

## **Análise espectral *in situ* e orbital para a estimativa da concentração de clorofila-*a* no reservatório da UHE de Funil - RJ**

Ricardo Neves de Souza Lima<sup>1</sup>  
Celso Bandeira de Melo Ribeiro<sup>1</sup>  
Rafael Damiani Ferreira<sup>2</sup>  
Cláudio Clemente Faria Barbosa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF/PGECOL/ESA  
Rua José Lourenço Kelmer, s/n - 36036-330 - Juiz de Fora - MG, Brasil  
ricneves80@yahoo.com.br; celso.bandeira@ufjf.edu.br

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/DPI  
Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
damiati@gmail.com; claudio@dpi.inpe.br

**Abstract.** Spectral algorithms can be used to estimate chlorophyll-*a* concentration in optically complex aquatic ecosystems. The absorption and scattering characteristics of chlorophyll-*a* in water can be used to construct bio-optics models to estimate its concentration from spectral data obtained by *in situ* and satellite sensors. The Funil reservoir is known as a eutrophic environment with frequent episodes of algal blooms, which changes the optical characteristics of the water. To evaluate the potential use of spectral algorithms for chlorophyll-*a* estimation in this reservoir *in situ* radiometric and limnological measurements were performed, and MERIS sensor data obtained. We tested NIR/Red, NDVI and First Derivative Spectral algorithms. The field spectra and MERIS sensor data showed diagnostic features of chlorophyll-*a* in green, red and near-infrared regions. The First Derivative highlighted the feature around 690 nm, while most significant adjustments for field spectra were among NDVI and NIR/Red ratio and log-transformed chlorophyll-*a* values, with  $R^2$  of 0.78 and 0.77, respectively. For MERIS sensor data adjustments were less significant, with  $R^2$  of 0.35 for the regression between NDVI and chlorophyll-*a*, possibly by interference with the signal due to the low resolution image format and narrow reservoir. Nevertheless, as well as the *in situ* spectra, the main features of chlorophyll-*a* were identified in the MERIS image.

**Palavras-chave:** Spectral algorithms, water reflectance, Field spectroradiometric, algoritmos espectrais, reflectancia da água, espectroradiometria de campo.

### **1. Introdução**

As alterações hidrodinâmicas decorrentes da construção de reservatórios, associado ao crescimento populacional, conduzem a modificações nas características físicas, químicas e biológicas dos sistemas aquáticos, podendo favorecer o crescimento acelerado de organismos fitoplanctônicos. A molécula de clorofila-*a* presente nestes organismos pode ser considerada um indicador do estado trófico em ecossistemas aquáticos devido a sua alta correlação com a biomassa fitoplanctônica.

Os florescimentos algais associados ao excesso de matéria orgânica são frequentes no reservatório de Funil com a presença de cianobactérias tóxicas que em alguns períodos do ano ocorrem na forma de *blooms* generalizados (Ferrão-Filho et al., 2009) com potenciais prejuízos ambientais, econômicos, sanitários, além de implicações de ordem operacional sobre o desempenho e durabilidade dos equipamentos da UHE.

As características espectrais da água e de seus constituintes opticamente ativos (COAs) podem ser utilizadas para extrair informações sobre sua condição, e com isso inferir sobre a qualidade da água. Tais constituintes são, basicamente, sedimentos em suspensão, pigmentos fotossintetizantes, matéria orgânica dissolvida e as próprias moléculas de água (Morel e Prieur, 1977).

Os estudos do comportamento espectral da água concentram-se, principalmente, na faixa espectral correspondente a radiação fotossinteticamente ativa, entre 350 e 700nm. Nessa

região visível do espectro ocorre a maioria das interações entre os COA's e a radiação eletromagnética, sendo que a clorofila-*a*, em geral, apresenta faixas de absorção no azul (400-500 nm) e, especialmente no vermelho (580-700 nm), enquanto que os picos de reflectância ocorrem na região do verde (515-600 nm), devido ao espalhamento celular das algas (Londe, 2008; Cannizzaro e Carder, 2006), e em torno de 690 a 700 nm, causado pela interação do espalhamento celular e do mínimo de absorção por água (Jensen, 2009). Estas características espectrais da clorofila-*a* em ambientes aquáticos permitem estimar sua concentração utilizando-se medidas radiométricas tanto *in situ* como por satélites orbitais através da detecção da radiância emergente da coluna d'água, denominada radiância volumétrica de subsuperfície (Jensen, 2009).

Em águas interiores, a extração de informações sobre a concentração de clorofila-*a* na superfície da água com uso de dados espectrais tem sido realizada principalmente através de algoritmos baseados nas propriedades do pico de reflectância próximo a 700 nm, que incluem razões espectrais entre a reflectância máxima e mínima na faixa entre 670 e 705 nm (Gitelson et al., 2007). Além destes, outros métodos são utilizados para destacar a influência da clorofila-*a* em relação aos demais COA's no comportamento espectral da água, como as derivadas espectrais, que indicam a taxa de variação da reflectância em função do comprimento de onda, sendo normalmente utilizadas as derivadas de primeira e segunda ordem próximas a 690 nm (Rudorff et al., 2007) como bons descritores da concentração de clorofila-*a* em águas opticamente complexas.

Neste contexto o objetivo deste trabalho é realizar a análise espectral da água no reservatório de Funil, bem como testar a capacidade de algoritmos espectrais para a estimativa da concentração de clorofila-*a*. Para isso, foram utilizadas medidas radiométricas realizadas *in situ* e dados obtidos pelo sensor MERIS, de modo a comparar as informações espectrais obtidas em campo concomitantemente à aquisição dos dados orbitais.

## 2. Metodologia de Trabalho

O reservatório da Usina Hidrelétrica de Funil (Figura 1) é formado pelo barramento do Rio Paraíba do Sul em seu trecho médio-superior, e localiza-se em sua maior parte nos municípios de Itatiaia e Resende no estado do Rio de Janeiro, margeando pequenas áreas nos municípios paulistas de Queluz, Areias e São José do Barreiro, entre as coordenadas de 22°30' e 22°37' de latitude Sul e 44°32' e 44°41' de longitude Oeste.

O reservatório de Funil possui uma área inundada de cerca de 40 km<sup>2</sup> com uma profundidade máxima de 70 metros e média de 20 metros, e volume total de 8,9 bilhões m<sup>3</sup> (AGEVAP, 2007). O tipo climático da região é mesotérmico com verões quentes e estação chuvosa no verão, segundo classificação climática de *Köppen*, e com uma estação seca bem acentuada coincidindo com o inverno.

Com relação aos aspectos limnológicos do reservatório de Funil diversos estudos tem demonstrado a presença constante de elevada biomassa fitoplanctônica associado ao aporte contínuo de N e P de efluentes domésticos e industriais a montante, com uma alta predominância de cianobactérias tóxicas dos gêneros *Anabaena*, *Cylindrospermopsis* e *Microcystis* (Ferrão-Filho et al., 2009).

Foram coletadas amostras de água em 21 pontos amostrais distribuídos no reservatório de Funil nos dias 12 e 13/12/2011 (Figura 1) para determinação da concentração de clorofila-*a* (µg/L) em laboratório. A transparência da água foi medida através da profundidade de desaparecimento do Disco de Secchi (metros) enquanto a Turbidez (NTU) foi medida através de uma sonda multiparamétrica YSI 6600.

As medidas radiométricas *in situ* foram conduzidas nos 21 pontos amostrais simultaneamente a coleta dos dados limnológicos. Foi utilizado um espectrorradiômetro ASD

*Field Spec HandHeld 2*, com faixa de operação entre 325 e 1075 nm, resolução espectral de 1nm e campo de visada de 25°.

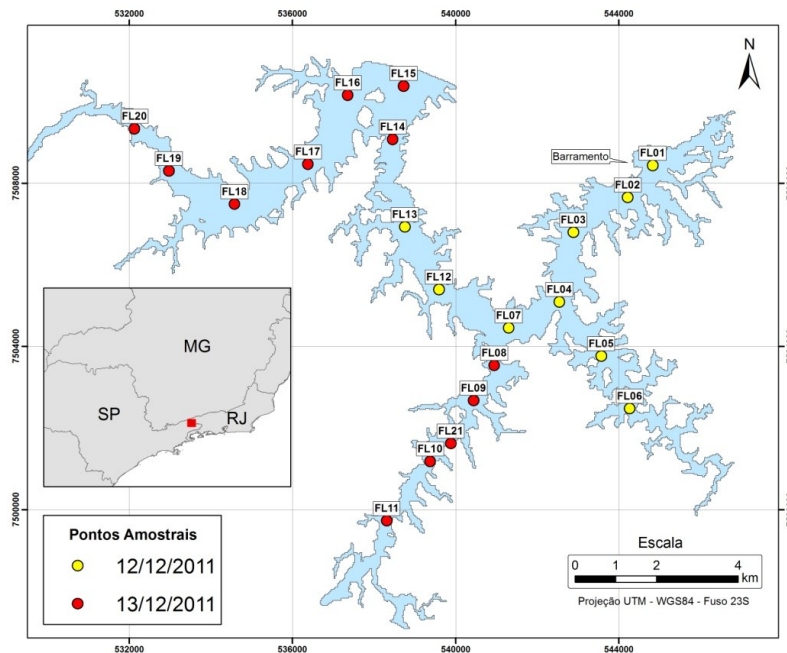


Figura 1 – Localização do reservatório de Funil e respectivos pontos amostrais.

O horário escolhido para aquisição dos dados espectrais foi entre 10:00 e 16:00 horas, que corresponde ao período com menor ângulo de inclinação solar e em que há maior fluxo de energia no campo de irradiação. As medidas radiométricas em cada ponto foram realizadas sob as mesmas condições de aquisição, de acordo com o protocolo sugerido por Fougnie et al (1999), considerando a aquisição em um ângulo de cerca de 40° em relação ao plano horizontal, e a uma posição perpendicular do alinhamento entre a proa do barco e o sol, de forma a evitar áreas sombreadas e também o efeito da reflexão especular. Para obtenção do fator de reflectância bidirecional (FRB), foi utilizada uma placa de referência (Spectralon). Para cada ponto foram realizadas 5 medidas de radiância da água, para que posteriormente fossem eliminadas as medidas não representativas e calculada a média para as restantes. Os valores de radiância espectral adquiridos pelo espectroradiômetro foram convertidos em fator de reflectância através da seguinte expressão:

$$FRB_{\lambda} = L_{a, \lambda} / L_{r, \lambda} \quad (1)$$

Onde:  $FRB_{\lambda}$  = Fator de reflectância bidirecional (adimensional);  $L_{a, \lambda}$  = Radiância espectral do alvo ( $W/cm^2 \cdot sr \cdot \mu m$ );  $L_{r, \lambda}$  = Radiância espectral da placa de referência ( $W/cm^2 \cdot sr \cdot \mu m$ ).

Foram testados algoritmos espectrais baseados nas principais feições de absorção e reflectância da REM pela clorofila, permitindo relacionar os valores obtidos com sua concentração. Os algoritmos utilizados foram a razão de bandas entre o máximo no Infravermelho-próximo e mínimo no Vermelho ( $NIR_{\max}/Red_{\min}$ ) (Rundquist et al., 1996), o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) (Rouse et al., 1974) e a Primeira Derivada espectral no comprimento de onda de 690 nm (Rundquist et al., 1996). Também foram testadas a razão NIR/Red e o NDVI sobre as bandas espectrais simuladas para o sensor MERIS a partir dos dados espectrais obtidos *in situ*, de acordo com a função de resposta espectral deste sensor disponível em ESA (2005).

Também foram adquiridas imagens do sensor MERIS (*Medium Resolution Imaging Spectrometer*) a bordo do satélite de observação da Terra ENVISAT (*Environmental Satellite*) da Agência Espacial Européia (ESA), através da plataforma EOLi (*Earth Observation Link*) versão 7.2, sendo selecionada a cena referente ao dia 13/12/2011, coincidente com o segundo dia da campanha de campo. Esta cena se mostrou adequada devido à baixa cobertura de nuvens, a qual ocorreu somente em um pequeno trecho do reservatório.

O processamento da imagem foi realizado pelo software BEAM-VISAT, onde foram executadas a correção atmosférica e a conversão para reflectância através do processador SMAC (*Simplified Method for Atmospheric Corrections*) utilizando dados do modelo atmosférico ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*). As imagens corrigidas foram reprojatadas para o sistema de coordenadas geodésicas, Datum WGS84 e formato *Geotiff*. Sobre as imagens MERIS processadas foram coletados os espectros de reflectância em cada ponto amostral, nas 15 bandas espectrais deste sensor. Em seguida foram calculados os algoritmos espectrais NDVI e razão NIR/Red (B9 / B8).

### 3. Resultados e Discussão

Nos espectros obtidos no reservatório de Funil, podem-se observar dois grupos principais caracterizados por diferentes respostas espectrais (Figura 2). O primeiro grupo (G1) corresponde aos espectros cuja resposta é dominada por feições típicas da presença de fitoplâncton, com picos de reflexão pronunciados no verde e no limite entre o vermelho e infravermelho e um pico de absorção no vermelho. O segundo grupo (G2) corresponde aos espectros com resposta espectral mais influenciada pelo material inorgânico em suspensão devido à proximidade com o ambiente lótico do rio Paraíba do Sul, apresentando curvas espectrais com um patamar bem definido entre 550 e 700 nm.

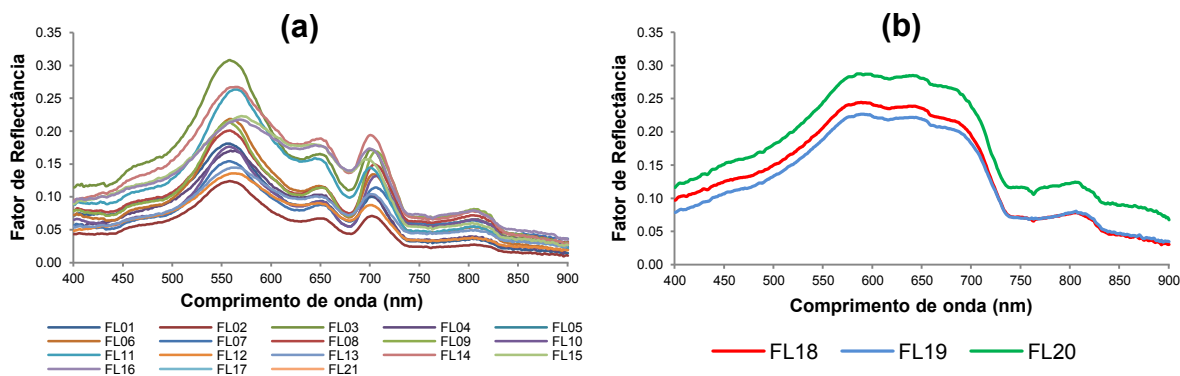


Figura 2 - Espectros de reflectância *in situ* obtidos no reservatório de Funil. (a) Grupo 1; (b) Grupo 2.

Através da análise das curvas espectrais, observa-se que tanto no Grupo 1 (FL01 a FL17 e FL21) quanto no Grupo 2 (FL18, FL19 e FL20), a região do Azul, nas faixas de comprimento de onda entre 400 e 500 nm, apresenta baixa reflectância, sendo que nos espectros do Grupo 1 observa-se um pequeno ponto de deflexão em 433 nm, conhecido como o pico de absorção da clorofila-*a* denominado *Soret* (Kirk, 1994). A partir deste ponto os espectros apresentam sentido crescente, sendo que a partir do Verde (500 nm) ocorre uma maior inclinação das curvas espectrais até atingir o pico em torno de 560 nm para o Grupo 1, e em torno de 590 nm para o Grupo 2. Nos espectros do Grupo 1 ocorre, a partir do pico no verde (R560), uma redução das taxas de reflexão, havendo em seguida um pequeno ponto de inflexão próximo a 640 nm devido provavelmente ao retroespalhamento causado por pigmentos acessórios (Barbosa, 2005; Gitelson, 1992). Neste mesmo grupo nota-se, próximo a 678 nm uma clássica

feição de absorção da clorofila-*a* (Gitelson, 1992), com um baixo fator de reflectância, seguido de um pico proeminente de reflectância em torno de 700 nm, possivelmente em razão do efeito combinado do espalhamento celular das algas e do mínimo de absorção por pigmentos e água (Jensen, 2009). Nos espectros do Grupo 2 nota-se que a partir do máximo em torno de 590 nm, as taxas de reflexão continuam elevadas até próximo à 690 nm, caracterizando uma faixa de mínima absorção onde, segundo Jensen (2009), mais fluxo radiante no verde, vermelho e infravermelho-próximo é refletido pelo corpo d'água possivelmente devido a maior presença de sedimentos inorgânicos em suspensão.

A derivada de primeira ordem calculada sobre os espectros permitiu destacar claramente determinadas feições em que ocorreram as maiores inclinações da curva espectral, e também reduzir as variações de constantes aditivas de radiação nos dados obtidos *in situ* (Figura 3).

Observa-se em geral um pico nas derivadas em torno de 690 nm que corresponde ao comprimento de onda em que ocorre a maior taxa de variação positiva da reflectância. Este comportamento está associado à maior amplitude entre o máximo de absorção no vermelho (678 nm) e o máximo de reflexão no infravermelho próximo (700 nm), característico do comportamento espectral de ambientes eutróficos, onde há elevada concentração de fitoplâncton.

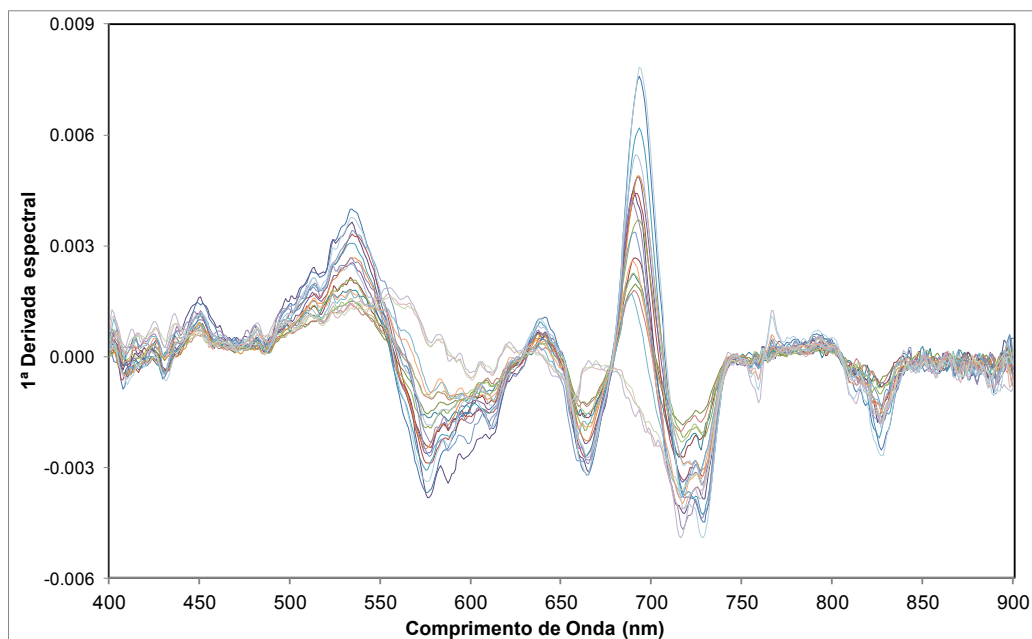


Figura 3 - Derivada espectral de primeira ordem dos espectros de reflectância *in situ*.

Na figura 4 pode se observar a diferença entre os espectros de reflectância extraídos das imagens MERIS (a) e simulados para as bandas do sensor MERIS (b) nos pontos amostrais (exceto nos pontos FL14, FL15 e FL16 devido a presença de nuvens). Em geral os espectros extraídos da imagem apresentaram intensidade menor no visível do que nos espectros simulados, porém nas faixas do NIR (> 700 nm) as reflectâncias foram mais elevadas nos espectros da imagem, o que possivelmente ocorreu pela interferência do sinal da vegetação terrestre das margens sobre os pixels analisados, os quais abrangem uma área de cerca de 300 x 300m. Apesar disso é possível observar em ambas as curvas espectrais algumas feições características da presença de clorofila na água, como os picos reflectância nas bandas do verde (B5 = 555-565 nm) e do NIR (B9 = 704-714 nm) e de absorção no vermelho (B8 = 678-685 nm).

O grau de correlação entre as variáveis limnológicas opticamente ativas e a reflectância podem ser observados na figura 5.

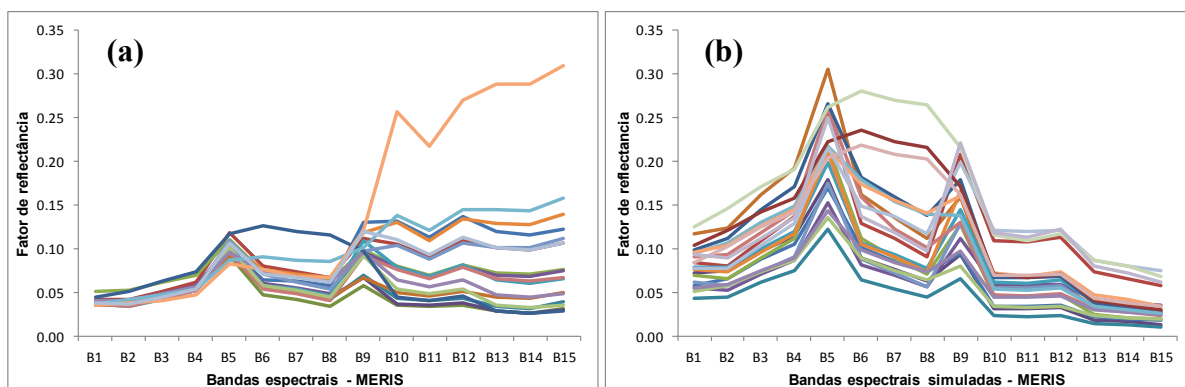


Figura 4 – Espectros de reflectância. (a) Extraídos das imagens MERIS; (b) Simulados para as bandas do MERIS a partir dos dados *in situ*

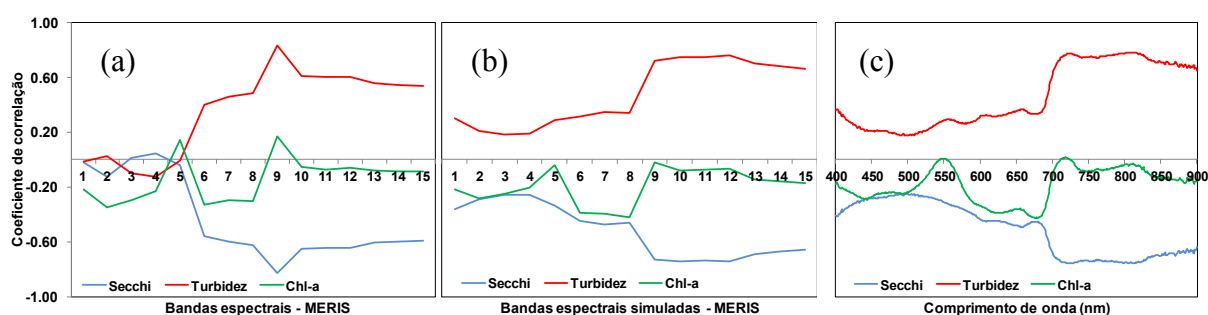


Figura 5 – Correlograma entre as variáveis limnológicas e a reflectância espectral da imagem MERIS (a); das bandas simuladas (b); e dos espectros coletados *in situ* (c).

Pode se observar nos correlogramas da figura 5 que a turbidez apresentou correlação predominantemente positiva com a reflectância com coeficientes máximos em torno de 0,75 nas bandas 9 a 12 das imagens MERIS e das bandas simuladas, e nos comprimentos de onda entre 700 e 800 nm dos espectros obtidos *in situ*. Inversamente, a transparência (Secchi) apresentou coeficientes negativos em torno de -0,75 nas mesmas faixas espectrais. Para a clorofila-*a* as correlações foram menos significativas, com valores em torno de -0,30 nas bandas 2, 3, 6, 7 e 8 das imagens MERIS, enquanto para as bandas simuladas a melhor correlação ocorreu na banda 8 com  $r = -0,42$ . Com relação aos espectros coletados *in situ* as correlações mais significativas com a clorofila-*a* ocorreram no comprimento de onda de 678 nm, com  $r = -0,42$ , indicando, neste caso, ser esta região espectral a mais influenciada pela concentração do fitoplâncton.

De todos os algoritmos espectrais testados para os dados *in situ* os ajustes mais significativos obtidos com a regressão foram entre o NDVI e a Razão  $NIR_{\max}/Red_{\min}$  e os valores logaritimizados (base 10) da clorofila-*a*, com  $R^2$  de 0,78 ( $p < 0,001$ ) e 0,77 ( $p < 0,001$ ), respectivamente (figura 6).

Para os dados do sensor MERIS extraídos da imagem e os dados simulados os ajustes mais significativos foram entre o NDVI e a concentração de clorofila-*a*, com  $R^2$  de 0,35 ( $p = 0,008$ ) e 0,55 ( $p < 0,001$ ), respectivamente (Figura 7). Observa-se que o ajuste obtido com os dados simulados foi mais significativo do que com os dados extraídos da imagem. Esta diferença pode estar relacionada à (Ferreira, 2012): i) integração do sinal do pixel dentro de uma área de aproximadamente 300x300 metros; ii) interferência da atmosfera, ainda que a imagem orbital tenha sido corrigida para os efeitos da atmosfera; iii) geometria de aquisição dos dados, tendo em vista que o sensor orbital pode captar a energia em um ângulo de observação diferente da obtida *in situ*; e iv) influencia das margens sobre o sinal do pixel, devido ao formato estreito e irregular do reservatório.

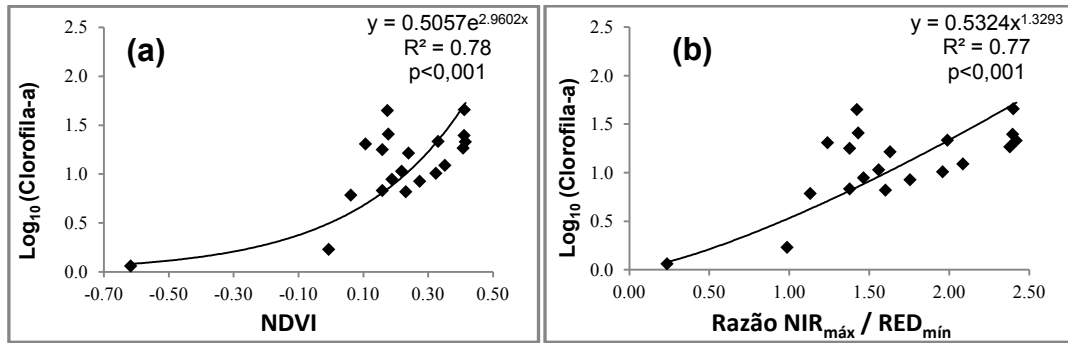


Figura 6 – Relação entre os valores logaritmizados de clorofila-*a* e os algoritmos espectrais NDVI (a) e Razão NIR<sub>max</sub>/Red<sub>min</sub> (b), calculados sobre os espectros coletados *in situ*.

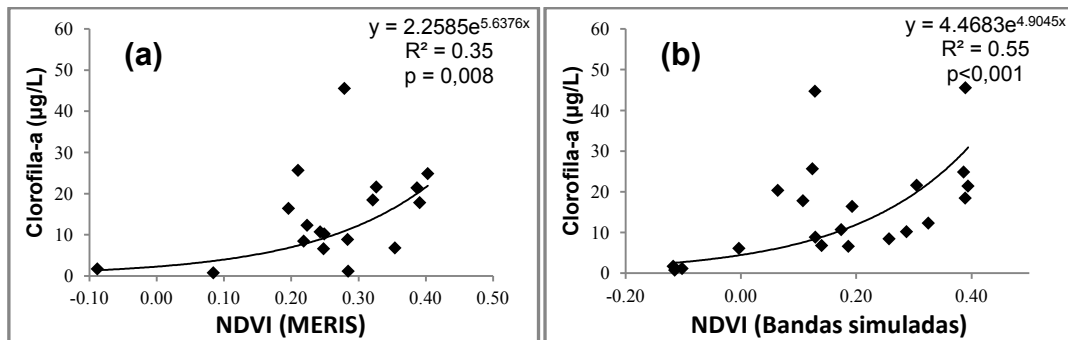


Figura 7 – Relação entre a clorofila-*a* e o NDVI, nos pontos amostrais, calculado sobre a imagem MERIS (a) e sobre as bandas simuladas a partir dos dados *in situ* (b).

Os ajustes mais significativos obtidos com o NDVI dos espectros *in situ* corroboram com os resultados obtidos por Londe (2008) no reservatório de Ibatinga-SP, onde o NDVI calculado sobre os espectros do grupo de maior pico no verde apresentaram melhor desempenho nos ajustes com a concentração de clorofila-*a*. De forma similar, a característica espectral da água no reservatório de Funil durante as medidas, com maiores picos na região do verde, favoreceu a utilização do NDVI, permitindo o estabelecimento de um ajuste mais significativo.

#### 4. Conclusões

Os espectros de reflectância obtidos *in situ* e a partir das imagens MERIS no reservatório de Funil, apresentaram algumas feições características da presença de fitoplâncton, como os picos de reflectância principalmente na região do verde e no Infravermelho-próximo e de absorção no Vermelho. A primeira Derivada espectral destacou a feição em torno de 690 nm, que indica a região em que a clorofila apresenta melhor distinção dos outros componentes opticamente ativos, de acordo com Rundquist et al. (1996). No entanto os resultados das regressões entre os algoritmos espectrais indicaram que o NDVI foi o mais correlacionado com os valores log-transformados da clorofila-*a* para os espectros de campo. Para os dados orbitais do sensor MERIS os ajustes foram fracos, possivelmente em função de interferências no sinal, como observado na comparação com espectros das bandas simuladas, e que prejudicaram o estabelecimento de relações mais robustas com a clorofila-*a*.

Sugere-se que futuros trabalhos sejam realizados em outros períodos do ano, com objetivo de avaliar as variações sazonais nas características espectrais e limnológicas do reservatório de Funil. Além disso, a análise de outros componentes opticamente ativos que possam causar interferências na resposta espectral da clorofila-*a* devem ser consideradas.

## Referências Bibliográficas

- AGEVAP, Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. **Relatório técnico sobre a situação dos reservatórios com subsídios para ações de melhoria da gestão na bacia do rio Paraíba do Sul: Novembro/2010**. Resende-RJ: AGEVAP, 2010. 184 p.  
Disponível em: <<http://www.ceivap.org.br/downloads2011/4-Rel2010SituRes.pdf>>. Acesso em: 02 dez. 2011.
- Barbosa, C. C. F. **Sensoriamento remoto da dinâmica de circulação da água do sistema planície de Curai/Rio Amazonas**. 2005. 286 p. (INPE-14614-TDI/1193). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.
- Cannizzaro, J.P.; Carder, L.K. Estimating chlorophyll *a* concentrations from remote-sensing reflectance in optically shallow waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 101, p. 13-24, 2006.
- ESA, European Space Agency. **MERIS Spectral Characterisation (R-10)**. ESA/ACRI, versão 1, 2005.  
Disponível em: <<http://envisat.esa.int/handbooks/meris/CNTR4-3.htm>>. Acesso em: 02 nov. 2012.
- Ferrão-Filho, A.S.; Soares, M.C.S.; Rocha, M.I.A.; Magalhães, V.F.; Azevedo, S.M.F.O. Florações de Cianobactérias tóxicas no Reservatório do Funil: dinâmica sazonal e consequências para o zooplâncton. **Oecologia Brasiliensis**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 2, p. 346-365, 2009.
- Ferreira, R. D. **Dados fluorométricos e espectrais aplicados à estimativa da concentração de clorofila na Planície de Curuai / Rio Amazonas**. 2012. 103 p. (sid.inpe.br/mte-m19/2012/04.12.16.46-TDI). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.  
Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3BML48H>>. Acesso em: 15 nov. 2012.
- 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. The peak near 700nm on radiance spectra of algae and water: Relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration. **International Journal of Remote Sensing**, v. 13, n. 17, p. 3367–3373, 1992.
- Gitelson, A. A.; Schalles, J. F.; Hladik, C. M. Remote chlorophyll-*a* retrieval in turbid, productive estuaries: Chesapeake Bay case study. **Remote Sensing of Environment**, v. 109, p. 464–472, 2007.
- Jensen, J.R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 604 p.
- Kirk, J. T. O. **Light and photosynthesis in aquatic ecosystems**. 2.ed. Cambridge, England: Cambridge University Press, 1994. 528 p.
- Londe, L.R. **Comportamento espectral do fitoplâncton de um reservatório brasileiro eutrofizado - Ibitinga (SP)**. 2008. 223 p. (INPE-00000-TDI/0000). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2008.
- Morel, A.; Prieur, L. Analysis of variations in ocean color. **Limnology and Oceanography**, v. 22, n. 4, p. 709-722, 1977.
- Rouse, J. W.; Haas, R. H.; Schell, J. A.; Deering, D. W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. In: Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. 1974, Greenbelt. **Anais...NASA SP-351**, 1974, p. 309-317.
- Rudorff, C. M.; Novo, M. L. M.; Galvão, L. S.; Filho, W. P. Análise derivativa de dados hiperespectrais medidos em nível de campo e orbital para caracterizar a composição de águas opticamente complexas na Amazônia. **Acta Amazônica**, v. 37, n. 2, p. 269-280, 2007.
- Rundquist, D. C.; Han, L. H.; 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. 2, p. 195-200, 1996.