

Estimativa da concentração de sólidos suspensos e clorofila-*a* no Rio Bonito (SP): ajuste de modelos empíricos baseados na análise derivativa

Bruno Frias Faga¹
Nilton Nobuhiro Imai¹
Luiz Henrique da Silva Rotta¹
Fernanda Sayuri Yoshino Watanabe¹
Mayk Ferreira Cardoso¹
Thanan Walesza Pequeno Rodrigues¹
Enner Alcântara¹
Claudio Clemente Faria Barbosa²

¹Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP/FCT
Caixa Postal 305 – 19060-900 – Presidente Prudente - SP, Brasil
{bfagant, nilton.imai, luizhrotta, fernandasyw, cardoso.mayk, twalesza, ennerha}@gmail.com

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 1758 – 12227-010 – São José dos Campos - SP, Brasil
claudio@dpi.inpe.br

Abstract. When it comes to limnological parameters analysis in water bodies, Brazilian companies still apply the traditional laboratory methods to control pollution levels. Usually, those procedures demand a great amount of money and laboratory structure to present high quality results. It was discovered that remote sensing data can be a useful tool to be applied in this pollution control process in water bodies, mainly when dealing with large reservoirs. Due to optically active components in water and their different spectral behavior when interacting with different wavelength radiant energy, it has been possible to develop techniques to detect their presence and concentration using remote sensing data. This paper aims to explore and apply the knowledge available to detect chlorophyll-*a* and suspended solids concentration at a Nova Avanhandava’s reservoir affluent (Bonito River) using remote sensing techniques, like derivative spectra. The results were quite different from the ones in some papers, mainly the best correlation wavelengths with the optically active components. Based on those correlation analysis, the team created some empirical models to represent the current situation on suspended solids and chlorophyll-*a* on the water body. Those empirical models were created using remote sensing reflectance itself, first and second derivative of remote sensing reflectance. Although derivative spectra were useful to chlorophyll-*a* analysis, suspended solids modeling using that technique was not so accurate as expected.

Palavras-chave: water quality, optically active components, empirical models, hyperspectral remote sensing, qualidade da água, componentes opticamente ativos, modelos empíricos, sensoriamento remoto hiperespectral.

1. Introdução

Nos dias atuais, visto o cenário de degradação dos recursos hídricos, faz-se necessário o monitoramento desses corpos d’água, de modo que um controle do estado de degradação e poluição possa ser realizado. Tradicionalmente, no que se refere ao meio aquático, tal procedimento é realizado por amostragens de campo, em que há coleta de material em certos pontos estrategicamente localizados, e as análises são concretizadas em ambiente laboratorial, sendo necessária uma gama bastante variada de equipamentos e condições.

Entretanto, em momentos em que o corpo hídrico apresenta certo desenvolvimento transversal e/ou longitudinal, esse processo de monitoramento torna-se bastante oneroso, muitas vezes inviável, na medida que se faz necessária a adoção de grande quantidade de pontos de amostragem. Além disso, gera-se uma quantidade excessiva de material a ser analisado em laboratório, demandando mão de obra para tal, além de recursos para montagem de infraestrutura que atenda a tais necessidades. Sendo assim, faz-se essencial o desenvolvimento de métodos alternativos que permitam o monitoramento dos recursos hídricos com maior rapidez e confiabilidade.

De acordo com Goodin et al. (1993), técnicas de sensoriamento remoto vêm sendo empregadas para satisfazer essa demanda e, dessa forma, cada vez mais se amplia a utilização de uma variedade de sensores para tal. O emprego dessas tecnologias em pleno desenvolvimento se faz possível devido à presença de componentes opticamente ativos - COAs. Esses componentes têm sido estudados por diversos autores que utilizam as técnicas acima citadas, como se observa para sedimentos em suspensão (CHEN et al., 1992), clorofila-*a* (GOODIN et al., 1993; RUNDQUIST et al., 1996).

O presente trabalho tem por objetivo apresentar os resultados de modelos empíricos ajustados para o caso de um afluente do Rio Tietê, o Rio Bonito, o qual sofre os efeitos do alagamento provocado pela implantação da barragem destinada a produção de energia pela UHE de Nova Avanhandava. Por se tratar de um reservatório localizado quase no final da cascata de reservatórios do Rio Tietê, apresenta características específicas que podem influenciar os modelos de estimativa dos COAs. Discute-se, ainda, a qualidade dos modelos ajustados e suas possíveis relações com as características específicas desse corpo d'água.

2. Metodologia de trabalho

Os dados apresentados nesse trabalho foram levantados em campanha de campo realizada no Rio Bonito, afluente do reservatório da usina hidrelétrica de Nova Avanhandava, localizado no município de Buritama (SP), em 28, 29 e 30 de junho de 2013. Os dados radiométricos foram adquiridos utilizando um conjunto de radiômetros ARC e ACC RAMSES, TriOS. A partir dos dados armazenados nesse equipamento, foi feito o cálculo da reflectância de sensoriamento remoto (R_{rs}) de acordo com Mobley (1999; Equação 1).

$$R_{rs} = \frac{(L_t - \rho L_s)}{E_d} \quad (1)$$

Onde: R_{rs} : Reflectância de Sensoriamento Remoto (sr^{-1}); L_t : Radiância Total acima da superfície da água ($W.m^{-2}.sr^{-1}$); L_s : Radiância proveniente do céu ($W.m^{-2}.sr^{-1}$); E_d : Irradiância descendente na coluna d'água ($W.m^{-2}$); ρ : Fator de correção (0,28).

As concentrações de sólidos suspensos [TSS] e clorofila-*a* [Chl-*a*] nos diferentes pontos examinados foram obtidas através de procedimentos laboratoriais executados em amostras coletadas durante o trabalho de campo em cada um dos pontos de estudo, seguindo as diretrizes propostas por Apha apud Clesceri (1998). As coordenadas de cada um dos pontos foram obtidas utilizando receptor GPS, GARMIN (GPS Map 78).

A partir da reflectância de sensoriamento remoto calculada, foi possível aplicar análise derivativa (Demetriades-Shah et al., 1990), obtendo-se as derivadas de primeira e segunda ordem. Em seguida, baseado em análises de correlação entre os dados espectrais e a [Chl-*a*] e [TSS], escolheu-se os melhores comprimentos de onda para o ajuste de modelos empíricos utilizando os dados disponíveis: reflectância de sensoriamento remoto, derivadas de primeira e segunda ordens. Destaca-se que foram utilizados dados limnológicos e radiométricos de 8 pontos para as análises propostas.

3. Resultados e Discussão

A Tabela 1 mostra as coordenadas geográficas e a [TSS] e [Chl-*a*] para os 8 pontos amostrais adotados para a obtenção dos dados.

Tabela 1. Localização e parâmetros limnológicos dos pontos de estudo

Pontos	Latitude	Longitude	Clorofila-a ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	Sólidos Suspensos (mg.L^{-1})
P01	21,30942° S	50,14084° W	3,41	1,10
P02	21,28500° S	50,14083° W	3,00	0,95
P03	21,27019° S	50,14894° W	9,92	1,05
P04	21,26150° S	50,13968° W	7,10	1,15
P05	21,24448° S	50,14212° W	13,01	0,55
P06	21,23158° S	50,13231° W	14,65	1,90
P07	21,21018° S	50,14574° W	9,10	0,50
P08	21,20628° S	50,13683° W	18,93	0,85

A Figura 1 mostra a reflectância de sensoriamento remoto calculada entre 400 e 850 nm, de acordo com a equação 1.

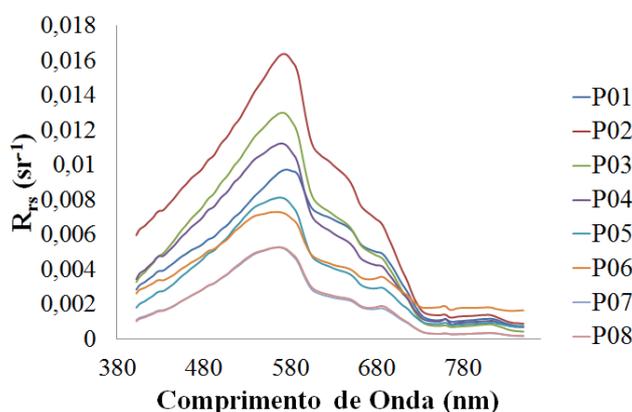


Figura 1. Curvas de Reflectância de Sensoriamento Remoto dos pontos estudados.

A Figura 1 permite observar uma série de feições típicas da presença da clorofila no ambiente, embora sua concentração seja baixa. Rundquist et al. (1996) descreve de maneira bastante detalhada essas feições principais, em seguida apresentadas. Observa-se, uma baixa refletância entre 400-500 nm, devido à absorção da luz azul; um pico de refletância na região do verde (~560-570 nm), uma pequena inflexão em 640 nm, relacionada essencialmente a pigmentos acessórios e matéria orgânica dissolvida; absorção ocorrida na região do vermelho (~690 nm); pequena reflectância em 697 nm; pequena reflectância na região de 810 nm, causada pelo retroespalhamento do material orgânico. É interessante destacar que algumas feições relacionadas à clorofila-*a* são pouco perceptíveis na Figura 1, como a refletância na região do vermelho, embora quase todas estejam presentes.

Com relação aos sólidos suspensos, é difícil detectar uma feição específica que indique sua presença ou concentração. Doxaran et al. (2002), no entanto, destaca que com o aumento da concentração de sólidos suspensos, ocorre um aumento da refletância nos comprimentos de onda de 400 a 900 nm, com picos em 800 nm. As baixas concentrações desses componentes no corpo hídrico de interesse impediram que estes efeitos pudessem ser detectados visualmente nas curvas de reflectância (Figura 1).

A partir dos dados de reflectância de sensoriamento remoto calculados, foi possível ajustar modelos para a determinação da [TSS] e [Chl-*a*]. No caso do primeiro, a melhor correlação foi observada em 850 nm (0,82), enquanto para [Chl-*a*] isso ocorreu em 656 nm (-0,77). Dessa forma, para tais comprimentos de onda, foi produzido um modelo de regressão

para cada um dos componentes acima citados, sendo que os resultados podem ser visualizados nas Figuras 2 e 3.

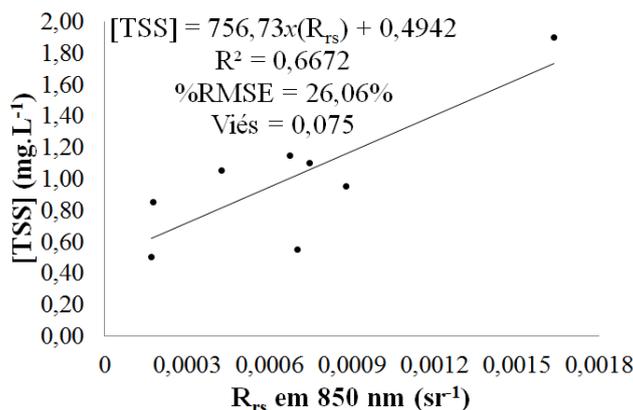


Figura 2. Modelo ajustado a partir da reflectância de sensorimento remoto em 850 nm e a [TSS].

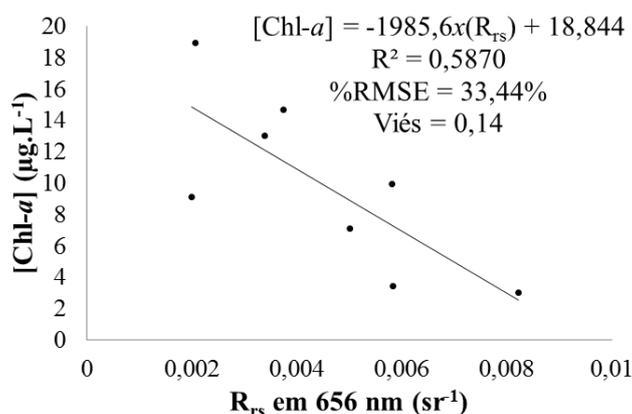


Figura 3. Modelo ajustado a partir da reflectância de sensorimento remoto em 656 nm e a [Chl-a]

Percebe-se, para as situações ilustradas nas Figuras 2 e 3, que o modelo de regressão ajustado para a [TSS] se mostrou mais acurado que aquele gerado para a obtenção da [Chl-a], fato que pode ser provado pelos coeficientes de determinação (R^2), a Raíz Quadrada do Erro Médio Quadrático Percentual (%RMSE) e Viés das curvas ajustadas.

Vale a ressalva que os modelos gerados e exibidos nas Figuras 2 e 3 foram oriundos dos dados radiométricos presentes nas curvas da Figura 1. Dessa forma, Kirk (2011) destaca que as respostas espectrais observadas na Figura 1, para todos os pontos estudados, é uma combinação linear das respostas espectrais dos componentes opticamente ativos presentes no corpo d'água no momento da tomada dos dados radiométricos, tais como sólidos em suspensão, água, clorofila-*a*, matéria orgânica dissolvida, dentre outros. Isso explica, muitas vezes, a baixa acurácia dos modelos gerados diretamente com dados de reflectância de sensoriamento remoto.

Além disso, Watanabe (2012) ressalta que em sensoriamento remoto aquático, muitas vezes, é interessante realçar as feições espectrais específicas de componentes opticamente ativos, como de sólidos suspensos e clorofila-*a*, sendo que o cálculo de derivadas da reflectância de sensoriamento remoto, técnica conhecida como análise derivativa, pode auxiliar em tal processo.

Sabe-se, conforme explanado por Goodin et al. (1993), que a diferenciação sucessiva elimina os efeitos de componentes opticamente ativos de menor ordem, de forma que a primeira derivada elimina os efeitos da água, permitindo uma análise mais acurada de

sedimentos suspensos e clorofila-*a*. Na Figura 4, são apresentadas as curvas que representam as derivadas de primeira ordem dos dados de reflectância de sensoriamento remoto para os 8 pontos em estudo.

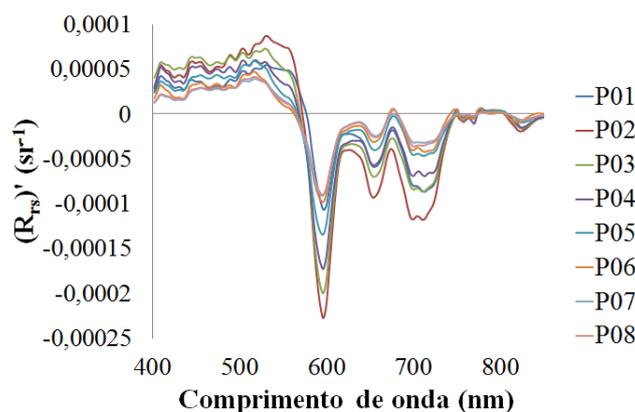


Figura 4. Primeira derivada das curvas de reflectância de sensoriamento remoto.

De forma a verificar as previsões com relação à análise derivativa apresentadas por Chen et al. (1992) e Goodin et al. (1993), as Figuras 5 e 6 mostram os modelos ajustados para [TSS] e [Chl-*a*], respectivamente. Com relação aos sólidos suspensos, os melhores comprimentos de onda para gerar esses modelos foram 757 nm e 774 nm, já que foram obtidas correlações de -0,61 e 0,73. Para [Chl-*a*], as correlações de -0,82 e 0,83 levaram a escolha dos dados coletados nos comprimentos de onda 566 e 830 nm para a geração dos modelos de regressão.

É interessante destacar que os modelos gerados para [TSS] não apresentaram bom ajuste da reta de regressão, fato demonstrado pelo baixo R^2 e alto %RMSE (Figura 5). Verificou-se um aumento da tendência dos erros associados aos modelos, fato demonstrado pelo incremento do viés, que indica uma piora na sua acurácia. Entretanto, o melhor deles foi obtido com os dados de 774 nm (Figura 5b). Ademais, os comprimentos de onda com melhor correlação com os dados limnológicos coletados, diferiram dos indicados por Chen et al. (1992) e Goodin et al. (1993). Ressalta-se que a aplicação da primeira derivada nos dados de reflectância de sensoriamento remoto piorou a acurácia dos modelos ajustados para sólidos suspensos.

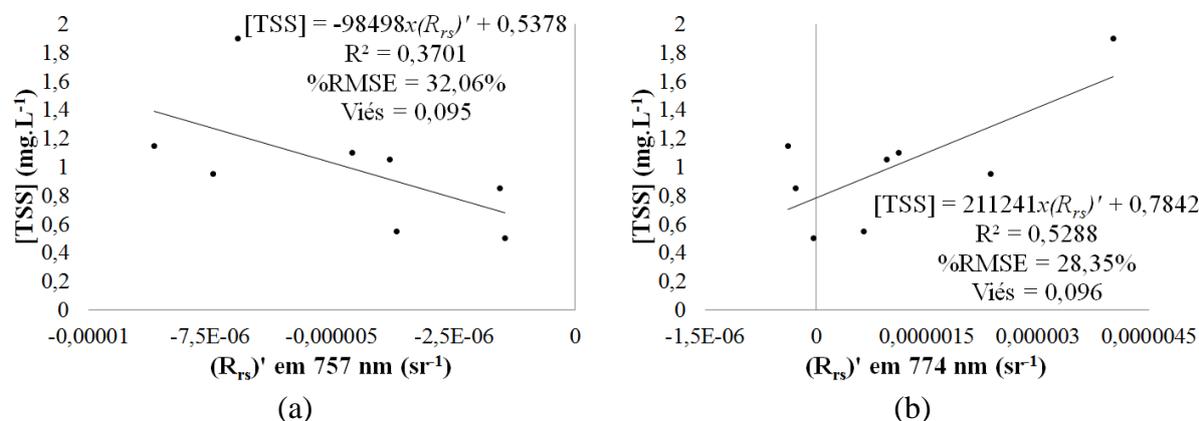


Figura 5. Modelo ajustado a partir da derivada de primeira ordem da reflectância de sensoriamento remoto em 757 (a) e 774 (b) nm e a [TSS].

Em relação à clorofila-*a*, os modelos de regressão criados a partir da aplicação da primeira derivada na reflectância de sensoriamento remoto (Figura 6) se mostraram mais acurados que o apresentado na Figura 3, com incrementos no R^2 , diminuição do %RMSE e da

tendência dos erros (Viés) das curvas ajustadas. No entanto, o modelo adotado para 566 nm (Figura 6a) se mostrou mais acurado que o outro gerado, principalmente pelo fato do viés estar mais baixo e adequado. Os valores de R^2 e %RMSE não foram determinantes para a definição feita acima, já que se mostraram muito próximos em ambos os comprimentos de onda.

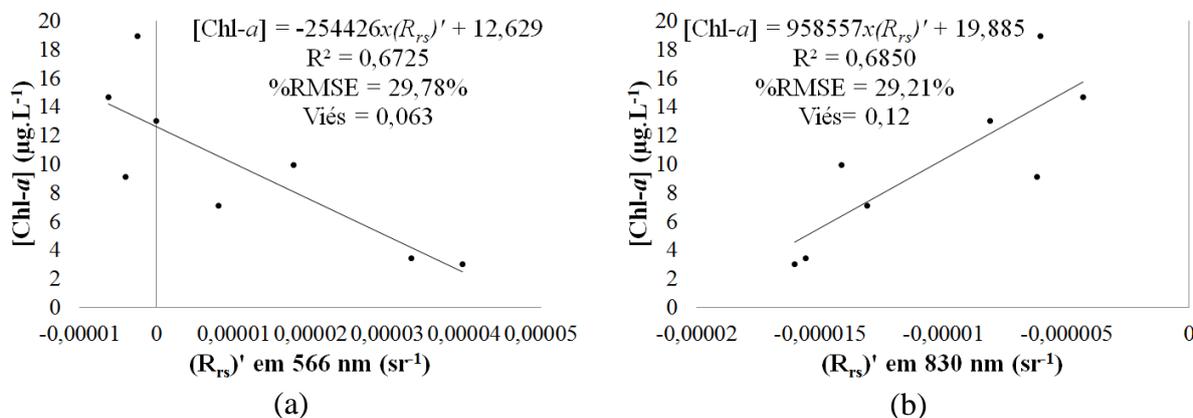


Figura 6. Modelo ajustado a partir da derivada de primeira ordem da reflectância de sensoriamento remoto em 566 (a) e 830 (b) nm e a [Chl-a].

Para análise mais detalhada do comportamento espectral associado especificamente a clorofila-a, procedeu-se para a aplicação da derivada de segunda ordem aos dados de reflectância de sensoriamento remoto, sendo o resultado evidenciado na Figura 7. “Efeitos de turbidez são removidos por diferenciais de segunda ordem, deixando a curva somente com feições associadas a clorofila.” (GOODIN et al., 1993).

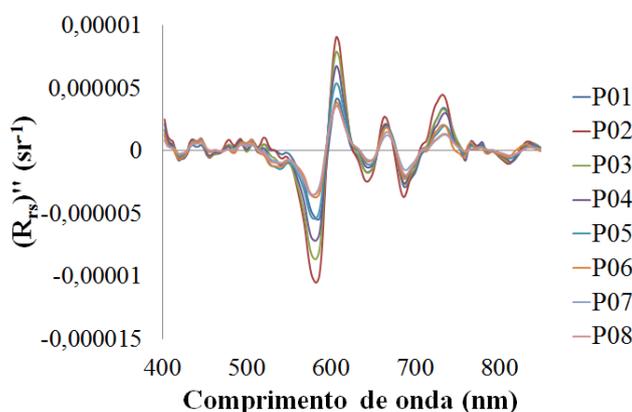


Figura 7. Segunda derivada das curvas de reflectância de sensoriamento remoto.

Dessa forma, foram gerados modelos para estimação da [Chl-a], os quais podem ser observados na Figura 8. As melhores correlações, de -0,84 e 0,83, foram obtidas em 523 e 654 nm, respectivamente.

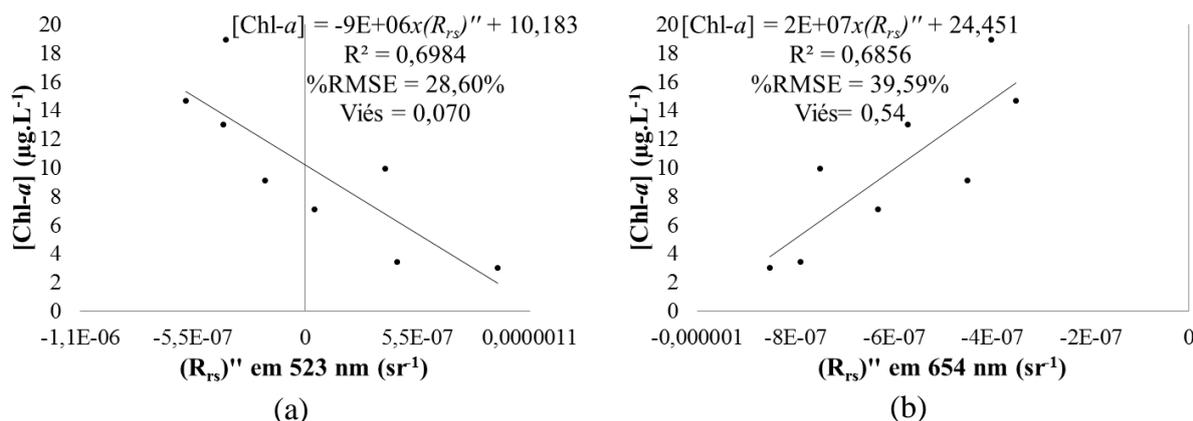


Figura 8. Modelo ajustado a partir da derivada de segunda ordem da reflectância de sensoriamento remoto em 523 (a) e 654 (b) nm e a concentração de [Chl-*a*].

Em ambos os comprimentos de onda mostrados na Figura 8, os modelos de regressão para a estimação da [Chl-*a*] apresentaram melhorias muito sutis quando comparados aos da Figura 6, fato indicado pelas medidas estatísticas apresentadas, principalmente o coeficiente de determinação. Em relação ao %RMSE e Viés, pode-se dizer que o modelo em 523 nm (Figura 8a) se manteve estável quando comparado aos da Figura 6, no entanto, em 654 nm (Figura 8b) o mesmo não pode ser dito, pois ocorreu um aumento razoável desses fatores, indicando uma diminuição na sua acurácia. Isso pode ter ocorrido pois, como as [TSS] são baixas, a aplicação da segunda derivada não destaca as feições de clorofila muito além do observado na primeira derivada, e muitas vezes o aumento do %RMSE e Viés está relacionado com o destaque dos ruídos das curvas de R_{rs} pela aplicação das derivadas.

No entanto, comparando o modelo empírico para [Chl-*a*], obtido utilizando dados de reflectância de sensoriamento remoto diretamente (Figura 3), com aqueles obtidos após a aplicação da segunda derivada (Figura 8), é possível perceber que houve um aumento da acurácia dos mesmos para 523 nm, demonstrado principalmente pelo incremento nos coeficientes de determinação e diminuição do %RMSE e Viés. O ajuste para 654 nm, embora tenha apresentado uma melhoria no coeficiente de determinação em relação ao que é observado na Figura 3, apresentou uma piora no %RMSE e Viés, levando a uma menor acurácia do mesmo.

4. Conclusões

Dessa forma, é possível perceber que a utilização da análise derivativa foi útil com certas limitações na área de estudo. Para os modelos ajustados para a determinação da [TSS], a utilização da técnica acima descrita não trouxe benefícios, na medida que as retas de regressão tiveram uma piora nas medidas estatísticas apresentadas, diferentemente do que era esperado e observado na literatura. Tal efeito pode ter sido causado em função do reservatório apresentar baixas [TSS], e dessa forma, a acurácia do modelo aplicado para a análise das medidas radiométricas obtidas pode não ser adequada.

É importante destacar que em artigos como Goodin et al. (1993) e Chen et al. (1992), que utilizam a análise derivativa para obtenção de modelos de regressão para [TSS], trabalharam em condições controladas para a captura das medidas radiométricas, ou seja, os componentes opticamente ativos no tanque de medida eram controlados, com sua concentração conhecida e alta.

Já os modelos empíricos criados para a obtenção da [Chl-*a*], a utilização da técnica da análise derivativa, principalmente de primeira ordem, se mostrou bastante útil, melhorando significativamente a acurácia dos modelos. Vale a ressalva que os ajustamentos realizados com dados da derivada de primeira ordem quando comparados segunda ordem não

apresentaram grandes diferenças de acurácia, sendo que em 654 nm houve uma degradação do modelo ajustado. Tais efeitos podem estar relacionados ao fato da [TSS] ser baixa, fazendo com que a aplicação segunda derivada não destacasse as feições específicas de clorofila-*a* muito além do que era observado na primeira derivada. Pelo fato da segunda derivada não ter trazido melhorias significativas para os modelos ajustados, gerando até sua diminuição de acurácia em alguns casos, percebe-se que sua aplicação não foi muito útil para análise da [Chl-*a*] nas águas em questão, podendo-se limitar à aplicação da derivada de primeira ordem sem prejuízos ao resultado final.

Agradecimentos

Agradecimento ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (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.

Referências Bibliográficas

Chen, Z.; Curran, P.J.; Hansom, J.D. Derivative Reflectance Spectroscopy to Estimate Suspended Sediment Concentration. **Remote Sensing of Environment**, v. 40, n. 04, p. 67-77, 1992.

Clesceri, L.S. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. Berkeley: American Public Health Association, 1998. 1220 p.

Demetriades-Shah, T.H.; Steven, M.D.; Clark, J.A. High Resolution Derivative Spectra in Remote Sensing. **Remote Sensing of Environment**, v. 33, n. 02, p. 55-64, 1990.

Doxaran, D.; Froidefond, J.M.; Lavender, S.; Castaing, P. Spectral Signature of Highly Turbid Waters – Application with SPOT Data to Quantify Suspended Particle Matter Concentration. **Remote Sensing of Environment**, v. 81, n. 08, p. 149-161, 2002.

Ennes, R. **Potencial das Imagens Hiperespectrais Orbitais na Detecção de Componentes Ópticamente Ativos no Reservatório de Itapararanga**. 2008. 127 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP)/Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente. 2008.

Goodin, P.R.; Han, L.; Fraser, R.N.; Rundquist, D.C.; Stebbins, W.A.; Schalles, J.F. Analysis of Suspended Solids in Water Using Remotely Sensed High Resolution Derivative Spectra. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 59, n. 04, p. 505-510, 1993.

Kirk, J.T.O. **Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems**. Nova York: Cambridge University Press, 2011. 649 p.

Mobley, C.D. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements. **Applied Optics**, v. 38, n.36, p. 7442-7455, 1999.

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, n. 02, p. 195-200, 1996.

Watanabe, F.S.Y. **Estudo da Influência da Coluna d' Água na Resposta Espectral da Vegetação Aquática Submersa em Condições Controladas**. 2012. 134 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP)/Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente. 2012.