

Avaliação do desenvolvimento da vegetação aquática submersa em reservatório por meio da profundidade do disco de Secchi estimada com imagem SPOT-6

Luiz Henrique da Silva Rotta ¹
Enner Herenio de Alcântara ²
Fernanda Sayuri Yoshino Watanabe ¹
Thanan Walesza Pequeno Rodrigues ¹
Nilton Nobuhiro Imai ¹

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

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

Abstract. The aquatic macrophytes are among the primary producers in artificial reservoirs and can be classified into four groups: rooted, floating, emergent and submerged. The radiation availability is the main limiting factor in the growth of submerged macrophytes (or submerged aquatic vegetation - SAV). The Secchi depth (SD) is a fundamental variable in limnological studies, and it is an indicator of water transparency. The water transparency is directly related to radiation availability; hence the SD is useful in SAV studies. Therefore, the goals of this study were to estimate the SD using SPOT-6 image and evaluate the development of SAV based on the SD estimated by remote sensing. The study area was a section of the Nova Avanhandava Reservoir, which belongs to the reservoirs cascade of the Tietê River - São Paulo, Brazil. The regression between the centered band at 660 nm and the SD resulted in a $R^2 = 0.73$ and a NRMSE = 21.5%. The SD map was made using the atmospherically corrected SPOT-6 image and the calibrated SD prediction model. Two regions with different SD (Class 0.0 - 1.0 m and Class > 5.0 m) were selected to evaluate the SAV height. Therefore, it was observed that under different SD conditions there is a change in both maximum height reached by the SAV and the depth of its occurrence.

Palavras-chave: remote sensing, water transparency, Nova Avanhandava Reservoir, submerged macrophyte, sensoriamento remoto, transparência da água, Reservatório de Nova Avanhandava, macrófita submersa.

1. Introdução

Existem muitas similaridades funcionais entre reservatórios artificiais e lagos naturais, como, por exemplo, a produtividade primária (Wetzel 2001). Os principais produtores primários em reservatórios são os fitoplânctons, perifítons e macrófitas aquáticas. As macrófitas aquáticas podem ser divididas em enraizadas, flutuantes, emergentes e submersas (Tundisi e Matsumura-Tundisi 2008). As macrófitas aquáticas submersas também são comumente chamadas de vegetação aquática submersa (VAS).

As macrófitas são vitais para a manutenção da biodiversidade de sistemas de água doce, devido às suas importantes funções, como influenciar o ciclo de nutrientes, manter a química da água e dos sedimentos, prover alimento e abrigo para vários invertebrados e vertebrados, e finalmente, alterar a estrutura espacial da paisagem aquática, aumentando a complexidade do habitat (Thomaz et al. 2008). Em reservatórios brasileiros a *Egeria densa* e a *Egeria najas* estão entre as principais espécies primárias de VAS encontradas (Thomaz e Bini 1998, Cavenaghi et al. 2003, Marcondes et al. 2003, Bini e Thomaz 2005).

Há diversos fatores que influenciam a produtividade de macrófitas aquáticas, porém a disponibilidade de radiação é o principal fator limitante no desenvolvimento da VAS (Tavechio e Thomaz 2003, Thomaz 2006, Rodrigues e Thomaz 2010, Kirk 2011). A radiação através da coluna d'água muda principalmente devido à concentração dos materiais em suspensão e dissolvidos, tais como clorofila-a (chl-a), total de sólidos em suspensão (TSS) e matéria orgânica dissolvida (MOD) (Esteves e Barbieri, 2011, Mishra et al. 2006, 2013, 2014).

A transparência da água pode ser considerada o oposto da turbidez e, neste sentido, o disco de Secchi foi criado para a avaliação visual da transparência da água. O disco de Secchi é um instrumento fundamental em estudos limnológicos, pois sua utilização é simples, o custo é baixo, o transporte é fácil e ainda é utilizado pela maioria dos pesquisadores da área; o que possibilita comparações entre ecossistemas de água doce (Esteves e Barbieri, 2011). Assim, o objetivo do trabalho foi estimar espacialmente a profundidade do disco de Secchi (DS) por meio de imagem SPOT-6 e analisar a influência da transparência da água sobre o desenvolvimento da VAS no reservatório estudado.

2. Materiais e Método

2.1 Área de Estudo

O Reservatório de Nova Avanhandava (Figura 1) pertence à cascata de reservatórios do Rio Tietê. A usina hidroelétrica de Nova Avanhandava está localizada em Buritama – SP, no baixo curso do Rio Tietê, entre as barragens de Promissão (montante) e Três Irmãos (jusante). Nova Avanhandava entrou em operação em 1982 e atualmente é gerenciada pela companhia AES Tietê (<http://www.aestiete.com.br/>). Tem uma área inundada de 210 km² e volume de $2,83 \times 10^9$ m³. A barragem é do tipo terra/concreto, com 2.038 m de comprimento.

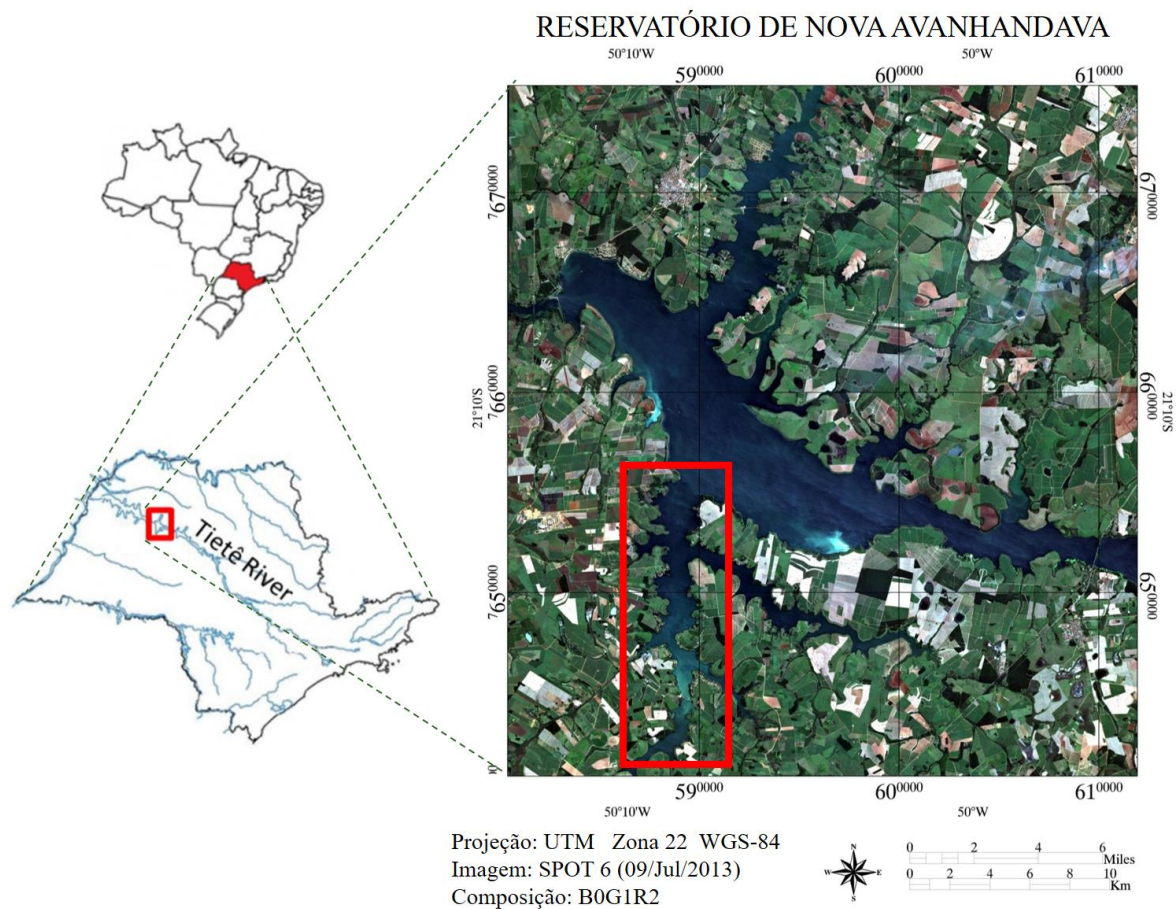


Figura 1. Reservatório de Nova Avanhandava em relação ao Estado de São Paulo e Brasil. Retângulo vermelho indica a área de estudo (Rio Bonito).

2.2 Coleta de dados em campo

Foi realizada uma campanha de campo entre os dias 28 e 30 de junho de 2013. Dez elementos amostrais foram distribuídos ao longo do Rio Bonito (retângulo vermelho – Figura 1), onde mediu-se o DS. A medida do DS consiste no uso de um disco circular de cerca de 30

cm que deve ser submerso até o ponto de seu desaparecimento. A distância entre a superfície da água e o ponto de desaparecimento é o DS. A profundidade do corpo d'água e a altura da VAS foram coletadas usando o sonar digital científico BioSonics DT-X (Ecobatímetro) (<http://www.biosonicsinc.com/>) nos dias 4 e 5 de julho de 2013. Os dados acústicos foram registrados em inúmeros transectos georreferenciados. O ecobatímetro registra e mostra em tempo real um ecograma com os dados de profundidade, altura da VAS e posição.

2.3 Correção atmosférica da imagem

A imagem multiespectral SPOT-6 foi corrigida dos efeitos atmosféricos por meio do *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes* (FLAASH), ferramenta de correção baseada no modelo de correção atmosférica MODTRAN (*MODerate spectral resolution atmospheric TRANsmittance algorithm and computer model*) (Adler-Golden et al. 1999). A imagem possui 4 bandas espectrais: B0 (455 – 525 nm), B1 (530 – 590 nm), B2 (625 – 695 nm) e B3 (760 – 890 nm). Os parâmetros inseridos no processo de correção atmosférica são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros de entrada no FLAASH. GSD = *Ground Sample Distance* e GMT = *Greenwich Mean Time*.

Tipo do Sensor	SPOT 6	Horário de Aquisição GMT	13:08:43
Altitude do Sensor	695 km	Modelo Atmosférico	Tropical
Altitude do Terreno	362 m	Modelo de Aerosol	Rural
Data de Aquisição	09/07/2013	Visibilidade Inicial	70 km
GSD	6,7 m	Sistema de referência	WGS-84

Dados hiperespectrais de radiância e irradiância coletados no corpo de água com o radiômetro RAMSES/TriOS (Rastede, Germany) foram utilizados calcular a reflectância de sensoriamento remoto (R_{rs} , sr⁻¹) usando a Equação (1), baseada em Dall'Olmo e Gitelson (2005) e Gitelson et al. (2008).

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{L_u(\lambda)}{E_d(\lambda)} \frac{t}{n^2} F_i \quad (1)$$

Onde,

$L_u(\lambda)$: radiância ascendente logo abaixo da superfície da água;

$E_d(\lambda)$: irradiância descendente sobre o barco;

t: transmitância na interface ar-água (0,98);

n: índice de refração da água em relação ao ar (1,33);

F_i : coeficiente de imersão espectral.

A R_{rs} foi utilizada para simular as bandas do SPOT-6. Para isso foi utilizada a função resposta espectral ($S(\lambda)$) de cada banda (ASTRIUM 2003). A R_{rs} simulada (R_{rs_s}) foi calculada com base na Equação 2. As bandas simuladas foram utilizadas como referência para validar a correção atmosférica.

$$R_{rs_s}(\lambda) = \frac{\sum_{\lambda} R_{rs}(\lambda) \times S(\lambda)}{\sum_{\lambda} S(\lambda)} \quad (2)$$

2.4 Calibração do modelo

Os dez elementos amostrais distribuídos ao longo do Rio Bonito foram utilizados na calibração do modelo para estimar o DS. Os valores de R_{rs} para cada ponto foram extraídos da imagem nas posições de coleta de campo, considerando uma janela de 3×3 pixels. Dessa

forma, utilizou-se a média de 9 pixels de cada ponto para correlacionar os valores de R_{rs} e DS. Regressões lineares foram calculadas entre o DS e as bandas do SPOT-6, centradas em 440 nm (Azul), 560 nm (Verde), 660 nm (Vermelho) e 825 nm (IVP – Infravermelho próximo). Devido ao baixo número de elementos amostrais, utilizou-se o método LOO (Leave One Out) para validar o modelo. No LOO, o modelo é calibrado usando todos os dados exceto um ponto, então o erro médio quadrático é calculado com base nesse ponto (Stone, 1974; Arlot e Celisse, 2010). O modelo com melhor desempenho foi selecionado.

2.5 Desenvolvimento da VAS em relação ao DS

Por meio da imagem SPOT-6 e do modelo selecionado foi possível obter o mapa da distribuição espacial do DS da área de estudo (Rio Bonito). Para isso, o modelo foi aplicado na R_{rs} de cada pixel da imagem. Duas regiões com DS distintos foram selecionadas para observar o comportamento da VAS, ou seja, sua altura em relação à profundidade do corpo d'água. Em outras palavras, dados coletados com o ecobatímetro sobre a VAS foram utilizados para avaliar o desenvolvimento dessa vegetação em regiões com diferentes valores de DS.

3. Resultados e Discussão

3.1 Modelo para estimativa do DS

Os coeficientes de correlação entre as bandas em 560 nm ($R = 0,845$) e 660 nm ($R = 0,857$) com o DS obtiveram melhores resultados. Assim, o modelo para estimar o valor do DS da área de estudo foi calibrado com a banda vermelha (660 nm) do SPOT-6. A Figura 2 (a) mostra o ajuste do modelo e a Figura 2 (b) sua validação. Observou-se um valor significativo para o coeficiente de determinação (R^2) de 0,73, além de uma RMSE (Raiz do erro médio quadrático) aceitável para a variável estudada.

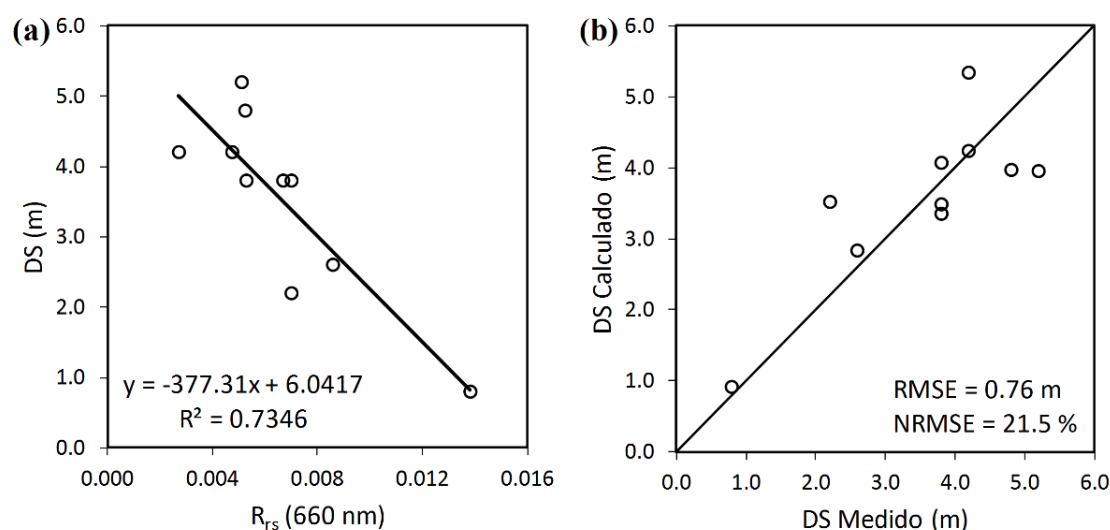


Figura 2. Ajuste do modelo para estimativa do DS com base na banda centrada em 660 nm em (a) e validação do modelo em (b).

3.2 Distribuição espacial do DS

A Figura 3 mostra o mapa com a estimativa do DS a partir da imagem SPOT-6, com o uso da equação mostrada na Figura 2 (a). Observa-se menores valores de DS (entre 0 e 3 m) na região mais próxima à nascente (Sul), enquanto que na região da foz do Rio Bonito os valores de DS são maiores (acima de 3 m). Assim, tem-se uma menor transparência da água a montante, quando comparada com a água a jusante.

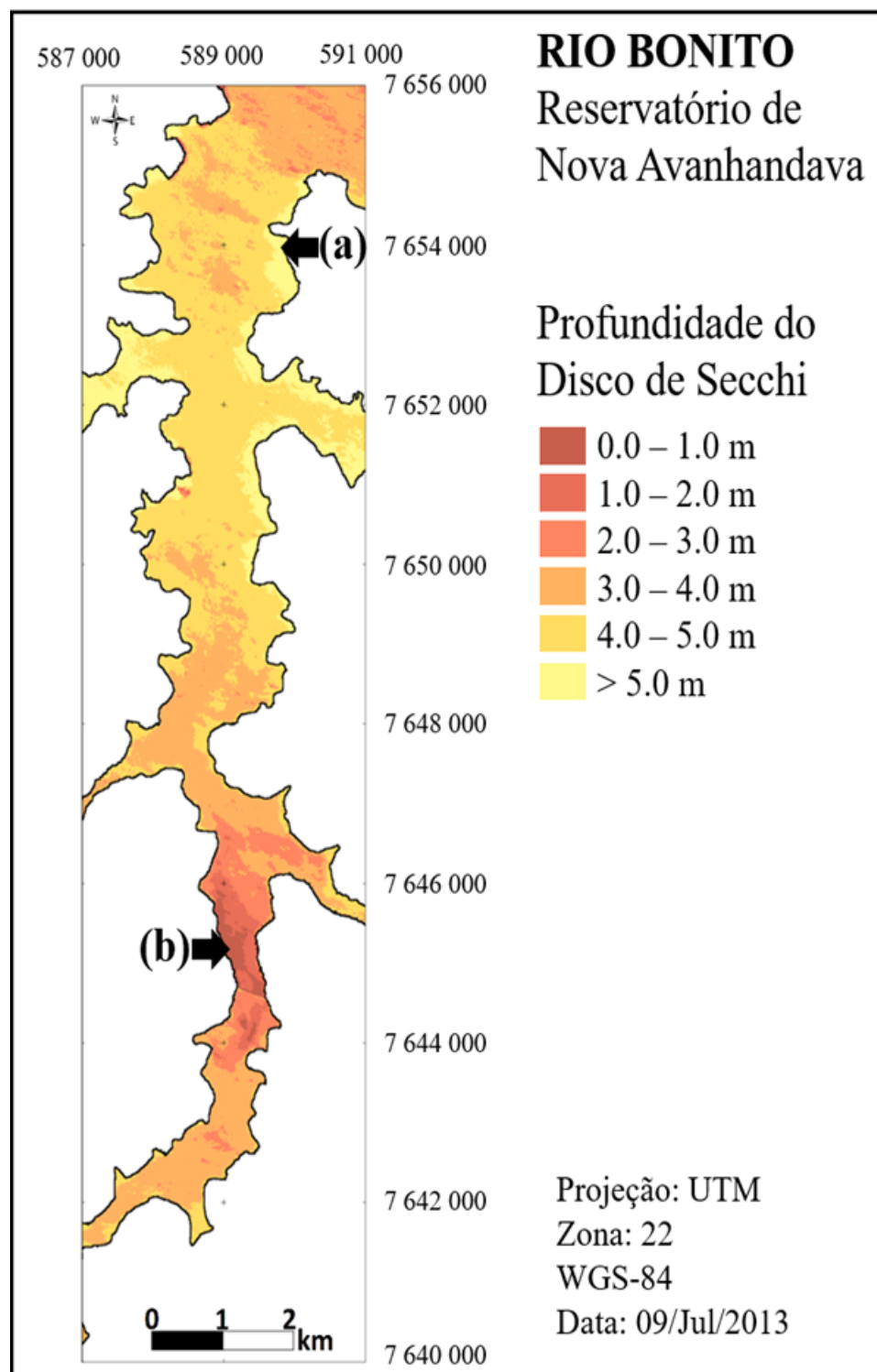


Figura 3. Distribuição espacial do DS gerado a partir da banda centrada em 660 nm da imagem SPOT-6.

Duas regiões com DS diferentes foram selecionadas para observar o comportamento da VAS em condições distintas de transparência da água. A região (a) (Figura 3) está localizada em uma área de alta transparência ($DS > 5$ m); já a região (b) (Figura 3) fica em uma área com água mais turbida ($DS < 1$ m). Vale ressaltar que há uma companhia de extração de areia do rio próximo ao ponto (b), o que ocasiona uma diminuição significativa na transparência da água nessa área.

A Figura 4 mostra a distribuição da altura da VAS em função da profundidade, coletada com o ecobatímetro, para as regiões (a) e (b) da Figura 3. A VAS na região (a) conta com diversas plantas com alturas entre 1,0 e 1,5 m, havendo também exemplares com 2,0 m de altura. Além disso, observou-se uma ocorrência de VAS em profundidade de até 9,5 m. Na região (b), a VAS se desenvolve com alturas de até 1,0 m e com ocorrência em profundidade abaixo de 7,0 m. Assim, tem-se que na região (a) (maior DS), a VAS se desenvolve com alturas maiores e com ocorrência em profundidade mais elevada, quando comparada com VAS da região (b) (menor DS).

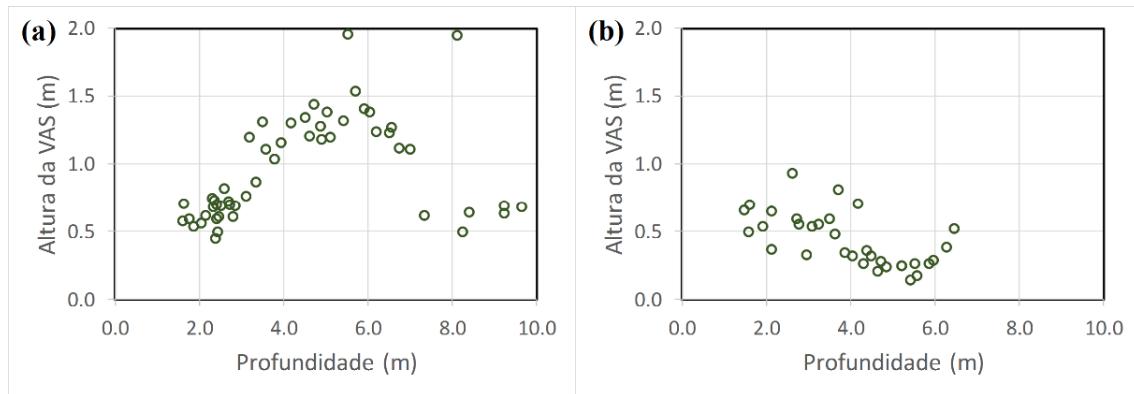


Figura 4. Altura da VAS em função da profundidade do corpo d'água nas regiões (a) e (b) mostradas na Figura 3.

4. Considerações Finais

O DS, apesar de simples e com baixo custo de amostragem, pode ser considerado como um indicador confiável da transparência da água. Com base nos resultados obtidos, conclui-se que a imagem multiespectral SPOT-6 se mostrou adequada para calibrar um modelo de estimativa do DS. Assim, com alguns elementos amostrais de DS e com imagem SPOT-6 foi possível gerar um mapa com a distribuição espacial dessa variável de grande importância limnológica.

Observou-se também que a transparência da água, representada pelo DS, influencia diretamente o comportamento da VAS em reservatórios. Ou seja, em condições de DS distintas há uma mudança tanto na altura máxima alcançada pela macrófita submersa quanto na profundidade de ocorrência dessa vegetação. Em regiões com águas mais transparentes, observou-se exemplares de VAS mais altas, além de ocorrerem em águas mais profundas. Finalmente, recomenda-se utilizar outras variáveis limnológicas (ex.: concentração de sólidos em suspensão e clorofila-*a*) para avaliar sua influência sobre a VAS em reservatório.

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 e à Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior – CAPES pela bolsa PNPd.

Referências Bibliográficas

Adler-Golden, S.M., Matthew, M.W., Bernstein, L.S., Levine, R.Y., Berk, A., Richtsmeier, S.C., Acharya, P.K., Anderson, G.P., Felde, G., Gardner, J., Hike, M., Jeong, L.S., Pukall, B., Mello, J., Ratkowski, A., Burke, H.-H. Atmospheric correction for shortwave spectral imagery based on MODTRAN4. *SPIE Proc. Imaging Spectrometry*, v. 3753, p. 61-69, 1999.

- Arlot, S.; Celisse, A. A survey of cross-validation procedures for model selection. **Statistics Surveys**, v. 4, p. 40–79, 2010.
- Astrium. SPOT 6 & SPOT 7 Imagery – **User guide**. SI/DC/13034-v1.0. 2013.
- Bini, L.M.; Thomaz S.M. Prediction of *Egeria Najas* and *Egeria Densa* Occurrence in a Large Subtropical Reservoir (Itaipu Reservoir, Brazil-Paraguay). **Aquatic Botany**, v. 83, p. 227-238, 2005.
- Cavenaghi, A.L.; Velini, E.D.; Galo, M.L.T.B.; Carvalho, F.T.; Negrisoli, E.; Trindade, M.L.B.; Simionato, J.L.A. Caracterização da Qualidade de Água e Sedimento Relacionados com a Ocorrência de Plantas Aquáticas em Cinco Reservatórios da Bacia do Rio Tietê. **Planta Daninha**, v. 21, p. 43-52, 2003.
- Dall’Olmo, G.; Gitelson, A.A. Effect of bio-optical parameter variability on the remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters: experimental results. **Appl. Optics**, v. 44, n. 3, p. 412-422, 2005.
- Esteves, F. A.; Barbieri, R. A radiação solar e seus efeitos em ecossistemas aquáticos continentais. In: Esteves, F.A. (Coordenador). **Fundamentos de Limnologia**. 3 ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2011. cap. 9, p.137-166,
- Gitelson, A.A.; Dall’Olmo, G.; Moses, W.; Rundquist, D.C.; Barrow, T.; Fisher, T.R.; Gurlin, D.; Holz, J. A simple semi-analytical model for remote estimation of chlorophyll-a in turbid waters: Validation. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 3582-3593, 2008.
- Kirk, J.T.O. **Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems**. 3 ed. New York: Cambridge University Press, 2011.
- Marcondes, D.A.S.; Mustafá, A.L.; Tanaka, R.H. Estudos para Manejo Integrado de Plantas Aquáticas no Reservatório de Jupiá. In: Thomaz, S.M.; Bini, L.M. **Ecologia e Manejo de Macrófitas Aquáticas**. Maringá: Editora EDUEM, 2003. cap. 15, p. 299-317.
- Mishra S.; Mishra, D.R.; Lee, Z. Bio-optical Inversion in Highly Turbid and Cyanobacteria Dominated Waters. **IEEE Transactions in Geosciences and Remote Sensing**, v. 52, n. 1, p. 375-388, 2014.
- Mishra S.; Mishra, D.R.; Lee, Z; Tucker, C. Quantifying Cyanobacterial Phycocyanin Concentration in Turbid Productive Waters: A Quasi-analytical Approach. **Remote Sensing of Environment**, v. 133, p. 141-151, 2013.
- Mishra, D.R.; Narumalani, S.; Rundquist, D.; Lawson, M.P. Benthic Habitat Mapping in Tropical Marine Environments using QuickBird Imagery. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 72, n. 9, p. 1037-1048, 2006.
- Rodrigues, R.B.; Thomaz, S.M. 2010. Photosynthetic and Growth Responses of *Egeria Densa* to Photosynthetic Active Radiation. **Aquatic Botany**, v. 92, n. 4, p. 281-284, 2010.
- Stone, M. Cross-Validatory Choice and Assessment of Statistical Predictions. **Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)**, v. 36, n. 2, p. 111-147, 1974.
- Tavechio, W.L.G.; Thomaz, S.M. Effects of Light on the Growth and Photosynthesis of *Egeria najas* Planchon. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 46, n. 2, p. 203-209, 2003.
- Thomaz, S.M., Fatores que Afetam a Distribuição e o Desenvolvimento de Macrófitas Aquáticas em Reservatórios: Uma Análise em Diferentes Escalas. In: Nogueira, M.G.; Henry, R.; Jorcin, A (Ed.). **Ecologia de Reservatórios: Impactos Potenciais, Ações de Manejo e Sistemas em Cascata**. São Carlos: RiMa, 2006.

Thomaz, S.M.; Bini, L.M. Ecologia e Manejo de Macrófitas Aquáticas em Reservatórios. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 10, n. 1, p. 103-116, 1998.

Thomaz, S.M.; Esteves, F.A.; Murphy, K.J.; Dos-Santas, A.M.; Caliman, A.; Guariento, R.D. Aquatic Macrophytes in the Tropics: Ecology of Population and Communities, Impact of Invasion and Use by Man. **Tropical Biology and Conservation Management**, v. 4, p. 33-37, 2008.

Tundisi, J.G.; Matsumura-Tundisi. T. **Limnologia**. São Paulo: Oficina de Textos. 2008.

Wetzel, R.G. **Limnology: Lake and River Ecosystems**. 3 ed. San Diego: Academic press, 2001.