PROPRIEDADES BIO-ÓPTICAS DA ÁGUA NA ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL COSTA DOS CORAIS

Thais Andrade Galvão de Medeiros[1], Andréa de Lima Oliveira[1], Vitor Galazzo de Paiva[1], Julia Caon Araujo[2], José Carlos Sicolí Seoane[2] and Milton Kampel[1]

[1] Divisão de Observação da Terra e Geoinformática, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, Brasil, {thais.medeiros, andrea.oliveira, vitor.paiva, milton.kampel}@inpe.br ; [2] Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, julia.caon23@gmail.com, cainho@geologia.ufrj.br

RESUMO

O advento de sensores hiperespectrais com melhor resolução espacial, como o PRISMA e o ENMAP, aumentaram as possibilidades de aplicação de técnicas sensoriamento remoto para mapeamento de habitats e monitoramento de variáveis ambientais em recifes de coral. No entanto, para a aplicação de algoritmos voltados para esse fim é fundamental a caracterização das propriedades bio-ópticas dominantes na área de estudo. Nesse trabalho, focamos na etapa de caracterização bio-óptica na área de Proteção Ambiental Costa dos Corais (APACC), em Tatuamunha, Alagoas, analisando a água sobre os recifes de coral e em áreas adjacentes. A região apresentou propriedades típicas de águas costeiras, com contribuição elevada do coeficiente de absorção pela matéria orgânica colorida dissolvida e detritos. Futuros estudos devem buscar a estimativa de variáveis relevantes para o monitoramento ambiental por sensoriamento remoto.

Palavras-chave — Recifes de coral, propriedades bio-ópticas, águas costeiras, absorção, sensoriamento remoto da água

ABSTRACT

The advent of hyperspectral sensors with better spatial resolution, such as PRISMA and ENMAP, has expanded the possibilities for applying remote sensing techniques in habitat mapping and environmental monitoring of coral reefs. However, for the application of algorithms aimed at this purpose, it is essential to characterize the dominant bio-optical properties in the study area. In this work, we focus on the bio-optical characterization of the Costa dos Corais Environmental Protection Area (APACC), in Tatuamunha, Alagoas, analyzing the water over the coral reefs and in adjacent areas. The region exhibited typical coastal water properties, with a high contribution from the absorption coefficient of colored dissolved organic matter and detritus. Future work should aim to estimate relevant variables for environmental monitoring using remote sensing.

Keywords *— Coral reefs, bio-optical properties, coastal waters, absorption, water remote sensing*

1. INTRODUÇÃO

Os recifes de coral estão entre os ecossistemas marinhos mais vulneráveis, sendo considerados indicadores da saúde desses ambientes [1,2]. Eles têm sido ameaçados pelo aumento das temperaturas oceânicas, por eventos extremos relacionados às mudanças climáticas e a pressões de origem antrópica [3,4]. Nas últimas décadas, a sua degradação tornou-se uma preocupação mundial [5], enfatizando a necessidade do desenvolvimento de ferramentas apropriadas para diagnóstico e monitoramento, como no caso da utilização de técnicas de sensoriamento remoto (SR).

As ferramentas para ampliar o conhecimento sobre recifes de coral incluem desde mapeamento batimétrico e bentônico e avaliação da qualidade da água (como a concentração de clorofila-*a* - Clo-*a*, material particulado em suspensão e turbidez, entre outros), até modelos usados para estimativas de produtividade primária e modelagem biogeoquímica [6]. Esses métodos e ferramentas requerem estimativas precisas da variabilidade nas propriedades bio-ópticas da coluna d'água. Mudanças nas propriedades bio-ópticas afetam a propagação da luz solar ao longo da coluna d'água, influenciando assim a distribuição de temperatura e a profundidade de penetração da radiação ultravioleta; aspectos relevantes para a compreensão da dinâmica dos recifes de coral [7].

Diversas áreas de recifes de coral na costa brasileira se encontram em áreas de conservação ambiental, como a Área de Proteção Ambiental Costa dos Corais (APACC) que é a maior unidade de conservação costeira e marinha do Brasil. Abrange mais de 400 mil hectares e aproximadamente 120 km de litoral, estendendo-se de Tamandaré, PE a Maceió, AL [8]. No plano de manejo da APACC, estão previstas áreas *no-take* ou Zonas de Preservação (ZP), também conhecidas como "áreas fechadas", como principal estratégia de conservação dos recifes de coral e manejo da pesca [8]. No entanto, o conhecimento sobre a seleção de áreas prioritárias para a conservação dentro dessa unidade de conservação ainda é limitado, e novas metodologias devem ser incorporadas para apoiar esse processo.

Frente ao exposto, este estudo visa analisar as propriedades bio-ópticas, uma vez que elas são indicadoras das condições ambientais dos recifes, na região de Tatuamunha, AL, dentro da APA Costa dos Corais.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de Estudo

A APACC, localizada no nordeste do Brasil, abrange uma diversidade de ecossistemas, incluindo recifes de corais rasos, manguezais, pradarias marinhas, bancos de rodolitos e esponjas, além de recifes mesofóticos, estendendo-se da costa até a borda da plataforma continental [9]. Este estudo foi realizado em uma porção da APACC, localizada na zona de proteção integral de Porto de Pedras - São Miguel dos Milagres (Tatuamunha), AL (9°13'54.73"S / 35°19'16.95"O) [8] (Figura 1). As zonas de proteção integral são áreas restritas onde atividades de pesca e turismo não são permitidas.

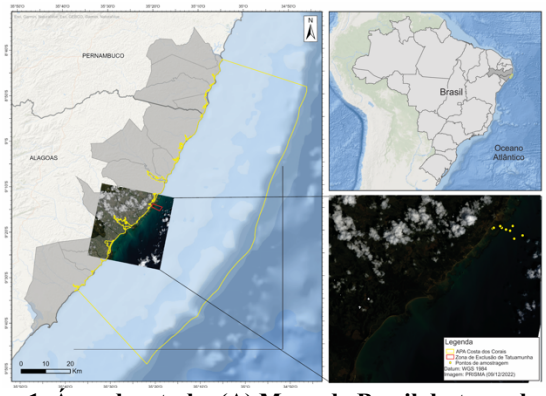


Figura 1. Área de estudo: (A) Mapa do Brasil destacando a APA Costa dos Corais, (B) Localização geral da área de estudo destacando a zona de exclusão de Tatuamunha, (C) Imagem PRISMA (R33G22B11) mostrando a distribuição dos pontos de amostragem in situ.

2.2. Coleta e análise dos dados

Foram coletadas amostras de água da superfície do mar (5 L) utilizando galões térmicos em 10 estações amostrais situadas na costa de São Miguel dos Milagres, mais especificamente em Tatuamunha, entre os dias 4 e 11 de dezembro de 2022 (Figura 1) para medição dos coeficientes de absorção de luz pela matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM), material particulado (fitoplâncton e detritos) e Clo-*a*. Sub-amostras duplicadas para análise de CDOM foram filtradas por pressão de 5 pol Hg utilizando uma bomba a vácuo e filtros de membrana Nuclepore com tamanho de poro de 0,2 µm, armazenados em frascos de vidro pré-combustados embrulhados com papel alumínio e mantidos sob refrigeração (4 °C), até novas análises laboratoriais [10].

As amostras de material particulado e Clo-*a* foram filtradas em duplicatas por meio de bomba a vácuo e pressão de 5 pol Hg, através de filtro Whatman GF/F de 25 mm (tamanho nominal de poro de 0,7 µm) até atingir volume de 2 L ou por até 40 min. Os filtros foram armazenados em freezer até a chegada no laboratório e posteriormente em ultrafreezer (-80°C), até as medições no espectrofotômetro [11].

Os coeficientes de absorção da luz pelo material particulado (a_p) e das respectivas frações de fitoplâncton (a_{ph}) e detritos (a_{nap}) foram determinados segundo [11], previamente filtrados em campo e armazenados em ultrafreezer até a análise espectrofotométrica. As medidas espectrais de a_p, a_{nap} e a_{ph} (200-800 nm) foram realizadas com espectrofotômetro de feixe duplo Shimadzu UV-2450 equipado com esfera integradora.

Para a determinação do coeficiente de absorção pelo CDOM (a_{CDOM}) foram utilizadas amostras de água (250 mL) filtradas previamente em campo, utilizando filtros de membrana Nucleopore (0,2 µm) e armazenadas em frascos de vidro mantidos refrigerados no escuro até a análise espectrofotométrica. O coeficiente a_{CDOM} (200-800 nm) foi determinado segundo [12] com uso do espectrofotômetro Shimadzu UV-2450 e cubeta de 10 cm. O parâmetro de decaimento espectral da absorção de luz pelo CDOM com o aumento do comprimento de onda (SCDOM) foi determinado a partir de um ajuste exponencial no intervalo entre 400-650 nm.

Após a filtragem em campo, as amostras de Clo-*a* foram armazenadas a -80 °C, até serem analisadas em fluorímetro no laboratório. As concentrações de Clo-*a* foram determinadas a partir da extração de pigmentos dos filtros Whatman GF/F acondicionados a -80 ºC com um fluorímetro de bancada 10-AU Turner Design, de acordo com o protocolo estabelecido por Welschmeyer (1994). Para extração dos pigmentos foram utilizados 10 mL de uma solução mista de acetona com dimetilsufóxido (DMSO), sendo 60% de acetona 90% (90% de acetona pura + 10% de água MilliQ ultrapura) e 40% de DMSO puro, em freezer por 24 horas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta os espectros médios dos coeficientes de absorção. Os valores máximos, mínimos, média e desvio padrão dos coeficientes de absorção, da concentração de Clo-*a* e do *slope* do CDOM se encontram na Tabela 1. Os valores dos coeficientes de absorção do material particulado, do fitoplâncton, dos detritos e do CDOM em 440 nm foram: $a_p(440)$: 0,12 m^{-1}; a_{ph} (440): 0,66 m^{-1}; $a_{nap}(440)$: 0,13 m^{-1} e $a_{CDOM}(440)$: 0,14 m^{-1} (Tabela 1). A concentração de Clo-*a* média foi de 0,82 mg/m^3, indicando condições oligomesotróficas. Os valores desse estudo foram maiores do que os observados anteriormente no banco de Abrolhos [13] e no mar do Caribe [14]. Tatuamunha se encontra mais próximo do continente, sofrendo maiores influências do aporte de rios e de pressões antrópicas em comparação às outras regiões [15]. O valor médio do *slope* do CDOM foi 0,14 nm^1, condizente com o esperado para regiões costeiras [16] (Tabela 1).

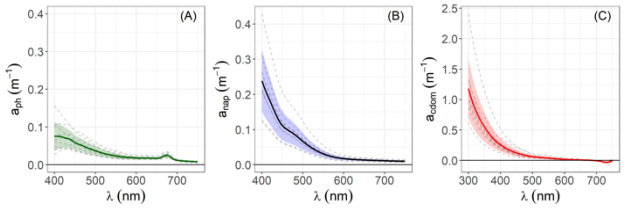


Figura 3- Curvas espectrais dos coeficientes de absorção de luz pelo (A) fitoplâncton, (B) detritos e (C) material orgânico colorido dissolvido. As curvas cinzas pontilhadas são os espectros de cada estação amostral; as curvas sólidas são as médias das estações e as áreas com transparência são os desvios padrões.

Tabela 1. Intervalo (média e desvio padrão) das propriedades bio-ópticas medidas em Tatuamunha, Alagoas.

Variável (N=10)	Min-Max	Média-Desvio padrão
Clo-*a* (mg m^{-3})	0,577- 1,123	0,82 ± 0,22
ap(440)(m^{-1})	0,099- 0,295	0,12 ± 0,05
aph(440) (m^{-1})	0,039-0,103	0,66 ± 0,02
anap(440) (m^{-1})	0,071- 0,239	0,13 ± 0,05
acdom(440) (m^{-1})	0,066-0,272	0,14 ± 0,06
$SCDOM_{(400\text{-}650)}$ (nm^{-1})	0,012-0,016	0,014 ± 0,001

Em geral, as contribuições pelo a_{CDOM} e a_{NAP} em 440 nm predominaram se comparadas à contribuição pelo a_{ph} (Figura 4). Padrão similar também foi observado em estudos realizados em recifes de coral do banco de Abrolhos [13] e do Pacifico [17]. A predominância da contribuição desses coeficientes é esperada, uma vez que os recifes de coral liberam quantidades significativas de matéria orgânica dissolvida na água [18] e pela influência continental em regiões mais próximas da costa [17]. As estações T01, T03, T07, T08, T09 e T10 apresentaram maior contribuição de a_{CDOM} (440) em relação aos outros componentes opticamente ativos. As estações T02, T04, T05, e T06 apresentaram maior contribuição de a_{NAP}.

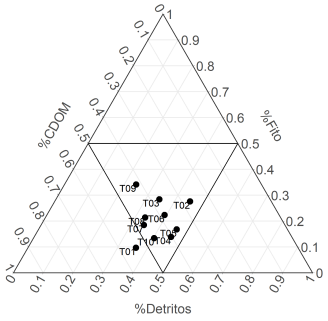


Figura 4- Diagrama ternário das contribuições relativas dos constituintes opticamente ativos, considerando os coeficientes de absorção de luz em 440 nm pelo fitoplâncton, detritos e material orgânico colorido dissolvido medidos in situ.

A distribuição espacial das estações e os valores dos coeficientes de absorção indicaram valores mais baixos de a_{ph} (440) nas estações sobre o recife de coral. Padrão oposto foi observado por Russel [17], em que os valores mais elevados foram encontrados no recife enquanto que os valores mais baixos se localizaram em regiões mais afastadas dos recifes. Todas as estações parecem ter uma contribuição importante de a_{NAP} (440) em especial as estações T10 e T01 (Figura 5B), que também tiveram uma maior contribuição de a_{CDOM} (440) (Figura 5C).

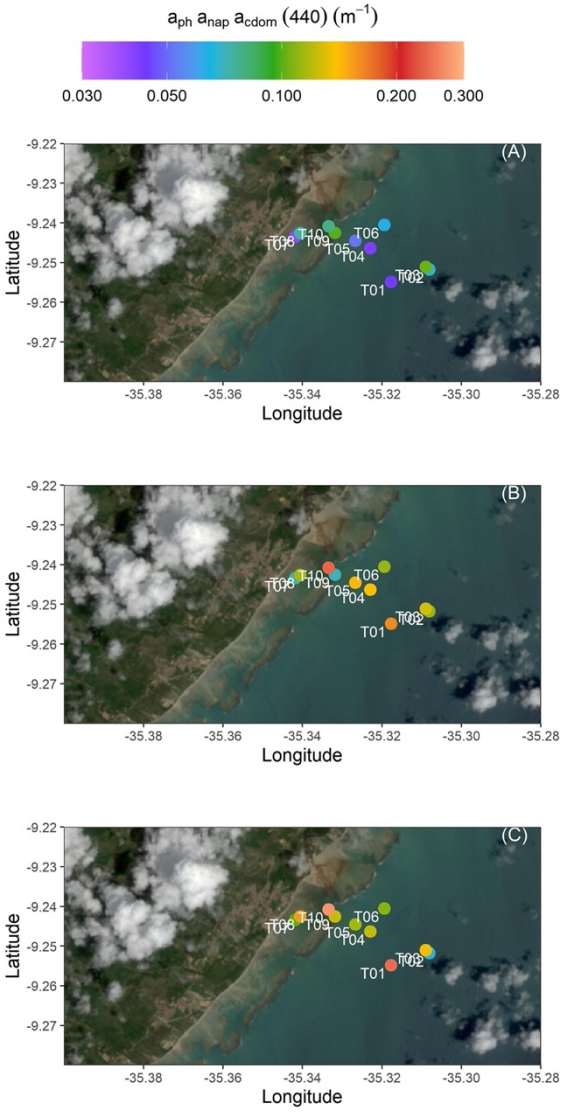


Figura 5- Mapa com a distribuição espacial dos valores dos coeficientes de absorção em 440 nm sendo apresentados na mesma escala de cores, (A) fitoplâncton, (B) detritos e (C) material orgânico colorido dissolvido. Mapa base é a imagem PRISMA adquirida em 09/12/2022 (composição R33, G22, B10).

5. CONCLUSÕES

As propriedades bio-ópticas de Tatuamunha são influenciadas pelos recifes de coral e por aporte terrígeno continental. Os valores da concentração de Clo-a encontrados indicam condições oligomesotróficas para a região. Os resultados identificaram uma contribuição relativa do coeficiente de absorção pelo CDOM e detritos, esperado para

ambientes costeiros. A distribuição espacial dos valores dos coeficientes de absorção revelou baixos valores de a_{ph} nas estações próximas à costa e valores e contribuição significativa do a_{CDOM} e do a_{NAP} em todas as estações, reforçando o padrão de regiões costeiras.

A caracterização das propriedades bio-ópticas de uma região é importante por proporcionar um entendimento das condições ambientais dominantes, e pode ser utilizada para calibração de algoritmos de SR que visam estimar variáveis relevantes para o monitoramento ambiental, como a concentração de Clo-a, batimetria e mapeamento de habitats bentônicos.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Rufford Foundation, ao FUNBIO (Fundo Brasileiro para a Biodiversidade) e ao Projeto Conservação Recifal (PCR). Os autores também gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) por fornecer bolsas por meio dos processos número 88881.131617/2016-01 e 2023/13544-0, MK agradece à FAPESP (Processo N. 2021/04128-8).

7. REFERÊNCIAS

1. Xu, J.; Zhao, D. Review of coral reef ecosystem remote sensing. *Acta Ecol. Sin.* **2014**, *34*, 19–25.
2. Halpern, B.S.; Selkoe, K.A.; Micheli, F.; Kappel, C. V. Evaluating and ranking the vulnerability of global marine ecosystems to anthropogenic threats. *Conserv. Biol.* **2007**, *21*, 1301–1315.
3. Hoegh-Guldberg, O.; Mumby, P.J.; Hooten, A.J.; Steneck, R.S.; Greenfield, P.; Gomez, E.; Harvell, C.D.; Sale, P.F.; Edwards, A.J.; Caldeira, K.; et al. Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science* **2007**, *318*, 1737–42.
4. Oliver, E.C.J.; Burrows, M.T.; Donat, M.G.; Sen Gupta, A.; Alexander, L. V.; Perkins-Kirkpatrick, S.E.; Benthuysen, J.A.; Hobday, A.J.; Holbrook, N.J.; Moore, P.J.; et al. Projected Marine Heatwaves in the 21st Century and the Potential for Ecological Impact. *Front. Mar. Sci.* **2019**, *6*, 1–12.
5. Hughes, T.P.; Barnes, M.L.; Bellwood, D.R.; Cinner, J.E.; Cumming, G.S.; Jackson, J.B.C.; Kleypas, J.; van de Leemput, I.A.; Lough, J.M.; Morrison, T.H.; et al. Coral reefs in the Anthropocene. *Nature* **2017**, *546*, 82–90.
6. Varunan, T.; Shanmugam, P. Modelling the optical properties of coral reefs and its implication for optical remote sensing. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **2021**, *249*, 107054.
7. Dekker, A.G.; Clementson, L.A.; Wettle, M.; Cherukuru, N.; Botha, H.; Oubelkheir, K. Bio-Optical Measurements Indicative of Biogeochemical Transformations of Ocean Waters by Coral Reefs. *Remote Sens.* **2022**, *14*, 1–18.
8. ICMBIO-INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE *Plano De Manejo Da Área De Proteção Ambiental Costa Dos Corais*; (Tamandaré, PE, Brazil: MMA/ICMBIO), 2021;
9. Pereira, P.H.C.; Lima, G. V.; Araujo, J.C.; Gomes, E.; Côrtes, L.G.F.; Pontes, A. V.; Recinos, R.; Cardoso, A.; Seoane, J.C.; Brito, C.C.P. Mesophotic Reefs of the Largest Brazilian Coastal Protected Area: Mapping, Characterization and Biodiversity. *Diversity* **2022**, *14*.
10. Bricaud, A.; Morel, A.; Prieur, L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains. *Limnol. Oceanogr.* **1981**, *26*, 43–53.
11. Tassan, S.; Ferrari, M. A sensitivity analysis of the "Transmittance-Reflectance" method for measuring light absorption by aquatic particles. *J. Plankton Res.* **2002**, *24*, 757–774.
12. Mitchell, B.G.; Kahru, M.; Wieland, J.; Stramska, M. *Determination of spectral absorption coefficients of particles, dissolved material and phytoplankton for ocean discrete water samples*; 2002 in Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation - revision 2. Editors G. S. Fargion and J. L. Mueller (Greenbelt, Maryland: NASA), 125–153
13. Medeiros, T.A.G.; Zoffoli, M.L.; Frouin, R.; Cortivo, F.D.; Cesar, G.M.; Kampel, M. Bio-optical properties of the Brazilian Abrolhos Bank ' s shallow coral-reef waters. *Front. Remote Sens.* **2022**, 1–24.
14. Lorenzoni, L.; Hu, C.; Varela, R.; Arias, G.; Guzmán, L.; Muller-Karger, F. Bio-optical characteristics of Cariaco Basin (Caribbean Sea) waters. *Cont. Shelf Res.* **2011**, *31*, 582–593.
15. Araujo, J.C.; Seoane, J.C.S.; Lima, G.V.; da Silva, E.G.; França, L.G.; de Souza Santos, E.E.; de Oliveira, I.M.; Pereira, P.H.C. High-resolution optical remote sensing geomorphological mapping of coral reef: Supporting conservation and management of marine protected áreas. *J. Sea Res.* **2023**, *196*.
16. Carder, K.L.; Steward, R.G.; Harvey, G.R.; Ortner, P.B. Marine humic and fulvic acids : Their effects on remote sensing of ocean chlorophyll. *Limnol. Ocean.* **1989**, *34*, 68–81.
17. Russell, B.J.; Dierssen, H.M.; Hochberg, E.J. Water column optical properties of Pacific coral reefs across geomorphic zones and in comparison to offshore waters. *Remote Sens.* **2019**, *11*, 9–14.
18. Kelly, L.W.; Nelson, C.E.; Petras, D.; Koester, I.; Quinlan, Z.A.; Arts, M.G.I.; Nothias, L.F.; Comstock, J.; White, B.M.; Hopmans, E.C.; et al. Distinguishing the molecular diversity, nutrient content, and energetic potential of exometabolomes produced by macroalgae and reef-building corals. *PNAS* **2022**, *119*.