

AVALIAÇÃO DE ALGORITMOS PARA ESTIMATIVA DE CLOROFILA-*a* NOS RECIFES DE CORAL DO BANCO DE ABROLHOS

Thais Andrade Galvão de Medeiros¹, Maria Laura Zoffoli², Milton Kampel¹

¹ Divisão de Observação da Terra e Geoinformática, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, Brazil, {thais.medeiros, milton.kampel}@inpe.br; ² Istituto di Scienze Marine (ISMAR), Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), Rome, Italy, laura.zoffoli@artov.ismar.cnr.it

RESUMO

A região do Banco dos Abrolhos (ABR) na Plataforma Leste do Brasil engloba o maior e o mais rico sistema de recifes de coral do Atlântico Sudoeste. Portanto, o monitoramento da qualidade da água neste ambiente é fundamental. A concentração de clorofila-*a* (Chl-*a*) é amplamente utilizada como indicador de qualidade da água e o sensoriamento remoto tem se apresentado como opção viável para seu monitoramento pela utilização de imagens da cor do oceano. Ambientes recifais adicionam maior complexidade à estimativa da Chl-*a* devido à influência do substrato bentônico. Este trabalho visa avaliar algoritmos para estimativa da Chl-*a* em ABR usando reflectâncias de sensoriamento remoto corrigidas para os efeitos do fundo marinho, utilizando o modelo *Hyperspectral Optimization Processing Exemplar* e dados *in situ* de 2013 e 2016. Os resultados apontaram uma superestimação dos valores de Chl-*a* para todos os algoritmos analisados, indicando a necessidade da regionalização de algoritmos para estimar Chl-*a*.

Palavras-chave — Clorofila-*a*, HOPE, OCx, GSM, Abrolhos

ABSTRACT

*The Banco dos Abrolhos (ABR) region on the East Brazil Platform encompasses the largest and richest coral reef system in the Southwest Atlantic. Therefore, monitoring the water quality in this environment is essential. The concentration of chlorophyll-*a* (Chl-*a*) is widely used as an indicator of water quality, and remote sensing has been presented as a viable option for its monitoring through ocean color images. Reef environments add more complexity to the Chl-*a* estimation due to the influence of the benthic substrate. This work aims to evaluate algorithms for estimating Chl-*a* in ABR using remote sensing reflectances corrected for seafloor effects, using the *Hyperspectral Optimization Processing Exemplar* model and *in situ* data from 2013 and 2016. The results showed an overestimation of the values of Chl-*a* for all analyzed algorithms, indicating the need for regionalization of algorithms to estimate Chl-*a*.*

Key words — Chlorophyll-*a*, HOPE, OCx, GSM, Abrolhos.

1. INTRODUÇÃO

Os recifes de coral são um dos ecossistemas mais biodiversos, produtivos e complexos da Terra, desempenhando, para milhões de pessoas, um importante papel cultural, social e econômico [1]. No entanto, eles estão entre os ecossistemas marinhos mais vulneráveis, sendo considerados indicadores de saúde desses ambientes [2]. Logo, o estudo da qualidade da água é de suma importância uma vez que fornece pistas sobre os processos relacionados à função e biodiversidade dos habitats dos recifes, transporte de material e saúde ambiental [3]. A biomassa fitoplanctônica tem sido frequentemente usada como indicador da qualidade da água em ambientes recifais. A flutuação da biomassa do fitoplâncton (expressa como concentração de clorofila-*a*; Chl-*a*) responde a vários fatores, incluindo o regime de luz e temperatura e entrada de nutrientes de fontes naturais e antropogênicas [4]. Em vista disso, o monitoramento da Chl-*a* é de extrema importância.

O sensoriamento remoto é um método prático para o monitoramento da Chl-*a*. Estimar a sua concentração a partir de sensoriamento remoto pode ser realizada por meio de algoritmos empíricos e semi-analíticos. Os primeiros possuem a vantagem de serem mais simples e fáceis de implementar. Enquanto que a vantagem dos semi-analíticos está em desacoplar a contribuição dos componentes opticamente ativos e, com isso, tendem a recuperar a Chl-*a* com maior precisão [5]. O *Ocean Color X (OCx)* é um algoritmo empírico que relaciona a razão de R_{rs} nas bandas no azul e no verde na região do visível do espectro eletromagnético com a concentração de Chl-*a* através de uma expressão polinomial de quarto grau [6]. Em contrapartida, os modelos semi-analíticos, como o Garver-Siegel Maritorena (GSM), otimizam os parâmetros bio-ópticos em uma solução aproximada da equação de transferência radiativa para combinar a reflectância modelada com a reflectância medida [7].

Comparado com a Chl-*a* estimada para águas oceânicas, os ambientes costeiros e recifais apresentam desafios ainda maiores causados pela presença da matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM), sedimentos em suspensão, além da influência da reflectância do fundo marinho, que pode aumentar significativamente os valores de R_{rs} levando a superestimação de Chl-*a* [8]. Devido a isso, é necessário o uso de técnicas que particionem a $R_{rs}(\lambda)$ em espectros de

coluna de água e de reflectância de substrato na tentativa de remover as contribuições do fundo.

Os espectros de R_{rs} foram previamente particionados analiticamente através de um modelo bio-óptico que foi parametrizado com dados das propriedades ópticas da coluna d'água, profundidade e albedo dos substratos [8]. Entretanto, na ausência de parâmetros de entrada medidos *in situ*, uma técnica de otimização que deriva simultaneamente absorção, retroespalhamento, profundidade e albedo do substrato a partir de $R_{rs}(\lambda)$ foi desenvolvida baseada na inversão de um modelo semi-analítico de reflectâncias, o qual otimiza os parâmetros desconhecidos. É o caso do modelo *Hyperspectral Optimization Processing Exemplar* (HOPE) descrito por [9].

Este estudo tem como objetivo avaliar a performance dos algoritmos de Chl-*a* nos recifes do Banco de Abrolhos, utilizando como dados de entrada $R_{rs}(\lambda)$ após remoção dos efeitos do fundo através do uso do modelo HOPE.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

A região do Banco dos Abrolhos (ABR) se encontra entre as coordenadas 16°40'S-19°40'S e 37°20'W-39°10'W e está localizada a aproximadamente 60 km da costa leste brasileira (Figura 1). Os recifes de Abrolhos são caracterizados pela ocorrência de estruturas colunares verticais denominadas "chapeirões" construídas por algas coralíneas, briozoários e corais [10]. Esta área está sobre influência das águas quentes, salinas e pobres em nutrientes da Corrente do Brasil (CB). Entretanto, a presença de bancos rasos e montes submarinos permite a geração de vórtices e meandros que, juntamente com a deriva litorânea desencadeiam a mistura de águas contribuindo para o enriquecimento local de nutrientes e influenciando a estrutura e dinâmica da comunidade planctônica [11].

2.2. Medidas *in situ*

A amostragem de campo foi realizada em ABR durante duas campanhas em março de 2013 e fevereiro de 2016, durante o verão austral (estação chuvosa, dezembro a março). Amostras de água de superfície foram coletadas em 35 estações e filtradas utilizando filtros Whatman GF/F com 0,7 m de porosidade. Os pigmentos fitoplanctônicos foram extraídos dos filtros após imersão em 10mL de solução a 90% de acetona/dimetilsulfóxido (DMSO) (60/40 em volume)[12] por 24h, no escuro a -10°C. A concentração de Chl-*a* foi quantificada usando um espectrofluorímetro Turner AU-10 [13].

Medidas radiométricas sobre a superfície da água foram realizadas com o espectrorradiômetro ASD handheld Fieldspec (Malvern Panalytical Ltd.), nos mesmos pontos de coleta de água. A faixa espectral amostrada foi de 350 e 1075nm, com resolução média de 1nm. A geometria de aquisição seguiu as recomendações de [14]. A reflectância de sensoriamento remoto, $R_{rs}(\lambda)$, foi calculada segundo:

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{L_w(\lambda) - \rho L_{sky}}{E_d(\lambda)} \quad (\text{Eq.1})$$

Onde, $L_w(\lambda)$ é a radiância ascendente da água, ρ é um fator que foi ajustado para a velocidade do vento, sol no zênite e geometria de visualização do sensor [14]. L_{sky} é a radiância do céu e E_d é a irradiância descendente, que foi estimada a partir da medida de radiância refletida por uma placa branca de *Spectralon* (L) [14] através da equação:

$$E_d(\lambda) = \frac{\pi L}{\rho} \quad (\text{Eq.2})$$

Onde, ρ é a reflectância da placa de referência padrão.

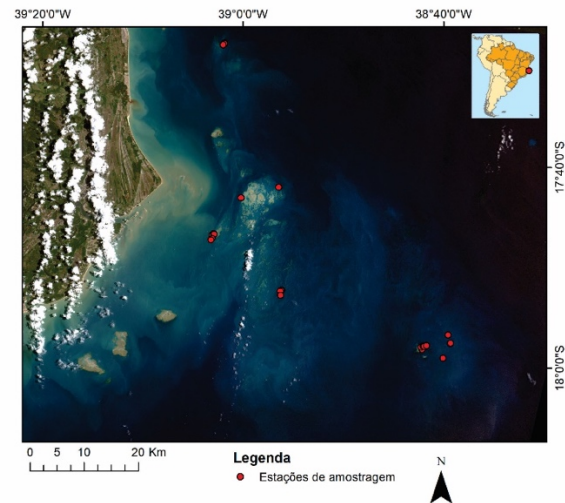


Figura 1. Localização das áreas de amostragem no Banco de Abrolhos. Imagem CBERS-4 (composição cor verdadeira).

Em seguida, foi aplicado o modelo *Hyperspectral Optimization Processing Exemplar* (HOPE) [9] em cada dado de $R_{rs}(\lambda)$ *in situ*, para corrigir os efeitos do fundo marinho, segundo:

$$R_{rs} \approx \frac{0.5r_{rs}}{1 - 1.5r_{rs}} \quad (\text{Eq.3})$$

$$r_{rs} \approx r_{rs}^{dp} \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{1}{\cos(\theta_w)} + \frac{D_u^C}{\cos(\theta_v)} \right) kH \right) \right] + \quad (\text{Eq.4})$$

$$\frac{1}{\pi} R_B \exp \left(- \left(\frac{1}{\cos(\theta_w)} + \frac{D_u^B}{\cos(\theta_v)} \right) kH \right)$$

$$k(\lambda) = a(\lambda) + b_b(\lambda), \quad u(\lambda) = \frac{b_b(\lambda)}{k(\lambda)} \quad (\text{Eq.5})$$

$$D_u^C \approx 1.03(1 + 2.4u)^{0.5} \quad e \quad D_u^B \approx 1.04(1 + 5.4u)^{0.5} \quad (\text{Eq.6})$$

$$b_b(\lambda) = b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda) \quad (\text{Eq.7})$$

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_{phy}(\lambda) + a_{dg}(\lambda) \quad (\text{Eq.8})$$

$$R_B(\lambda) = B\rho(\lambda) + (1 - B\rho(\lambda)) \quad (\text{Eq.9})$$

Onde, r_{rs} é a reflectância de sensoriamento remoto de subsuperfície, r_{rs}^{dp} é a reflectância de sensoriamento remoto para águas opticamente profundas. Dentro deste modelo, existem dois fatores de alongamento do caminho óptico: um para fótons da coluna d'água (D_u^C) e outro para os fótons do

substrato (D_u^B). Esses fatores são aproximados de acordo com [9]. H é a profundidade, b_{bw} é o coeficiente de retroespalhamento das moléculas de água (m^{-1}), b_{bp} é o coeficiente de retroespalhamento das partículas (m^{-1}), a_w é o coeficiente de absorção da água do mar pura (m^{-1}), a_{phy} é o coeficiente de absorção do fitoplâncton (m^{-1}), a_{dg} é o coeficiente de absorção de CDOM e detritos (m^{-1}). B é o albedo do substrato e representa a sua refletância em 550nm e ρ é a refletância do substrato normalizado em 1 em 550nm. Originalmente, utiliza-se como dado de entrada a informação espectral de apenas um substrato. Entretanto, neste estudo foi utilizada uma mistura linear entre dados de coral, alga e areia de acordo com a Equação 9.

O modelo foi aplicado seguindo os mesmos critérios adotados por [15]. Após a correção dos efeitos do fundo marinho, as $R_{rs}(\lambda)$ foram integradas visando simular as bandas espectrais dos sensores orbitais de cor do oceano *Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor* (SeaWiFS) e MODIS.

2.3. Algoritmos para estimativa de clorofila

Aos dados de $R_{rs}(\lambda)$ simulados para SeaWiFS foram aplicados os algoritmos *Ocean Colour- OC4* e *Color Index* (CI). Para as $R_{rs}(\lambda)$ simuladas para o MODIS foram aplicados os algoritmos *Ocean Colour-OC3M* e GSM [6, 7,16].

Neste trabalho foram testadas duas variantes do algoritmo OCx (OC3M e OC4). O OC4 usa como entrada a R_{rs} em 443, 490, 510 e 555nm, e o OC3M em 443, 488 e 547nm e calculam a concentração de Chl-*a* (em $mg\ m^{-3}$). O algoritmo empírico CI é baseado na diferença de banda entre as refletâncias de sensoriamento remoto na região do verde e a combinação linear formada entre as bandas azul e vermelha. Um polinômio linear de primeira ordem é ajustado através do CI e levado à sua potência de dez para calcular Chl-*a* [16]. O algoritmo semi-analítico GSM utiliza uma formulação quadrática para relacionar os valores de R_{rs} à razão de absorção total, a (m^{-1}), e retroespalhamento, b_b (m^{-1}). Neste trabalho, foram utilizadas as medidas de absorção e da curva de absorção pelo CDOM e detritos obtidos *in situ* [15] como dados de entrada para o GSM.

2.4. Métricas

Todos os valores de Chl-*a* estimados foram comparados com as medidas *in situ* usando as métricas estatísticas: R^2 , *bias*, Erro absoluto médio (MAE), e erro quadrático médio absoluto (RMSE).

$$R^2 = \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \quad (Eq. 10)$$

$$bias = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i - x_i \right] \quad (Eq. 11)$$

$$MAE = 10^{\left(\frac{\sum_{i=1}^N |\log_{10}(y_i) - \log_{10}(x_i)|}{N} \right)} \quad (Eq. 12)$$

$$RMSE = \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{N} \right]} \quad (Eq. 13)$$

Onde, SS_{res} é a soma dos quadrados dos resíduos, SS_{tot} é a soma total dos quadrados, x_i são os dados de Chl-*a in situ*, y_i é o valor estimado para a Chl-*a* e N é o tamanho da amostra.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de clorofila medidos *in situ* variaram entre 0,058 e 1,034 $mg\ m^{-3}$, com valor médio de 0,525 ($\pm 0,26$) $mg\ m^{-3}$. Os baixos valores observados são típicos de águas oligotróficas da CB [17].

Os espectros de $R_{rs}(\lambda)$ corrigidos apresentaram grande variabilidade tanto na forma espectral quanto na magnitude, apresentando maior variabilidade na banda do verde (Figura 2). Os valores máximos de $R_{rs}(\lambda)$ variaram entre 475 e 575nm dependendo da clareza da água e profundidade. Em contrapartida, devido à forte absorção pelas moléculas de água, os valores se aproximaram a zero após 600nm.

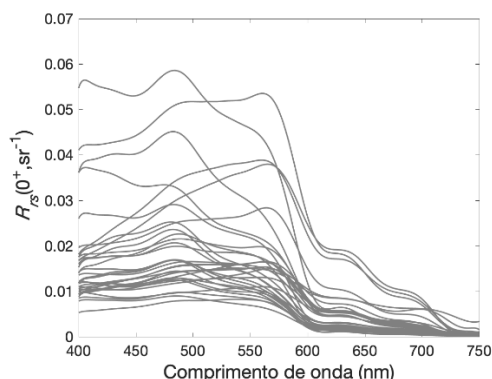


Figura 2. Refletância de sensoriamento remoto *in situ* (R_{rs}, sr^{-1}) coletadas no Banco de Abrolhos após remoção dos efeitos do fundo marinho.

Apesar da correção dos efeitos do fundo marinho, os algoritmos empíricos e semi-analítico sistematicamente superestimaram a Chl-*a* (Figura 3). A forte presença do CDOM no banco de Abrolhos [15], oriundo de aporte terrígeno e/ou produzido pelos recifes de coral, possivelmente é um fator determinante para esta superestimação. Especialmente para os modelos que usam razão de bandas no verde e azul, uma vez que eles apresentam uma fraca correlação com a Chl-*a* em águas costeiras causando superestimação dessa variável [18,19].

O algoritmo CI que mostrou bom desempenho em águas costeiras [16] apresentou baixo desempenho em ABR. Em contrapartida, o GSM, que separa as contribuições de a_{dg} e a_{phy} da absorção total no esquema de inversão, mostrou melhor desempenho comparado aos algoritmos empíricos, com maior valor de R^2 (0,42) e menores valores de *bias* (0,83 $mg\ m^{-3}$) e RMSE (0,97 $mg\ m^{-3}$). Resultados similares foram observados por [20] na Nova Caledônia.

Os resultados sugerem que os algoritmos utilizados não se adequaram à complexidade da coluna d'água encontrada nos recifes de ABR. Entretanto, vale destacar que diversas incertezas também podem estar associadas aos resultados obtidos. O modelo HOPE pode não ter conseguido remover

com precisão o sinal do fundo. A aquisição, métodos de processamento e condições ambientais durante a medição *in situ* de $R_{rs}(\lambda)$ podem promover incertezas que poderão ser amplificadas tanto no modelo HOPE quanto na estimativa de Chl-*a*. Cabe ainda considerar as incertezas nas medidas *in situ* de Chl-*a* e nas propriedades ópticas utilizadas como input no modelo GSM.

Estudos adicionais são necessários para aumentar o conhecimento sobre a comunidade fitoplanctônica em ABR, os tipos de grupos representados e suas dinâmicas temporais e espaciais.

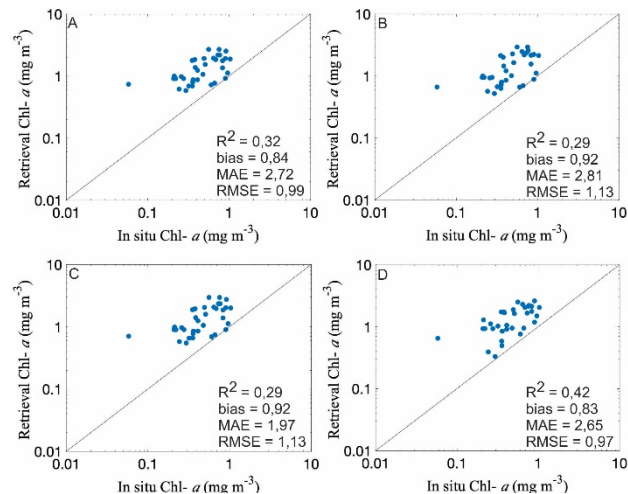


Figura 3. Comparação entre Chl-*a* medida *in situ* e estimada através de modelos empíricos e semi-analíticos. (A) OC3M. (B) OC4. (C) CI. (D)GSM. A linha diagonal representa 1:1.

5. CONCLUSÃO

Os resultados apontaram que os algoritmos empíricos OC3M, OC4 e CI e semi-analítico GSM, sistematicamente superestimaram a Chl-*a* nos recifes de coral do Banco de Abrolhos, mesmo após a remoção dos efeitos do fundo marinho nos dados de entrada. Logo, estes algoritmos não se ajustaram à complexidade da coluna d'água encontrada nessa região sendo necessário maior esforço e novas amostragens para desenvolver ajustes regionais que deverão estimar com maior precisão a concentração de Chl-*a*.

8. AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Capacitação Institucional (PCI) do INPE e a Rede-Abrolhos (CNPq/MCTI/CONFAP-FAPs/PELD N° 21/2020).

9. REFERÊNCIAS

[1] M.Spalding, L. Burke, S.A Wood, J. Ashpole, J. Hutchison, P. zu Ermgassen. Mapping the global value and distribution of coral reef tourism. *Mar. Policy*, 82: 104–113, 2017.
[2] J. Xu, D. Zhao Review of coral reef ecosystem remote sensing. *Acta Ecol. Sin.*, 34: 19–25, 2014.

[3] C. Rogers. Responses of coral reefs and reef organisms to sedimentation. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 62: 185–202, 1990.
[4] E. Otero, K.K. Carbery. Chlorophyll a and turbidity patterns over coral reefs systems of La Parguera Natural, Puerto Rico. *Rev. Biol. Trop.*, 53: 25–32, 2005.
[5] S. Clay, A. Peña, B. DeTracey, E. Devred, E. Evaluation of satellite-based algorithms to retrieve chlorophyll-a concentration in the Canadian Atlantic and Pacific Oceans. *Remote Sens.*, 11: 1–29, 2019.
[6] J.E. O'Reilly, S. Maritorena, D.A. Siegel, M.C. O'Brien, D. Toole, B.G. Mitchell, M. Kahru, F.P. Chavez, P. Strutton, G.F. Cota, et al. Ocean color chlorophyll a algorithms for SeaWiFS, OC2, and OC4: Version 4. In *SeaWiFS Postlaunch Technical Report Series; v.11; SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3*; Hooker, S.B., Firestone, E.R., Eds., 11:9–23, 2000.
[7] S. Maritorena, D.A Siegel, A.R Peterson. Optimization of a semianalytical ocean color model for global-scale applications. *Appl. Opt.*, 41: 2705-2714, 2002.
[8] R.W. Gould, R.A. Arnone. Remote sensing estimates of inherent optical properties in a coastal environment. *Remote Sens. Environ.*, 61: 290–301, 1997.
[9] Z. Lee, K.L. Carder, C.D. Mobley, R.G. Steward, J.S. Patch. Hyperspectral remote sensing for shallow waters: 2 Deriving bottom depths and water properties by optimization. *Appl. Opt.*, 38: 3831-3843, 1999.
[10] Z.M.A.N. Leão. Abrolhos- O complexo recifal mais extenso do Oceano Atlântico Sul. In *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*; C. Schobbenhaus, D.A. Campos, E.T. Queiroz, M. Winge, M. Berbert-Born, Ed., 1–26, 1999.
[11] W. Ekau. Topographical and hydrographical impacts on zooplankton community structure in the Abrolhos bank region, East Brazil. *Arch. Fish. Mar. Res.*, 47: 307–320, 1999.
[12] W.T. Shoaf, B.W. Lium. Improved extraction of chlorophyll a and b from algae using dimethyl sulfoxide. *Limnol. Oceanogr.*, 21: 926–928, 1976.
[13] N.A. Welschmeyer. Fluorometric analysis of chlorophyll a in the presence of chlorophyll b and pheopigments. *Limnol. Oceanogr.*, 39: 1985–1992, 1994.
[14] C.D. Mobley. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements. *Appl. Opt.*, 38: 7442–55, 1999.
[15] T.A.G. Medeiros, M.L. Zoffoli, R. Frouin, F.D. Cortivo, G.M. Cesar, M. Kampel. Bio-optical properties of the Brazilian Abrolhos Bank's shallow coral-reef waters. *Front. Remote Sens.*, 1–24, 2022.
[16] C. Hu, Z. Lee, B. Franz. Chlorophyll-a algorithms for oligotrophic oceans: A novel approach based on three-band reflectance difference. *J. Geophys. Res. Ocean.*, 117: 1–25, 2012.
[17] R.M. Lopes, B.M. Castro. Oceanography, ecology and management of Abrolhos Bank. *Cont. Shelf Res.*, 70: 1–2, 2013.
[18] R.J.W. Brewin, D.E. Raitsos, G. Dall'Olmo, N. Zarokanellos, T. Jackson, M.F. Racault, E.S. Boss, S. Sathyendranath, B.H. Jones, I. Hoteit. Regional ocean-colour chlorophyll algorithms for the Red Sea. *Remote Sens. Environ.*, 165: 64–85, 2015.
[19] M.M. Abbas, A.M. Melesse, L.J. Scinto, J.S. Rehage. Satellite estimation of chlorophyll-a using moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) sensor in shallow coastal water bodies: Validation and improvement. *Water (Switzerland)*, 11: 1-17 2019.
[20] L.R. Favareto, N. Rudorff, M. Kampel, R. Frouin, R. Röttgers, D. Doxaran, H. Murakami, C. Dupouy. Bio-optical characterization and ocean colour inversion in the Eastern Lagoon of New Caledonia, South Tropical Pacific. *Remote Sens.*, 10: 1-30, 2018.