

ESTADO DA ARTE: MODELAGEM BIO-ÓPTICA EM RESERVATÓRIOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS

State of the Art: Bio-optical Modeling in Reservoirs of Hydroelectric Power Plants

Ana Karoline Ferreira dos Santos

Secretaria Municipal de Educação de Rio Verde - GO

João Batista Pereira Cabral

Universidade Federal de Jataí

RESUMO

A crescente instalação de usinas hidrelétricas impulsiona a economia, porém intensifica os impactos ambientais, que evidenciam a necessidade de estratégias para monitorar esses efeitos. A modelagem bio-óptica surge como uma ferramenta essencial para estimar e quantificar os efeitos de parâmetros bio-ópticos, como clorofila-a e sólidos em suspensão, na reflectância da água. Nessa perspectiva, o objetivo desse estudo foi apresentar o estado da arte das metodologias e lacunas na modelagem bio-óptica de águas de reservatórios de Usinas Hidrelétricas. A realização desta pesquisa foi com base no levantamento do estado da arte sobre monitoramento bio-óptico em cursos hídricos, especialmente em reservatórios de usinas hidrelétricas, tendo por finalidade um diálogo entre os autores de modo crítico e reflexivo. A seleção das obras científicas analisadas foi conforme os descritores de “Qualidade da água”, “Modelos bio-ópticos e empíricos na água”, “Componentes Opticamente Ativos na Água”, “Clorofila-a”, “Sólidos em Suspensão”, “Reflectância bidirecional” e “Reflectância de sensoriamento remoto”. A pesquisa ressaltou a aplicabilidade das técnicas estatísticas para a geração de cálculos capazes de demonstrar e estimar como os componentes clorofila-a e sólidos em suspensão interferem na reflectância da água, principalmente em determinadas faixas espectrais. No entanto, enfatizou-se a importância de considerar as particularidades de cada ambiente aquático ao escolher e validar modelos empíricos, garantindo resultados confiáveis e relevantes para embasar políticas de conservação ambiental.

Palavras-chave: Modelos bio-ópticos; Clorofila-a; Reflectância da água.

ABSTRACT

The increasing installation of hydroelectric power plants drives economic growth but intensifies environmental impacts, highlighting the need for strategies to monitor these effects. Bio-optical modeling emerges as a key tool for estimating and quantifying the influence of bio-optical parameters, such as chlorophyll-a and suspended solids, on water reflectance. In this context, the objective of this study was to present the state of the art of methodologies and gaps in bio-optical modeling of waters in hydroelectric power plant reservoirs. This research was conducted based on a state-of-the-art review of bio-optical monitoring in water bodies, particularly in hydroelectric reservoirs, aiming to foster a critical and reflective dialogue among authors. The selection of the scientific works analyzed was based on descriptors such as “Water Quality,” “Bio-optical and Empirical Models in Water,” “Optically Active Components in Water,” “Chlorophyll-a,” “Suspended Solids,” “Bidirectional Reflectance,” and “Remote Sensing Reflectance.” The study highlighted the applicability of statistical techniques for generating calculations capable of demonstrating and estimating how chlorophyll-a and suspended solids affect water reflectance, especially in specific spectral bands. However, it emphasized the importance of considering the particularities of each aquatic environment when selecting and validating empirical models, ensuring reliable and relevant results to support environmental conservation policies.

Keywords: Bio-optical models; Chlorophyll-a; Water reflectance.

INTRODUÇÃO

A progressiva instalação de reservatórios de usinas hidrelétricas ao longo dos cursos d'água reflete o cenário socioeconômico atual do Brasil, marcado pelo crescimento na produção de energia. Esse desenvolvimento também expõe a vulnerabilidade ambiental, especialmente nos diversos biomas do país. O cerrado, em particular, destaca-se pelos impactos significativos na qualidade da água e na variabilidade biológica.

A expansão agrícola, urbanização e outras formas de desenvolvimento humano têm imposto desafios significativos ao cerrado. Entre os principais fatores de poluição hídrica nesse bioma estão os agroquímicos, como pesticidas e fertilizantes, que modificam os parâmetros físico-químicos, comprometendo a qualidade da água (Cabral et al. 2023).

O monitoramento preciso e em tempo real de parâmetros físicos, metais pesados, nutrientes agrícolas, características bio-ópticas, entre outros, enfrenta diversas lacunas devido à escassez de recursos financeiros, infraestrutura e políticas governamentais adequadas. Essa limitação impede o desenvolvimento de pesquisas em cursos hídricos de diversos países, tornando-os vulneráveis à degradação ambiental (Kumar et al. 2024). Portanto, é fundamental implementar estratégias que empreguem as leis ambientais e integrem as novas tecnologias para um monitoramento de recursos hídricos a baixo custo.

Nesse cenário de lacunas e desafios, a história recente mostra que, a partir da década de 1990, ocorreu um aumento significativo das iniciativas ambientais, com maior envolvimento da sociedade em pesquisas voltadas para a fiscalização e gestão dos recursos hídricos. Em 1997, foi adotada a Convenção das Nações Unidas sobre o Direito dos Cursos de Água Transfronteiriços e dos Lagos Internacionais (Convenção de Água). Esta convenção estabelece princípios e normas para a utilização, proteção e gestão sustentável dos cursos de água internacionais para promover a cooperação entre nações para resolver questões relacionadas à gestão conjunta desses recursos hídricos.

Em 1997, foi promulgada no Brasil a Lei n.º 9.433/97, que estabeleceu a Política Nacional de Recursos Hídricos e instituiu o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH). Esta legislação representou um marco na gestão das águas em todo o território nacional, abrangendo também as regiões predominantemente cobertas pelo bioma cerrado.

A Resolução n.º 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) representou uma medida fundamental para a gestão dos recursos hídricos no Brasil. Esta resolução tratou da classificação dos corpos de água, estabeleceu diretrizes ambientais para seu enquadramento e definiu condições e padrões para o lançamento de efluentes, entre outras disposições.

A Lei n.º 12.334, de 20 de setembro de 2010, desempenha um papel fundamental na gestão das águas do Brasil ao instituir a política nacional de segurança de barragens destinadas à acumulação de água para

diversos usos. Além disso, a resolução da ANA n.º 839/2021 introduziu novas diretrizes para a operação de reservatórios de usinas hidrelétricas e estabeleceu critérios para o uso múltiplo da água, visando promover sua utilização sustentável.

Desde as primeiras legislações ambientais até as mais recentes, ocorreu um avanço para regulamentar e proteger os recursos naturais. As novas tecnologias, como sistemas de monitoramento por sensores de satélite, espectrorradiômetro e drones, também contribuíram para uma vigilância mais detalhada dos ecossistemas e para a aplicação das normas ambientais, que auxiliam a combater práticas ilegais, como desmatamento e poluição.

Nas últimas décadas, foram realizadas ações ambientais ativas, incluindo a aprovação de diversas leis voltadas para a gestão dos recursos hídricos. Essas iniciativas impulsionam o desenvolvimento de novos métodos de análise da qualidade da água. Um exemplo desses avanços são abordagens não convencionais, como o monitoramento bio-óptico, que se mostra uma forma eficaz de avaliar a qualidade da água em reservatórios de usinas hidrelétricas.

A modelagem bio-óptica é um método aplicado para monitorar as características espectrais de diversos ambientes aquáticos, incluindo os reservatórios das Usinas Hidrelétricas (UHEs). Nestas áreas, Componentes Opticamente Ativos (COAs) da água, como clorofila-a e sólidos em suspensão, interagem com a luz em diferentes comprimentos de onda. Diversas estratégias são utilizadas para monitorar esses COAs, incluindo cálculos estatísticos baseados em algoritmos, que utilizam razões de bandas espectrais de reflectância da água, permitindo estimar com precisão a concentração dos COAs (Hou et al. 2023).

Os estudos voltados para o monitoramento bio-óptico em recursos hídricos têm ganhado destaque com o advento de espectrorradiômetros de alta resolução espectral e radiométrica. Estes avanços possibilitaram o desenvolvimento de algoritmos para estimar os COAs e compreender seus efeitos na reflectância, tanto obtidos “*in situ*” quanto a partir de imagens de sensores remotos de satélites (Morel e Maritorena, 2005; Medeiros et al. 2022).

Segundo Pizani et al. (2022), em águas mais claras, a análise dos COAs é mais complexa devido à menor presença de partículas em suspensão e materiais dissolvidos, que influenciam a interação da luz. Assim, em águas com baixa concentração de clorofila e sólidos em suspensão, torna-se mais desafiador identificar e medir os COAs, uma vez que são substâncias na água que absorvem, dispersam ou refletem a luz.

A geração de modelos empíricos em ambientes aquáticos com características mais complexas enfrenta uma série de desafios, incluindo a dificuldade de replicar os resultados em outras áreas de estudo. Isso se deve à possibilidade de variação na concentração dos COAs entre diferentes regiões. Portanto, é essencial calibrar os algoritmos conforme as particularidades locais (Lobo e Jorge, 2019).

Zhang et al. (2022) ressaltaram que os avanços nas técnicas estatísticas têm sido fundamentais para a análise de dados coletados em diferentes escalas temporais e espaciais, o que possibilita uma compreensão mais completa das condições hídricas nos ambientes dos reservatórios de Usinas Hidrelétricas (UHEs).

Castro et al. (2023) desenvolveram uma metodologia para estimar variáveis de qualidade da água com auxílio de ferramentas estatísticas e técnicas de sensoriamento remoto em um corpo d'água tropical. Os pesquisadores aplicaram modelos empíricos que tiveram uma adaptação favorável para as estimativas de sólidos em suspensão e clorofila-a, com valores de R^2 (coeficiente de determinação) acima de 80%. A metodologia neste estudo contribuiu para monitorar e preservar corpos d'água em locais de difícil acesso, além de consistir em um meio de conservação ambiental mais eficiente e econômico.

Com base nas reflexões anteriores, este estudo teve por objetivo apresentar o estado da arte das metodologias e lacunas na modelagem bio-óptica de águas de reservatórios de Usinas Hidrelétricas. Nesta análise, foi ressaltado a importância dos modelos estatísticos bio-ópticos para estimar parâmetros como clorofila-a e sólidos em suspensão, além de avaliar seus efeitos sobre a reflectância bidirecional da água. A abordagem nessa perspectiva visa demonstrar a aplicabilidade de modelos empíricos no monitoramento da qualidade da água.

MATERIAL E MÉTODOS

A elaboração deste estudo envolveu a análise de periódicos especializados, dissertações, teses e livros publicados entre 1978 e 2024. Esse período foi escolhido para abranger desde o início das pesquisas sobre a temática até as contribuições mais recentes. Os materiais foram selecionados com base em descritores específicos relacionados ao comportamento espectral da água, modelos bio-ópticos e monitoramento da qualidade hídrica, sendo uma análise reflexiva e atualizada dos avanços científicos nessa temática.

O método de pesquisa adotado foi uma revisão de literatura com abordagem qualitativa, conforme delineado por Gil (2010). Esta abordagem é caracterizada por uma leitura exploratória, que visa verificar o interesse da obra para a pesquisa e identificar elementos que contribuam para a compreensão da temática em análise.

Nesse contexto, esta pesquisa estabeleceu um diálogo crítico e reflexivo das informações provenientes de diferentes perspectivas, acessíveis gratuitamente em algumas plataformas científicas (por exemplo, SciELO, Scopus, Web of Science). Foram analisados periódicos como *Water Research*, *Journal of Hydrology* e *Limnology and Oceanography*, entre outras. Todas as informações utilizadas foram obtidas respeitando os direitos autorais dos autores originais.

As análises dos estudos selecionados foram realizadas de maneira qualitativa e quantitativa. As informações relevantes foram interpretadas para evidenciar as características hidrológicas e físicas

que impactam o comportamento espectral da água nos reservatórios das UHEs, com base na particularidade de cada localidade.

Na escolha das obras científicas, foram priorizadas as que exploravam a correlação entre os dados espectrais e os parâmetros de qualidade da água, como a reflectância da água, concentração de clorofila-a e sólidos em suspensão. Estes parâmetros são utilizados para geração de modelos bio-ópticos, que se baseiam em estratégias de cálculos estatísticos para prever os efeitos das assinaturas espectrais da água.

Os estudos apresentados nesta pesquisa foram desenvolvidos com técnicas empíricas, baseadas em coleta e análise de dados. Essas abordagens são essenciais para explorar e compreender fenômenos complexos das propriedades bio-ópticas da água em reservatórios de Usinas Hidrelétricas (UHEs) e para a gestão ambiental e a conservação da qualidade da água.

REVISÃO DE LITERATURA

Avaliação limnológica reservatórios de UHEs instalados em sequência longitudinal

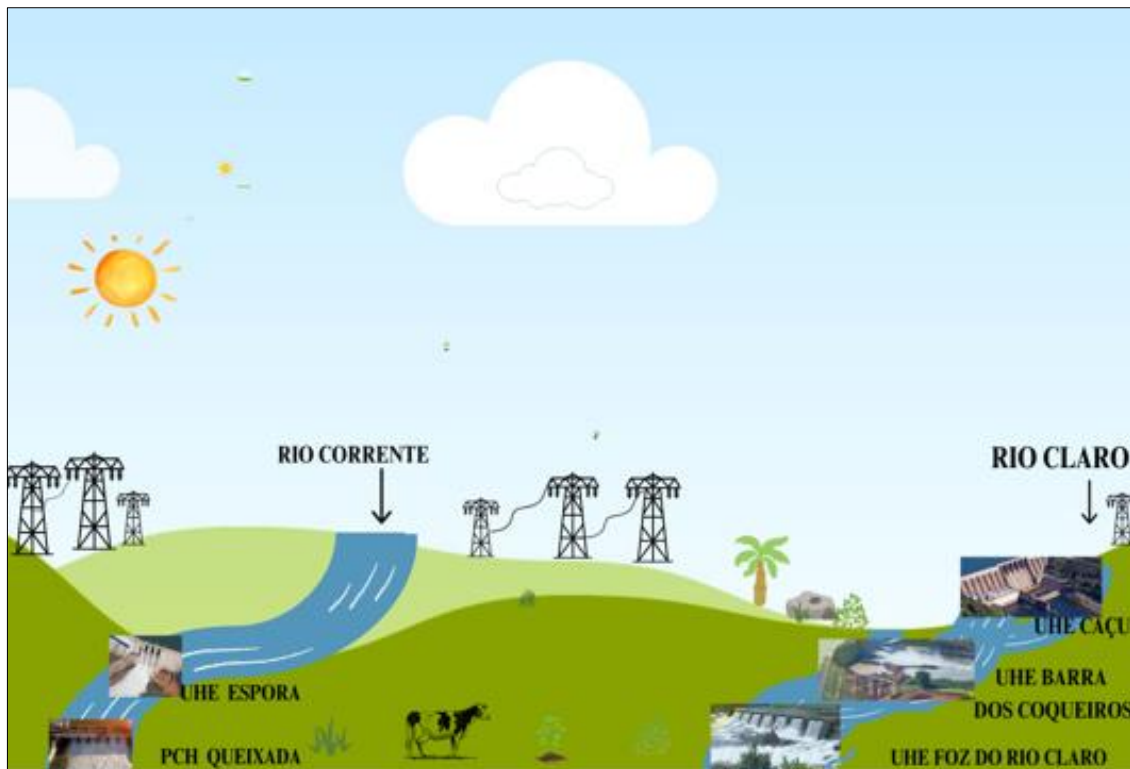
Na década de 1990, o Brasil tinha poucos exemplos de reservatórios situados no mesmo curso hídrico, conhecidos como cascata ou em série (Kimmel et al., 1990). No entanto, o avanço industrial e socioeconômico do país impulsionou a construção de várias barragens de Usinas Hidrelétricas (UHEs), muitas vezes instaladas sequencialmente ao longo do curso d'água para aumentar a eficiência na geração de energia elétrica.

A região Centro-Oeste do Brasil, caracterizada pelo bioma do Cerrado, é uma das principais áreas do país com grande concentração de usinas hidrelétricas (UHEs). Essa área faz parte do sistema integrado de produção de energia e desempenha um papel central na matriz energética do país. Nos rios Claro e Corrente, encontram-se UHEs instaladas em sequência longitudinal. Essa configuração consiste na instalação de uma UHE, seguida por outra usina a jusante, que amplia a capacidade de produção energética.

Desse modo, a UHE Caçu encontra-se a montante do rio Claro, seguida pela UHE Barra dos Coqueiros e, a jusante, pela UHE Foz do Rio Claro. Em uma área adjacente, localiza-se o rio Corrente, com a UHE Espora e a Pequena Central Hidrelétrica (PCH) Queixada (figura 1).

Essa configuração em sequência longitudinal otimiza a geração de energia elétrica, mas requer estratégias para mitigar os impactos ambientais. Segundo Esteves (1998), a construção de barragens de Usinas Hidrelétricas (UHEs), pode resultar em modificações prejudiciais, como o aumento da sedimentação nos afluentes a montante e alterações irregulares no regime hidrológico a jusante, com variações entre períodos de cheia e seca. Essa dinâmica torna essencial o monitoramento constante da qualidade da água.

Figura 1 – Exemplo de UHEs instaladas em sequência longitudinal em cursos hídricos na região do cerrado brasileiro.



Fonte: Autoria própria, 2024.

As transformações na qualidade da água a montante podem resultar em um aumento de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, devido à sedimentação e decomposição de matéria orgânica, o que pode provocar eutrofização. A jusante, o desvio nos padrões de fluxo podem levar à redução da diversidade biológica e à alteração dos habitats aquáticos, prejudicando a reprodução e a distribuição de espécies (Esteves, 2011). Essa inter-relação entre os impactos a montante e a jusante enfatiza a importância do monitoramento constante da qualidade da água nos reservatórios de UHEs para garantir a sustentabilidade ambiental.

Veronez, Lima e Tshibangu (2022) enfatizam que as fases de implementação e operação das Usinas Hidrelétricas (UHEs) são períodos com potencial para gerar significativos impactos ambientais. Assim, a elaboração do Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental (EIA-RIMA) é essencial para compreender e mitigar esses efeitos negativos nos cursos hídricos.

As Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), assim como as UHEs, exercem influência na qualidade de cursos hídricos. Bortoluzzi, Furlan e Neto (2022) realizaram pesquisas que evidenciam que a construção e operação dessas PCHs afetam o ambiente aquático, incluindo alterações no regime de fluxo de água, qualidade da água, fauna e flora locais.

Campos e Pedrollo (2023) ressaltam que a construção de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) resulta em alterações significativas no ambiente aquático, especialmente no transporte de sedimentos, sendo

essencial empregar diferentes técnicas de monitoramento, como a modelagem Fuzzy, para avaliar constantemente a qualidade hídrica.

Uma das estratégias fundamentais para o monitoramento dos recursos hídricos envolve avaliar a variação temporal e espacial dos componentes que influenciam as propriedades ópticas da água. Gomes et al. (2022) aplicaram esse método em um reservatório situado no bioma do cerrado brasileiro. O estudo examinou como os parâmetros ópticos, como clorofila-a e sedimentos em suspensão, alteram a reflectância da água e interferem em seu comportamento espectral.

Barcelos et al. (2024) realizaram uma análise estatística dos dados utilizando a Análise de Componentes Principais (PCA), revelando correlações de baixa a média intensidade entre variáveis físico-químicas e biológicas da água no reservatório da Usina Espora (GO). Os pesquisadores destacaram que as atividades agropecuárias na região têm se expandido desde a década de 1970, sendo um dos fatores que influenciam na distribuição de parâmetros na água, como os sólidos em suspensão e a clorofila-a.

Rocha et al. (2023) analisaram a resposta espectral do rio Tarumã-Açu, localizado na Amazônia brasileira, caracterizado pela coloração escura de suas águas devido à alta concentração de matéria orgânica. O estudo destacou uma relação entre a turbidez da água e a reflectância da superfície durante os períodos de vazante e enchente. Os picos de reflectância nas bandas do vermelho e verde foram associados à presença de sedimentos inorgânicos e à atividade fotossintética da clorofila-a.

Ali et al. (2023) utilizaram cálculos estatísticos para investigar os efeitos da distribuição de clorofila e sedimentos na água do Lago Chilika, na Índia. O estudo teve como objetivo correlacionar dados coletados em campo com informações derivadas do sensoriamento remoto, imagens dos satélites Oceansat-2 OCM-2 (resolução espacial aproximada de 360 m) e Landsat-8 OLI (resolução espacial aproximada de 30 m). Os resultados indicaram as áreas de maior produtividade de fitoplâncton e acúmulo de sedimentos. A partir desses dados, os pesquisadores desenvolveram algoritmos para estimar parâmetros bio-ópticos, que evidenciaram a importância nesses estudos de considerar as condições ambientais locais.

Os estudos sobre monitoramento bio-óptico da água, contribuem para a implementação de métodos inovadores para a avaliação da qualidade da água. O avanço das tecnologias de sensores ópticos, possibilitou um acompanhamento contínuo das condições da água. Essa evolução viabiliza o desenvolvimento de modelos bio-ópticos, que estimam parâmetros, como a concentração de clorofila-a e de sólidos em suspensão. Portanto, é fundamental investir nessas tecnologias para mitigar os impactos adversos sobre a qualidade da água.

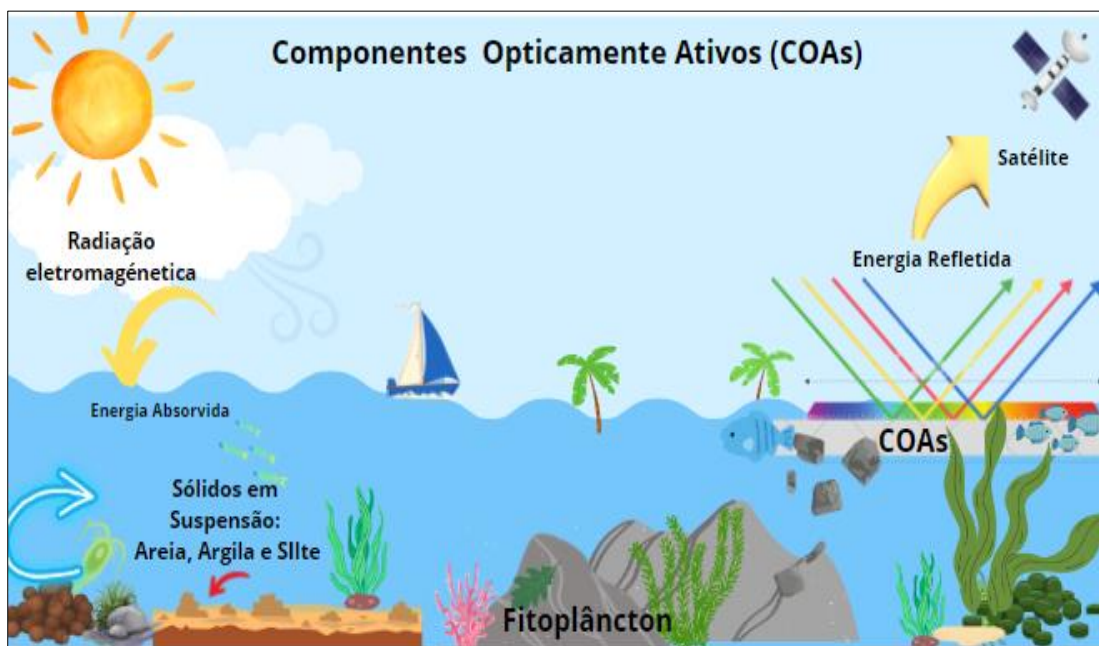
Os Parâmetros Bio-Ópticos: Clorofila-a, Sólidos em Suspensão e a Reflectância da água

Os parâmetros bio-ópticos mencionados neste levantamento descrevem a interação da luz com a água, especialmente na reflectância bidirecional, que indica como a água reflete ou absorve a luz incidente. A Concentração de Clorofila-a (Chl-a) é um indicador da produtividade primária e do estado trófico do ecossistema aquático. E a Concentração de Sólidos em Suspensão (CSS) afeta diretamente a transparência e a reflectância bidirecional da água (Pereira Filho et al. 2019). Essa compreensão dos parâmetros bio-ópticos é essencial para a avaliação da qualidade da água.

O processo de interação entre a radiação eletromagnética e os Componentes Opticamente Ativos (COAs) na água é fundamental para o monitoramento bio-óptico da água. Conforme ressaltado na figura 2, a radiação eletromagnética incide sobre a água, sendo parcialmente absorvida e refletida. Os COAs, que incluem sólidos em suspensão e fitoplâncton (clorofila-a), interferem na quantidade de luz refletida de volta para a superfície, informação que pode ser captada por sensores ópticos, como de satélites. Essa dinâmica de interação entre a radiação e os COAs é essencial para a realização de estudos detalhados sobre a qualidade da água.

A clorofila-a é um pigmento fotossintético usado como indicador da presença e quantidade de fitoplâncton nos ecossistemas aquáticos. Geralmente, seu espectro de absorção apresenta dois picos de máxima absorção, um no azul (aproximadamente 443 nm) e outro secundário no vermelho (675 nm). A magnitude desses picos depende principalmente da concentração de clorofila-a (Bricaud et al. 1995).

Figura 2 - Processo de interação entre radiação eletromagnética e os COAs em cursos hídricos.



Fonte: Autoria própria, 2024.

A Concentração de Sólidos em Suspensão (CSS) é outro parâmetro bio-óptico, que interfere na qualidade da água, altera a transparência, a absorção da luz e a disponibilidade de nutrientes. Os processos erosivos na bacia hidrográfica, intensificados pela expansão de atividades agrícolas e desmatamento, aumentam a presença de sedimentos nos cursos d'água (Silva e Passos, 2022).

Em estudos realizados por Esteves (2011), constatou-se que a CSS presente na água, se refere aos materiais inorgânicos (como areia, argila e minerais) e aos orgânicos (como matéria orgânica em decomposição). Essa concentração é geralmente medida em termos de massa de sólidos por unidade de volume de água (por exemplo, mg L^{-1}).

A Concentração de Sólidos em Suspensão (CSS) na água resulta de fatores como a origem das partículas, incluindo a estrutura geológica, o uso e a ocupação da terra, a topografia, a erosão, as atividades industriais, as descargas urbanas, as condições hidrológicas (como correntes e turbulência) e a sazonalidade climática (Wang et al. 2024). Assim, a CSS tem origem tanto natural, quanto antrópica e, em conjunto com a Concentração de Clorofila-a (Chl-a), impacta a maneira como a radiação é absorvida ou refletida.

A avaliação da CSS e da Chl-a, pode ser realizada por meio de tecnologias avançadas, como sensores remotos em imagens de satélite e espectrorradiômetros de campo. Essas ferramentas são essenciais para a obtenção de dados precisos sobre aspectos físico-químicos e biológicos, além do comportamento espectral das bacias hidrográficas, conforme destacado por Kallio et al. (2020).

As altas CSS podem indicar impactos ambientais adversos, como redução da transparência da água, assoreamento, eutrofização das águas, entre outros impactos, que evidenciam a importância de monitoramento e gestão adequados para preservar a qualidade da água (Bi; Röttgers e Hieronymi, 2023). Estudos de monitoramento bio-óptico da água também são fundamentais nesse contexto, por contribuírem para entender como essas concentrações afetam a reflectância e outras propriedades ópticas da água.

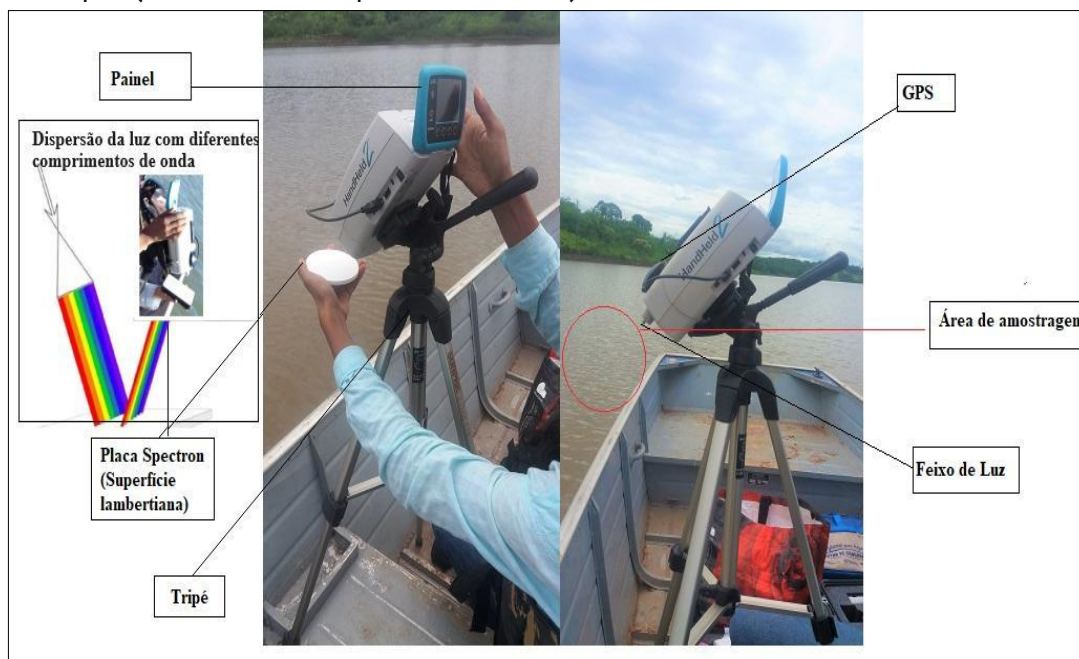
Dentre os instrumentos utilizados no monitoramento bio-óptico, destaca-se o espectrorradiômetro ASD FieldSpec® HandHeld, projetado para captar a radiação eletromagnética refletida por superfícies terrestres em amplas faixas do espectro (325 nm a 1075 nm). Através de um aplicativo específico, o aparelho converte a radiação refletida em sinais elétricos proporcionais à energia incidente. Essa capacidade de medição em múltiplas bandas permite a análise detalhada das propriedades ópticas das superfícies, essencial para o monitoramento da qualidade da água (Santos, 2018).

O FieldSpec® HandHeld, opera com base nos princípios da óptica, que foram inicialmente investigados por Isaac Newton (1672), o qual descobriu que a luz branca pode ser separada em suas cores componentes através da refração em um prisma, formando um espectro contínuo de cores visíveis, utiliza princípios ópticos para medir a refração, reflexão e dispersão da luz em diferentes comprimentos de onda.

O modelo FieldSpec® HandHeld utiliza uma placa de referência chamada de Spectron, que possui uma característica óptica conhecida como reflectância lambertiana, que significa que ela reflete a luz incidente de maneira uniforme em todas as direções, refletindo 100% da luz que incide sobre ela.

A calibração do instrumento FieldSpec® HandHeld (figura 3), o detector é posicionado em relação à Spectron, uma placa de referência com características ópticas conhecidas como reflectância lambertiana em homenagem ao matemático e físico suíço Johann Heinrich Lambert, que formalizou matematicamente esse tipo de reflexão (ASD, 2010).

Figura 3 – Placa Spectron utilizada para calibrar espectrorradiômetro de campo (modelo FieldSpec® HandHeld).



Fonte: Autoria própria, 2024.

A placa lambertiana é fundamental para calibrar a resposta do instrumento em cada ponto de amostragem. Por meio dela, é possível identificar, assim como nas experiências de Newton (1672), que a luz branca é composta por uma mistura de cores visíveis, devido à dispersão da luz com diferentes comprimentos de onda. A calibração do instrumento com a placa assegura que as medições subsequentes de reflectância sejam precisas e consistentes em diferentes condições de amostragem e ambientes (figura 4).

Em estudos específicos para ambientes aquáticos, a faixa espectral entre 400 nm e 900 nm, que refere-se ao espectro visível do azul ao infravermelho, é frequentemente utilizada. Esse intervalo espectral é selecionado devido aos picos de absorção e reflectância de parâmetros bio-ópticos, como a Chl-a, e a CSS, que possibilitam uma análise mais aprofundada da qualidade hídrica (Ogashawara e Lin, 2019).

A reflectância bidirecional da água, em função do comprimento de onda, resulta de uma combinação complexa de fatores, com as condições meteorológicas. Para garantir medições precisas, é essencial que a

coleta de dados ocorra sob luz solar direta, que fornece a intensidade necessária para que os sensores capturem adequadamente os sinais de reflectância. Condições adversas, como ventos fortes, podem gerar ondas na superfície da água, criando sombras que alteram a distribuição da luz e comprometem a precisão das medições (Bi; Röttgers e Hieronymi, 2023).

Assim, geralmente, as condições ideais para a coleta de dados de reflectância da água, principalmente na região Centro-Oeste do Brasil, correspondem ao horário entre as 10h e as 14h, quando a luz solar é mais intensa e direta. Nesse período, a radiação solar incide de forma mais vertical sobre a superfície da água, minimizando a interferência causada por sombras e variações na distribuição da luz, fatores esses, que asseguram uma melhor qualidade dos dados obtidos.

A variação da reflectância bidirecional da água é resultado dos COAs presentes em um curso hídrico, sendo ambientes com altas concentrações de clorofila-a e sólidos em suspensão frequentemente exibem picos de reflectância nas regiões do espectro visível, particularmente nas faixas de comprimento de onda correspondentes ao verde e vermelho. Esses padrões espectrais são indicativos das interações complexas entre a luz incidente (reflectância) e os COAs presentes na água, como clorofila-a e sólidos em suspensão (Rosa et al. 2019).

A CSS representa um dos parâmetros ópticos de interferência na reflectância bidirecional da água, devido à dispersão e absorção diferencial da luz pelos sólidos em suspensão, que modificam a composição espectral da luz refletida na superfície da água (Lee et al. 2023). Além disso, a turbidez causada pelas CSS pode afetar a transparência na coluna d'água, influenciando a distribuição da reflectância ao longo dos comprimentos de onda visíveis e infravermelhos próximos (Cheng et al. 2020).

No estudo conduzido por Marinho e Severo (2023), foram analisados os padrões de Reflectância de sensoriamento remoto (Rrs) da superfície d'água ao longo do Rio Uatumã e da Represa de Balbina na Amazônia brasileira. Identificaram-se características espectrais da água, com um pico significativo de Rrs próximo a 580 nm (região espectral do verde), com valores inferiores a $0,006 \text{ Sr}^{-1}$, correlacionados à atividade fotossintética da clorofila-a. Observou-se também um pico secundário de reflectância na faixa de 640 nm (região espectral do vermelho), atribuído à maior concentração de sólidos totais suspensos presentes na água.

As pesquisas que investigam a influência dos Componentes Ópticamente Ativos (COAs) na reflectância bidirecional da água, coletada por espectrorradiômetros, ou na Reflectância de Sensoriamento Remoto (Rrs), obtida por sensores remotos, contribuem para o monitoramento da qualidade da água. Esses estudos são essenciais para o desenvolvimento de modelos bio-ópticos avançados, que utilizam técnicas estatísticas computacionais para avaliar como concentrações de clorofila-a, sólidos em suspensão e outros componentes ópticos afetam a interação da luz com

a água. Esses modelos integram geotecnologias e promovem o monitoramento contínuo da qualidade hídrica.

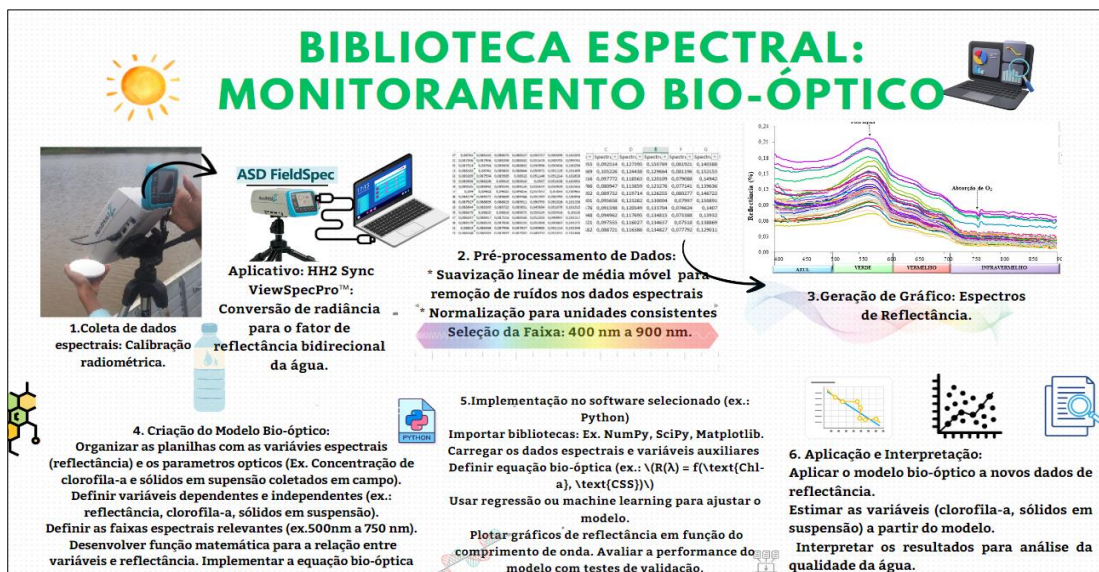
A Biblioteca Espectral surge como um recurso valioso nesse contexto, sendo um meio de análise de dados desde a coleta em campo até o processamento e interpretação. Após a coleta, os dados espectrais passam por um rigoroso tratamento, que inclui calibração radiométrica, normalização e remoção de ruído. Após o processamento inicial, os dados são submetidos à análise em softwares especializados, como Python, uma ferramenta para a construção e validação de modelos bio-ópticos, pois permite uma melhor compreensão dos fenômenos ópticos aquáticos.

A linguagem Python, junto a suas bibliotecas especializadas, possibilita a aplicação de algoritmos para modelagem bio-óptica, análise estatística e visualização de resultados. Essa abordagem permite o desenvolvimento de modelos que estimam a influência de variáveis, como a concentração de clorofila-a e sólidos em suspensão, na reflectância e transparência das águas dos reservatórios. A combinação de dados coletados por espectrorradiômetros com análises estatísticas auxilia o monitoramento bio-óptico da água (figura 4).

Os modelos estatísticos criados para estimar as correlações entre clorofila-a, sólidos em suspensão e as faixas espectrais do verde e vermelho apresentam equações que evidenciam as possíveis relações entre esses parâmetros ópticos. Assim, o monitoramento bio-óptico contribui significativamente para o monitoramento bio-óptico da água, conforme ressaltado na figura 5.

Os modelos bio-ópticos viabilizam uma análise detalhada dos efeitos da Chl-a e CSS na reflectância bidirecional e na transparência da água, e fornecem informações valiosas para o monitoramento da qualidade da água e tomada de decisões.

Figura 4 – Biblioteca Espectral para geração de modelos bio-ópticos em reservatórios de UHEs.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Figura 5 - Contribuições do monitoramento bio-óptico para avaliar a qualidade da água.



Fonte: Autoria própria (2024).

Abordagem estatística na modelagem bio-óptica de reservatórios de usinas hidrelétricas

A modelagem bio-óptica aplicada a reservatórios de usinas hidrelétricas tem sua origem em pesquisas desenvolvidas em águas oceânicas, nas quais inicialmente se buscou compreender as interações entre a luz e os componentes opticamente ativos da água. Posteriormente, esses modelos foram adaptados para ambientes aquáticos continentais, uma vez que as propriedades ópticas inerentes e as dinâmicas físico-químicas desses sistemas diferem significativamente das condições marinhas (Smith et al., 1978). Essa adaptação foi fundamental para o avanço da compreensão dos sistemas aquáticos continentais e consolidou a modelagem bio-óptica como uma ferramenta essencial para o monitoramento da qualidade da água em reservatórios e outros corpos hídricos interiores.

No século XX e início do século XXI, os modelos bio-ópticos começaram a ser amplamente aplicados em ambientes de reservatórios de UHEs. Esse progresso coincidiu com o desenvolvimento e refinamento contínuo das técnicas de sensoriamento remoto, facilitando uma integração mais eficaz e precisa de dados espectrais para a modelagem bio-óptica (Wang, Wenjun et al. 2024).

No estudo realizado por Lima et al. (2023), os pesquisadores monitoraram a variação de ficocianina e clorofila-a em águas interiores do Brasil, sendo utilizados algoritmos semi-analíticos e de aprendizado de máquina (ML). O estudo evidenciou a importância do uso de sensoriamento remoto para a avaliação ambiental da qualidade da água em rios e reservatórios no país.

Adjovu et al. (2023) destacam a importância da estimativa de clorofila-a, que é amplamente realizada por meio de modelos empíricos, analíticos, semi-empíricos e, mais recentemente, por modelos avançados de inteligência artificial (IA) e Machine Learning (ML) no monitoramento bio-óptico em ambientes aquáticos. Essa diversidade de abordagens evidencia a evolução das técnicas de modelagem, permitindo uma análise mais precisa e abrangente das concentrações de clorofila-a.

Um exemplo prático dessa evolução aparece no estudo de Amador e Pombrol (2023), que analisou a variação da concentração de clorofila-a no reservatório Abreus, em Cuba. Os pesquisadores utilizaram métodos avançados de sensoriamento remoto, com imagens do satélite Landsat 8 e três modelos de regressão simples. Os resultados indicaram que o modelo mais eficaz refere a razão entre os valores espectrais das bandas B4 (infravermelho próximo) e B5 (infravermelho médio), destacando-se como o principal indicador da concentração de clorofila-a. Essa abordagem ressalta a importância da integração de tecnologias de sensoriamento remoto e modelagem estatística no monitoramento da qualidade da água.

Essas investigações se alinham ao quadro 1, que apresenta diversos modelos bio-ópticos desenvolvidos com base na relação entre a reflectância e os Componentes Ópticos Ativos (COAs). Essas fórmulas, que combinam observações empíricas com princípios físicos e biológicos, são fundamentais para estimar a concentração de clorofila-a, sólidos em suspensão e outros parâmetros bio-ópticos. Os dados de reflectância obtidos por sensoriamento remoto e instrumentos como o espectrorradiômetro possibilitam essa análise. A integração de métodos tradicionais e modernos, incluindo a aplicação de inteligência artificial (IA) e machine learning (ML), enriquece as práticas de monitoramento da qualidade da água.

Zhai et al. (2023) desenvolveram um modelo bio-óptico em um curso hídrico na China com alta concentração de sólidos em suspensão (>20 g/L), com uso de tecnologia de sensoriamento remoto multiespectral de drones. Ao aplicar modelos empíricos existentes, encontraram baixa precisão, especialmente em altas concentrações de sólidos em suspensão. No entanto, introduziram um novo modelo de três bandas (verde, vermelho e infravermelho), denominado TB2-EXP, que melhorou significativamente a estimativa de sólidos em suspensão, especialmente em condições de extrema turbidez. Os resultados destacam o potencial dos drones multiespectrais para monitoramento eficaz das águas.

Crioni, Teramoto e Chang (2023) testaram diferentes modelos bio-ópticos previamente descritos na literatura, aplicados nas águas dos reservatórios Billings, Guarapiranga e Rio Grande (SP), utilizando a reflectância de sensoriamento remoto obtido a partir de imagens do Sentinel-2. Os resultados mostraram que os modelos tiveram desempenhos variados na detecção de clorofila-a, sendo que o modelo proposto por Dall'Olmo et al. (2003) se destacou como o mais preciso, seguido pelo modelo de Gitelson et al. (2003).

De acordo com Crioni, Teramoto e Chang (2023), esses modelos não foram originalmente desenvolvidos para a região estudada, e as características locais podem influenciar a precisão dos resultados.

Consequentemente, o estudo sugere que alguns modelos são eficazes para estimar a clorofila-a na área investigada, enquanto outros não apresentaram ajustes satisfatórios.

Quadro 1 – Exemplos de modelos bio-ópticos aplicados em ambientes aquáticos.

Modelo bio-óptico	Autor/ANO	Equações
Modelo Derivada de primeira ordem (1D) e segunda ordem (2D)	Goodin et al. (1993).	$\frac{1D}{dR(\lambda)} \frac{d\lambda}{d\lambda^2}$ $2D \frac{d^2R(\lambda)}{d\lambda^2}$ Onde: • $dR(\lambda)$ Derivada de primeira ordem da reflectância em relação ao comprimento de onda. • $d(\lambda)$ Comprimento de onda da luz visível ou infravermelha próxima utilizada para medir a reflectância da água.
Modelo exponencial de Dall'Olmo et al.	Dall'Olmo et al. (2003).	$R(\lambda)=R_w(\lambda)+a(\lambda) \cdot Cchl \cdot \Phi(\lambda)$ Onde: • $R(\lambda)$ é a reflectância espectral na banda de comprimento de onda λ • $R_w(\lambda)$ é a reflectância de base da água (reflectância da água limpa). • $Cchl$ é a concentração de clorofila-a na água, • $a(\lambda)$ é um coeficiente de absorção da clorofila-a, que depende do comprimento de onda λ • $\Phi(\lambda)$ é o fator de eficiência quântica da clorofila-a, que também varia com λ
Modelo de Sólidos em suspensão.	Shi; Zhang e Wang, (2018)	$TSM=a \cdot R(\lambda NIR) +b \cdot [R(\lambda NIR)]^2$ Onde: • TSM é a concentração de matéria em suspensão total. • $R(\lambda NIR)$ é a reflectância na banda espectral NIR específica usada no estudo (por exemplo, 862 nm). • a e b são coeficientes empíricos ou semi-empíricos derivados durante a calibração do modelo.

Fonte: Autoria própria (2024).

Nesse contexto, a validação de estudos de modelagem bio-óptica da água deve considerar as características específicas do local, uma vez que um modelo pode ser eficaz em ambientes aquáticos na China, mas não em águas de uma região brasileira e vice-versa. Assim, é fundamental empregar técnicas para identificar as faixas espectrais mais apropriadas conforme as particularidades da área de estudo.

Existem vários modelos bio-ópticos aplicáveis em ambientes aquáticos, porém é essencial considerar aspectos como calibração e validação apropriados para garantir precisão e confiabilidade. Além disso, é importante escolher modelos específicos para diferentes tipos

de ambientes aquáticos, que considerem suas características ópticas e hidrográficas.

Os modelos dependem da sensibilidade espectral da água e dos constituintes estimados, exigindo a escolha adequada das bandas espectrais e possíveis atualizações conforme novos dados e tecnologias surgem. A interpretação correta dos resultados também é fundamental, exigindo conhecimento especializado para evitar interpretações inadequadas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A implementação de metodologias inovadoras, como a modelagem bio-óptica, é especialmente relevante em biomas vulneráveis, como o Cerrado, que enfrenta a redução de áreas nativas devido à expansão da agropecuária e urbanização. Nesse cenário, a adoção de leis ambientais, juntamente com o uso de tecnologias avançadas, como espectrorradiômetros, representa um avanço significativo na proteção e monitoramento desses ecossistemas.

As pesquisas abordadas neste estudo fornecem um importante conhecimento técnico para o monitoramento bio-óptico em ambientes aquáticos, tanto em contextos nacionais quanto internacionais. O levantamento literário realizado revelou que essas investigações utilizam ferramentas estatísticas para estimar e comparar variáveis bio-ópticas, como clorofila-a e sólidos em suspensão. Entre as ferramentas destacadas, encontram-se a análise multivariada, as razões de bandas e os modelos de regressão, sejam eles lineares ou não lineares. As faixas espectrais mais analisadas no monitoramento bio-óptico incluem o verde (500 nm a 600 nm) e o vermelho (600 nm a 700 nm), essenciais para a caracterização da qualidade da água.

A aplicação de modelos bio-ópticos é complexa, e requer uma compreensão aprofundada dos fatores que influenciam a variação na reflectância em diferentes comprimentos de onda ao longo de um curso d'água. Essas variações podem sinalizar mudanças nas concentrações de clorofila-a e sólidos suspensão, tornando-se fundamentais para monitorar fontes de poluição e alterações ambientais.

A elaboração de modelos bio-ópticos exige a seleção criteriosa dos comprimentos de onda que melhor se correlacionam com os componentes ópticos da água, etapa essencial para garantir a precisão e a confiabilidade dos resultados. A escolha adequada dessas bandas determina a capacidade do modelo em representar com fidelidade as propriedades ópticas da coluna d'água.

Entretanto, erros podem ocorrer devido à seleção inadequada de bandas espectrais, incertezas nas medições de reflectância ou variações nas condições ambientais que afetam a interação da luz com a água. Apesar dessas limitações, a modelagem bio-óptica permanece como uma ferramenta fundamental para analisar variações temporais e espaciais dos componentes ópticos ativos, contribuindo de forma significativa para o monitoramento e a gestão da qualidade da água em reservatórios de usinas hidrelétricas.

REFERÊNCIAS

ADJOVU, G.E.; STEPHEN, H.; JAMES, D.; AHMAD, S. **Measurement of Total Dissolved Solids and Total Suspended Solids in Water Systems: A Review of the Issues, Conventional, and Remote Sensing Techniques**. *Hydrology*. v.15, n.14, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs15143534>. Acesso em: 7 jul. 2024.

ALI, SM.et al. **Bio-Optical Characterization of Chilika Lagoon Using Multispectral Remote Sensing Data**. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, v.51. 1729-1737, 2023. Disponível em: [doi:10.1007/s12524-023-01716-x](https://doi.org/10.1007/s12524-023-01716-x). Acesso em: 06 jul. 2024.

AMADOR, J, A, C; POMBROL, A, V. **Empleo de técnicas de percepción remota para la estimación de Clorofila-a en el Embalse Abreus**. *Use Of Remote Sensing techniques for the estimation of chlorophyll-a in the abreus reservoir*. 2023. Disponível em: <https://www.researchgate.net/>. Acesso em: 6 jul. 2024.

ASD, **Analytical Spectral Devices, Inc. FieldSpec® HandHeld 2™ Spectroradiometer User's Manual**. ASD Inc., 2010, p.140.

BARCELOS, A. A. et al. **Environmental impacts due to the behavior of limnological variables in water reservoirs of hydroelectric power plants**. *Environ Earth Sci* 83, 294 (2024). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11624-z>. Acesso em: 08 jul. 2024.

BERNARDO, N et al. **Ajustamento de modelos bio-ópticos para estimar a concentração de sólidos suspensos totais no reservatório de Barra Bonita**. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 67, n. 7, p. 1497-1507, 2019. DOI: 10.14393/rbcv67n7-49203. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/49203>. Acesso em: 6 jul. 2024.

BI, S.; Röttgers, R.; Hieronymi, M. **Transfer model to determine the above-water remote-sensing reflectance from the underwater remote-sensing ratio**. *Optica Publishing Group*. v.31, 10512-10524, 2023. Disponível: <https://doi.org/10.1364/OE.482395> Acesso em: 6 jul. 2024.

BORTOLUZZI, M.; FURLAN, M.; NETO, dos R, J. F. **Assessing the impact of hydropower projects in Brazil through data envelopment analysis and machine learning**. *Renewable Energy*, Volume 200, November 2022, Pages 1316-1326. Elsevier. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.10.066>. Acesso em: 08 jul. 2024.

BRASIL. **Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA**. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 18 mar. 2005.

BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. **Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens**. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 21 set. 2010.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 9 jan. 1997.

BRICAUD, A., M. Babin, A. Morel, H. Claustre, 1995. **Variability in the chlorophyll specific absorption coefficients of natural phytoplankton: analysis and parameterization**. Journal of Geophysical Research, 100, 13321-13332.

CABRAL, J. B. P. et al. **Harmful Effects of Potentially Toxic Elements in Soils of Cerrado Biomes**. Water Air Soil Pollut, 334, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06344-2>. Acesso em: 08 jul. 2024.

CASTRO, Q, A., et al. **Implementation of remote sensing algorithms to estimate TOC, Chl-a and TDS in a tropical water body; Sanalona reservoir, Sinaloa, Mexico**. Research Square.2023. Disponível em: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3353764/v1>. Acesso em: 08 jul. 2024.

CHENG, C. et al. **What is the relationship between land use and surface water quality? A review and prospects from remote sensing perspective**. Environ. Sci. Pollut. v.29, 56887-56907, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21348-x>. Acesso em: 7 jul. 2024.

DALL'OLMO, G., GITELSON, A. A, RUNDQUIST, D. C. **Towards a unified approach for remote estimation of chlorophyll-a in both terrestrial vegetation and turbid productive waters**. Geophysical Research Letters. 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2003GL018065>. Acesso em: 6 jul. 2024.

ESTEVEZ, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. Rio de Janeiro: Interciência, 2011.

FRANÇA, J. M. B. et al. **Qualidade da água em um sistema de reservatórios em cascata – um estudo de caso no semiárido brasileiro**. Eng. Sanit. Ambient. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200328>. Acesso em: 08 jul. 2024.

GOMES, P. S, et al. **Avaliação espaço-temporal de constituintes opticamente ativos e caracterização espectral das águas de um reservatório no cerrado brasileiro**. Revista Brasileira de Geografia Física, Pernambuco, v. 5, n. 15, p. 2654, 01 jan. 2022. Semanal. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/download/253449/41891>. Acesso em: 08 jul. 2024.

HOU, Y.; Xing, Q.; Zheng, X.; Sheng, D.; Wang, F. **Monitoring Suspended Sediment Concentration in the Yellow River Estuary and Its Vicinity Waters on the Basis of SDGSAT-1 Multispectral Imager**. Water, 2023, 15(19), 3522. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w15193522>. Acesso em: 08 jul. 2024.

KIMMEL, B.L.; Lind, O.T.; Paulson, L.J. Reservoir primary production. In: Thornton, K.W.; Kimmel, B.L.; Payne, F.E. **Reservoir limnology: Ecological perspectives**. New York: John Wiley & Sons, p.133-193. 1990

KUMAR, M. et al. **In-situ optical water quality monitoring sensors-applications, challenges, and future opportunities**. *Frontiers in Water*, v.6, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1380133>. Acesso em: 08 jul. 2024.

LEE, J.-S et al. **Suspended Sediment Concentration Estimation along Turbid Water Outflow Using a Multispectral Camera on an Unmanned Aerial Vehicle**. *Remote Sens.* v.15, n. 5540, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs15235540>. Acesso em: 6 jul. 2024.

LIEW, S. C. et al. **Monitoring water quality in Singapore reservoirs with hyperspectral remote sensing technology**. *Water Practice and Technology*, v. 14, n. 1, p. 118-125, jan. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/wpt.2018.119CC>. Acesso em: 21 jun. 2024.

LIMA, Thainara Munhoz Alexandre de et al. **Assessment of Estimated Phycocyanin and Chlorophyll-a Concentration from PRISMA and OLCI in Brazilian Inland Waters: A Comparison between Semi-Analytical and Machine Learning Algorithms**. *Remote Sensing*, v. 15, n. 5, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs15051299>. Acesso em: 6 jul. 2024.

LOBO, F. L. L.; Jorge, D. S. F. **Processamento de dados, modelagem e mapeamento de parâmetros bio-ópticos**. In: BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. M.; MARTINS, V. S. (Orgs.). *Introdução ao Sensoriamento Remoto de Sistemas Aquáticos: princípios e aplicações*. 1. ed. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2019. p. 82-103. Disponível em: <https://www.dpi.inpe.br/labisa/livro/>. Acesso em: 06 jul. 2024.

MARINHO, R, R; SEVERO, E, B. **Comportamento espectral do rio Uatumã e representação de Balbina, Amazonas, Brasil**. In: XX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2023, Florianópolis. Anais... Florianópolis: SBSR, 2023. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/>. Acesso em: 6 jul. 2024.

MEDEIROS, T, A, G, et al. **Bio-optical properties of the Brazilian Abrolhos Bank's shallow coral-reef waters**. *Fronteiras em Sensoriamento Remoto*, v. 3, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/frsen.2022.986013>. Acesso em: 6 jul. 2024.

MOREL, A.; MARITORENA, S. Bio-optical properties of oceanic waters: A reappraisal. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 106, n. C4, p. 7163-7180, 2001. DOI: 10.1029/2000JC000319. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2000JC000319>. Acesso em: 7 jul. 2024.

OGASHAWARA, IGOR; LI, LIN; HOWARD, CHASE; DRUSCHEL, GREGORY K. **Monitoring Phycocyanin with Landsat 8/Operational Land Imager Orange**

Contra-Band. Environments, v.9, p. 40, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/environments9030040>. Acesso em: 6 jul. 2024.

PEREIRA FILHO, W, et al. **Clorofila-a na coluna de água e reflectância espectral.** Anais... XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2019, São José Dos Campos, INPE, 2019. Disponível em: <https://proceedings.science/sbsr-2019/papers/clorofila-a-na-coluna-de-agua-e-reflectancia-espectral?lang=pt-br>. Acesso em: 08 jul. 2024.

PIZANI, Fernanda Mara Coelho; FERREIRA, Adrielly Fonseca Fialho; MAILLARD, Philippe. **Estimativa de parâmetros Não-Opticamente Ativos de qualidade da água a partir de sensores Sentinel-2/MSI e Landsat-8/OLI.** Revista Caminhos de Geografia, Uberlândia-MG, v. 23, n. 90, p. 399-414, dez. 2022. Disponível em: DOI: <http://doi.org/10.14393/RCG239061589>. Acesso em: 7 jul. 2024.

ROCHA, A. R., et al. **Resposta espectral de águas escuras amazônicas em ambiente com influência antrópica na cidade de Manaus-AM.** Anais... XX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis. São José dos Campos, INPE, 2023. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/372442366>. Acesso em: 08 jul. 2024.

ROSA, C. N. et al. **Resposta da reflectância da água frente à presença de distintas concentrações de sólidos em suspensão na água.** In: Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, São José dos Campos: INPE, 2019. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/332876860>. Acesso em: 08 jul. 2024.

SANTOS, A. K. F, et al. **Relação entre reflectância in situ do espectrorradiômetro e de superfície do Landsat 8/ OLI nas águas do reservatório da Usina hidrelétrica Barra dos Coqueiros (GO).** Anais... XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. São José dos Campos, INPE, 2019. Disponível em: <https://proceedings.science/sbsr-2019>. Acesso em: 08 jul. 2024.

SANTOS, E. V. R. et al. **Application of spectral indexes in the evaluation of sediment input to the reservoirs of the Itumbiara and Batalha hydroelectric power plants (Brazil).** Dialnet, ISSN-e 2340-7743, n. 23, 2024. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9097293>. Acesso em: 08 jul. 2024.

SHI, W.; Zhang, Y.; Wang, M. **Deriving Total Suspended Matter Concentration from the Near-Infrared-Based Inherent Optical Properties over Turbid Waters: A Case Study in Lake Taihu.** Remote Sensing, v. 10, n. 2, artigo 333, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs10020333>. Acesso em: 06 jul. 2024.

SILVA, EFF, NOVO, EMLM, Lobo, FL et al. **Tipos de águas ópticas encontradas em águas brasileiras.** Limnologia, 22, 57-68. 2021.

Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10201-020-00633-z>. Acesso em: 6 jul. 2024.

SILVA, Ranielle Linhares da; PASSOS, Carlos José Sousa. **Controle de sedimentos em rios e reservatórios**. In: Encontro nacional de engenharia de sedimentos, 15, Campo Grande, MS: ABRHidro. Anais..., 2022. Disponível em: <https://les.abrhidro.org.br>. Acesso em: 6 jul. 2024.

SMITH, R. C.; Baker, K. S. **The bio-optical state of ocean waters and remote sensing**. *Limnology and Oceanography*, v. 23, p.247-259, 1978. Disponível em: <https://doi.org/10.4319/lo.1978.23.2.0247>. Acesso em: 6 jul. 2024.

UUDEBERG, K. et al. **Optical Water Type Guided Approach to Estimate Optical Water Quality Parameters**. *Remote Sensing*, v. 12, n. 6, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs1206093>. Acesso em: 7 jul. 2024.

VERONEZ, F. A; Lima, F. R. D; Tshibangu, G. M. (2022). **Environmental impacts of hydropower plants in Brazil: an identification guide**. *Sustainability in Debate*, 13(1), 210. Disponível em: <https://doi.org/10.18472/SustDeb.v13n1.2022.40635>. Acesso em: 21 jun. 2024.

WANG, W., et al. **Quantitative Contributions of Climate and Human Activities to Streamflow and Sediment Load in the Xiliugou Basin of China**. *Sustainability*, v. 16, n. 11, p. 4645, 30 maio 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su16114645>. Acesso em: 30 jun. 2024.

ZHAI, Y. et al. **Modeling of Suspended Particulate Matter Concentration in an Extremely Turbid River Based on Multispectral Remote Sensing from an Unmanned Aerial Vehicle (UAV)**. *Remote Sensing*, 2023, 15(22), 5398. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs15225398>. Acesso em: 09 jul. 2024.

ZHANG, C. et al. **Estimation of Suspended Sediment Concentration in the Yangtze Main Stream Based on Sentinel-2 MSI Data**. *Remote Sensing*, v. 14, n. 18, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs14184446>. Acesso em: 06 jul. 2024.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado, em parte, pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES–Brasil), Código de Financiamento 001. O trabalho contou também com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq–Brasil), por meio dos processos nº 471123/2014-5 e 305566/2014-8, bem como do Programa Nacional de Cooperação Acadêmica (PROCAD/CAPES–Brasil), processo nº 88881.068465/2014-01.

Contato da autora e do autor:

autora: Ana Karoline Ferreira dos Santos
e-mail: karoljti.santos@gmail.com

autor: João Batista Pereira Cabral
e-mail: cabral@ufj.edu.br

Manuscrito aprovado para publicação em: 01/07/2025