

Estimativa do coeficiente de retroespalhamento da água do reservatório de Itumbiara (GO) baseada em propriedades ópticas aparentes e inerentes

¹Enner Alcântara
²Renata Nascimento
²Milton Kampel
²Pétala Bianchi Silva
²José Stech

¹Departamento de Cartografia
Faculdade de Ciências e Tecnologia - FCT
Universidade Estadual Paulista 'Júlio de Mesquita Filho' - UNESP
Campus de Presidente Prudente
E-mail: enner@fct.unesp.br

²Divisão de Sensoriamento Remoto - DSR
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
São José dos Campos, SP
E-mail: {milton; petala; stech}@dsr.inpe.br; re_ffnascimento@yahoo.com.br

Abstract. The backscattering coefficient is an important characteristic of aquatic systems, as the light backscattered from particles and water molecules makes it possible to get information about the properties of the water under study. The quantitative interpretations of the detected signal by remote sensors in terms of water components require to be identified and isolated the effects caused by variations in the incident light field over the remotely detected signal. The water represents a complex mixture of a variety of dissolved or particulate materials. These materials have different optical properties, that is, interact with light in different ways in function of their nature and concentration. Optical property of inland water varies spatially and temporally corresponding to change of concentrations of water components. The same water type classified by optical property may have uniform character which may make water components deriving algorithm simpler and accuracy. Thereupon, the water colour modeling aims to express the remote sensing reflectance in terms of Inherent Optical Properties (IOPs), such as total backscattering coefficient. The development of models for deriving IOPs from Apparent Optical Properties (AOPs) have been essential for achieving determinations of water IOPs. The study of IOPs is very important because these properties allow to access the water quality and primary production in aquatic systems. The objective of this paper was to use the IOPs and AOPs to estimate the backscattering coefficient based in two different approaches. The results shown that both approaches used to estimate the backscattering coefficient failed. This is because most algorithms available in the international literature are suitable only for Case I water type.

Palavras-chave: remote sensing reflectance, backscattering coefficient, reflectância de sensoriamento remoto, coeficiente de retroespalhamento.

1. Introdução

As interpretações quantitativas do sinal detectado por sensores remotos em termos dos constituintes da água requerem que sejam identificados e isolados os efeitos causados pelas variações no campo de luz incidente sobre o sinal detectado remotamente. Por isso, a modelagem da cor da água visa expressar a reflectância de sensoriamento remoto em termos das propriedades ópticas inerentes (POI) (Gitelson et al., 2009), nomeadas de coeficientes de absorção total (a) e coeficiente de retroespalhamento (b_b).

O retroespalhamento espectral é considerado um parâmetro chave, que exerce influência sobre as propriedades de reflectância da água de sistemas aquáticos, pois controla largamente a Função de Distribuição de Reflectância Bidirecional (FBRB,

Twardowski et al, 2007). A magnitude específica do retroespalhamento é particularmente importante para os algoritmos que não dependem de razões espectrais da reflectância ou radiância que deixa a água (Balch et al. 2005).

O retroespalhamento em águas oceânicas já foi extensivamente estudado (Maffione; Dana, 1997), mas quanto a sistemas aquáticos continentais (artificiais ou naturais) os trabalhos ainda são poucos (Sun et al. 2010) e no Brasil, se tem apenas o trabalho de Nascimento (2010) como referência.

O coeficiente de retroespalhamento (b_b , m^{-1}) e o entendimento detalhado de sua variabilidade em sistemas aquáticos é de fundamental importância para as ciências aquáticas e o conhecimento das partículas em suspensão. Esse coeficiente é de grande importância para a cor da água, já que o sinal radiométrico registrado pelo sensor remoto é diretamente proporcional à sua intensidade.

Entretanto, nossos conhecimentos atuais sobre sua interpretação e o entendimento das principais fontes do retroespalhamento e sua variabilidade de sistemas aquáticos é incerto e controverso (Stramski et al. 2004). Além disso, o espalhamento da luz na coluna d'água é a fonte primária da variabilidade na reflectância de sensoriamento remoto, sendo que esse espalhamento é diretamente influenciado pelo retroespalhamento (Sun et al. 2009).

O objetivo deste trabalho é o de testar e avaliar métodos disponíveis na literatura internacional, na estimativa do coeficiente de retroespalhamento na água do reservatório de Itumbiara (GO).

Materiais e Métodos

2.1. Área de Estudo

O reservatório hidrelétrico de Itumbiara ($18^{\circ} 25' S$, $49^{\circ} 06' W$) está localizado no bioma cerrado, na divisa dos estados de Minas Gerais, no Triângulo Mineiro, e Goiás. Foi formado pelo represamento do Rio Paranaíba, resultando na inundação de seus principais tributários, os Rios Corumbá e Araguari (Figura 1).

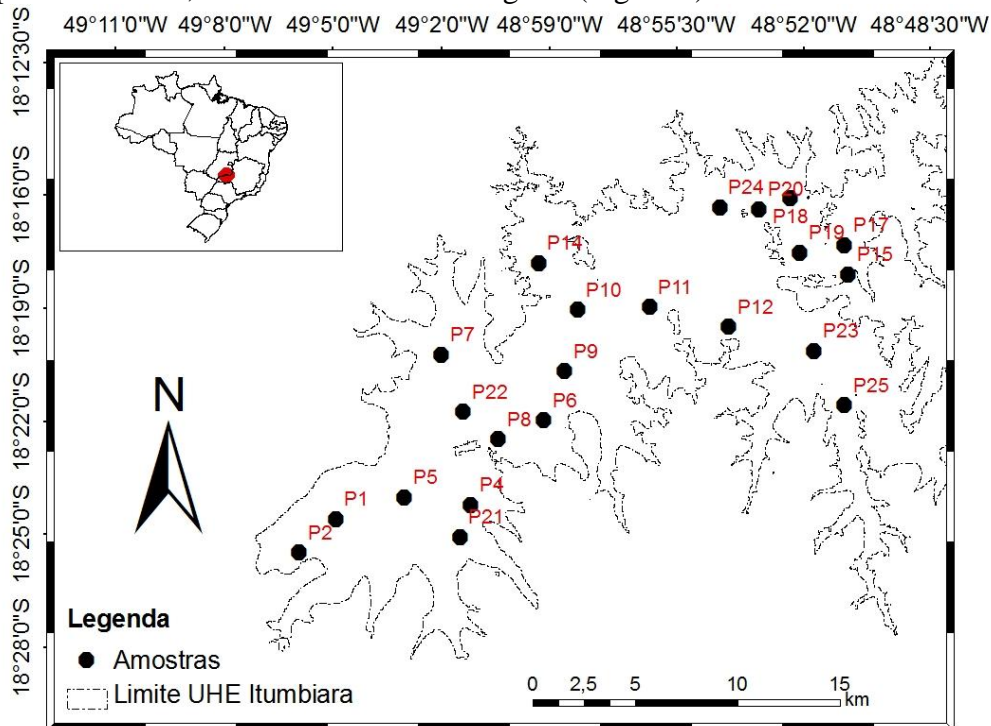


Figura 1: Localização do reservatório hidrelétrico de Itumbiara (GO) no território brasileiro e dos pontos amostrais.

Possui forma dendrítica, com 778 Km² de área inundada e um volume total de 17 bilhões m³, podendo ser assim classificado como um reservatório de alta capacidade. A profundidade varia entre 0,5 m e 78 m, com profundidade média de 32 m, sendo que as áreas mais profundas ocorrem próximas à barragem e na região central do corpo principal do reservatório. O clima da região do reservatório é caracterizado por duas estações bem definidas sendo, uma estação seca que vai de Abril a Setembro e uma estação chuvosa que vai de Outubro a Março, com precipitação média de 2 mm e 315 mm, respectivamente (Alcântara et al. 2010).

2.2. Dados

2.2.1. Campanhas de Campo

Foi realizada uma campanha durante o período de vazante (9, 10 e 11 de setembro de 2009). Durante as campanhas de campo foram realizadas coletas de água para análise, e medidas radiométricas (Nascimento, 2010).

2.2.2. Variáveis Limnológicas

Amostras superficiais de água (22 amostras), em torno de 1 m de profundidade, foram coletadas para a determinação dos seguintes parâmetros: concentração de clorofila-*a*, material em suspensão orgânico e inorgânico, e carbono orgânico e inorgânico dissolvido. Também foi medida a temperatura da água, pH, concentração de oxigênio dissolvido, e condutividade através das sondas multiparâmetros YSI e Horiba.

2.2.3. Propriedades ópticas aparentes

As medidas radiométricas (22 amostras) acima da superfície da água foram realizadas por meio do radiômetro hiperespectral *Fieldspec Hand Held*, seguindo o protocolo de aquisição sugerido por Fougnie et al. (1999), sem polarizador. Com o radiômetro *Fieldspec* foram realizadas 3 medidas da água, 3 medidas do céu e 3 medidas da placa de referência, em cada ponto amostral. Dentre essas medidas, foi escolhido o melhor conjunto de dados para o cálculo da reflectância de sensoriamento remoto R_{rs} , que foi calculada de acordo com Kampel et al. (2009):

$$R_{rs} = \frac{L_w(0+)}{E_d(0+)} = \frac{L_u(0+)\rho L_{sky}(0+)}{E_d(0+)} \quad (1)$$

Onde $L_w(0+)$ é a radiância emergente da água; E_d é a irradiância plana espectral descendente que incide sobre a superfície do corpo d'água (calculado de acordo com Mobley, 1999); L_u é a radiância ascendente que chega ao sensor; L_{sky} é a radiância incidente proveniente do céu; e ρ é o fator de proporcionalidade que relaciona a radiância medida pelo detector quando apontado para o céu com a radiância do céu refletida medida pelo detector quando este é apontado para a água.

2.2.4. Propriedades ópticas inerentes

Amostras de água em 22 pontos amostrais, (ver localização na Figura 1) foram utilizadas para determinação dos coeficientes de absorção do material particulado (fitoplâncton e detritos), e da matéria orgânica dissolvida (CDOM), seguindo os protocolos de análise publicados pelo projeto *SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor)* da *National Aeronautics and Space Administration – NASA* (Mueller et al., 2002).

O coeficiente de retroespalhamento (b_b) foi medido nos mesmos pontos amostrais, por meio do perfilador Satlantic < <http://satlantic.com/>>, em 470 nm .

3. Enfoque Metodológico

3.1. Modelos de estimativa do coeficiente de retroespalhamento espectral

Neste trabalho dois modelos serão testados, o apresentado por Jerome et al. (1996) e McKee et al. (2003). O modelo de Jerome leva em consideração a reflectância de sensoriamento remoto (R_{rs}) e o coeficiente de absorção total (a), como mostra a equação 2:

$$\frac{b_b}{a} = 0,0027 + 9,87 \times R_{rs} - 34,5 \times (R_{rs})^2 + 1534 \times (R_{rs})^3 \quad (2)$$

Já o modelo de apresentado por McKee é apresentado na equação 3:

$$b_b = \frac{K_d \times \mu_d}{g \times \left[1 + \frac{Q}{R_{rs}} \right]} \quad (3)$$

Onde μ_d é o cosseno médio para a irradiância descendente, g é uma constante determinada por regressão linear (=1,0395; Gordon, 1989), K_d é o coeficiente de atenuação difusa obtido por meio de experimento no reservatório de Itumbiara por Nascimento (2010), Q é a razão entre a irradiância ascendente e a radiância $\frac{E_u}{L_u}$, e f é um fator que varia com o ângulo solar e as propriedades ópticas da coluna d'água.

3.2. Avaliação da estimativa do retroespalhamento espectral

A avaliação foi realizada comparando as estimativas do retroespalhamento pelos modelos (b_{be}) e pelo medido em campo em 470 nm (b_{bm}), a partir do cálculo do Viés (Equação 4), Coeficiente de Correlação Linear (r) (Equação 5) e do Erro Quadrático Médio - EQM (Equação 6):

$$Viés = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (b_{be} - b_{bm}) \quad (4)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n b_{be_i} b_{bm_i} - \sum_{i=1}^n b_{be_i} \sum_{i=1}^n b_{bm_i}}{\sqrt{\left[n \sum_{i=1}^n b_{be_i}^2 - \left(\sum_{i=1}^n b_{be_i} \right)^2 \right] \left[n \sum_{i=1}^n b_{bm_i}^2 - \left(\sum_{i=1}^n b_{bm_i} \right)^2 \right]}} \quad (5)$$

$$EQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (b_{be} - b_{bm})^2} \quad (6)$$

Onde, n é o número de amostras utilizadas para a validação.

4. Resultados e Discussão

4.1 Caracterização limnológica

Das variáveis analisadas, a clorofila-*a* foi a que apresentou o maior desvio padrão, se comparado com sua concentração média (ver Tabela 1). A concentração de clorofila-*a* em alguns pontos amostrais pode ser considerada baixa, mostrando que o reservatório de Itumbiara é oligotrófico, para o período analisado. Isso se reflete também no pH da água, que nesse caso é considerada básico. A concentração de total de sólidos em suspensão na água é baixa e isso se reflete em profundidades Secchi que variam de 4 a 7 metros.

Tabela 1: Estatística descritiva dos dados limnológicos coletados durante a campanha de setembro de 2009 no reservatório de Itumbiara. Onde: Chl-*a*: é a concentração de clorofila-*a* ($\mu\text{g L}^{-1}$), TSS: é o total de sólidos em suspensão (mg L^{-1}), CDOM: é o carbono orgânico dissolvido (mg L^{-1}), CID: é o carbono inorgânico dissolvido (mg L^{-1}), Secchi: é a profundidade de desaparecimento do disco de Secchi (m), Temp: é a temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$), pH: é o potencial hidrogeniônico.

Parâmetros	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
Chl- <i>a</i>	0,25	10,02	3,93	$\pm 3,03$
TSS	0,25	1,81	1,12	$\pm 0,40$
CDOM	0,99	2,59	1,16	$\pm 0,33$
CID	3,08	3,76	3,27	$\pm 0,19$
Secchi	4,00	7,00	5,50	$\pm 0,82$
Temp	24,8	25,9	25,28	$\pm 0,37$
pH	6,29	7,90	6,99	$\pm 0,47$

4.2 Reflectância de sensoriamento remoto

A Figura 2 mostra as curvas de reflectância de sensoriamento remoto para os dados coletados durante a campanha do mês de setembro de 2009.

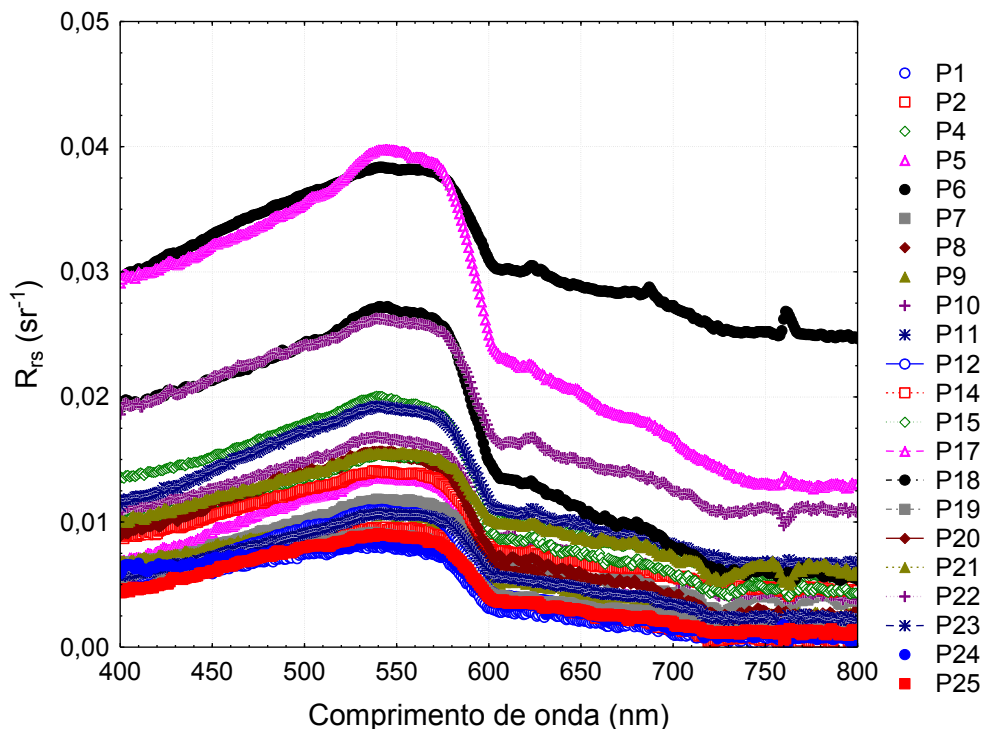


Figura 2. Espectros de R_{rs} obtidos *in situ* em setembro de 2009.

As curvas apresentaram um pico entre 500 e 600 nm, mostrando uma provável influência por sedimentos inorgânicos em suspensão, pois o espectro de águas dominadas por esse componente apresenta um aumento na reflectância, principalmente, na região entre 580 e 680 (Novo et al., 1991). A resposta espectral do sedimento em suspensão também varia de acordo com sua granulometria e a origem e cor do sedimento, sendo que no intervalo de 550 a 570 é observado um espalhamento maior (Gitelson; Keydan, 1990).

Também é observado um achatamento do pico de reflectância nas curvas; Goodin et al. (1993) demonstraram ao estudar a resposta fitoplanctônica, que as curvas de reflectância sofrem um deslocamento de um pico bem definido em 550 , quando a água está pouco turbida, para um pico mais extenso e achatado que vai de 550 a 650 em águas com níveis mais altos de turbidez. Esse resultado mostra o mascaramento do pico na faixa do verde devido aos sedimentos em suspensão.

4.3 Estimativa do retroespalhamento

A Figura 3-a,b mostra a estimativa do coeficiente de retroespalhamento para o modelo de Jerome et al. (1996) e McKee et al. (2003), respectivamente.

Ambos os resultados mostraram que o espalhamento é maior para comprimentos de onda entre 400-440 e 600-720 . Como foi observado na Figura 2, o espalhamento apresentado na Figura 3-a,b é devido principalmente ao sedimento em suspensão.

Os pontos amostrais que apresentaram os maiores valores de retroespalhamento foram, P6, P17 e P22 (Figura 3-c,d). O ponto amostral P6 fica próximo da margem direita do reservatório e por isso sofre influência com a transferência de massa d'água carregada com sedimento em suspensão.

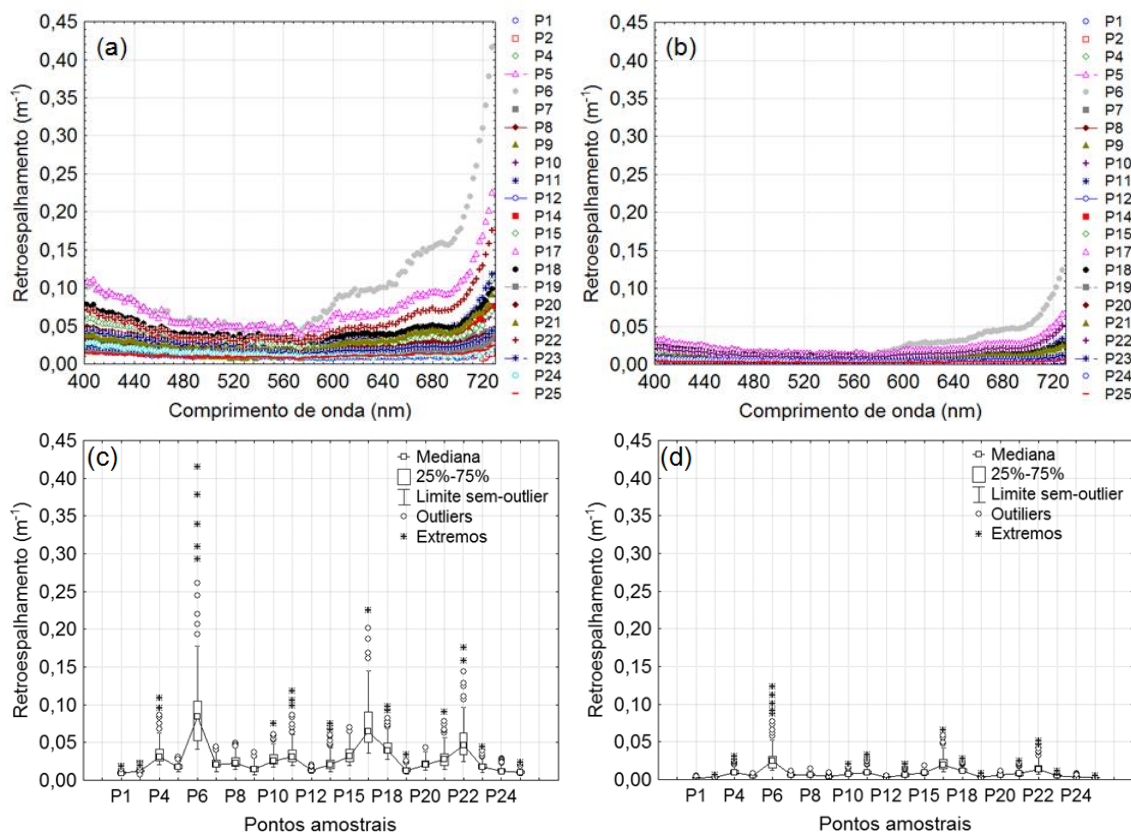


Figura 3. Estimativa do coeficiente de retroespalhamento pelo método de Jerome (a) e o Box-plot (c) e pelo método de McKee (b) e o Box-plot (d).

Já o ponto P17 está localizado na zona de transição rio-reservatório. Essa região recebe o aporte de sedimentos que é carregado pela bacia de drenagem e alcança o reservatório por meio dos rios.

O terceiro ponto com maior retroespalhamento, P22, está localizado no centro do reservatório, onde passa o antigo leito do rio que foi inundado. Isso mostra a ocorrência da dispersão dos sedimentos em suspensão para a região central do reservatório por meio da ação mecânica do vento.

Os menores valores de retroespalhamento são encontrados nos pontos P1, P2, P24 e P25 (Figura 3-c,d). Os pontos P1 e P2 estão localizados próximos à barragem do reservatório; os pontos P24 e P25 estão localizados próximos à entrada dos rios, mas em regiões mais abrigadas e fora da pista de vento.

A Figura 3-c,d também mostra que a estimativa do retroespalhamento pelo método de Jerome et al. (1996) apresentou valores superiores se comparado às estimativas pelo método do McKee et al. (2003).

4.4 Avaliação da estimativa do retroespalhamento

A avaliação dos métodos utilizados para a estimativa do coeficiente de retroespalhamento está resumida na Tabela 2. O método de Jerome, apesar de apresentar um EQM de 0,084, apresentou um coeficiente de correção maior do que o método do McKee (EQM = 0,029). Pelo resultado do viés, é possível observar que o método de Jerome tem a tendência de superestimar e o método do McKee de subestimar. O coeficiente de correlação mostra que os métodos utilizados, não são adequados para a estimativa do retroespalhamento em sistemas aquáticos continentais tropicais.

Tabela 2: Avaliação dos métodos de estimativa de retroespalhamento por meio do Viés, Erro Quadrático Médio (EQM) e do coeficiente de correlação (r)

Método	Viés	EQM	r
Jerome et al. (1996)	0,013	0,084	0,257
McKee et al. (2003)	- 0,005	0,029	0,176

5. Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo estimar o coeficiente de retroespalhamento por meio de propriedades ópticas aparentes e inerentes.

Foram testados dois métodos, e os resultados mostraram que ambos falharam em estimar o retroespalhamento com um erro estatisticamente aceitável. No entanto, chama-se a atenção para o fato de que apenas foram comparados os comprimentos de onda em 470 nm. Esse fato limita a análise dos erros, e pode levar a uma conclusão precipitada.

Os resultados apresentados mostram a importância de se investir em equipamentos para medir principalmente as propriedades ópticas inerentes em mais comprimentos de onda, para que seja possível não só avaliar os algoritmos disponíveis, mas também para permitir o desenvolvimentos de algoritmos para as águas tropicais continentais.

Referências Bibliográficas

Alcântara, E.H.; Stech, J.L.; Lorenzetti, J.A.; Bonnet, M-P.; Casamitjana, X.; Assireu, A.T.; Novo, E.M.L.M. Remote sensing of water surface temperature and heat flux over a tropical hydroelectric reservoir. **Remote Sensing of Environment**. v. 114, p. 2651-2665. 2010.

Balch, W.M.; Gordon, H.; Bowler, B.C.; Drapeau, D.T.; Booth, E.S. Calcium carbonate measurements in the surface global ocean based on Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer data, **J. Geophys. Res.**, 110, C07001, 2005.

- Fougnie, B.; Frouin, R.; Lecomte, P.; Deschamps, P. Y. Reduction of Skylight Reflection Effects in the Above-Water Measurement of Diffuse Marine Reflectance. **Applied Optics**, v. 38, n. 18, p. 3844-3856, 1999.
- Gitelson, A.; Gurlin, D.; Moses, W.J.; Barrow, T. A bio-optical algorithm for the remote estimation of the chlorophyll-a concentration in case 2 waters. **Environ. Res. Lett.** 4:1-5, 2009.
- Gitelson, A.; Keydan, G. P. Remote sensing of inland surface water quality - measurements in the visible spectrum. *Acta hydrophys.*, v. 34, n. 1, p. 5-27, 1990.
- Gordon H.R. Can the Lambert-Beer law be applied to the diffuse attenuation coefficient of ocean water?. **Limnology and Oceanography**. v. 34, n. 8, p. 1389-1409. 1989.
- Jerome, J.H.; Bukata, R.P.; Miller, J.R. Remote sensing reflectance and its relation to optical properties of natural waters. **International Journal of Remote Sensing**. v. 17, n. 16, p. 3135-3155. 1996.
- Kampel, M.; Lorenzetti, J.A.; Bentz, C.M.; Nunes, R.A.; Paranhos, R.; Rudorff, F.M.; Politano, A.T. Simultaneous Measurements of Chlorophyll Concentration by Lidar, Fluorometry, above-Water Radiometry, and Ocean Color MODIS Images in the Southwestern Atlantic. **Sensors**, v. 9, p. 528-541, 2009.
- Maffione, R.A.; Dana, D.R. Instruments and methods for measuring the backward-scattering coefficient of ocean waters. **Applied Optics**. v. 36, n. 24, p. 6057-6067. 1997.
- McKee, D.; Cunningham, A.; Craig, S. Estimation of absorption and backscattering coefficients from in situ radiometric measurements: theory and validation in case II waters. **Applied Optics**. v. 42, n. 15, p. 2804-2810. 2003.
- Mobley, C.D. Estimation of the remote sensing reflectance from above-surface measurements. **Applied Optics**, v. 38, n. 36, p. 7442-7455, 1999.
- Morel, A.; Gentili, B. Diffuse reflectance of oceanic waters. II. Bidirectional aspects. **Applied Optics**. v. 38, n. , p. 6864-6879. 1993.
- Mueller, J. L.; Fargion, G. S.; McClain, C. R. **Oceans optics protocols for satellite ocean color sensor validation**. Revision 4, volume IV: Inherent optical properties. Greenbelt: NASA, 2002. 76 p.
- Nascimento, R. F. F. **Utilização de dados MERIS e in situ para a caracterização bio-óptica do reservatório de Itumbiara, GO**. 2010. 113 p. (sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/03.15.18.39-TDI). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3769MUL>>. Acesso em: 17 ago. 2012.
- Novo, E. M. L. M.; Steffen, C. A.; Braga, C. Z. F. Results of a laboratory experiment relating spectral reflectance total suspended solids. **Remote Sensing of Environment**, v. 36, n. 1, p. 67-72, 1991.
- Stramski, D.E.; Boss, E.; Bogucki, D.; Voss, K.J. The role of seawater constituents in light backscattering in the ocean. **Prog. Oceanogr.** 61:27-56. 2004.
- Sun, D.; Li, Y.; Wang, Q.; Lv, H.; Le, C.; Huang, C.; Gong, S. Partitioning particulate scattering and absorption into contributions of phytoplankton and non-algal particles in winter in Lake Taihu (China). **Hydrobiologia**, 664:337-349. 2010.
- Twardowski, M.S.; Claustre, H.; Freeman, S.A.; Stramski, D.; Huot, Y. Optical backscattering properties of the "clearest" natural waters. **Biogeosciences**, 4, 1041-1058, 2007.