

## Relação entre clorofila *a* com perfil espectral e imagem de satélite no reservatório Passo Real – RS

Waterloo Pereira Filho<sup>1</sup>  
Daniela Wancura Barbieri<sup>1</sup>  
Flávio Wachholz<sup>2</sup>  
Rosana Corazza<sup>1</sup>  
Aline Biasoli Trentin<sup>1</sup>  
Patrícia Michele Pereira Trindade<sup>1</sup>  
André Luis Domingues<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Santa Maria – UFSM  
Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/INPE  
Laboratório de Geotecnologias/Departamento de Geociências  
97.105-900 – Santa Maria – RS, Brasil  
{waterloopf; daniwbarbieri}@gmail.com  
{corazza\_ro}; {abtrentin}@yahoo.com.br  
{pattytrindadgeo}; {eng.domingues}@gmail.com

<sup>2</sup>Programa de Pós-Graduação em Geografia – UNESP/RC  
fwalemao@gmail.com

**Abstract.** The water surface of a reservoir shows the anthropogenic and natural effects present in the watershed and the nutrients and solids suspension inside the water define its color. This work had the objective to identify the spectra profile as a function of chlorophyll *a* in Passo Real reservoir, located in Jacuí River in Rio Grande do Sul State. Samples from water were used to identify the chlorophyll *a* in laboratory. Simultaneously at fieldwork the reflectance spectra were obtained. Thirty one samples stations were used to represent the entire water surface of the reservoir. The reflectance was identified by FieldSpec spectroradiometer. The simple ratio of the wavelength 699/682 showed significant correlation with chlorophyll *a* at a 99.5% determination coefficient. The effect of spectra profile was simulated with Thematic Mapper bands image from field spectra. The reflectance of band 2 was superior to band 3 for the samples with chlorophyll *a* concentrations were bigger than 50  $\mu\text{g/L}$ . Spectra with these same conditions were observed in an image with the passage of the satellite close to the date of the field work. The image also permitted to identify the transitions zones between river and lacustre conditions due to a little reflectance alteration in band 2, probably associated to the chlorophyll *a* growth. The field data and image permitted to identify that the aquatic compartment defined by Ingaí tributary had the biggest chlorophyll *a* concentration.

**Palavras-chave:** Reflectance, Thematic Mapper image, reservoir, Reflectância, Imagem Thematic Mapper, reservatório.

### 1. Introdução

O crescimento da demanda de energia elétrica tem exigido cada vez a mais exploração do potencial energético dos rios brasileiros e no Rio Grande do Sul este quadro não é diferente. Recentemente, diversos reservatórios com fins de produção de energia foram construídos no estado. No rio Jacuí há cinco reservatórios construídos e que estão localizados desde área de planalto até o rebordo da bacia do Paraná e configuram-se como em efeito “cascata”. O reservatório de Passo Real é o que apresenta maior área, possui aproximadamente 220  $\text{km}^2$ , e encontra-se no topo do planalto.

A alteração de um rio para um lago, devido à construção de um reservatório, modifica as condições hidrodinâmicas da água e define, conforme Wetzel (2001), três zonas: a do rio, a de transição e a lacustre, cada uma com características físicas, químicas e biológicas próprias. No setor rio, de modo geral, a água é bem misturada, com capacidade de transportar elevadas

cargas de partículas suspensas e com isso há reduzida infiltração da luz o que limita a produção primária. Na zona de transição ocorre diminuição da turbidez proporcionando aumento na infiltração da luz, com isso aumentam as taxas de produtividade pelo fitoplâncton. Na zona com características de lago pode ocorrer estratificação térmica e limitação na disponibilidade de nutrientes.

A variação das condições as quais a água fica submetida em um reservatório define, muitas vezes, alterações de sua cor. Neste sentido, o sensoriamento remoto mostra-se como uma potencial ferramenta para o monitoramento destes sistemas devido sua característica sinótica. A repetitividade de dados, a área de abrangência a resolução espacial das imagens de satélite e as informações espectrais produzidas são as principais características dos dados de sensoriamento remoto.

Explorando a característica espectral, diversos autores têm investigado o perfil espectral como forma de obter informações mais detalhadas do ambiente aquático. A presença de partículas em suspensão na água, muitas vezes, determina a cor da água. A partir disso são observadas feições de absorção e picos de reflectância em certas faixas do espectro eletromagnético que estão associadas aos componentes óticamente ativos da água, como é o caso da clorofila *a*, dos totais de sólidos, dos sólidos inorgânicos, dos sólidos orgânicos em suspensão entre outros pigmentos fotossintetizantes. A análise destas feições pode proporcionar informações precisas dos componentes óticamente ativos da água.

A razão de bandas, análise derivativa, remoção do contínuo, índices de vegetação são alguns dos recursos disponíveis e que foram usados por Gitelson (1992); Penuelas *et al.* (1993); Rudorff *et al.* (2007); Mathews *et al.* (2010) para a extração de informações de espectros de reflectância da água. Neste contexto, os objetivos deste trabalho, tendo-se como área de estudo o reservatório de Passo Real, são os de: a) identificar o efeito da clorofila *a* sobre os espectros de reflectância da água e b) avaliar a distribuição espacial da concentração da clorofila *a* partir de imagem TM.

## 2. Metodologia de Trabalho

A área de estudo corresponde ao reservatório Passo Real localizado no Rio Grande do Sul. O reservatório, situado no alto curso do rio Jacuí, corresponde ao segundo de uma série de cinco represas que se configuram em cascata. O reservatório de Passo Real é abastecido por três principais tributários, o rio Jacuí (principal), Jacuí-mirim e o rio Ingaí (que possui 1/6 da área de captação entre as três bacias hidrográficas). Foram distribuídos 31 pontos amostrais sobre o reservatório de forma a contemplar o maior número de compartimentos aquáticos, inclusive aqueles formados pelos três principais rios abastecedores. A partir da Figura 1 pode-se verificar a distribuição espacial dos pontos amostrais. Em cada ponto amostral foi obtido o valor de sua coordenada geográfica, amostra para identificação da clorofila *a* em laboratório e o fator de reflectância.

Clorofila *a* foi identificada conforme descrito em Mackinney (1941). O método utilizado considera a absorbância, medida em espectrofotômetro, nos comprimentos de onda de 663 e 750 nm. A reflectância foi determinada com o uso do espectrorradiômetro FieldSpec HandHeld com resolução espectral nominal que varia de 1,6 a 3,0 nm para a faixa de 400 a 900 nm e campo de visada de 25° (ASD, 2009). O processamento dos dados espectrais foram tratados com o uso do programa computacional ViewSpecpro versão 5.6. A aquisição da reflectância respeitou a inclinação de 45° em relação à superfície da água e 90° em relação ao azimute do sol. Este procedimento foi adotado com o objetivo de evitar o efeito especular promovido pela superfície da água. A medida de reflectância foi obtida a partir do uso de uma placa de referência (spectralon) conforme descrito em (Steffen *et al.*, 1996). As medidas radiométricas foram realizadas no dia 21 de outubro de 2009 entre 09:40 e as 16:15 horas.

Para a análise dos espectros de reflectância de campo foram descritas as principais feições de absorção e identificada a razão simples entre infravermelho e vermelho e relacionada com a clorofila *a*. Diante dos efeitos causados pela clorofila *a* na reflectância foram identificadas as respostas que os valores de clorofila *a* causam nas bandas do sensor TM. Neste sentido, foram identificadas as reflectâncias no centro das bandas 1 a 4 do sensor TM nos espectros de campo. E, finalmente, foi avaliada a distribuição espacial da clorofila no lago a partir de imagens TM. A imagem utilizada é do dia 13 de outubro de 2009 e foi corrigida em relação aos efeitos da atmosfera a partir da subtração de alvo escuro e convertida em reflectância.

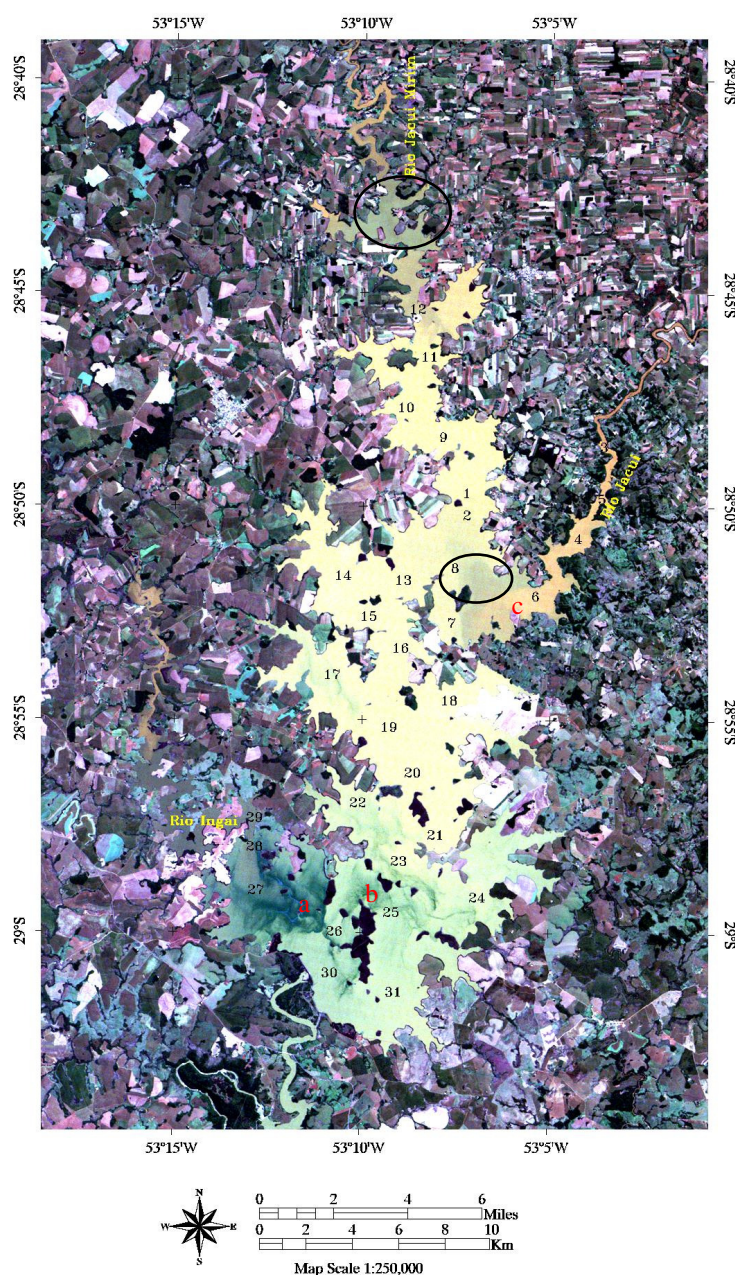


Figura 1 – Distribuição dos pontos amostrais no reservatório Passo Real – RS. A imagem corresponde a uma composição colorida do sensor Thematic Mapper na composição RGB321 do dia 13 de outubro de 2009. As letras “a”, “b” e “c” representam setores com condições espectrais diferenciadas. Os círculos indicam áreas no reservatório com características de transição de rio para lago.

### 3. Resultados e Discussão

A clorofila *a* apresentou grande variação de sua concentração, com valores de 1,68  $\mu\text{g/L}$  (ponto amostral 5) a 439,52  $\mu\text{g/l}$  (ponto amostral 29). Os menores valores foram encontrados em compartimento aquático formado pelos pontos amostrais 3 e 5, que corresponde a transição do rio Jacuí em reservatório. E os maiores valores foram encontrados em compartimento aquático formado pelos pontos amostrais 29, 28 e 27, que formam a transição do rio Ingaí em reservatório. A acentuada diferença encontrada nestes dois compartimentos se deve principalmente aos processos hidrodinâmicos e de uso da terra presentes nestes dois tributários. Estes pontos amostrais representam os principais setores do reservatório. Houve o domínio da classe Cyanophyceae, sendo encontrado 371.568 células/mL no ponto amostral 29 e 8.387 células/mL no ponto amostral 10. Em um segundo grupo com menor densidade foram identificadas as classes Chlorophyceae e Cryptophyceae e um terceiro grupo com densidade muito baixa também foi encontrado. Geralmente elevada concentração da classe Cyanophyceae está associada a ambientes eutrofizados devido ao aporte de nutrientes, principalmente o fósforo (Calijuri, 2006).

A amplitude da concentração de clorofila *a* proporcionou diferenças nos espectros de reflectância. Os pontos amostrais que apresentaram clorofila com valores elevados, acima de 50  $\mu\text{g/L}$ , apresentaram feições de absorção associadas a clorofila bem definidas até mesmo em faixa de alta absorção da água, como é o caso do infravermelho próximo (NIR). Na Figura 2 são indicadas as principais feições de absorção para algumas amostras e que a variação das condições espectrais daquele reservatório. A partir destes perfis espectrais pode-se verificar o impacto das diferentes concentrações de clorofila na reflectância da água. Em alguns pontos amostrais foi observado que comprimentos de onda em torno de 620 nm e em 680 nm apresentaram feições de absorção bem definidas. Estas duas feições de absorção são descritas em Matthews *et al.* (2010) como relacionadas a absorção da ficocianina e clorofila *a*, respectivamente.

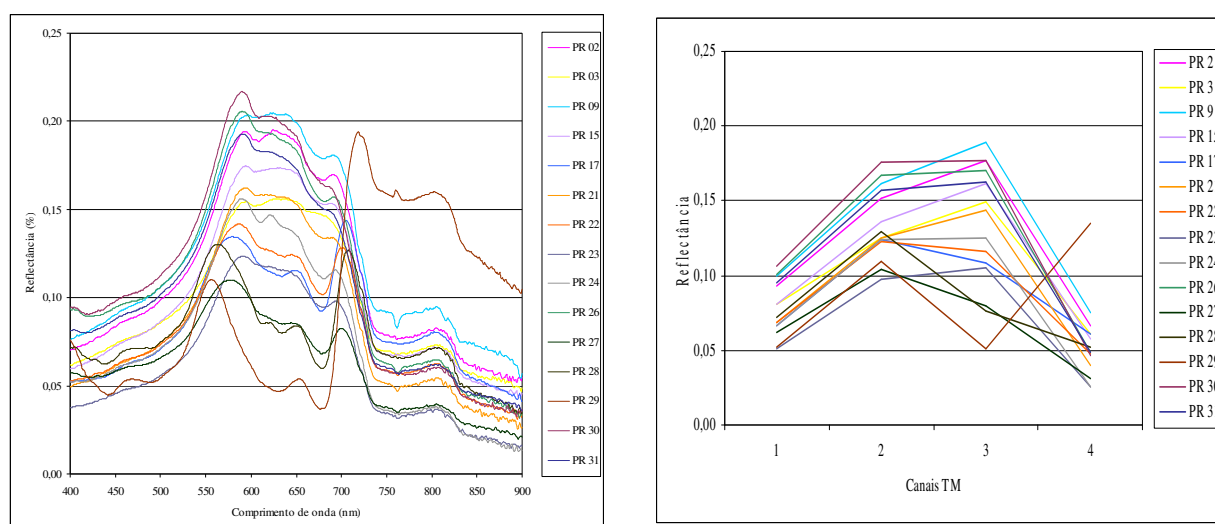


Figura 2 – Espectros de reflectância de amostras do reservatório Passo Real (a) e a reflectância no centro dos canais TM a partir dos dados de campo em “b”.

Estudos relacionados a faixa de 700 nm identificam que ocorre um deslocamento do pico de reflectância para comprimentos de onda maiores com o aumento de clorofila (Gitelson, 1992; Rundquist *et al.*, 1995; Lobo *et al.*, 2009). Esta condição foi confirmada no presente trabalho em que picos de reflectância foram observados em até 719 nm, correspondente a

amostra de maior valor de clorofila (Figura 3). Observou-se que a posição deste pico não segue uma relação linear de acordo com a amplitude de clorofila encontrada e sim um modelo logarítmico. Com isso é possível estabelecer um coeficiente de determinação de 94%. Por outro lado, a posição deste pico obedece uma relação linear para concentrações superiores a 50  $\mu\text{g/L}$ .

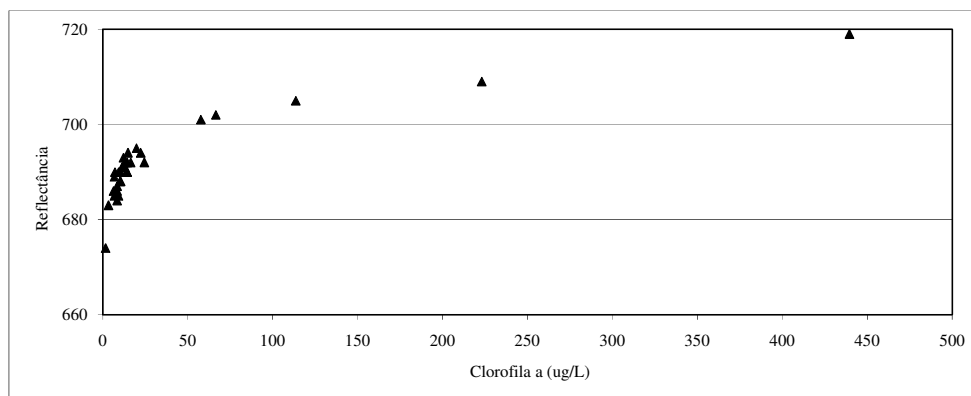


Figura 3 – Posicionamento do pico de reflectância em função da concentração de clorofila *a* em comprimentos de ondas próximo a 700 nm.

A feição de absorção presente próximo em 680 nm mostrou variações de posicionamento em relação ao comprimento de onda, mas não foi dependente da concentração da clorofila. Diante deste quadro, foi identificada significativa correlação entre a razão simples do pico de reflectância no NIR com a feição de absorção no vermelho. Neste sentido, foram testadas algumas razões simples nesta faixa espectral e foi observado que os melhores resultados foram encontrados para razão do comprimento de onda 699nm/682nm com um coeficiente de determinação de 99,5% com a concentração de clorofila. A Figura 4 mostra esta relação. Estes comprimentos de onda, provavelmente, identificam que esta faixa espectral corresponda a maior variação de reflectância devido a presença da clorofila *a*. Em concentrações muito baixas deve ser avaliado o efeito que outros componentes óticamente ativos exercem nesta faixa espectral. Elevados valores de sólidos inorgânicos em suspensão, por exemplo, podem obliterar a presença desta feição. Gitelson (1992) destaca a elevação na reflectância na faixa do verde devido a clorofila. A razão 590nm/682nm, nos dados de Passo Real, também mostrou correlação significativa com a clorofila, mas o coeficiente de determinação foi de 72%. Apesar de este coeficiente ser menor do que a razão NIR/Vermelho ainda poderia ser utilizada para relacionar com a clorofila *a*.

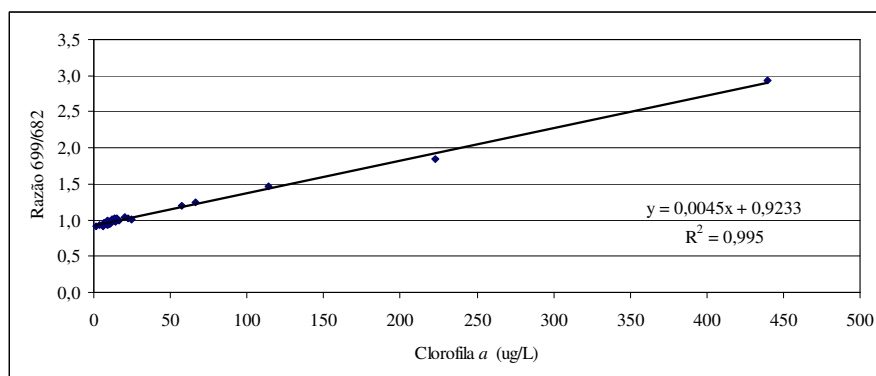


Figura 4 – Clorofila *a* e razão entre os comprimentos de onda 699 e 682 nm.

A elevação no pico de reflectância no infravermelho permitiu ser registrado em canais desta faixa espectral em imagens de satélite. A reflectância dos dados de campo para os comprimentos de ondas do centrais dos canais TM foram identificadas e relacionadas com a clorofila. Este procedimento permitiu as seguintes observações: a) a mais alta concentração de clorofila *a* fez com que houvesse uma reflectância maior na banda 4 em relação à banda 3 do TM, apesar da alta absorção de energia pela água presente na banda 4. Este efeito foi observado na estação amostral 29 e está representado na Figura 2b; b) a absorção presente na faixa do vermelho e o pico de reflectância no verde, mostrou em amostras com concentrações de clorofila *a* mais elevadas maiores valores de reflectância na banda 2 em relação a banda 3. Este efeito foi bem definido em amostras com concentrações superiores a 50  $\mu\text{g/L}$ , conforme foi identificado nas amostras 27, 22, 17, 28 e 29 que apresentaram as concentrações de clorofila *a* com valores de 57,68; 66,52; 113,67; 223,13 e 439,52  $\mu\text{g/L}$  respectivamente. Este efeito pode ser visto na Figura 2b.

A alta concentração de clorofila encontrada, principalmente no compartimento aquático definido pela drenagem do rio Ingaí, se deve, provavelmente, as condições hidrodinâmicas, climáticas e de uso da terra na área de captação que proporcionam maior disponibilidade de nutrientes do que em outras partes do reservatório. Este sistema de drenagem corresponde a um sexto da área de captação do reservatório, com isso as suas águas ao atingir o reservatório, localizado no setor próximo ao dique, podem apresentar maior período de residência. Esta área pode ser considerada a zona de transição que proporciona condições favoráveis a altos valores de clorofila

Diante destas informações buscou-se na imagem TM de 13 de outubro de 2009 o perfil espectral de algumas áreas do reservatório. Com isto foi verificado, conforme Figura 5 que há naquela data em certos locais, como era esperado, espectro de reflectância que representam altos índices de clorofila *a*. Neste sentido, verifica-se que o ponto indicado pela letra “a”, em vermelho na Figura 1 e 5, representa uma condição de alta concentração de clorofila, provavelmente com valores superiores a 300  $\mu\text{g/L}$ , pois na imagem, a reflectância da banda 4 é muito superior ao da banda 3. A letra “b” da Figura 5 e com sua localização na Figura 1 indica uma área de transição da concentração de clorofila *a*. Para o rol de dados identificados em trabalho de campo, a área indicada pela letra “b” representa locais com concentrações de clorofila intermediária, pois a reflectância da banda 2 é superior ao da banda 3, o que aponta para valores superiores a 50  $\mu\text{g/L}$ . Em um contexto diferenciado, na área indicada pela letra “c” na Figura 1, foi verificado a maior reflectância presente na banda 3 (Figura 5 “c”). Esta condição pode estar relacionada com a maior concentração de sólidos inorgânicos em suspensão visto que aquela área ainda apresenta fortes características de rio. Novo *et al.* (1989) destacam que a maior reflectância em comprimentos de ondas correspondente a esta faixa espectral está relacionada com a presença de silte vermelho em suspensão. Amostras localizadas em áreas de acesso dos rios, a exemplo da amostra 3 e 9, apontam maior reflectância na banda 3 (Figura 2b).

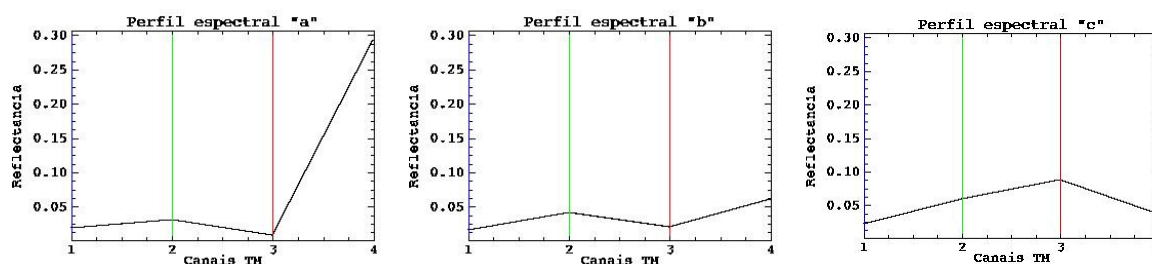


Figura 5 - Espectros de reflectância dos locais indicados, em vermelho, na Figura 1 pelas letras “a”, “b” e “c” a partir de imagem TM de 13 de outubro de 2009.

Verifica-se que há variação das características espectrais no reservatório Passo Real. Observa-se que a zona transição apresenta um padrão espectral diferenciado da apresentada no eixo principal do reservatório. Os espectros apontam que no rio a reflectância está associada com sólidos em suspensão e que a zona de transição ocorre com a elevação da clorofila *a*. Isto foi verificado nas zonas de transição do rio Ingaí, com confirmação de espectros de campo e na imagem de satélite. Nos outros dois importantes tributários, Jacuí e Jacuí-Mirim, este efeito também aparece, mas com menor intensidade e está identificado por círculos na Figura 1. É possível verificar a partir da Figura 1 que há um pequeno aumento da contribuição do canal 2 (verde) nesta fase do reservatório em relação ao rio.

A resposta diferenciada nas zonas de transição destes três tributários provavelmente se deve a vazão de cada um deles. Como a vazão do rio Jacuí é muito superior em relação ao do rio Ingaí possível que para este rio a zona de transição não tenha tido as mesmas condições de aumento de transparência da água e ter restringido as condições favoráveis como a encontradas no Ingaí. Ainda, a foz do Ingaí ocorre, onde o reservatório apresenta maior volume de água, menor velocidade e maior período de residência da água, estas condições proporcionaram o efeito sinérgico necessário ao que ocorreu naquele compartimento aquático.

#### 4. Conclusões

O período dos dados utilizados neste trabalho, que corresponde a outubro de 2009, apresentou grande variação nos perfis espectrais dos locais amostrados. A clorofila *a* mostrou grande amplitude desde 1,68 a 439,52  $\mu\text{g/L}$  e isso determinou espectros de reflectância também diferenciados. Usando-se exclusivamente a clorofila *a* como indicadora do estado trófico encontrou-se ambientes de oligotrófico a hipereutrófico conforme CETESB (2010) no reservatório Passo Real. Os espectros de reflectância mostraram-se com feições de absorção relacionadas a clorofila, sendo mais nítidas quanto maiores eram suas concentrações. O aumento da reflectância no verde, feições de absorção na faixa de 680 nm e pico de reflectância na faixa de 700 nm foram bem definidos diante a presença da clorofila *a*. A razão entre os comprimentos de onda 699nm/682nm foi a que mostrou melhor desempenho relacionado a clorofila *a*, o coeficiente de determinação atingiu 99,5 %.

Os dados de reflectância de campo nos comprimentos de ondas centrais dos canais do TM mostraram que as diferenças nas concentrações de clorofila alteram os balanços de reflectância entre estes canais. O maior valor de clorofila encontrado proporcionou maior valor de reflectância no canal 4, correspondente ao efeito esperado ao de uma vegetação. O canal 2 mostrou maior reflectância em relação ao canal 3 em amostras que o valor da clorofila era superior a 50  $\mu\text{g/L}$ . Neste contexto, a razão do canal 2 pelo canal 3 em que se tem valores superiores a 1, identifica-se como condições em que se tem, pelo menos, ambiente supereutrófico. Dados de imagem com passagem próxima ao dia de campo permitiram identificar áreas no reservatório em que se tem a reflectância da banda 2 superior ao da banda 3 e em que se tem a banda 4 muito superior ao da banda 3, o que, mostra que o uso da imagem TM permite a classificação do estado trófico do reservatório Passo Real. A imagem ainda permitiu identificar, naquele reservatório, zonas de rio, de transição e lacustre, conforme apresentado por Wetzel (2001), sendo a zona de transição a que apresentou maiores valores de clorofila *a*.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq), processo 474812/2007-1, pelo auxílio financeiro para realização deste trabalho.

## Referências Bibliográficas

ASD – Analytical Spectral Devices Inc – **FielSpec HandHeld Spectroradiometer Use'r Guide**. Boulder, CO. 2003. 72p

Calijuri, M. do C.; Alves, M. S. A.; Dos Santos, A. C. A. **Cianobactérias e Cianotoxinas em Águas Continentais**. São Carlos: RiMa, 2006. 109 p.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Classificação do Estado Trófico para reservatórios segundo Índice de Carlson Modificado – Reservatórios**. Disponível em: <[http://www.cetesb.sp.gov.br/Agua/rios/indice\\_iva\\_iet.asp](http://www.cetesb.sp.gov.br/Agua/rios/indice_iva_iet.asp)>. Acesso em: 18.nov.2010.

Gitelson, A. The peak near 700 nm 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.

Lobo, F. L.; Yunes, J. S.; Barbosa, C. C.; Londe, L. R.; Pereira Filho, W.; Theil, C. I. Novo, E. M. L. M. Propriedades da reflectância de *Microcystis aeruginosa* (Cianobacteria) manipulada em altas concentrações de pigmentos. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 14., 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. Artigos, p. 4747-4754. Disponível em: <[http://w3.ufsm.br/labgeotec/pdf/XIVSBSR/Felipe\\_de\\_Lucia%20Lobo.pdf](http://w3.ufsm.br/labgeotec/pdf/XIVSBSR/Felipe_de_Lucia%20Lobo.pdf)>. Acesso em: 18.nov.2010.

Mackinney, G. Absorption of light by chlorophyll solutions. **The Journal of Biological Chemistry**, v. 140, p. 315–322, 1941

Mattews, M. W.; Bernard, S.; Winter, K. Remote sensing of cyanobacteria-dominant algal blooms and water quality parameters in Zeekoevlei, a small hypertrophic lake, using MERIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, p. 2070-2087, 2010.

Novo, E. M. L. M.; Hanson, J. D.; Curran, P. J. The effects of sediments type on the relationship between reflectance and suspended sediment concentration. **International Journal of Remote Sensing**, v. 10, p. 1283-1289, 1989.

Panuelas, J.; Gamon, J.; Griffin, K.; Field, C. B. Assessing community type, plant biomass, pigment composition, and photosynthetic efficiency of aquatic vegetation from spectral reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 46, p. 110-118, 1993.

Rudorff, C. M.; Novo, E. M. L. M.; Galvão, L. S.; Pereira Filho, W. Análise derivativa de dados hiperespectrais medidos em nível de campo e orbital para caracterizar a composição de águas opticamente complexas na Amazônia. **Acta Amazonica**, v. 37, n. 2, p. 269-280, 2007.

Rundquist, D. C.; Schales, J. F.; Peake, J. S. The response of volume reflectance to manipulated algal concentration above bright and dark bottom at various depths in an experimental pool. **Geocarto International**, v. 10, n. 4, p. 5-14, 1995.

Steffen, C. A. Técnicas radiométricas com o spectron se-590. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 8., 1996, Salvador. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1996. Artigos, p. 969-975. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/sid.inpe.br/deise/1999/02.01.11.01/doc/T177.pdf>>. Acesso em: 18.nov.2010.

Wetzel, R. G. **Limnology: Lake and River Ecosystems**. San Diego: Academic Press, 2001. 1006 p.  
Yunes, J. S.; Araujo, E. A. C. **Protocolo para análise de clorofila-a na água**. Rio Grande: Unidade de Pesquisa em Cianobactérias da Fundação Universidade Federal de Rio Grande. [s/d].