

## Desenvolvimento de modelos empíricos para a estimativa da concentração de clorofila-*a* e do total de sólidos em suspensão no reservatório de Nova Avanhandava (SP), baseados nos coeficientes de absorção e retroespalhamento

Luiz Henrique da Silva Rotta<sup>1</sup>

Enner Alcântara<sup>1</sup>

Nilton Nobuhiro Imai<sup>1</sup>

Fernanda S Y Watanabe<sup>1</sup>

Thanan P Rodrigues<sup>1</sup>

Renato Ferreira<sup>2</sup>

Claudio Barbosa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual Paulista – FCT/UNESP  
19060-900 - Presidente Prudente - SP, Brasil  
luizhrotta@yahoo.com.br, {enner, nnimai}@fct.unesp.br,  
{fernandasyw, twalesza}@gmail.com

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil  
claudio@dpi.inpe.br, renatompf@gmail.com

### Abstract.

Constructing large reservoirs by river impoundment leads to several changes in aquatic environment, which include changes in water constituents concentration such as Total Suspended Solids [TSS] and Chlorophyll-*a* [Chl-*a*]. Those changes, hence, affect water optical properties such as backscattering ( $b_b$ ) and absorption ( $a$ ) coefficient. Therefore, this study aims to evaluate the relationship between inherent optical properties ( $b_b$ ,  $a$  and  $b_b/a$ ) and optically active components in a Brazilian reservoir and thus develop empirical models to assess [TSS] and [Chl-*a*]. In order to do so, ten sampling stations were profiled using an AC-S attenuation and absorption meter and a Hydroscat-6 backscattering meter from June 28<sup>th</sup> to 30<sup>th</sup> 2013 in Nova Avanhandava Reservoir, located in western São Paulo state. Simultaneously, water samples were collected for laboratory analysis to set chlorophyll-*a* and total suspended solids concentrations. [TSS] was strongly correlated with  $a$ ,  $b_b$  and  $b_b/a$  in all wavelengths, with correlation coefficient ranging from 0.735 to 0.920. [Chl-*a*] presented a significant correlation coefficient (greater than 0.6) only with  $b_b/a$ . Several different wavelengths were attempted for determining ratios between  $b_b/a$ . The best model for [TSS] was achieved using  $[b_b/a (590)] / [b_b/a (442)]$  ratio, which provided  $R^2 = 0.855$  and  $RMSE = 0.158 \text{ mg L}^{-1}$ . The regression between [Chl-*a*] and  $[b_b/a (510)] / [b_b/a (470)]$  ratio provided the best fit for chlorophyll-*a*, with  $R^2 = 0.472$  and  $RMSE = 3.394 \text{ mg L}^{-1}$ .

**Palavras-chave:** optically active components, inherent optical properties, linear regression, HydroScat, AC-S, componente opticamente ativas, propriedades ópticas inerentes, regressão linear, HydroScat, AC-S.

### 1. Introdução

Vários reservatórios foram construídos em todo o Brasil para geração de energia elétrica após o seu desenvolvimento industrial e sócio-econômico. Com a construção desses reservatórios ocorre uma mudança no ambiente que pode alterar a comunidade biológica e os constituintes presentes na água. Ao atravessar a coluna de água, a radiação é submetida a profundas alterações devido, principalmente, à concentração de material dissolvido e à concentração de material em suspensão (Esteves, 2011). Esses constituintes dissolvidos e suspensos na coluna de água, chamados de “ópticamente ativos”, fazem com que a radiação, ao penetrar na água, seja absorvida e espalhada, o que altera a cor da água.

A cor da água é uma característica óptica influenciada pelos processos de absorção, espalhamento e emissão pela coluna da água, além de reflectância pelo substrato (Dekker et al., 2001). Segundo Mobley (1994), as propriedades ópticas da água podem ser divididas em duas classes, são elas: Propriedades Ópticas Inerentes (POIs) e Propriedades Ópticas

Aparentes (POAs). As POAs são dependentes tanto do meio quanto da estrutura direcional do campo de luz ambiente. Já as POIs são dependes apenas do meio aquático e não da estrutura geométrica do campo de luz. As duas Propriedades Ópticas Inerentes fundamentais – coeficiente de absorção e de espalhamento – podem ser definidas em termos do comportamento de um feixe paralelo de luz incidente sobre uma fina camada do meio (Kirk, 2011).

Uma vez que a radiação refletida pela água depende da qualidade e das propriedades ópticas específicas de um ou mais constituintes da água, sua cor carrega informação espectral sobre a concentração de alguns parâmetros de qualidade da água (Dekker et al., 2001). Os componentes opticamente ativos (COAs) são determinantes sobre as POIs de corpos d'água. Sedimentos em suspensão, pigmentos fotossintetizantes e substâncias húmicas são os principais COAs responsáveis pela variação espectral da água (Kirk, 2011).

Este estudo tem como objetivo avaliar a correlação entre as propriedades ópticas inerentes e os componentes opticamente ativos em um reservatório brasileiro e, assim, desenvolver modelos empíricos para estimar a concentração de [TSS] e [Chl-a].

## 2. Procedimento Metodológico

A coleta de dados em campo foi realizada entre os dias 28 e 30 de junho de 2013, no Rio Bonito, afluente do Rio Tietê, pertencente ao Reservatório de Nova Avanhandava (Figura 1). Esse reservatório, localizado no município de Buritama – SP entrou em operação em 1982. Possui uma área de 210 km<sup>2</sup> e volume de 2830x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> (AES Tietê, 2014).

Foram selecionados 10 pontos amostrais e coletados dados com os equipamentos HydroScat (<http://www.hobilabs.com>) e AC-S (<http://www.wetlabs.com/ac-s>), além de amostras de água para análise em laboratório (Figura 2).

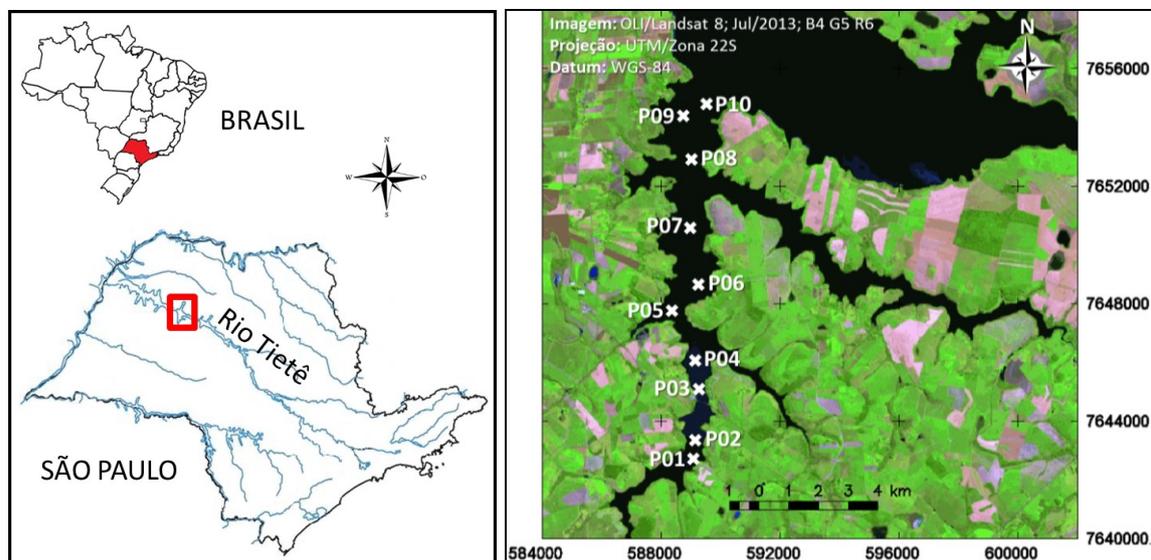


Figura 1. Localização do Reservatório de Nova Avanhandava em (a) e do Rio Bonito com a posição dos elementos amostrais em (b).

A água amostrada foi filtrada utilizando filtros de fibra de vidro para que fosse possível realizar as análises da [Chl-a] e do [TSS] em laboratório para cada ponto. O HydroScat forneceu dados do coeficiente de retroespalhamento ( $b_b$ ) e o AC-S do coeficiente de absorção ( $a$ ); ambos em diferentes profundidades. Porém, foram utilizados somente os dados adquiridos em 0,5 m de profundidade, para que fosse compatível com a profundidade de coleta de água.



Figura 2. Equipamento AC-S para medir o coeficiente de absorção em (a) e HydroScat para medir o coeficiente de retroespalhamento em (b).

O HydroScat realiza medições em 6 comprimentos de onda: 420, 442, 470, 510, 590, e 700 nm. Já o AC-S fornece dados de absorção no intervalo 400–750 nm com resolução de 4 nm. Porém, no presente trabalho, foram utilizados somente valores nos seis comprimentos de onda correspondente aos fornecidos pelo HydroScat.

Também foi calculada uma relação entre  $b_b$  e  $a$ . Segundo Mobley (1994), a reflectância irradiante logo abaixo da superfície da água ( $R(0^-)$ ) é diretamente proporcional ao coeficiente de retroespalhamento, e inversamente proporcional ao coeficiente de absorção.

$$R(0^-) = \alpha \frac{b_b}{a} \quad (1)$$

A constante  $\alpha$  depende de vários fatores como ângulo solar zenital, radiação difusa do céu, condições da água, etc. Alguns estudos mostram uma aproximação para o valor dessa constante é de 0.33 (Morel e Prieur, 1977, Kirk, 1991). Porém, essa constante não é relevante para o presente estudo, pois seu valor não alteraria o resultado do modelo.

Foram calculados os coeficientes de correlação ( $r$ ) dos coeficientes de absorção ( $a$ ), do retroespalhamento ( $b_b$ ) e da razão entre eles ( $b_b/a$ ) com a [Chl- $a$ ] e a [TSS]. Adicionalmente, foram calculados os coeficientes de correlação de todas as razões entre os comprimentos de onda obtidos da relação  $b_b/a$  e a [Chl- $a$ ] e a [TSS]. Modelos de regressão linear foram desenvolvidos para os resultados que apresentaram maior correlação. Os modelos foram avaliados com base no coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e no erro médio quadrático (RMSE).

### 3. Resultados e discussão

A água amostrada em cada ponto foi analisada em laboratório e obtiveram-se os valores de [Chl- $a$ ] e de [TSS] mostrados na tabela 1.

Tabela 1. [Chl- $a$ ] e [TSS] em cada ponto amostral.

	P01	P02	P03	P04	P05	P06	P07	P08	P09	P10
TSS (mg L <sup>-1</sup> )	1.30	1.10	2.05	0.95	1.05	1.15	0.55	0.85	0.5	0.85
Chl- $a$ (µg L <sup>-1</sup> )	9.147	3.413	6.280	3.003	9.920	7.099	13.015	14.107	9.101	18.930

Os coeficientes  $b_b$  e  $a$  para os seis comprimentos de onda medidos em cada ponto são mostrados na figura 3 (a) e (b), respectivamente.

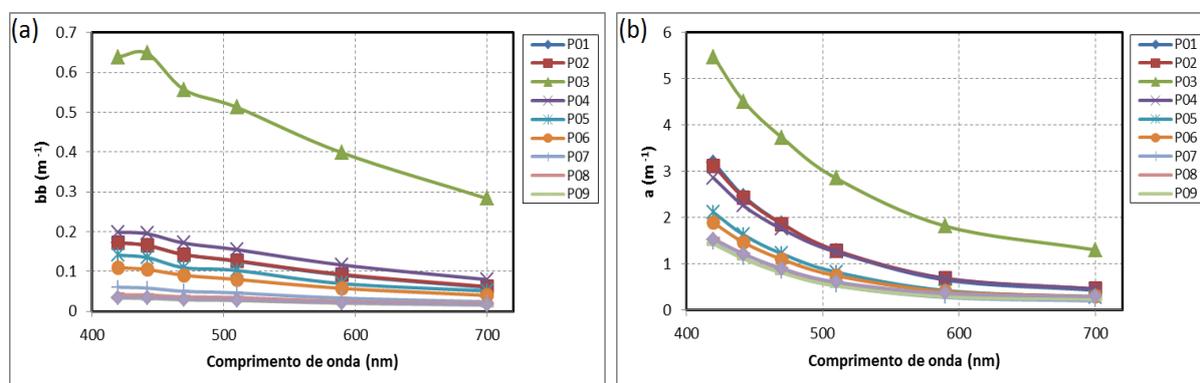


Figura 3 – Coeficiente de retroespalhamento em (a) e coeficiente de absorção em (b).

Observa-se que o ponto P03 se destaca dentre os demais valores, tanto para retroespalhamento quanto para absorção. Nesse ponto obteve-se a maior [TSS] dentre os dez pontos analisados, o que justifica a discrepância nos valores de  $b_b$  e  $a$ .

O comportamento do coeficiente de retroespalhamento tende a apresentar maiores valores em menores comprimentos de onda no visível (Figura 3 (a)), esta forma na curva também podendo ser vista em outros trabalhos (Morel et al., 2007; Twardowski, et al., 2007).

O coeficiente de absorção da água pura indica baixos valores nas regiões do espectro correspondente às cores azul e verde, porém a absorção começa a aumentar acima de 550 nm (Pope e Fry, 1997). Devido à presença de vários constituintes presentes na água, especialmente o material orgânico dissolvido, a absorção tende a ser muito na extremidade vermelha do espectro visível e os valores vão subindo de forma constante com a diminuição do comprimento de onda para o azul (Kirk, 2011). Esse comportamento é compatível com o observado na figura 3 (b).

A razão ( $b_b/a$ ) é mostrado na figura 4. Nota-se que os valores entre os pontos encontram-se mais regularmente distribuídos com a razão entre os coeficientes  $b_b$  e  $a$ .

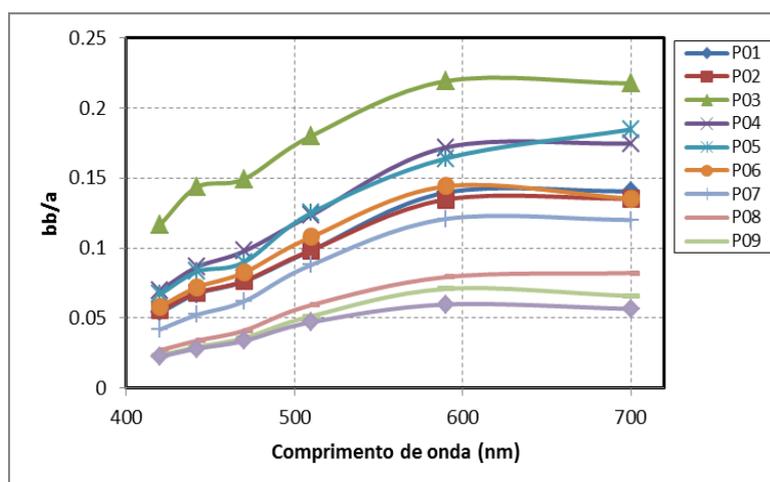


Figura 4 – Razão entre o coeficiente de retroespalhamento ( $b_b$ ) e o de absorção ( $a$ )

A tabela 2 mostra a correlação entre coeficiente de retroespalhamento ( $b_b$ ), coeficiente de absorção ( $a$ ) e  $b_b/a$  com a [Chl- $a$ ] e a [TSS] para cada um dos comprimentos de ondas obtidos por meio dos equipamentos.

Tabela 2. Coeficiente de correlação dos coeficientes  $b_b$ ,  $a$  e  $b_b/a$  com a [Chl- $a$ ] e a [TSS] para diferentes comprimentos de onda (CO).

CO (nm)	$b_b$ vs [TSS]	$b_b$ vs [Chl- $a$ ]	$a$ vs [TSS]	$a$ vs [Chl- $a$ ]	$b_b/a$ vs [TSS]	$b_b/a$ vs [Chl- $a$ ]
420	0.910	-0.477	0.919	-0.559	0.867	-0.615
442	0.907	-0.464	0.920	-0.541	0.866	-0.613
470	0.905	-0.467	0.920	-0.527	0.851	-0.639
510	0.902	-0.458	0.918	-0.510	0.817	-0.629
590	0.896	-0.446	0.909	-0.448	0.770	-0.687
700	0.892	-0.429	0.895	-0.406	0.735	-0.654

Os valores dos coeficientes de correlação foram significativamente similares em cada análise, ou seja, valores parecidos em diferentes comprimentos de onda. Apesar disso, foram gerados modelos de regressão para cada combinação com o maior coeficiente de correlação, indicado em destaque na tabela 2. O modelo de regressão linear entre o  $b_b$  em 420 nm e a [Chl- $a$ ] é mostrada na figura 5 (a) e entre  $b_b$  em 420 nm e [TSS] na figura 5 (b). A figura 6 (a) mostra o modelo de regressão entre  $a$  em 420 nm e [Chl- $a$ ] e a figura 6 (b) entre  $a$  em 470 nm e [TSS]. Já a relação entre  $b_b/a$  em 590 nm e a [Chl- $a$ ] pode ser visualizada na figura 7(a) e entre  $b_b/a$  em 420 nm e [TSS] na figura 7(b).

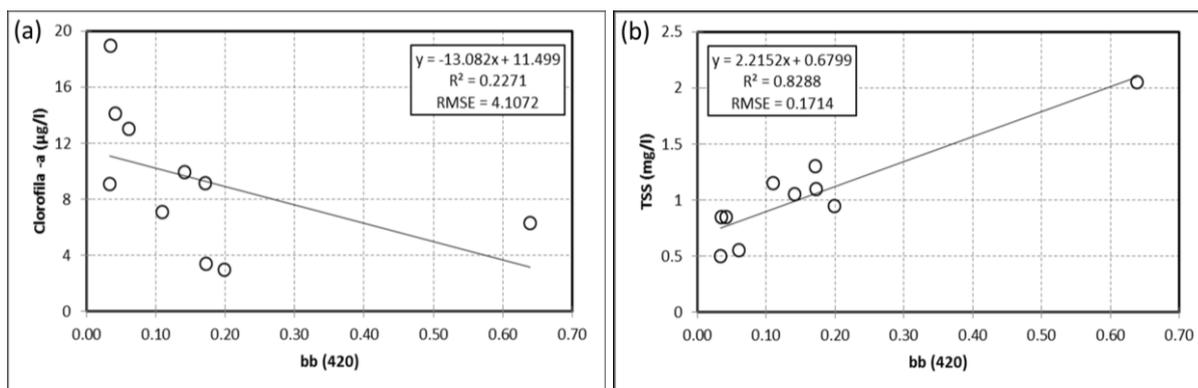


Figura 5. Regressão entre [Chl- $a$ ] e o coeficiente de retroespalhamento em 420 nm em (a) e regressão entre [TSS] e o coeficiente de retroespalhamento em 420 nm em (b).

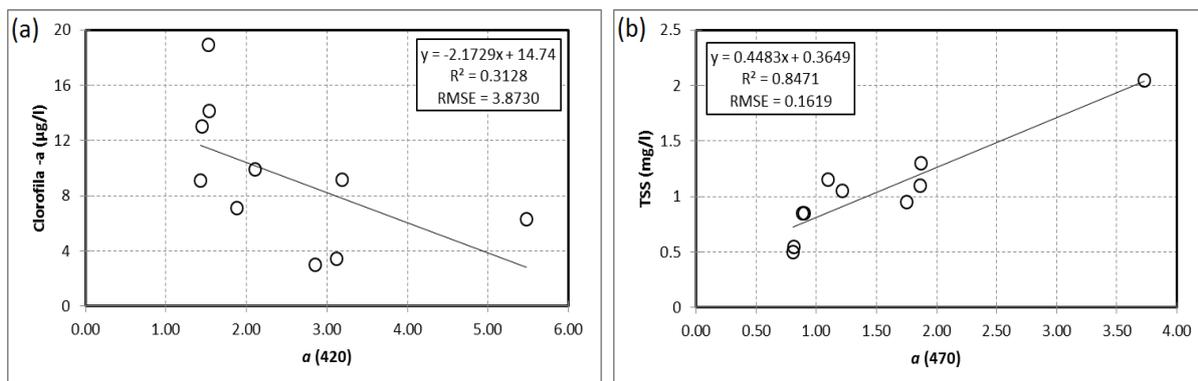


Figura 6. Regressão entre [Chl- $a$ ] e o coeficiente de absorção em 420 nm em (a) e regressão entre [TSS] e o coeficiente de absorção em 470 nm em (b)

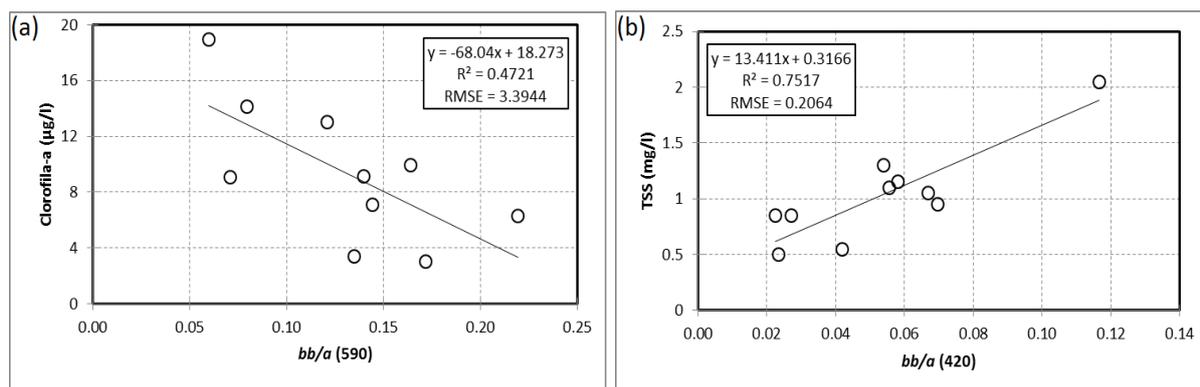


Figura 7. Regressão entre [Chl-*a*] e a relação  $b_b/a$  em 590 nm em (a) e regressão entre [TSS] e a relação  $b_b/a$  em 420 nm em (b).

Os modelos para [TSS] apresentaram alto coeficiente de determinação para todas as análises anteriores, obtendo-se um maior valor ( $R^2 = 0,847$ ) na regressão com o coeficiente *a*. Esse melhor ajuste é confirmado pelo menor valor da raiz quadrada do erro médio quadrático ( $RMSE = 0.162 \text{ mg L}^{-1}$ ). Já a [Chl-*a*] obteve o melhor modelo de regressão com a relação  $b_b/a$  em 590 nm, com um coeficiente de correlação de 0.4721 e RMSE de  $3.394 \text{ µg L}^{-1}$ .

Para uma análise mais detalhada do potencial do uso dos dados disponíveis, especificamente da relação  $b_b/a$ , as razões entre os seis comprimentos de onda disponíveis foram calculadas, obtendo-se um total de 15 razões. A figura 8 mostra a correlação entre cada razão e a [Chl-*a*] e a [TSS].

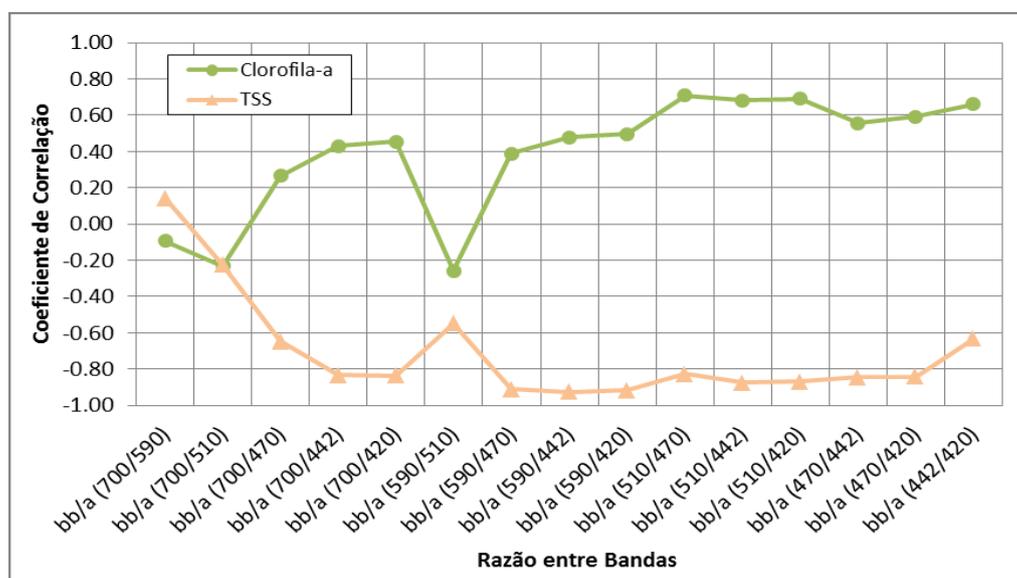


Figura 8. Correlação entre a [Chl-*a*] e razão de bandas em verde e correlação entre a [TSS] e razão de bandas em laranja claro.

As menores correlações foram encontradas com as razões 700/590, 700/510 e 590/510, tanto pra a [TSS] quanto para a [Chl-*a*]. A maior correlação ( $r=0.71$ ) encontrada para [Chl-*a*] utilizando a relação  $b_b/a$  foi obtida com a razão entre as bandas 510 e 470 nm; já para a [TSS], a maior correlação ( $r=0.92$ ) foi com a razão entre as bandas 590 e 442 nm. A figura 9 mostra a regressão da [Chl-*a*] e da [TSS] com a maior correlação encontrada para cada um.

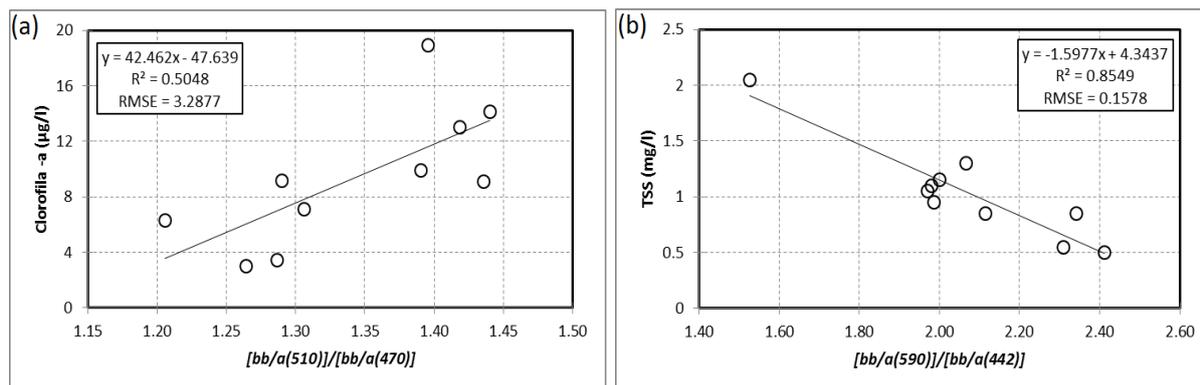


Figura 9. Regressão entre [Chl-*a*] e a relação  $b_b/a$  para a razão 510/470 nm em (a) e regressão entre a [TSS] e a relação  $b_b/a$  para a razão 590/442 nm em (b).

Dentre os modelos de regressão linear apresentados neste trabalho, os que apresentaram melhores resultados foram os que utilizaram o procedimento de razão de bandas da relação  $b_b/a$ , ou seja, a regressão entre [TSS] e a razão  $[b_b/a(590)]/[b_b/a(442)]$  e a regressão entre [Chl-*a*] e  $[b_b/a(510)]/[b_b/a(470)]$ .

#### 4. Conclusões

Encontrou-se uma boa correlação entre as propriedades ópticas inerentes e os constituintes opticamente ativos (TSS e Chl-*a*). De maneira geral, observou-se uma maior correlação com a [TSS] do que com a [Chl-*a*], e consequentemente, melhores modelos de regressão para a primeira variável.

A [TSS] apresentou coeficientes de correlação de aproximadamente 0.9 para todos os comprimentos de onda, tanto quando utilizado o coeficiente *a* quanto o  $b_b$ , permitindo o desenvolvimento de modelos em qualquer comprimento de onda analisado. Já a [Chl-*a*] só apresentou correlação significativa ( $r > 0.6$ ) quando utilizada a relação  $b_b/a$  para gerar o modelo de regressão.

Com relação à utilização da razão de bandas, apesar de ter apresentado boas correlações entre as variáveis, não houve uma melhora significativa para os modelos. Ao utilizar a regressão entre *a* e [TSS], obteve-se um  $R^2 = 0.847$  e  $RMSE = 0.162 \text{ mg L}^{-1}$ , já utilizando a regressão entre a razão  $[b_b/a(590)]/[b_b/a(442)]$  o  $R^2$  foi de 0.855 e o RMSE de  $0.158 \text{ mg L}^{-1}$ . O mesmo foi observado para o modelo de [Chl-*a*], ou seja, a regressão entre [Chl-*a*] e  $b_b/a$  obteve um  $R^2$  de 0.472 e um  $RMSE$  de  $3.394 \text{ µg L}^{-1}$ , e ao utilizar a razão  $[b_b/a(510)]/[b_b/a(470)]$ ,  $R^2 = 0.505$  e  $RMSE = 3.288 \text{ µg L}^{-1}$ .

#### Agradecimentos

Agradecimento ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq) pela bolsa cedida e pelos recursos dos projetos de pesquisa Universal: CNPq 472131/2012-5 e CNPq 482605/2013-8, assim como dos projetos FAPESP: 2013/09045-7 e 2012/19821-1. O primeiro autor agradece, também, ao CNPq pela bolsa sanduíche, por meio do projeto CNPq 400881/2013-6.

#### Referências Bibliográficas

AES Tietê. Web site. Disponível em: <<http://www.aestiete.com.br/>>. Acesso em: 09 de novembro de 2014.

DEKKER, A. G.; BRANDO, V. E.; ANSTEE, J. M.; PINNEL, N.; KUTSER, T.; HOOGEBOOM, E. J.; PETERS, S.; PASTERKAMP, R.; VOS, R.; OLBERT, C.; MALTHUS, T. J. M. **Imaging spectrometry of water**. In: Imaging spectrometry: basic principles and prospective applications. VAN DER MEER, F. D.; DE JONG, S. M. (Editors). Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, 2001.

ESTEVEES, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. 3<sup>o</sup> Edição. Rio de Janeiro, RJ: Interciência, 2011.

KIRK, J. T. O. **Light and photosynthesis in aquatic ecosystems**. 3rd ed. New York: Cambridge University Press, 2011.

KIRK, J. T. O. **Volume scattering function, average cosines, and the underwater light field**. *Limnology and Oceanography*, 36 (3), 455-467, 1991.

MOBLEY, C. D. **Light and water: Radiative transfer in natural waters**. Academic Press, 1994.

MOREL, A.; GENTILI, B.; CLAUSTRE, H.; BABIN, M.; BRICAUD, A.; RAS, J.; TIÈCHE, F. Optical properties of the “clearest” natural waters. ***Limnology and Oceanography***, V. 52(1), p. 217-229, 2007.

MOREL, A.; PRIEUR, L. **Analysis of variations in ocean color**. *Limnology and Oceanography*. V. 22 (4), p. 709-722, 1977.

POPE, R. M.; FRY, E. S. Absorption spectrum (380 –700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements. ***Applied Optics***, V. 36, N. 33, p. 8710-8723, 1997.

TWARDOWSKI, M. S.; CLAUSTRE, H.; FREEMAN, S. A.; STRAMSKI, D.; HUOT, Y. Optical backscattering properties of the “clearest” natural waters. ***Biogeosciences***, V. 4, p. 1041-1058, 2007.