

Avaliação de modelos de correção atmosférica para a estimativa do total de sólidos em suspensão no reservatório de Barra Bonita via imagem OLI/Landsat-8

Nariane Bernardo¹
Enner Alcântara²
Thanan Rodrigues¹
Fernanda Watanabe¹

¹Universidade Estadual Paulista – Unesp - Departamento de Cartografia
19060-900 - Presidente Prudente – SP, Brasil.
{narianebernardo, twalesza, fernandasyw}@gmail.com

²Universidade Estadual Paulista – Unesp, Departamento de Engenharia Ambiental
12247-004 - São José dos Campos – SP, Brasil.
enner.alcantara@ict.unesp.br

Abstract. The atmosphere contains gases and molecules that affect the signal registered by remote sensors. These effects might be minimized in order to provide suitable surface reflectance (R_{sup}) values in aquatic systems. The atmospheric correction methods aim to minimize such interferences and avoid the under or overestimation of remote sensing reflectance (R_{rs}). Accurate R_{rs} provides better information about the state of aquatic system, it means, establishing the concentration of aquatic compounds accurately. The aim of this study was to assess the outputs from five atmospheric correction methods (Dark Object Subtraction - DOS; Quick Atmospheric Correction – QUAC; Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes - FLAASH; Atmospheric Correction for OLI ‘lite’ – ACOLITE, and Provisional Landsat-8 Surface Reflectance Algorithm - L8SR). The main purpose was to investigate the suitability of R_{rs} for estimating total suspended matter concentrations (TSM) in Barra Bonita Hydroelectrical Reservoir. To establish TSM concentrations via atmospherically corrected Operational Land Imager (OLI) scene, the TSM retrieval model was calibrated and validated with *in situ* data. Thereby, the achieved results from TSM retrieval model application demonstrated that L8SR was able to provide the most suitable R_{rs} values for green and red spectral bands, and consequently, the lowest TSM retrieval errors (Mean Absolute Percentage Error ranged from 8% to 128%, respectively). In the near-infrared band, retrieving R_{rs} is still a challenge for all the tested algorithms.

Palavras-chave: water color, inland water, Landsat-8, cor da água, águas interiores, Landsat-8.

1. Introdução

Em sistemas aquáticos apenas 20% da radiação eletromagnética (REM) incidente pode retornar ao sensor e disponibilizar informações sobre a composição ótica destes ambientes (Roy et al., 2014). A perda, ou atenuação, da REM emitida pelo sol se dá ao longo do seu caminho ótico, onde há interação desta com os componentes atmosféricos, ou seja, gases e partículas (Chavez, 1988; Adler-Golden et al., 1999; Vanhellemont e Ruddick, 2014).

A minimização dos efeitos atmosféricos em medidas radiométricas é feita por meio de métodos de correção atmosférica, os quais modelam matematicamente esses efeitos para retirá-los da informação espectral registrada pelo sensor orbital. Se os efeitos atmosféricos são computados de forma correta pelos modelos, as estimativas de reflectância de sensoriamento remoto (R_{rs}) se tornam mais acuradas (Rotta et al., 2016).

Diferentes algoritmos de correção atmosférica (CA) foram desenvolvidos com o propósito de reduzir a influência dos efeitos atmosféricos nas grandezas radiométricas registradas por sensores remotos (Chavez et al., 1988; Adler-Golden et al., 1999), sendo alguns deles voltados PARA aplicações em ambientes aquáticos (Vanhellemont and Ruddick, 2015; Rotta et al., 2016). Contudo, a aplicação da CA deve visar a produção de dados confiáveis de R_{rs} de forma que estes sejam úteis para estimativas acuradas da composição do sistema aquático. A partir desse contexto, o presente trabalho teve por objetivo avaliar a

confiabilidade dos valores de R_{rs} resultantes de diferentes métodos de CA para estimar a concentração de sólidos suspensos totais (SST), um indicador de qualidade da água, no Reservatório Hidrelétrico de Barra Bonita (RHBB).

2. Metodologia

2.1 Área de Estudo

O RHBB é o primeiro reservatório hidrelétrico localizado no Rio Tietê (Figura 1), com uma área de inundação de aproximadamente 310 km² e uma profundidade média de 10,2 m (Watanabe et al., 2016). A bacia de contribuição de RHBB apresenta diferentes fontes de poluição não-pontuais devido aos grandes centros urbanos e áreas de intensa atividade agrícola. O resultado das elevadas concentrações de clorofila-*a* (Chl-*a*), nutrientes e SST caracterizam o RHBB como um ambiente eutrófico (Tundisi et al., 2008).

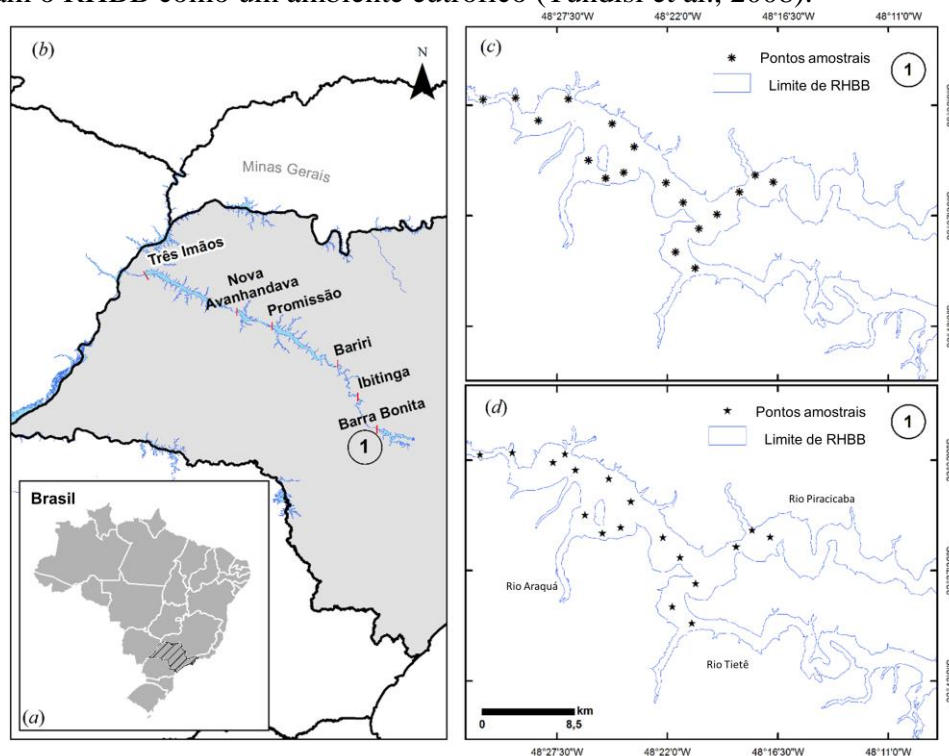


Figura 1. (a) Brasil e estado de São Paulo em destaque; (b) Cascata do Rio Tietê de montante (Reservatório de Barra Bonita (RHBB)– número 1) a jusante (Três Irmãos); (c) locais de amostragem da primeira e (d) segunda campanha de campo realizadas em maio e outubro de 2014, respectivamente.

2.2 Coleta de dados

Duas campanhas de campo foram realizadas: (1) 5 a 8 de Maio de 2014; e (2) 13 a 16 Outubro de 2014. Coleta de amostras de água permitiram a estimativa das concentrações de Chl-*a* (Golterman et al., 1978) e de SST (APHA, 1996) em laboratório. Medidas de parâmetros da qualidade da água- Oxigênio Dissolvido (OD, em mg.L⁻¹), Turbidez (em NTU) e disco de Secchi (em m), foram realizadas com Oxímetro (Hanna Instruments, Woonsocket, USA), Turbidímetro (Hanna Instruments, Romania, USA) e disco de Secchi, respectivamente.

As medidas de irradiância descendente incidente sobre a superfície da água (E_d em W.m⁻²), e de radiância total (L_t em W.m⁻².sr⁻¹) e difusa (L_{sky} em W.m⁻².sr⁻¹) foram obtidas por meio dos sensores TriOS - ARC e ACC, respectivamente, com amostragem espectral de 3,3 nm, no intervalo de 320 nm a 950 nm, interpolados a cada um nanômetro para compatibilizar as bandas, uma vez que cada sensor trabalha com diferentes padrões de amostragem. A coleta dos dados seguiu o protocolo de Mobley (1999) afim de evitar interferência da sombra do

barco ou efeito de reflexão especular da água sobre as medidas radiométricas. A geometria de visada adotou um ângulo azimutal (φ) de 90° e ângulo zenital (θ) de 40° . As grandezas radiométricas amostradas permitiram calcular a R_{rs} conforme a Equação 1.

$$R_{rs}(\theta, \varphi, \lambda, 0^+) = \frac{L_t(\theta, \varphi, \lambda, 0^+) - 0.028 \times L_{sky}(\theta, \varphi, \lambda, 0^+)}{E_d(\theta, \varphi, \lambda, 0^+)} \quad (1)$$

2.3 Reamostragem espectral

Para utilizar os dados de R_{rs} medidos *in situ* como referência na validação do processamento de CA, foi realizada uma reamostragem espectral por meio da ponderação da $R_{rs}(\lambda)$ hiperespectral pela função resposta ($S(\lambda)$ – Barsi et al., 2014) do sensor *Operational Land Imager* (OLI) a bordo do Landsat-8 (Equação 2 – Van de Meer, 1999).

$$R_{rs_s}(\theta, \varphi, \lambda_i, 0^+) = \frac{\sum_{\lambda} R_{rs}(\theta, \varphi, \lambda, 0^+) \times S(\lambda)}{\sum_{\lambda} S(\lambda)} \quad (2)$$

Onde $S(\lambda)$ é a função resposta espectral para cada banda do OLI (Barsi et al., 2014); e $R_{rs_s}(\theta, \varphi, \lambda_i, 0^+)$ é a reflectância reamostrada para as bandas do OLI.

2.4 Estimativas de SST

A calibração do modelo empírico para estimativas de SST foi feito por meio dos dados amostrados em campo para as duas campanhas ($n=36$); sendo 23 amostras utilizadas na calibração do modelo e 13 amostras utilizadas na validação das estimativas das concentrações de SST. Os erros foram calculados por meio da raiz do erro quadrático médio (RMSE, Equação 3), RMSE normalizado (nRMSE, Equação 4) e Bias (Equação 5).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{true})^2}{n}} \quad (3)$$

$$nRMSE = \frac{RMSE}{(x_{max}^{true} - x_{min}^{true})} \times 100 \quad (4)$$

$$Bias = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (x_i - x_{true}) \quad (5)$$

2.5 Dados remotos

A imagem OLI tomada em 13 de outubro (órbita/ponto: 220/76) foi obtida via *Earth Explorer* (processamento nível 1T – com correções geométricas e radiométricas), coincidindo com um dos dias da segunda campanha de campo. A conversão de Número Digital para reflectância no topo da atmosfera, R_{TOA} , ou radiância no topo da atmosfera (L_{TOA}) foi realizada com os metadados disponíveis na imagem. O incremento da razão sinal-ruído, a melhor quantização (12-bits) e a resolução espacial de 30 m do sensor viabilizam a aplicação de cenas do OLI para estudos de ambientes aquáticos interiores (Roy et al., 2014).

2.6 Correção atmosférica (CA)

Os métodos de CA podem ser divididos em métodos empíricos e métodos físicos (Hadjimitsis et al., 2009). Os métodos empíricos são aqueles que realizam a correção dos efeitos atmosféricos com base nos elementos presentes na própria cena. Os métodos físicos

têm por objetivo resolver a equação de transferência radiativa para modelar os efeitos atmosféricos com o uso de dados referentes às condições da atmosfera no momento de tomada da imagem. Com base na aplicação dos métodos de CA em ambientes aquáticos, cinco métodos foram selecionados: *Dark Object Subtraction* (DOS – Chavez, 1988), *Quick Atmospheric Correction* (QUAC – Bernstein et al., 2005), *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes* (FLAASH – Adler-Golden et al., 1999), *Atmospheric Correction for OLI ‘lite’* (ACOLITE – Vanhellemont and Ruddick, 2014), e *Provisional Landsat-8 Surface Reflectance Algorithm* (L8SR – USGS, 2015).

2.7 Avaliação da CA

Os resultados da CA foram avaliados por meio da aplicação do melhor modelo empírico de estimativa de SST na imagem corrigida *versus* as concentrações *in situ* de SST. Os valores de R_{rs} na imagem para aplicação dos modelos foram obtidos pela seleção de pixels que sobreponham as coordenadas geográficas dos pontos amostrais.

A avaliação das estimativas de SST via imagem OLI atmosféricamente corrigida (bandas verde (OLI3), vermelho (OLI4) e infravermelho próximo (OLI5) foi realizada por meio do RMSE (Equação 3), do Bias (Equação 5) e do erro percentual absoluto médio (MAPE, Equação 6). A seleção das bandas OLI3, OLI4 e OLI5 para estimativa de SST foi feita em decorrência do uso destas para as estimativas de SST (Wu et al., 2015).

$$MAPE = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - x_{true}}{x_{true}} \right| \times 100 \quad (6)$$

3. Resultados e Discussões

3.1 Caracterização limnológica e radiométrica

A estatística descritiva dos parâmetros da qualidade da água amostrados em campo se encontram na Tabela 1. Há um aumento das concentrações de SST da campanha de maio para outubro, o que pode ter sido a causa da redução da profundidade média do disco de Secchi. As concentrações de Chl-*a* também aumentaram entre as duas campanhas, indicando um aumento da biomassa fitoplanctônica. O eventual aumento da produtividade primária dos fitoplânctons pode ser uma das causas da elevação dos níveis de oxigênio dissolvido – OD na superfície, (Fondriest, 2013).

Tabela 1. Estatística descritiva (Mínimo, Máximo, Média e Desvio Padrão) dos parâmetros da qualidade da água amostrados *in situ* para as duas campanhas de campo realizadas em 2014 (Maio de 2014 e Outubro)

	SST (mg.L ⁻¹)		Chl- <i>a</i> (µg.L ⁻¹)		Turbidez (NTU)		Disco Secchi (m)		OD (mg.L ⁻¹)	
	Maio 2014	Out 2014	Maio 2014	Out 2014	Maio 2014	Out 2014	Maio 2014	Out 2014	Maio 2014	Out 2014
Média	7,2	21,2	123,2	411,8	5,5	18,4	1,4	0,6	0,5	11,6
Mínimo	3,8	10,8	17,8	263,2	1,7	11,6	0,8	0,4	3,8	5,6
Máximo	16,3	44,0	279,9	723,5	12,5	33,2	2,3	0,8	12,9	15,7
Desvio Padrão	±3,2	±4,7	±69,9	±134,6	±2,4	±5,1	±0,4	±0,1	±2,5	±3,0

As curvas hiperespectrais calculadas com amostras de campo (calculadas com a Equação 1) se encontram na Figura 2, para o mês de maio (a) e outubro (c). A elevada absorção na região de 620 nm pode estar associada à presença de ficocianina, pigmento presente em cianobactérias, encontradas no reservatório de RHBB (Dellamano-Oliveira et al., 2008). A

absorção da água pura em conjunto com valores elevados de espalhamento em 710 nm resultam no pico de reflectância observado nos dois campos.

A reamostragem das curvas hiperespectrais (Figuras 2a e 2c) resultou nas curvas da Figura 2 (b e d) para os meses de maio e outubro, respectivamente. É possível observar que diversas feições espectrais foram suprimidas, uma vez que o posicionamento e largura das bandas do OLI são os principais fatores que influenciam na representatividade das feições em curvas reamostradas espectralmente.

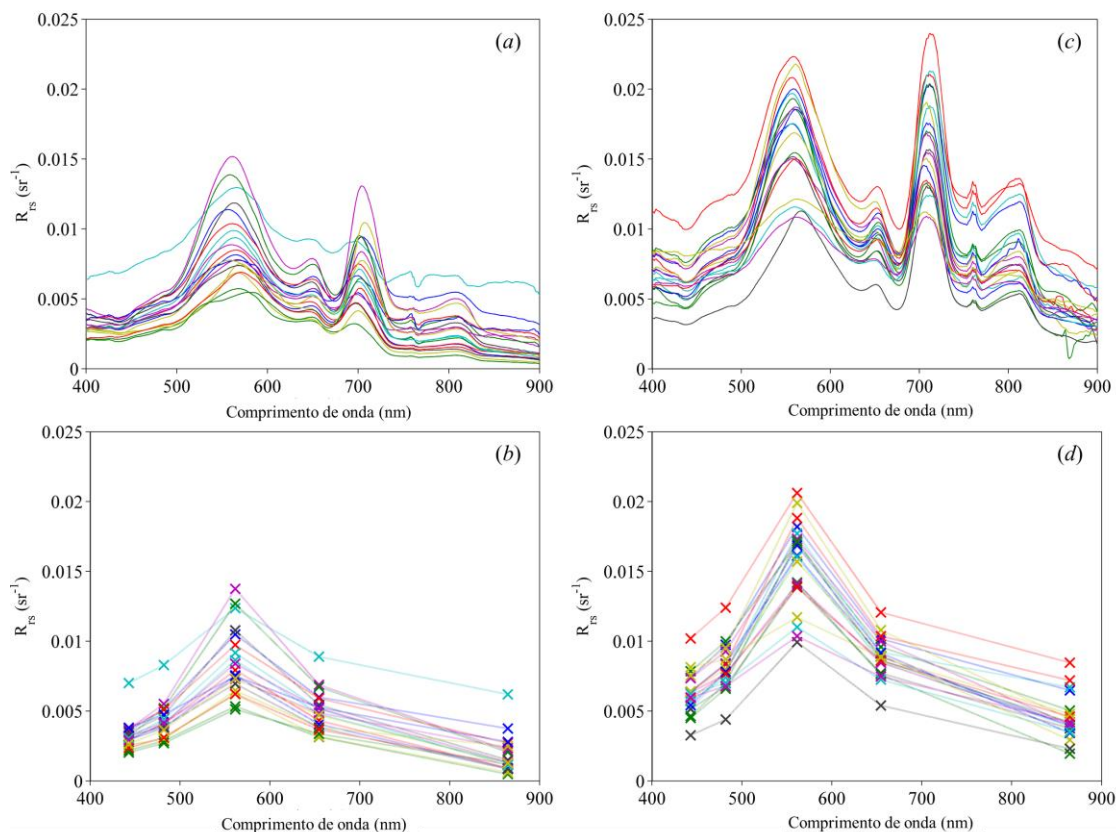


Figura 2. Curvas hiperespectrais e multiespectrais obtidas via reamostragem espectral para as bandas do sensor OLI para o primeiro (a e c) e segundo (b e d) trabalhos de campos.

3.2 Validação do modelo de estimativa de SST

Os modelos de estimativa de SST foram calibrados e validados utilizando os dados *in situ* e os valores de $R_{rs,s}$. Os ajustes linear e não-linear dos modelos de SST foram avaliados pelos valores de R^2 e p-valor. A validação foi realizada por meio da análise de erros (RMSE, nRMSE e Bias), conforme a Tabela 2.

Os valores de nRMSE variaram entre 8,7% e 35,2%. Todos os modelos superestimaram os valores de SST (Bias >0), mas apresentaram grande confiabilidade (p-valor <0,01 e $R^2 > 0,7$ na maioria dos casos), sendo que os modelos de uma banda espectral foram melhores que os modelos de razão de bandas. Em vista dos erros obtidos, o ajuste quadrático para as bandas OLI3, OLI4 e OLI5 foram selecionados para serem aplicados à imagem OLI atmosféricamente corrigida com o uso das Equações 7, 8 e 9, respectivamente.

$$SST = 28695 \times (OLI3)^2 + 935,53 \times (OLI3) - 1,29 \quad (7)$$

$$SST = 193470 \times (OLI4)^2 + 445,92 \times (OLI4) + 1,36 \quad (8)$$

$$SST = 130654 \times (OLI5)^2 + 3110,5 \times (OLI5) + 3,52 \quad (9)$$

Tabela 2. Modelos de estimativa de SST para OLI via dados *in situ* com ajustes linear, exponencial e quadrático, e respectivos coeficientes, onde no ajuste linear: $SST = a \times R_{rs_s} + b$; exponencial: $SST = y = a \times \exp(b \times R_{rs_s})$; e quadrático: $SST = a \times (R_{rs_s}^2) + b \times R_{rs_s} + c$. A validação foi feita por meio de RMSE ($mg.L^{-1}$), nRMSE (%) e Bias ($mg.L^{-1}$).

ÍNDICE	Ajuste	p-valor	a	b	c	RMSE ($mg.L^{-1}$)	nRMSE (in %)	Bias ($mg.L^{-1}$)	R ²
OLI3	Linear	<0,01	1650,9	-5,18	-	3,6	12,6	1,0	0,7
	Exponencial	<0,01	2,62	126,55	-	3,6	12,9	1,2	0,7
	Quadrático	<0,01	28695	935,53	-1,3	3,5	12,3	1,2	0,7
OLI4	Linear	<0,01	3190,4	-7,30	-	3,4	12,2	0,5	0,7
	Exponencial	<0,01	2,3	242,3	-	3,6	12,7	0,7	0,7
	Quadrático	<0,01	193470	445,9	1,4	3,4	11,9	0,9	0,7
OLI5	Linear	<0,01	4111	2,12	-	3,0	10,6	0,6	0,6
	Exponencial	<0,01	5,00	285,06	-	3,7	13,0	1,0	0,7
	Quadrático	<0,01	130654	3110,5	3,5	2,5	8,7	0,8	0,7
OLI5/OLI2	Linear	<0,01	27,71	0,80	-	7,3	35,2	0,8	0,3
OLI5/OLI4	Linear	<0,01	31,04	1,32	-	6,25	30,20	0,38	0,3

3.3 Estimativa de SST via dados orbitais

Os erros das estimativas das concentrações de SST via imagem OLI atmosféricamente corrigida se encontram na Tabela 3. Foram avaliados os cinco métodos descritos na Seção 2.6, sendo que os valores de RSME variaram entre 2,28 $mg.L^{-1}$ a 31,98 $mg.L^{-1}$, MAPE variaram entre 7,71% e 128,45%, e Bias variaram entre 17,17 $mg.L^{-1}$ e 29,23 $mg.L^{-1}$.

Tabela 3. Análise de erros via RMSE ($mg.L^{-1}$), nRMSE (%), Bias ($mg.L^{-1}$) para estimativas de SST obtidas pelas imagens atmosféricamente corrigidas com a aplicação de modelos de quadráticos nas bandas OLI3, OLI4 e OLI5 (Equações 7, 8 e 9, respectivamente).

	Banda espectral	RMSE ($mg.L^{-1}$)	MAPE (%)	Bias ($mg.L^{-1}$)
ACOLITE	OLI3	18,12	60,97	12,57
	OLI4	15,31	56,69	-8,90
	OLI5	17,30	75,44	-17,17
DOS	OLI3	16,19	70,97	-16,15
	OLI4	15,85	69,32	-15,78
	OLI5	13,02	46,70	10,17
FLAASH	OLI3	6,45	27,91	6,35
	OLI4	20,95	91,58	20,84
	OLI5	30,19	128,45	29,23
QUAC	OLI3	6,71	31,92	7,26
	OLI4	15,63	66,80	15,20
	OLI5	31,98	125,56	28,58
L8SR	OLI3	4,38	18,54	-4,22
	OLI4	2,28	7,71	-0,39
	OLI5	17,76	70,99	16,16

O melhor desempenho foi obtido com o modelo quadrático aplicado a banda do vermelho (OLI4) resultante do produto de reflectância L8SR (MAPE = 7,71%). A aplicação deste modelo na imagem é mostrada na Figura 3. As estimativas de SST com a banda OLI3 corrigida pelo método FLAASH (MAPE = 27,91%) também apresentaram bons resultados,

mas os erros foram maiores que aqueles alcançados via L8SR. A distribuição espacial de SST para o RHBB por meio da aplicação da Equação 8 na imagem L8SR resultou em um intervalo de concentrações de SST similar aos encontrados *in situ* – as estimativas variaram de 10 mg.L⁻¹ a 34,12 mg.L⁻¹, enquanto que as *in situ* ficaram entre 10,8 mg.L⁻¹ e 32,8 mg.L⁻¹.

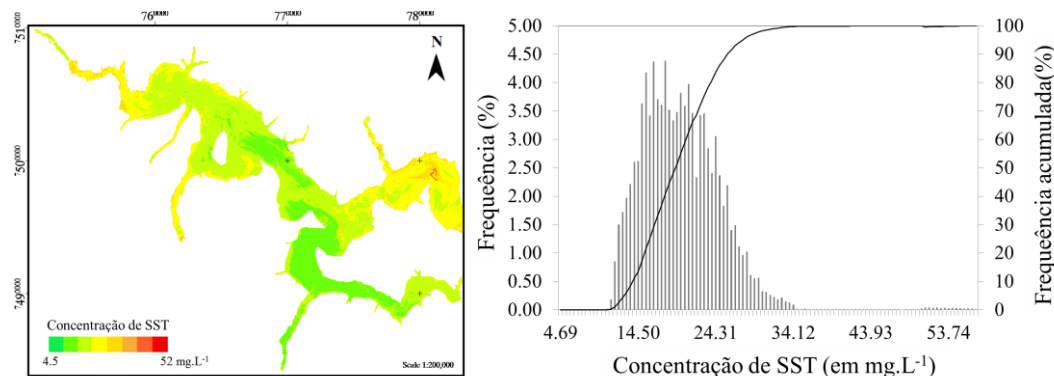


Figura 3. Distribuição espacial de SST em RHBB e histograma de frequência de SST.

O melhor modelo de estimativa de SST ajustado com os dados *in situ* foi para a banda OLI5 (MAPE = 8,70%). Entretanto, ao ser aplicado na imagem atmosféricamente corrigida, os erros aumentaram significativamente. Este indicativo demonstra que nenhum dos modelos de CA foi capaz de fornecer valores de R_{rs} adequados para as estimativas de SST.

A variabilidade dos erros (Tabela 3) é resultado das características do processamento de cada CA. O método DOS, por exemplo, corrige apenas o espalhamento atmosférico que ocasiona um efeito aditivo nos valores registrados por sensores remotos (Chavez, 1988). O método FLAAH faz uso da banda *Cirrus* para estimar a quantidade de vapor d'água na atmosfera e com isso estabelece as concentrações de SST com pequenos erros para a banda OLI3, entretanto, a aplicação do FLAASH requereu a adoção de muitas aproximações em decorrência da ausência de dados *in situ* sobre a condição atmosférica, e essas podem ser as causas das variabilidades das estimativas de R_{rs} em comprimentos de onda mais longos.

Os modelos ACOLITE e QUAC apresentaram MAPE > 30%. O método QUAC não requer informações *a priori* sobre a condição atmosférica, entretanto não é possível realizar alterações no método durante a sua execução. As aproximações realizadas pelo QUAC para a estimativa do espalhamento e absorção da contribuição dos gases e moléculas presentes na atmosfera não permitiram modelar os efeitos na cena de forma acurada para comprimentos de onda mais longos (OLI4 e OLI5). O método ACOLITE, desenvolvido para ambientes extremamente túrbidos, subestimou a contribuição dos efeitos atmosféricos, resultando na superestimativa dos valores de R_{rs} e, conseqüentemente, superestimando as concentrações de SST nas bandas OLI3, OLI4 e OLI5.

O sucesso das estimativas de SST via L8SR pode ser resultado da adequada modelagem da interferência atmosférica. O produto de L8SR é obtido por meio da aplicação do modelo *Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum Vectorial* (6SV –Vermote et al., 2016). Os dados auxiliares sobre as condições atmosféricas são obtidos nos produtos MODIS - CMA (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer - Climate Modeling Grid-Aerosol*, Vermote et al., 2011). Dados de temperatura, quantidade de vapor de água e espessura ótica de aerossóis são interpolados para a cena de interesse e são utilizados durante o processamento. Portanto, essa característica pode ajudar na explicação da razão pela o L8SR apresentou espectros de R_{rs} mais próximos dos obtidos *in situ*; o que gerou, também, um menor erro na estimativa de SST.

4. Conclusões

A avaliação dos cinco métodos de CA demonstrou a relevância dessa etapa para a estimativa de componentes opticamente significativos presentes em sistemas aquáticos. Ao considerar apenas os dados amostrados *in situ*, o melhor modelo de estimativa de SST foi para a banda OLI5. Entretanto, ao ser aplicado em imagens atmosféricamente corrigidas, os métodos testados não foram capazes de produzir estimativas de R_{rs} confiáveis para aplicação desses. Dentre os métodos avaliados, o produto de reflectância L8SR apresentou os melhores valores de R_{rs} para as bandas OLI3 e OLI4. A confiabilidade dos dados L8SR para estimativa de SST indica a potencialidade do uso destas informações para avaliação de sistemas aquáticos interiores de forma acurada.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Pesquisa de São Paulo – FAPESP (projetos 2012/19821-1 e 2015/21586-9) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (projetos 400881/2013-6 e 472131/2012-5) pelo suporte financeiro.

Referências

- Adler-Golden et al. Atmospheric correction for shortwave spectral imagery based on MODTRAN4. In: **SPIE Proceedings, Imaging Spectrometry**, 3753, 61-69, 1999.
- APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. Washington: American Public Health Association; 1998.
- Barsi, J., Lee, K., Kvaran, G., Markham, L.B., Pedelty, J.A. The Spectral Response of the Landsat-8 Operational Land Imager, **Remote Sensing**, v.6, n.10, p. 10232–10251. 2014.
- Bernstein, L.S. Validation of the QUick Atmospheric Correction (QUAC) algorithm for VNIR-SWIR multi- and hyperspectral imagery. In: **SPIE Proceedings, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XI**, 5806, p. 668-678. 2005.
- Chavez Jr., P.S. An improved Dark-Object Subtraction Technique for Atmospheric Scattering Correction of Multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, n.24, p. 459-479, 1988.
- Dellamano-Oliveira, M.J.; Vieira, A.A.H.; Rocha, O.; Colombo, V. 2008. Phytoplankton taxonomic composition and temporal changes in a tropical reservoir. **Fundamentals and Applied Limnology**, v. 171, p. 27–38, 2008.
- Fondriest Environmental, Inc. Dissolved Oxygen. **Fundamentals of Environmental Measurements**. Disponível em: <http://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/dissolved-oxygen/>.2013. Acesso em: 31 Outubro 2016.
- Golterman, H.L. **Developments in Water Science 2**. In *Physiological Limnology: An Approach to the Physiology of Lake Ecosystems*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 1975.
- Hadjimitsis, D. G., Clayton, C. Assessment of temporal variations of water quality in inland water bodies using atmospheric corrected satellite remotely sensed image data. **Environmental monitoring and assessment**, v.159 n. 1–4, p. 281–292, 2009.
- Mobley, C. D. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements, **Applied Optics**, v. 38, n.36, p. 7442–7455, 1999.
- Rotta, L.H.S., Alcântara, E.H., Watanabe, F.S.Y., Rodrigues, T.W.P., Imai, N.N. Atmospheric correction assessment of SPOT- 6 image and its influence on models to estimate column transparency in tropical reservoir. **Remote Sensing Applications: Society and Environment** , v. 4, 158-166, 2016.
- Roy, D.P., et al. Landsat-8: science and product vision for terrestrial global change research. **Remote Sensing of Environment**, v. 145, p. 154–172, 2014
- Rundquist, D.C.; Han, L.; Schalles, J.F.; Peake, J.S. Remote measurement of algal chlorophyll in surface waters: The case for the first derivative of reflectance near 690 nm. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 62, p. 195–200, 1996.
- TriOS Optical Sensors. Manual: msda_xe 8.5. TriOS, Oldenburg, Germany, 2009.
- Tundisi, J. G., Matsumura-Tundisi, T., Abe, D. S. The ecological dynamics of Barra Bonita (Tietê River, SP, Brazil) reservoir: implications for its biodiversity. **Brazilian Journal of Biology**, v. 68, n. 4, 1079–1098, 2008.
- Van der Meer, F. Physical principles of optical remote sensing. In Stein, A., Van Der Meer, F., Gorte, B. [eds.]. **Spatial statistics for remote sensing**. Dordrecht, Netherlands, Kluwer Academic Publishers, chapter 3.1999.
- USGS. Product Guide. Provisional Landsat 8 Surface Reflectance Product, v.1.5. 2015.
- Wu, G., Cui, L., Liu, L., Chen, F., Fei, T., Liu, Y. Statistical model development and estimation of suspended particulate matter with Landsat 8 OLI images of Dogting Lake, China. **International Journal of Remote Sensing**, n. 36, p.343-360, 2015.