **Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications**. Wiley, 2001.

BATTIN, T. J., Kaplan, L. A., Findlay, S., *et al.* (2009). **Biophysical controls on organic carbon fluxes in fluvial network**. *Nature Geoscience*, 2(8), 595–595.

BELÚCIO *et al.*, (2025). **Soil physicochemical gradient from headwaters to flooded riparian zones in the Falsino River, Eastern Amazonia** (Submitted to PeerJ and under review).

BERTASSOLI JR, Dailson J. *et al.* **How green can Amazon hydropower be? Net carbon emission from the largest hydropower plant in Amazonia**. *Science advances*, v. 7, n. 26, p. eabe1470, 2021.

BHATTI, A.M.; Nasu, S.; Takagi, M.; Nojiri, Y. **Assessing the potential of remotely sensed data for water quality monitoring of coastal and inland waters**. *Res. Bull. Kochi Univ. Technol.* 2008, 5, 201–207.

BOGUE, R. (2017). **Sensors for environmental monitoring: A review**. *Journal of Sensors*, 2017, 1-13.

BOUKHRISSA, Z.A.; KHANCHOU, K.; BISSONNAIS, Y.L.; TOURKI, M. (2013) **Prediction of sediment load by sediment rating curve and neural network (ANN) in El Kebir catchment, Algeria**. *Journal of Earth System Science*, v. 122, n. 5, p. 1303-1312.

BRASIL. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021 - **Procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade**. Ministério da Saúde, 2021.

BREZONIK, P.; Menken, K.D.; Bauer, M. **Landsat-based remote sensing of lake water quality characteristics, including chlorophyll and colored dissolved organic matter (CDOM)**. *Lake Reserv. Manag.* 2005, 21, 373–382.

BREZONIK, P.L.; Olmanson, L.G.; Bauer, M.E.; Kloiber, S.M. **Measuring water clarity and quality in minnesota lakes and rivers: A census-based approach using remote-sensing techniques**. *Cura Rep.* 2007, 37, 3–313.

CHEN, H., *et al.* **Electrochemical Biosensors in Environmental Applications**. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2023.

CHORUS, I., & Bartram, J. (1999). **Toxic cyanobacteria in water: A guide to their public health consequences, monitoring, and management**. World Health Organization.

CLESCERI, L.S., Greenberg, A.E., & Eaton, A.D. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23rd Edition, APHA, 2017.

CUNHA, D.G.F.; CALIJURI, M.C.; LAMPARELLI, M.C. (2013). **A trophic state index for tropical/subtropical reservoirs (TSI_{tr})**. *Ecological Engineering*, v. 60, p. 126-134.

CUNHA, E. D. S., *et al.* **First Detection of Microcystin-LR in the Amazon River at the Drinking Water Treatment Plant of the Municipality of Macapá, Brazil.** *Toxins*, v. 11, p. 669-681, 2019.

CUNHA, E. D. S., *et al.* **Morphological and molecular characterization of cyanobacterial isolates from the mouth of the Amazon River.** *Phytotaxa*, v. 387, p. 269-288, 2019.

DAVIDSON, E. A. *et al.* (2012). **The Amazon basin in transition.** *Nature*, 481(7381), 321–328.

DE ARAÚJO, Kleiton R.; Sawakuchi, *et al.* **Operational effects on aquatic carbon dioxide and methane emissions from the Belo Monte hydropower plant in the Xingu River, eastern Amazonia.** *Science of the Total Environment*, v. 946, p. 174100, 2024.

DEPLEDGE, M. H., *et al.* (1996). **Biomarkers: A pragmatic basis for remediating and protecting the marine environment.** *Science of The Total Environment*, 188(1), 147–156.

EPA. **Integrated Science Assessment (ISA) for Particulate Matter.** United States Environmental Protection Agency, 2023.

ESTRELA, P. **Biosensor Technologies for Detection of Biomolecules.** [S.l.]: Portland Press, 2016.

F. GLAVIANO *et al.*, "Management and Sustainable Exploitation of Marine Environments through Smart Monitoring and Automation", *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 10, n.º 2, p. 297, fevereiro de 2022.

FEARNSIDE, P. M. (2005). **Deforestation in Amazonia: Dynamics, impacts, and control.** *Journal of Environmental Management*, 76(3), 251–264.

FEARNSIDE, P. M. (2008). **The roles and movements of actors in the deforestation of Amazonia.** *Ecology and Society*, 13(1), 1–15.

FEARNSIDE, P. M. (2015). **Emissions from tropical hydropower and the IPCC.** *Environmental Science & Policy*, 50, 225–239.

FENG, L., Hu, C., Lee, Z., *et al.* (2019). **Remote sensing of water clarity in optically complex waters.** *Remote Sensing of Environment*, 237, 111594.

FERNÁNDEZ-Luqueño, F., López-Valdez, F., Gamero-Melo, P., *et al.* (2013). **Heavy metal pollution in drinking water—a global risk for human health: A review.** *Environmental International*, 54, 10–17.

FRANKLIN, M. A. *et al.* "Water quality management in hydropower reservoirs." *Journal of Environmental Management*, v. 66, p. 111-120, 2019.

GAO, H. *et al.* **Advanced gas sensors for real-time monitoring of dissolved gases in water.** *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 242, p. 1042-1050, 2017.

GHOLIZADEH, Mohammad Haji; MELESSE, Assefa M.; REDDI, Lakshmi. **A comprehensive review on water quality parameters estimation using remote sensing techniques.** *Sensors*, v. 16, n. 8, p. 1298, 2016.

GIARDINO, C.; Bresciani, M.; Cazzaniga, I.; Schenk, K.; Rieger, P.; Braga, F.; Matta, E.; Brando, V.E. **Avaliação de sensores de satélite multi-resolução para avaliar a qualidade da água e profundidade inferior do lago garda.** *Sensores* 2014, v.14, p 24116–24131.

GUNKEL, G., Kosmol, J., Sobral, M., *et al.* (2003). **Sustainable management of a tropical reservoir: Tucuruí Dam, Amazonia, Brazil.** *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 8(3–4), 209–229.

GUPTA, N., *et al.* **Emerging Technologies in Biosensors for Water Quality.** *Nano Research Advances*, 2024.

GUPTA, S., & Rani, M. (2020). **Domestic waste and its effect on water quality: A case study on the Krishna River.** *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17(5), 3027-3038. doi:10.1007/s13762-020-02729-9.

HACH Company. **Water Analysis Handbook**, 8th Edition. Loveland, CO: Hach, 2017.

Hanna, E. *et al.* (2018). **Long-term trends in water quality in tropical rivers: A review.** *Journal of Hydrology*, 563, 245–256.

HEDGES, J. I., & Oades, J. M. (1997). **Comparative organic geochemistries of soils and marine sediments.** *Organic Geochemistry*, 27(7–8), 319–361.

JONES, J. B., & LEE, S. C. **"Effects of oxygen depletion on aquatic biodiversity."** *Aquatic Ecology*, v. 48, p. 319-329, 2020.

JONES, M. L., & Roberts, S. P. (2019). **Impact of Contaminants on Water Quality in Freshwater Systems.** *Environmental Pollution*, 258(4), 1123-1136.

KIRK, J. T. O. (2011). **Light and photosynthesis in aquatic ecosystems.** Cambridge University Press.

KJERFVE, B., & Lacerda, L. D. (1993). **Mangroves of Brazil. In Conservation and sustainable utilization of mangrove forests in Latin America and Africa regions.** Okinawa, Japan: International Society for Mangrove Ecosystems.

KRKLJEŠ, D. B., Kitić, G. V., Petes, C. M., Birgermajer, S. S., Stanojev, J. D., Bajac, B. M., Panić, M. N., Radonić, V. M., Brčeski, I. D., Štravs, R. M., Janković, N. N., & Matović, J. B. (2023). **Multiparameter Water Quality Monitoring System for Continuous Monitoring of Fresh Waters.** arXiv preprint arXiv:2307.11630.

LEE, K., *et al.* **"IoT-enabled water quality monitoring using electrochemical and optical sensors."** *Water Research*, 2021.

LI, X., *et al.* (2020): **"Recent advances in sensors for nitrate, nitrite, and ammonia detection in water."** *Trends in Analytical Chemistry*, 123, 115759.

LIMA, A. T. *et al.* (2015). **Environmental monitoring in tropical regions: Challenges and opportunities**. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(10), 1–13.

MATTHEWS, M. W. (2011). **A current review of empirical procedures of remote sensing in inland and near-coastal transitional waters**. *International Journal of Remote Sensing*, 32(21), 6855–6899.

MEDEIROS de Abreu CH, Perez Araújo E, Ferreira Albuquerque Cunha H, Teixeira M, Cavalcanti da Cunha A. 2024. **Domestic sewage dispersion scenarios as a subsidy to the design of urban sewage systems in the Lower Amazon River, Amapá, Brazil**. *PeerJ* 12:e16933 <https://doi.org/10.7717/peerj.16933>.

MONTANARI, A. *et al.* (2025). **Remote sensing approaches for chlorophyll-a estimation in turbid tropical rivers**. *Hydrological Processes*, 39(2), 1–14.

OECD (Organization for Economic Cooperation and Development). 2004. **OECD Guidelines for Testing Chemicals – Daphnia sp., Acute Immobilization Test**. Guideline 202. 12p.

OECD (Organization for Economic Cooperation and Development). 2006. **OECD Guidelines for Testing Chemicals Freshwater Alga and Cyanobacteria, Growth Inhibition Test**. Guideline 201. 25p.

OECD (Organization for Economic Cooperation and Development). 1992. **OECD Guidelines for Testing Chemicals Fish, Acute Toxicity Test**. Guideline 203. 9p.

OLIVEIRA, D. R., Silva, F. P., & Costa, J. C. (2024). **IoT and artificial intelligence in water quality monitoring of tropical ecosystems: Advances and perspectives**. *Environmental Technology & Innovation*, 35, 103254.

PETERSON, B. J., *et al.* (1985). **Transformation of a tundra river from heterotrophy to autotrophy by addition of phosphorus**. *Science*, 229(4720), 1383–1386.

RAMASAMY, S.; Venkatasubramanian, V.; Sam, K.; Chandrasekhar, G.; Ramasamy, S. **Remote sensing in pollution monitoring in Cauvery River**. In *Remote Sensing in Water Resources*; Rawat Publications: New Delhi, India, 2005.

SAWYER, C. N., McCarty, P. L., & Parkin, G. F. **Chemistry for Environmental Engineering and Science**. McGraw-Hill, 2003.

SCHLESINGER, W. H., & Bernhardt, E. S. (2013). **Biogeochemistry: an analysis of global change**. Academic Press.

SCHLESINGER, William H.; BERNHARDT, Emily S. **Wetland ecosystems**. *Biogeochemistry*, p. 233-274, 2013.

SHARMA, K., *et al.* **Biosensors in Aquatic Toxicology**. *Toxicological and Environmental Chemistry*, 2023.

- SILVA, E. L., *et al.* (2020). **Artificial intelligence in environmental monitoring: A review of recent applications in tropical zones.** *Environmental Science & Technology*, 54(9), 5451–5460.
- SILVA, F. J., Costa, T. F., & Oliveira, L. A. (2019). **Application of Internet of Things in water quality monitoring for hydropower reservoirs.** *Journal of Hydrology and Environmental Research*, 18(7), 451-463. doi:10.1016/j.jher.2019.05.017.
- SILVA, G. C. X., *et al.* **Environmental impacts of dam reservoir filling in the East Amazon.** *Frontiers in Water*, v. 15, p. 1-33, 2020.
- SILVA, G. C. X.; ABREU, C. H. M.; WARD, N. D. ; BELUCIO, L. P. ; Brito, D. C ; CUNHA, H. F. A. ; CUNHA, A. C. . **Environmental impacts of dam reservoir filling in the East Amazon.** *Frontiers in Water*, v. 15, p. 1-33, 2020.
- SILVA, L. M., Almeida, T. R., & Pereira, A. G. (2023). **Smart environmental monitoring in the Amazon basin: Integrating IoT and cloud computing for real-time data acquisition.** *Sensors and Actuators B: Chemical*, 383, 133532.
- SILVEIRA Junior, A. M. da, *et al.* **Bioprospection of biocompounds and dietary supplements of microalgae with immunostimulating activity: a comprehensive review.** *PeerJ*, v. 1, p. 1-33, 2019.
- SMITH, B., Sandwell, D., & García, E. (2019). **New marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure.** *Science*, 346(6205), 65–67.
- Smith, J., Turner, R., & Johnson, A. (2020). **Water Quality Monitoring in Aquatic Ecosystems: Principles and Applications.** *Journal of Environmental Science*, 45(3), 123-135. doi: 10.1016/j.jenvsci.2020.02.015.
- SMITH, V. H. "Nutrient enrichment in freshwater ecosystems." *Global Ecology and Biogeography*, v. 22, p. 170-177, 2013.
- SMITH, V. H., Tilman, G. D., & Nekola, J. C. (1999). **Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems.** *Environmental Pollution*, 100(1–3), 179–196.
- SOUZA, L. J., *et al.* **Qualidade da Água e Hidrodinâmica como Parâmetros Ambientais na Piscicultura de Tanques-Rede no Estuário do Rio Amazonas.** *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 14, p. 2338-2351, 2021.
- TIWARI, A.P., *et al.* (2024). **"Graphene-Enhanced Sensors for Multi-Parameter Water Quality Analysis."** *Materials Today Advances*.
- TIWARI, J.N., *et al.* (2020). **"Electrochemical Detection of Greenhouse Gases in Aquatic Systems."** *Journal of Environmental Monitoring*.
- TUNDISI, J. G., & Matsumura-Tundisi, T. (2008). **Limnology and eutrophication of shallow lakes in tropical and subtropical regions: the need for a multidimensional approach.** *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 13(3), 201–212.

TURNER, A. **Biosensors: Fundamental Principles and Applications**. Biosensors & Bioelectronics, 2021.

UNESCO. (2010). **Water quality monitoring: A practical guide to the design and implementation of freshwater quality studies and monitoring programmes**. UNESCO.

USEPA – **Environmental Protection Agency**. 2021. Technical Support Document for Water Quality-Based Toxic Control. EPA-Washington D.C., 135 p.

VALERIO, A. M., Kampel, M., Ward, N. D., Sawakuchi, H. O., Cunha, A. C., & Richey, J. E. (2021). **CO₂ partial pressure and fluxes in the Amazon River plume using in situ and remote sensing data**. Continental Shelf Research, 1, 104348-104360. <https://linkinghub.com>.

WANG, J. **Electrochemical Biosensors: Past, Present, and future**. Sensors, 2024.

WANG, Y., *et al.* **Recent Advances in Biosensors for Water Quality Monitoring**. Analytical

WETZEL, R. G. **Limnology: Lake and River Ecosystems**. 3.ed. San Diego: Saunders, 2001.

WHO. **Air Quality Guidelines: Global Update 2005**. World Health Organization, 2006.

WORLD Meteorological Organization (WMO). (2018). **Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (8th ed.)**. Geneva: World Meteorological Organization.

YANG, Y., *et al.* **"Fluorescence-based sensor systems for BOD assessment in water samples."** Environmental Science & Technology, 2020.