

Modelagem espectral de biomassa fitoplanctônica com base em imagens Landsat 5/TM

Luiz Rogério Mantelli¹
Marisa Dantas Bitencourt¹

¹Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo (IB-USP)
Rua do Matão, Trav. 14, nº 321 – Cidade Universitária – CEP 05508-090
São Paulo – SP, Brasil
luizmantelli@gmail.com; tencourt@ib.usp.br

Abstract. Given the alarming situation of anthropic pressure on the urban reservoirs and their importance as public water supply in the greater metropolitan area of Brazil, it is imminent the need to revert these situation to sustainable levels. Eutrophication episodes are frequent, causing great damage to the whole population. Given this reality, it is crucial a program for effective management of water resources. This paper presents a phytoplankton biomass estimation model based on remote sensing data, derived from Landsat 5/TM. The laboratory controlled radiometric tests and the calculation of phytoplankton biomass pigments estimators allowed to obtain a linear model with 86% adjustment. Taking into account the used methods this is a significant result that increases the use of remote sensing tools for reservoirs trophic state monitoring and for impacted water collections effective management. However, even considering the rigor used during the experiments, other arrangements should be made and statistical methods tried, in order to increase such model reliability. Furthermore, calibrations are being performed in the Billings, Guarapiranga and Paiva Castro reservoirs, São Paulo (SP), allowing the creation of an instrument that can be deployed in public managers routines, guiding decision making process and public policies establishment needed to restore not only the sub-basins studied, but other tropical reservoirs in general.

Palavras-chave: remote sensing, reservoir, water monitoring, phytoplankton biomass, sensoriamento remoto, reservatórios, monitoramento de água, biomassa fitoplanctônica.

1.Introdução

O crescimento da população urbana do Brasil é responsável pelo agravamento da questão hídrica, já que promoveu um aumento considerável nas demandas de água para abastecimento, associada à expansão urbana, à degradação dos mananciais e à contaminação e poluição. Estes efeitos podem ser vistos com clareza na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP).

A eutrofização desses corpos d'água ocorre por causas naturais e artificiais. Naturalmente todos os sistemas lacustres tendem a uma eutrofização muito lenta. A eutrofização artificial resulta da drenagem de áreas agrícolas, urbanas, bem como por lançamento de esgotos e efluentes industriais nos rios. Com a intensa ocupação das áreas de mananciais que ocorre na RMSP este processo é ainda mais acelerado. A eutrofização se caracteriza por um aumento exagerado de nutrientes que pode ser medido pela concentração desses na coluna d'água e através da estimativa da biomassa.

O gerenciamento e o manejo da qualidade das águas de lagos artificiais em áreas de mananciais passa, necessariamente, pelo controle de vários parâmetros limnológicos e ambientais. O ambiente pode influenciar o estado trófico dessas águas, alterando vários parâmetros limnológicos que podem facilitar infestações por macrófitas, causando diversos problemas para saúde pública. Vários são os fatores antrópicos que podem afetar a utilização e a vida útil de um corpo d'água lântico natural ou artificial. O mais importante é sem dúvida a eutrofização, que é um processo de enriquecimento exacerbado da água o que acaba sendo um fator favorável pelo desenvolvimento de macrófitas aquáticas.

Estudos dessa natureza realizados em áreas tropicais estão longe de uma modelagem final, por conta da enorme diversidade de ambientes e da marcante biodiversidade, bem como pela sazonalidade. Por conta disso, ainda é necessário validar e calibrar dados de campo e de laboratório, com dados espectrais registrados remotamente. As inferências feitas por sensores

remotos são baseadas na assinatura espectral de cada alvo, que varia conforme a faixa espectral utilizada. A partir do comportamento espectral já é possível inferir tipos e concentrações de partículas em suspensão, bem como identificar espécies de plantas aquáticas infestantes. Estas mesmas informações podem ser coletadas na forma de imagens multiespectrais, registradas por plataformas aéreas e orbitais.

Nesse contexto, as técnicas de geoprocessamento, associadas ao sensoriamento remoto orbital podem ser muito úteis na predição de impactos, além de possibilitar simulações de cenários diversos. Os procedimentos mais comuns utilizados para o mapeamento e monitoramento das áreas ocupadas ainda envolvem medidas *in situ*, oferecendo grande precisão em análises pontuais, porém com custo alto e restrições em escala espacial e temporal (Ritchie e Cooper, 2001).

No entanto, há uma grande confiabilidade na aplicação das informações obtidas por sensoriamento remoto óptico para estudos limnológicos, como já pôde ser observado em vários estudos realizados anteriormente (Preisendorfer, 1986; Curran & Novo, 1988; Ritchie *et al.*, 1990; Bitencourt-Pereira, 1992; Jerome *et al.*, 1996).

Para compreender esses estudos é preciso saber que, de um corpo d'água, o que se observa através dos diversos sistemas sensores remotos é a radiância emergente resultante do espalhamento causado pelos elementos em suspensão na zona eufótica (Smith e Baker, 1978 (a,b) e 1981; Smith, 1968; Bukata *et al.*, 1981; Bukata *et al.*, 1983). Cerca de 90% do fluxo emergente de um corpo d'água é originado dentro dele mesmo, e é causado por este espalhamento (Jerlov e Nielsen, 1968; Kirk, 1994). A radiância está diretamente relacionada à reflectância, que é determinada pelas propriedades físicas e químicas dos alvos, a qual é conhecida como a assinatura espectral do alvo.

Sendo assim, somente os parâmetros limnológicos capazes de alterar as propriedades ópticas da água podem ser relacionados com a resposta espectral obtida por sensoriamento remoto (Bitencourt-Pereira, 1988 e 1992). Entre estes podemos destacar a turbidez (medida por disco de Secchi) e a concentração de pigmentos. A partir da observação empírica de que a transparência de disco de Secchi cai pela metade toda vez que a biomassa algal dobra, Carlson (1977) desenvolveu um índice que mostra os estados tróficos da água que varia de zero a 100, onde zero = oligotrófico e 100 = eutrófico.

O *Índice de Estado Trófico de Carlson* (1977), o IET, foi modificado por Toledo *et al.* (1983), gerando o IETM, de modo a adequá-los a ambientes subtropicais.

Vários autores (Lillesand *et al.*, 1983; Lathrop e Lillesand, 1991) testaram, com sucesso, o potencial de estimativa deste índice, em lagos do hemisfério norte, substituindo o parâmetro limnológico de campo por imagens multiespectrais que o represente.

Outro parâmetro que pode ser medido através de dados orbitais são os particulados orgânicos formados pelas populações planctônicas. Nesse sentido os pigmentos são os responsáveis pela assinatura espectral registrada. Contudo, a concentração de pigmentos "a" totais (clorofila + feofitina) não pode ser inferior a 20 mg/m³ (Bitencourt-Pereira, 1992 e 1993). Assim, se a eutrofização do corpo d'água estiver relacionada com alguns desses parâmetros limnológicos, é possível estimar espacialmente as áreas de diferentes níveis tróficos, utilizando imagens espectrais nas faixas espectrais do visível.

Bitencourt-Pereira (1992) fez uma revisão bibliográfica dos fundamentos que relaciona a luz e a água, bem como uma discussão dos pontos frágeis relacionados ao uso de imagens de satélite na detecção de parâmetros limnológicos passíveis de serem monitorados por sensoriamento remoto. Palombo e Bitencourt-Pereira (1992) fizeram um estudo sobre infestação de *Pistia stratiotes* no reservatório do Rio das Pedras, no Complexo Billings.

Lathrop e Lillesand (1991) testaram a utilidade de imagens multiespectrais para monitorar a turbidez de águas continentais, seguindo as experiências de Bukata *et al.* (1983) e concluíram que a razão vermelho/azul apresentou o melhor desempenho. A medida que

aumenta o espalhamento devido aos sólidos em suspensão, aumenta também a reflectância desde as faixas do visível até o IVP, com pico no vermelho. A razão vermelho/azul se mostrou um índice útil para prever a transparência da água.

Cheng e Lei (2000) avaliaram o estado trófico de um reservatório utilizando imagens Landsat/TM. Testaram o índice de eutrofização de Carlson (IEC) a partir da profundidade de disco de Secchi e da concentração de clorofila, ambos obtidos no campo e em imagens de satélite no vermelho e verde, definindo assim como devem ser as novas equações desse índice.

Outro exemplo de aplicação do uso da assinatura espectral para determinar estado trófico foi o estudo do reservatório de Paraibuna no Estado de São Paulo, visando calibrar a turbidez com dados espectrais provenientes do sistema Landsat/TM (Bitencourt-Pereira, 1993). Nesse estudo a autora também conseguiu relacionar, através das imagens de satélite, diferentes estados tróficos do reservatório com as respectivas profundidades com que o disco de Secchi desapareceu na coluna d'água.

Contudo, ao contrário do estudo da comunidade de macrófitas (Remillard e Welch, 1992; Waldron *et al.*, 2001; Bitencourt-Pereira, 1992; Valta-Hulkkonen *et al.*, 2004; Aparicio *et al.*, 2005) a estimativa da biomassa fitoplanctônica em reservatórios urbanos, com base em dados de sensoriamento remoto, ainda é um processo pouco estudado.

Dessa maneira, o objetivo deste trabalho foi gerar um modelo para estimativa de biomassa fitoplanctônica com base em dados espectrais, fornecidos por sensoriamento remoto óptico, em especial pela plataforma Landsat 5/TM.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Padronização do método de análise

A modelagem da biomassa fitoplanctônica é um procedimento realizado através de equações elaboradas com base em dados empíricos. Dessa maneira, a aquisição dos dados de reflectância foi feita de forma controlada, em laboratório de radiometria. A fonte de iluminação consistiu numa lâmpada halógena de 1000 Watts, posicionada com 60° de elevação e distante aproximadamente 1 metro da amostra.

As assinaturas espectrais foram tomadas utilizando-se o espectraloradiômetro *Ocean Optics*[®], modelo USB2000, posicionada a uma altura de 43 cm, uma vez que, nessa configuração, a abertura de 24,3° da fibra óptica fornece uma área de visada de aproximadamente 283,5 cm², correspondente ao diâmetro da tina de vidro utilizada no experimento (\cong 19cm).

Ainda, cabe ressaltar que, para protocolar o método, foram realizados diversos ensaios, considerando-se diferentes fontes de iluminação, recipientes para acondicionamento da amostra e superfícies de fundo (cobertura da mesa do laboratório). A observação dos espectros de reflectância instantâneos, diretamente na tela do computador, permitiu concluir a montagem que melhor caracterizasse a resposta espectral do fitoplâncton. A tina de vidro adotada possui medida de 200mm de diâmetro por 300mm de altura. A Figura 1, a seguir, ilustra detalhadamente a montagem do experimento no laboratório de radiometria.

2.2 Ensaio radiométrico e determinação da biomassa fitoplanctônica

A amostra utilizada para realização do ensaio final foi obtida no Lago da Biologia (USP) e possuía alta concentração de fitoplâncton, verificada inicialmente pela coloração verde acentuada do material coletado. Essa é uma característica fundamental para o método utilizado já que, a cada assinatura espectral adquirida, um volume conhecido de amostra (entre 100mL e 500mL) era retirado, completava-se o recipiente com água destilada até a marca de 5L e uma nova aquisição era efetuada.

Dessa maneira, ao final do ensaio foram obtidas 21 assinaturas espectrais relacionadas à diferentes concentrações de fitoplâncton. Os dados numéricos foram salvos para processamento posterior e o valor de biomassa estimado para cada alíquota extraída da amostra.

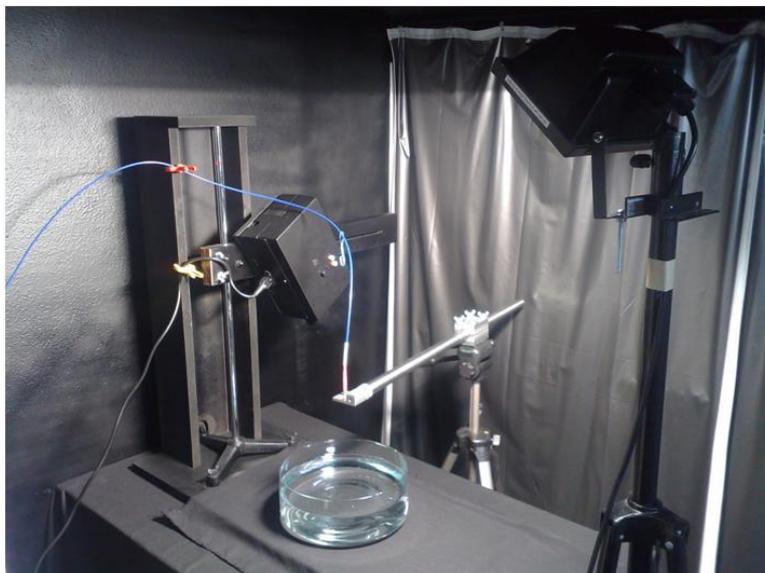


Figura 1. Estrutura do laboratório de radiometria.

Essa estimativa foi feita com base na medida de Clorofila a, determinada por espectrofotometria, segundo método descrito por Jeffery e Humphrey (1975). Além da medida de Clorofila a, para aproveitar o experimento, também considerou-se útil o cálculo da Clorofila b e c, Feofitina e Catorenóides (Jeffery e Humphrey, 1975; Lorenzen, 1960; Strickland e Parsons, 1972), estudados em outros trabalhos. A extração dos pigmentos foi realizada, previamente, segundo Wetzel e Likens (1991).

2.3 Ajustes e tratamento estatístico dos dados

O processamento estatístico dos dados de reflectância foi realizado através de regressão linear simples, de modo a relacionar os valores de biomassa aos valores de reflectância fornecidos por imagens de sensoriamento remoto óptico.

Para garantir um melhor ajuste do modelo, os dados de reflectância obtidos em laboratório foram segmentados de acordo com o intervalo correspondente às bandas 1, 2, 3 e 4 da plataforma Landsat 5/TM (Tabela 1). Em seguida, foi calculada a reflectância média dos intervalos estudados, para cada assinatura espectral obtida. Essas médias foram utilizadas como variável independente na análise de regressão. A variável dependente, nesse caso, correspondeu ao valor de biomassa (CI b).

Tabela 1. Comprimentos de onda das bandas espectrais 1, 2, 3 e 4 da plataforma Landsat 5/TM

Landsat 5/TM	Comprimento de Onda (λ) - nm
Banda 1	450 – 520
Banda 2	520 – 600
Banda 3	630 – 690
Banda 4	760 – 900

O modelo final representa o melhor ajuste nos testes estatísticos realizados, ou seja, a banda utilizada para estimativa de biomassa foi aquela que apresentou o maior valor de R^2 na análise por regressão linear simples.

3.RESULTADOS E DISCUSSÃO

O estudo do comportamento espectral do fitoplâncton é um procedimento que pode ser realizado de diversas maneiras. A busca por métodos padronizados para aquisição dos dados revelou uma grande discrepância em diferentes trabalhos analisados (Aparício *et al.*, 2005; Aparício, 2007; Bukata *et al.*, 1981; Bukata *et al.*, 1983; Toledo Jr *et al.*, 1983). Dessa maneira, buscou-se um novo método para estudo das amostras de água, chegando-se ao modelo anteriormente descrito.

As assinaturas espectrais resultantes do ensaio realizado estão expressas graficamente na Figura 2.

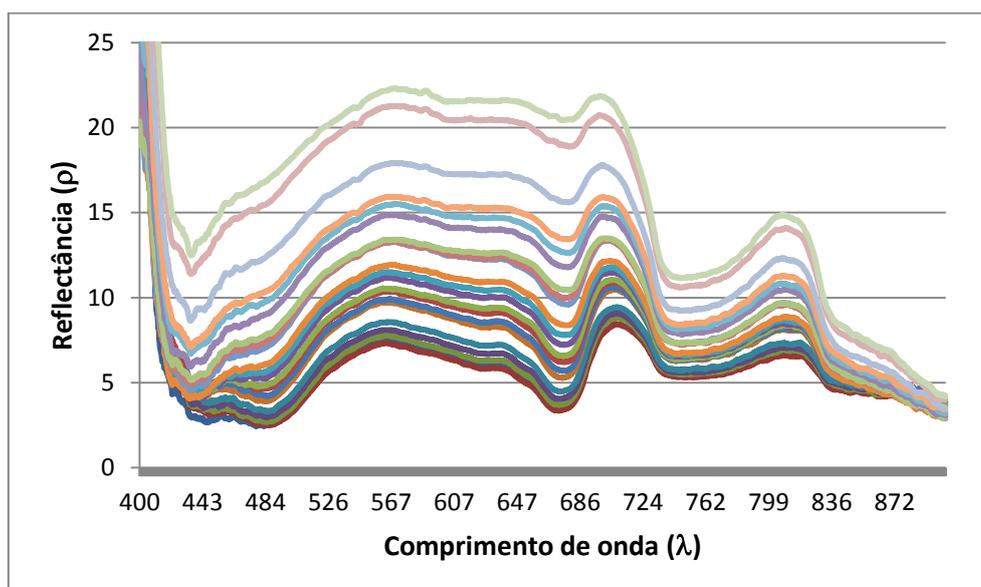


Figura 2. Assinaturas espectrais resultantes do ensaio radiométrico realizado com amostra saturada de fitoplâncton, proveniente do Lago da Biologia (USP).

Com relação à quantificação de pigmentos, como já comentado, a determinação das concentrações de clorofila-*a* proporciona uma estimativa da biomassa fitoplanctônica e os feopigmentos indicam o seu grau fisiológico, uma vez que numa população em declínio, o teor de clorofila-*a* diminui, enquanto que seus produtos de degradação (feopigmentos) e os carotenoides aumentam. Isso ocorre porquê as clorofilas são facilmente alteradas, por variações no pH, alta incidência luminosa ou temperatura, entre outros fatores, tendo como produto desta alteração, a feofitina (Golterman *et al.*, 1978).

Ainda, a determinação das concentrações de clorofila-*a* proporciona uma estimativa da biomassa fitoplanctônica e os feopigmentos indicam o seu grau fisiológico, uma vez que numa população em declínio, o teor de clorofila-*a* diminui, enquanto que seus produtos de degradação (feopigmentos) e os carotenóides aumentam. Isso ocorre porquê as clorofilas são facilmente alteradas, por variações no pH, alta incidência luminosa ou temperatura, entre outros fatores, tendo como produto desta alteração, a feofitina (Golterman *et al.*, 1978).

Os valores negativos encontrados para a concentração de feopigmentos indicam, na verdade, uma situação contrária à disposta acima. Como a concentração de clorofila obtida foi alta, esperava-se, realmente, baixo valor para os feopigmentos. Os dados completos da extração de pigmentos podem ser analisados na Tabela 2, abaixo.

O tratamento estatístico dos dados por regressão linear simples permeou a escolha da banda espectral que fornecesse o melhor ajuste para os dados de clorofila *a*, e conseqüentemente, a melhor equação de reta. Tal equação foi determinada como sendo o modelo para estimativa da biomassa fitoplanctônica com base em dados espectrais fornecidos pelo sensor Landsat 5/TM. Os valores de R² obtidos estão dispostos na Tabela 3, abaixo.

Tabela 2. Dados de concentração de pigmentos obtidos em laboratório

Cl a	Cl b	Cl c	Feopigmentos	Carotenoides
116,08	105,25	11,89	-822,36	53,20
121,53	108,32	13,68	-818,36	53,60
115,20	101,59	13,58	-722,50	50,00
120,18	110,70	15,54	-770,30	52,40
107,71	95,94	8,74	-686,46	43,20
93,35	81,99	11,62	-623,71	40,00
80,56	70,91	8,20	-539,87	36,00
95,56	82,74	12,98	-532,80	41,80
77,91	68,32	7,69	-449,23	34,40
66,10	58,36	10,58	-411,36	29,87
62,23	54,57	8,56	-386,44	27,20
48,36	42,72	5,00	-305,09	21,07
45,40	41,19	8,10	-287,38	20,93
47,82	40,84	6,68	-256,19	21,40
41,64	36,29	3,94	-235,83	18,70
41,05	36,42	5,25	-225,41	18,90
33,03	29,60	4,55	-189,70	15,20
30,55	26,50	2,65	-178,62	13,84
25,22	21,65	2,45	-138,20	11,04
11,88	11,20	2,72	-69,15	4,32
15,09	13,83	3,98	-89,50	7,52

Nota: Cl = Clorofila

Tabela 3. Valores de R^2 obtidos para as bandas 1, 2, 3 e 4.

R^2	
Banda 1	0,8137
Banda 2	0,8609
Banda 3	0,8693
Banda 4	0,7289

A banda que forneceu o melhor ajuste corresponde à faixa entre 630 a 690 nm (Banda 3), relacionada ao vermelho, com valor de R^2 de 0,8693. Esse é um resultado muito importante, já que difere das análises realizadas para macrófitas aquáticas, conduzidas paralelamente a esse trabalho e, também, estudada por outros autores (Aparício, 2007). Essa diferença garante o um monitoramento mais adequado dos grupos vegetais mencionados, permitindo as aproximações propostas neste trabalho.

A Figura 3, apresentada abaixo, ilustra os resultados da análise por regressão linear simples.

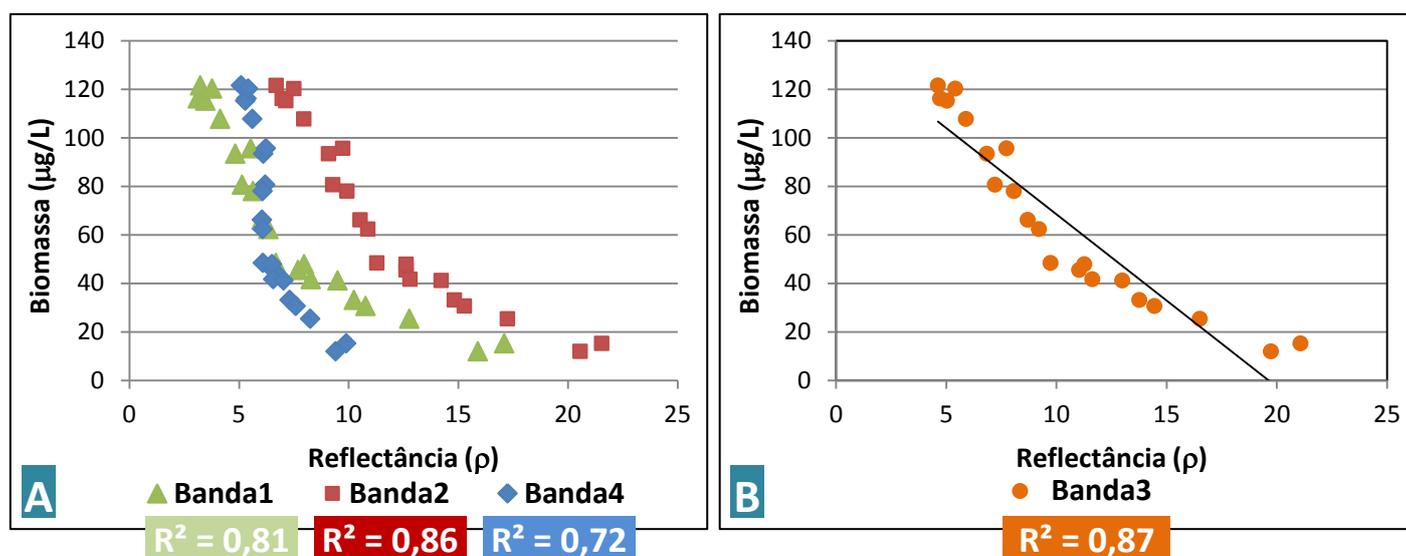


Figura 3. Resultados da análise estatística por regressão linear simples. A) Dispersão dos dados e valores de R^2 para as Bandas 1, 2 e 4 do satélite Landsat 5/TM. B) Valor de R^2 para a Banda 3 e respectiva linha de tendência.

Após escolha da Banda 3 como sendo a que apresenta melhor relação com os dados de biomassa, definiu-se a equação para estimativa da biomassa fitoplanctônica com base em dados espectrais fornecidos pelo sensor Landsat 5/TM (Equação 1), como sendo:

$$y = -7,115x + 139,59 \quad (1)$$

A próxima etapa do trabalho, ainda em desenvolvimento, consiste na aplicação da equação acima tendo-se em vista o estudo dos reservatórios da Represa Billings, Guarapiranga e Paiva Castro. Uma série de 10 imagens com datas entre 2003 e 2010 foram adquiridas, tomando-se o cuidado de que todas tivessem sido pré-processadas pelo Departamento de Geração de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DGI-INPE), utilizando-se a mesma versão do software em todos os exemplares.

As devidas correções radiométricas foram efetuadas com base no disposto por Chander, 2009. A plataforma utilizada foi o ENVI, versão 4.7. O processamento seguinte será a aplicação do IETM, conforme descrito na introdução deste trabalho e o estudo da série temporal, tendo-se em vista a identificação de padrões nos reservatórios de interesse.

4. CONCLUSÃO

Embora os testes finais e melhoramentos do modelo ainda não tenham sido implementados, os estudos já realizados apresentaram bons resultados, de modo que o leitor pode encorajar-se a utilizar as formulações propostas. Ainda, cabe ressaltar que, com o advento do sensoriamento remoto de alta resolução espacial e a captação de imagens na região do amarelo pode haver um considerável incremento de informações, muito importantes para melhoramento do modelo.

Ainda há de se trabalhar no aperfeiçoamento dos testes laboratoriais e na realização de novos ensaios radiométricos, de modo a aumentar a precisão da equação estimadora e, conseqüentemente, a confiabilidade do método como um todo.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos Laboratório de Limnologia da USP pelo auxílio nas análises de pigmentos e à CAPES pelo auxílio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aparício, C., Bitencourt, M.D., Meirelles, S.T., Pompêo, M.L.M. Análise espectral para diferenciação de espécies de macrófitas aquáticas e qualidade de água no reservatório Billings, São Paulo, Brasil. In: Congresso Brasileiro de Limnologia, 10., 2005, Ilhéus. **Anais...** Ilhéus: Sociedade Brasileira de Limnologia, 2005. p. 338-338.
- Aparício, C. Análise da resposta espectral de espécies de macrófitas, 2007, 163 p. Tese (Doutorado em Ecologia de Ecossistemas terrestres e Aquáticos). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- Bitencourt-Pereira, M.D. **Parâmetros limnológicos passíveis de serem monitorados através de sensores remotos orbitais**. 1992. 111 p. Tese (Doutorado em Ecologia e Recursos Naturais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 1992.
- Bitencourt-Pereira, M.D. Dificuldades no uso de dados espectrais orbitais para inferir ou estimar concentração de clorofila em ecossistemas lênticos tropicais. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 7., 1993, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1993. p. 109-116.
- Bukata, R.P., Bruton, J.E., Jerome, J.H., Jain, S.C., Zwick, H.H. Optical water quality model of Lake Ontario. 2) Determination of chlorophyll-a and suspended mineral concentrations of natural waters from submersible and low altitude optical sensors. **Applied optics**. v. 20, n. 9, p. 1704-1714, 1981.
- Bukata, R.P., Bruton, J.E., Jerome, J.H. Use of chromaticity in remote measurements of water quality. **Remote Sensing of Environment**, v. 13, n. 2, p. 161-177, 1983.
- Carlson, R.E. A trophic state index for lakes. **Limnology and Oceanography**, v. 22, n. 2, p. 361-369, 1977.

Chander, G., Markham, B., Helder, D. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+ and EO-1 ALI sensors. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. 893-903, 2009.

Cheng, Ke-Sheng; Lei, Tsu-Chiang 2000 Reservoir Trophic State using Landsat TM data. **GISdevelopment.net** – **AARS** – **ACRS 2000** – **Water Resources**. Disponível em: <www.gisdevelopment.net/aars/acrs/2000/ts2/water0006pf.htm>. Acesso em 25 mai. 2008.

Curran, P.J.; Novo, E.M.L. The relationship between suspended sediment concentration and remotely sensed spectral radiance: a review. **Journal of Coastal Research**, v. 4, n. 3, p. 351-368, 1988.

Golterman, H. L.; Clymo, R. S.; Ohnstad, M. A. M. **Methods for physical and chemical analysis of freshwaters**. Oxford: Blackwell Scientific Publications. Handbook 8, 1978, 213p.

Jeffrey, S. W. & Humphrey, G. F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 e c2 in higher plants, algae, and natural phytoplankton. **Physiol. Pflanzen**, v.167, p.191-194, 1975.

Jerlov, N.G.; Nielsen, E.S.. 1968 - **Beam attenuation. Optical aspects of oceanography**. Abdeen, Aberdeen Univ.,;cap.1 pp 47-62.

Jerome, J.H.; Bukata, R.P.; Miller, J.R. Remote sensing reflectance and its relationship to optical properties of natural waters. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 16, p. 3135-3155, 1996

Lathrop, R.G.; Lillesand, T.M.; Yandell, B.S. Testing the utility of simple multi-date Thematic Mapper calibration algorithms for monitoring turbid inland waters. **International Journal of Remote Sensing**, v. 12, n. 10, p. 2045-2063, 1991.

Lillesand, T.M.; Johnson, W.L.; Lindstorm, O.M.; Meisner, D.E. Use of Landsat data to predict the trophic state of Minnesota lakes. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 49, n. 2, p. 219-229, 1983.

Lorenzen, C. J. Determination of chlorophyll and pheo-pigments: Spectrophotometric equations. **Limnol. Oceanogr.**, v.12, p.343-346. 1967.

Preisendorfer, R.W. Secchi disk science: Visual optics of natural waters. **Limnology and Oceanography**. v. 31, n. 5, p. 909-926,

Remillard, M.M.; Welch, R.A. GIS technologies for aquatic macrophyte studies: I. Database development and changes in the aquatic environment. **Landscape Ecology**, v. 7, n. 3, p. 151-162, 1992.

Ritchie, J.C.; Cooper, C.M., Schiebe, F.R.. The relationship of MSS and TM digital data with suspended sediments, chlorophyll, and temperature in Moon Lake, Mississippi. **Remote Sensing of Environment**, v. 33, n. 2, p. 137-148, 1990.

Ritchie, J.C.; Cooper, C.M. Remote sensing techniques for determining water quality: Application to TMDLs. In: TMDL Science Issues Conference. Alexandria. **Anais...** Alexandria: Water Environment Federation, 2001. p. 367-374.

Smith, R.C. The optical characterization of natural waters by means of an extinction coefficient. **Limnology and Oceanography**, v. 13, n. 3, p. 423-429, 1968.

Smith, R.C.; Baker, K.S.. The bio-optical state of ocean waters and remote sensing. **Limnology and Oceanography**, v. 23, n. 2, p. 247-259, 1978a.

Smith, R.C.; Baker, K.S.. Optical classification of natural water. **Limnology and Oceanography**, v. 23, n. 2, p. 260-267, 1978b.

Strickland, J. D.; Parsons, T. R. A manual of seawater analysis. **Bull. Fihs. Res. Bel. Can.**, v.125, p.1-185, 1960.

Toledo Jr., A.P.; Talarico, M.; Chinez, S.J.; Agudo, E.G. A aplicação de modelos simplificados para a avaliação e processo de eutrofização em lagos e de reservatórios tropicais In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária, 12, 1983, Camboriú. **Anais...** Camboriú, 1983. p. 1-34.

Valta-Hulkkonen, K.; Kanninem, A.; Pellikka, P. Remote sensing and GIS for detecting changes in aquatic vegetation of rehabilitated lake. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 24, p. 5745-5758, 2004.

Waldron, M. C.; Steeves P. A.; Finn J. T. Use of thematic mapper imagery to assess water quality, trophic state, and macrophyte distributions in Massachusetts lakes. **Water Resource Investigations report - Massachusetts Department of Environmental Management**, 2001, 40 p. Disponível em: <<http://water.usgs.gov/pubs/wri/wri014016/>>. Acesso em: 24 mai. 2008.

Wetzel, R. G.; Likens, G. E. **Limnological analyses**. Springer-Verlag, 1991, 391 p.