

CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DA ÁGUA DO RESERVATÓRIO DE ITUPARARANGA, SP, A PARTIR DE IMAGENS HIPERESPECTRAIS HYPERION E ANÁLISE DERIVATIVA

*Spectral characterization of water in Itupararanga reservoir, SP, from
hyperspectral Hyperion images and derivative analysis*

REJANE ENNES¹
MARIA DE LOURDES BUENO TRINDADE GALO^{1,2}
VILMA MAYUMI TACHIBANA^{1,3}

Universidade Estadual Paulista
Faculdade de Ciências e Tecnologia

¹Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

²Departamento de Cartografia

³Departamento de Matemática, Estatística e Computação

Rua Roberto Simonsen, 305 CEP 19060-900 Presidente Prudente, SP, Brasil
rejane_e@yahoo.com.br, mlourdes@fct.unesp.br, vilma@fct.unesp.br

RESUMO

A atual disponibilidade de imagens hiperespectrais do sensor orbital Hyperion/EO1 trouxe novas perspectivas para estudos de ambientes aquáticos por possibilitar a estimativa remota de diferentes constituintes opticamente ativos (COAs) no corpo d'água. As variações na composição e concentração de COAs provocam diferentes padrões de absorção e espalhamento da radiação eletromagnética, passíveis de serem detectados usando dados hiperespectrais. Nesse contexto, foi realizada uma investigação visando a caracterização espectral da água de um reservatório destinado ao abastecimento público (Reservatório de Itupararanga), a partir de imagens Hyperion/EO1 e da técnica de análise derivativa aplicada à curvas espectrais geradas. Para isso, simultaneamente à tomada de uma imagem Hyperion/EO1, foram feitas mensurações "in situ" e coleta de água para análise laboratorial em pontos amostrais georreferenciados. Após a correção radiométrica da imagem, foram extraídos os espectros de reflectância dos pixels, para cada

estação de amostragem e as curvas obtidas foram submetidas à técnica de análise derivativa, a qual evidenciou feições de absorção e espelhamento associadas, principalmente, à presença de pigmentos fotossintetizantes. Os resultados obtidos com a imagem hiperespectral mostraram presença de fitoplâncton e atividade algal no reservatório de Itupararanga, consistente com as observações de campo.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto Hiperespectral; Análise Derivativa; Componentes Opticamente Ativos; Qualidade da Água; Sensor Hyperion.

ABSTRACT

The current accessibility to hyperspectral images of Hyperion/EO1 orbital sensor has brought new perspectives for studies of aquatic environments for allowing the remote estimative of several optically active constituents (OACs) in water body. The changes in the composition and concentration of OACs cause different patterns of absorption and scattering of electromagnetic radiation, likely to be detected using hyperspectral data. Therefore, an investigation was conducted to the spectral characterization of water of a reservoir intended for public supply (Itupararanga Reservoir), from Hyperion/EO1 images and derivative analysis technique applied to spectral curves generated. For this, simultaneously to the acquisition of a Hyperion/EO1 image, a field campaign was carried out to collect limnological data in situ in georeferenced points. After radiometric correction of the image, reflectance curves of pixels were extracted for each station and the curves obtained were subjected to the technique of derivative analysis, which revealed features of absorption and scattering mainly associated to the presence of algal pigments. The results obtained show the presence of phytoplankton and algal activity, matching the field observation.

Key words: Hyperspectral Remote Sensing; Derivative Analysis; Hyperion Sensor; Optically Active Constituents (OACs); Water Quality.

1. INTRODUÇÃO

O gerenciamento adequado dos recursos hídricos fundamenta-se, cada vez mais, no desenvolvimento de estudos que permitam conhecer a distribuição espacial e temporal dos indicadores de qualidade da água, principalmente no caso de águas continentais destinadas ao consumo da população. Em geral, a análise da qualidade da água é feita a partir de estimativas pontuais no tempo e no espaço, as quais são pouco representativas considerando a extensão dos reservatórios brasileiros. Nesse aspecto, o Sensoriamento Remoto tem sido usado para avaliar importantes indicadores da qualidade da água, devido à grande abrangência espacial e temporal de imageamento da superfície terrestre (NOVO, 2007). Contudo, uma das dificuldades para sua utilização está relacionada com a baixa resolução espectral dos principais sistemas sensores instalados em plataformas orbitais, o que restringe a possibilidade de caracterizar constituintes opticamente ativos (COAs) presentes na água, como matéria orgânica dissolvida, clorofila e sedimentos em suspensão.

Porém, os recentes avanços do Sensoriamento Remoto proporcionaram o desenvolvimento de sensores com alta resolução espectral, capazes de fornecer medidas radiométricas em bandas estreitas e contíguas para cada pixel da imagem, medindo espectros com potencial para discriminar diferentes componentes da matéria (GREEN et al., 1998). Instalado a bordo do satélite *Earth Observing One* (EO1), lançado em 21 de novembro de 2000 pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), o Hyperion foi o primeiro sensor orbital a produzir imagens hiperespectrais da superfície da Terra. Apesar desse sensor adquirir dados em 242 bandas espectrais entre 356 nm e 2577 nm, a intervalos espectrais de 10 nm, apenas 196 bandas são radiometricamente calibradas. As imagens adquiridas têm resolução espacial de 30 m e resolução radiométrica de 16 bits e a cena padrão tem largura de 7,7 km e 42 km de extensão, com a opção de aumentar o comprimento da cena para 185 km (THENKABAIL et al., 2004).

Em se tratando de ambientes aquáticos, a disponibilidade de dados hiperespectrais Hyperion amplia a possibilidade de estudos dos COAs responsáveis por alterações nas propriedades ópticas inerentes da água, principalmente nas faixas espectrais do visível e do infravermelho próximo, cujo conhecimento, contribui para o estabelecimento de técnicas para avaliar o estado trófico e produtividade do corpo d'água (HAN et al., 1994). Estudos dessa natureza permitem restringir a abrangência espectral dos dados para os comprimentos de onda entre 400 e 900 nm, principal faixa espectral de resposta da água e de seus COAs.

Com desenvolvimento desses sensores e a perspectiva de se trabalhar com feições de absorção e espalhamento em curvas de reflectância, a utilização de técnicas de espectroscopia passou a ser uma opção viável na análise dessas curvas espectrais. Dentre as técnicas propostas, a análise derivativa tem mostrado uma forte consistência teórica para estudos de ambientes aquáticos (GOODIN et al., 1993; RUNDQUIST et al., 1996; CHEN et al., 1992; BARBOSA, 2005; RUDORFF et al., 2007). A vantagem da aplicação da análise derivativa é a possibilidade de produzir dados hiperespectrais menos sensíveis às componentes que causam variações indesejáveis na radiância detectada por um sensor, que se comportam como constantes aditivas e espectralmente independentes ao longo do intervalo espectral de interesse (TSAI; PHILPOT, 1998; RUDORFF et al., 2007).

Goodin et al. (1993) desenvolveram uma pesquisa aplicando análise derivativa em curvas espectrais extraídas de corpos d'água contendo somente sólidos em suspensão ou clorofila e a mistura dos dois constituintes. Os resultados obtidos mostraram que os efeitos de alguns componentes podem ser removidos na primeira derivação e efeitos de sólidos em suspensão pela segunda derivada, produzindo uma curva que retém somente feições associadas à presença de clorofila. Assim, na análise derivativa, a reflectância espectral de um corpo d'água pode ser entendida como um sinal composto representado pela soma ponderada de três componentes: água, sólidos em suspensão e clorofila. Cada componente tem um padrão ou assinatura espectral distinto e a mistura desses padrões produz a assinatura espectral do corpo d'água, que pode ser representada como um polinômio

de ordem N , de modo que N varie diferentemente para cada componente. Então, pela diferenciação sucessiva da assinatura espectral original, é possível remover sistematicamente os efeitos dos componentes de menor ordem (GOODIN et al., 1993).

A área de estudo selecionada para o desenvolvimento da pesquisa foi o Reservatório de Itupararanga/SP, pertencente à bacia hidrográfica do Rio Sorocaba – médio Tietê/SP. Trata-se de um dos maiores mananciais de água potável da região, abastecendo aproximadamente 800.000 habitantes. Sabe-se que a principal característica desse reservatório é de possuir água de boa qualidade, de acordo com órgãos oficiais do Estado de São Paulo e, por se tratar de um manancial de abastecimento, as concentrações de componentes opticamente ativos são relativamente pequenas, dificultando sua identificação em curvas espectrais. Considerando, então, a premissa de que é possível caracterizar e estimar a concentração de COAs da água com dados hiperespectrais, o objetivo deste trabalho é utilizar imagens Hyperion/EO1 e análise derivativa, aplicada aos espectros dos pixels da cena, para caracterizar espectralmente o Reservatório de Itupararanga (SP) e identificar os componentes opticamente ativos presentes nesse corpo d'água. Além disso, pretende-se realizar a inferência das variáveis limnológicas que definiram resposta espectral nesse reservatório.

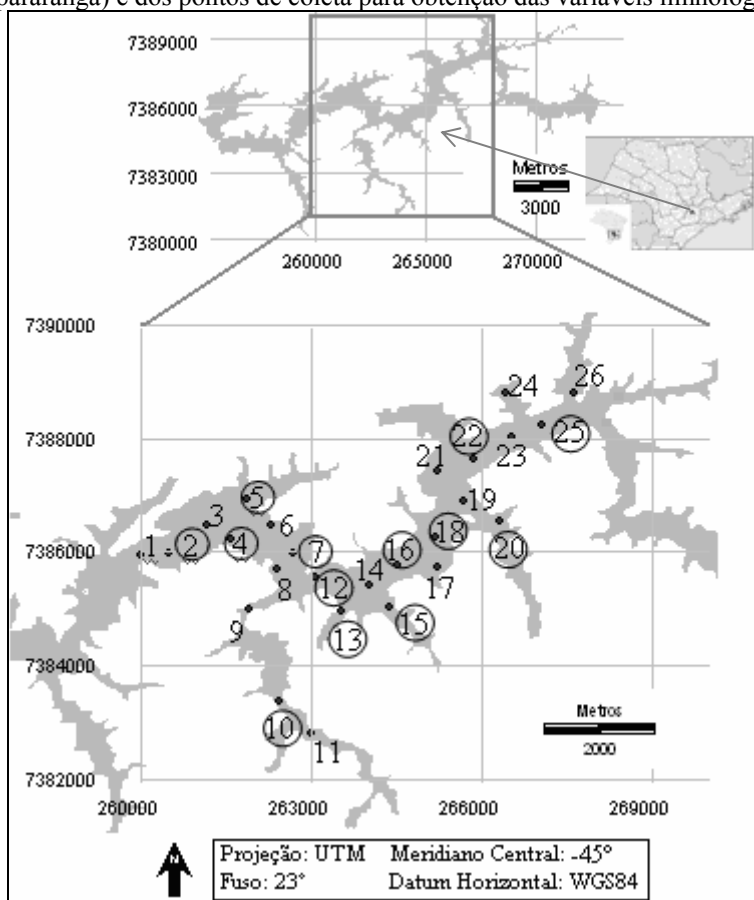
2. METODOLOGIA DE TRABALHO

2.1 Aquisição da Imagem Hyperion e dos Dados Limnológicos

O desenvolvimento da pesquisa exigiu um planejamento cuidadoso, prevendo a necessidade da tomada da imagem Hyperion simultaneamente à realização do levantamento de dados limnológicos “in situ”. A distribuição das estações de coleta das variáveis limnológicas considerou três situações: a ocorrência de águas espectralmente distintas, a entrada dos principais afluentes e as áreas marginais do reservatório. No total, foram levantados 26 pontos de coleta, porém, em apenas 13 elementos amostrais foi possível a análise da variável “pigmentos totais” (medida indireta da variável clorofila *a*). A campanha de campo ocorreu em 09 de outubro de 2007 no mesmo dia da aquisição da imagem, que abrangeu a parte central do reservatório de Itupararanga.

A Figura 1 mostra a localização geográfica da área de estudo e das 26 estações de amostragem na parte central do reservatório, coberta pela imagem Hyperion. Os pontos circulados correspondem aos locais, nos quais, o volume da água filtrado viabilizou a análise da variável “pigmentos totais”.

Figura 1 - Localização da área de estudo no Estado de São Paulo (reservatório de Ituparanga) e dos pontos de coleta para obtenção das variáveis limnológicas.



Em cada estação de amostragem, foram medidos: profundidade Secchi (penetração vertical da luz solar na coluna d'água), pH, condutividade elétrica, temperatura, sólidos em suspensão, sólidos dissolvidos, sólidos totais, oxigênio dissolvido, turbidez e pigmentos totais. Para obtenção das variáveis sólidos em suspensão, dissolvidos e totais, utilizou-se a metodologia descrita em Eaton et al. (1998) e, para pigmentos totais, foi adotado o método espectrofotométrico, descrito por Gotterman (1978). As demais variáveis foram obtidas por métodos diretos usando equipamentos apropriados.

O sistema de posicionamento *Global Positioning System* (GPS) foi utilizado para registrar a localização geográfica dos pontos de amostragem. O emprego desses

receptores com precisão posicional da ordem de 10m (SEEBER, 2003) é compatível com a resolução espacial de 30 m da imagem Hyperion (PEREIRA *et al.*, 2007).

2.2 Pré-Processamento da Imagem Hyperion

As operações de pré-processamento aplicadas à imagem incluíram a remoção de pixels anômalos, correção atmosférica, ajuste geométrico e utilização de uma máscara para isolar o corpo d'água. A remoção de pixels anômalos foi necessária para minimizar o efeito de “faixas verticais escuras contínuas” (*stripes*) que ocorrem perpendicularmente à linha de varredura. Nesse processo, foi utilizada a técnica proposta por Goodenough *et al.* (2003) e Han *et al.* (2002), na qual as respostas radiométricas dos pixels das faixas com ruído são substituídas pela média de seus vizinhos na direção horizontal.

Para a calibração radiométrica e correção dos efeitos atmosféricos foi utilizado o aplicativo FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*), disponível no *software* ENVI 4.4. A correção radiométrica implementada no FLAASH se baseia no código MODTRAN4, cujo modelo procura minimizar os efeitos de espalhamento e absorção dos gases da atmosfera. Os parâmetros usados na correção referem-se às especificações do instrumento sensor, condições de aquisição da imagem (latitude e longitude central, elevação média da cena, tipo e altitude do sensor, tamanho do pixel da imagem, data e hora da aquisição da cena) e alguns parâmetros atmosféricos relativos ao modelo atmosférico adotado (modelo de aerossóis, visibilidade e comprimento de onda da feição de absorção pela água na atmosfera). Dentre as opções de modelos atmosférico e aerossóis, implementados no FLAASH, foram selecionados os que melhor representaram a região de interesse, nesse caso, os modelos tropical e rural, respectivamente.

O georreferenciamento da imagem foi realizado no *software* ENVI, utilizando-se 14 pontos de controle sobre feições correspondentes entre a imagem Hyperion e uma cena ETM+/Landsat georreferenciada, que serviu como referência. Na transformação geométrica foi usado um polinômio do primeiro grau, adotando-se o sistema de projeção UTM, datum WGS-84 e zona UTM 23. O erro residual foi 0,3 unidades de pixel, e a amostragem dos valores de reflectância de superfície dos pixels da cena Hyperion foi feita pelo método de vizinho mais próximo. À imagem georreferenciada foi aplicada uma máscara, delimitando apenas o corpo d'água.

Nas coordenadas correspondentes às estações de coleta, posicionadas sobre a imagem georreferenciada Hyperion, foram lidos os valores de reflectância de superfície obtidos na correção radiométrica e extraídas curvas espectrais de cada ponto, a partir da média de 3x3 pixels. Para suavizar as curvas, evitar a presença de possíveis ruídos remanescentes e reduzir as oscilações radiométricas ainda observadas nos espectros gerados na faixa espectral de 436 a 894 nm (definindo 46 bandas espectrais estreitas e contínuas) foi aplicado um filtro de média móvel simples com três pontos (bandas), conforme proposto por Tsai e Philpot (1998).

2.3 Análise Derivativa e de Correlação

A técnica de análise derivativa foi aplicada às curvas espectrais filtradas, na faixa espectral de 436 a 894 nm. No cálculo da primeira derivada do espectro de reflectância em relação ao comprimento de onda λ , para um determinado ponto n , foi realizada uma aproximação numérica (central ou simétrica, neste caso) por um esquema de diferenças finitas. A equação 1 foi usada para estimar a primeira derivada da curva espectral obtida para cada ponto (conforme descrito em RUDORFF et al., 2007):

$$\left. \frac{ds}{d\lambda} \right|_n \approx \frac{\rho(\lambda_{n+1}) - \rho(\lambda_{n-1})}{2\Delta\lambda}, \quad (1)$$

na qual $\Delta\lambda$ é a separação entre bandas adjacentes ($\Delta\lambda = \lambda_j - \lambda_i$ para $\lambda_j > \lambda_i$, com o intervalo entre as bandas constante) e $\rho(\lambda_n)$ é o valor do espectro na faixa de comprimento de onda λ_n . A segunda derivada foi obtida aplicando-se a equação 1 na curva resultante da primeira derivada.

Após aplicação da técnica de análise derivativa, os dados resultantes desses processamentos e os originais foram correlacionados com as variáveis limnológicas que apresentam propriedades ópticas, especificamente a transparência da água (a partir da profundidade de Secchi) e COAs medidos em laboratório. As faixas espectrais que proporcionaram melhores resultados de correlação foram testadas em modelos de regressão linear simples para estimar as concentrações de COAs. Para o cálculo dos coeficientes de correlação de Pearson, foram utilizados 13 pontos de coleta para pigmentos totais e 26 pontos de coleta para as demais variáveis.

A validação do modelo de regressão foi feita por meio de uma adaptação do método de múltiplas sub-amostras denominado *jackknife*, proposto por Lachenbruch (1967, apud NEOPHYTOU et al. 2000). O *jackknife* é uma técnica estatística amplamente aceita na validação de modelos de classificação e é particularmente útil para pesquisas que envolvem amostras de tamanho pequeno, pois permite que todas as observações sejam utilizadas na estimação dos parâmetros do modelo (NEOPHYTOU et al., 2000, p.20).

O método baseia-se no princípio “*leave-one-out*”, que consiste em separar uma observação da amostra original e estimar os coeficientes do modelo com base no restante da amostra ($n-1$) e, em seguida, estimar a observação reservada utilizando a nova equação. O procedimento é repetido para toda a amostra (n vezes), de maneira que todas as observações sejam estimadas por modelos cujos parâmetros foram estimados com base nas demais. O percentual de classificações corretas é acumulado para todos os elementos amostrais da amostra, indicando a precisão global do modelo.

A adequação desse método foi necessária por não se conhecer o intervalo de confiança do valor real de cada elemento amostral retirado da amostra original, inviabilizando o cálculo da precisão global do modelo. Inicialmente, foi retirado um elemento amostral, obtendo-se um modelo de regressão para pigmentos totais com

os elementos que restaram na amostra. Em seguida, o intervalo de predição (IP) foi construído para a estimação da concentração de pigmentos totais daquele elemento amostral que não fez parte dos dados que geraram o modelo. Esse procedimento foi repetido até que cada um dos elementos amostrais fossem retirados da amostra.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise dos Espectros de Reflectância do Hyperion

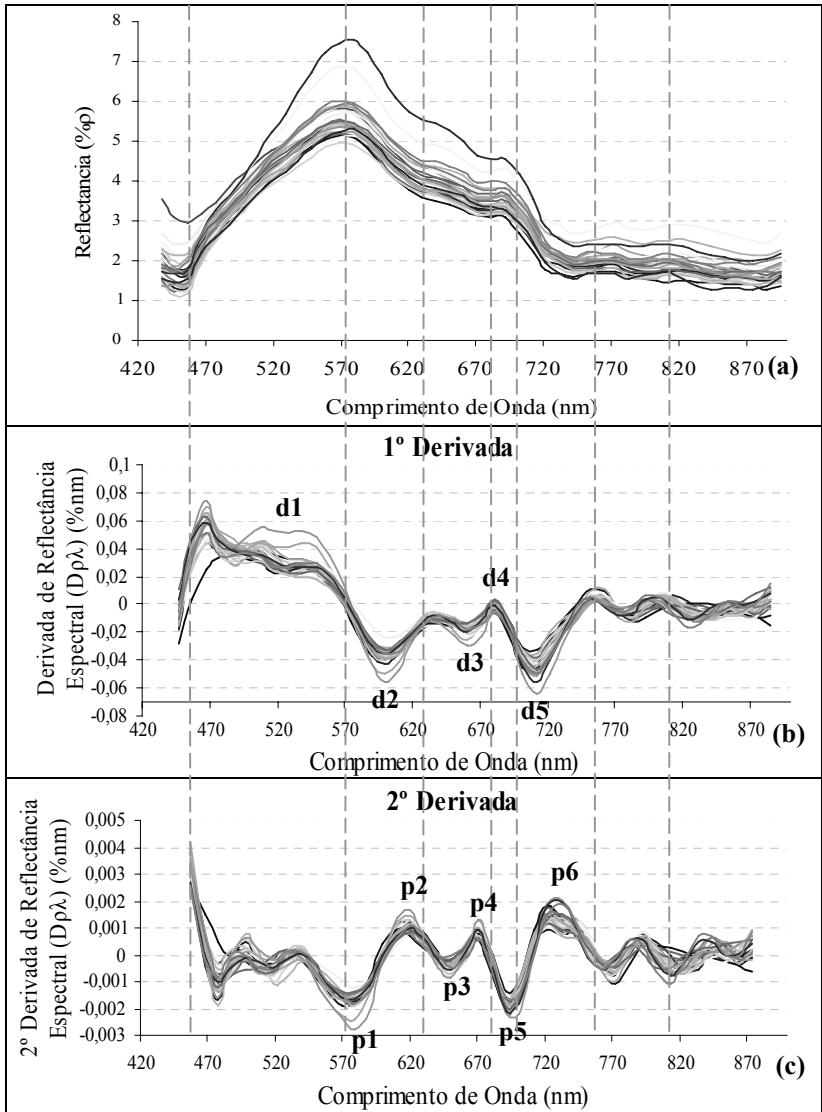
As curvas espectrais extraídas da imagem Hyperion nos pontos de coleta de variáveis limnológicas, assim como as curvas resultantes da aplicação da primeira e segunda derivadas, são apresentadas nas Figuras 2a, 2b e 2c, respectivamente. Nessas figuras, as linhas verticais tracejadas referem-se aos locais espectrais nos quais são definidas feições específicas que indicam a ocorrência de COAs na água (GOODIN et al., 1993; HAN et al., 1994; RUNDQUIST et al., 1996; BARBOSA, 2005, entre outros), enquanto que para a primeira e segunda derivadas as feições espectrais definidas a partir da curva original estão identificadas pelas letras *d* e *p*, respectivamente.

As curvas originais da imagem Hyperion do reservatório de Itupararanga (Figura 2a) definem espectros que, aparentemente, apresentam forma similar, com baixa reflectância na faixa espectral considerada, com um valor máximo em torno de 6%, conforme esperado para alvos dessa natureza (GOODIN et al., 1993). A baixa reflectância da água observada na faixa dos menores comprimentos de onda (entre 436 e 450 nm, principalmente) tem sido atribuída, por alguns autores, à forte absorção pela matéria orgânica dissolvida e clorofila (GITELSON, 1992; KIRK, 1994). Nota-se um pico de reflectância máxima no verde entre 560 a 570 nm, um pequeno ponto de inflexão em torno de 630 nm, uma região de absorção no vermelho (671 nm) e picos de reflectância no infravermelho próximo (700 nm) e, com menor magnitude, em 770 e 820 nm. Essas variações nos valores de reflectância mostram-se similares àquelas observadas nas curvas obtidas por Rundquist et al. (1996), Han et al. (1994) e Kirk (1994) para corpos d'água com presença predominante de clorofila *a*. Assim, em uma análise preliminar das curvas espectrais originais, considerou-se que a radiação eletromagnética, ao atravessar a camada superior do corpo d'água, foi absorvida e espalhada principalmente pelo fitoplâncton.

Na curva de primeira derivada (Figura 2b) os picos de absorção e reflexão são definidos nas regiões espectrais de maior inclinação da curva de reflectância original, enquanto que os locais de cruzamento com o eixo das abscissas (valor nulo na ordenada) correspondem aos maiores picos de absorção ou espalhamento da reflectância original (Figura 2a). De maneira análoga, os picos de absorção e reflexão da curva de primeira derivada referem-se aos valores nulos na curva de segunda derivada (Figura 2c) e as feições definidas nessa curva representam regiões espectrais de maior inclinação da curva de primeira derivada. Aparentemente, para

curvas de segunda derivada, os resultados mostram um realce das feições características das curvas de primeira derivada (BRAGA, 1998).

Figura 2 - Espectros da água extraídos da imagem Hyperion: (a) curvas espectrais originais; (b) curvas resultantes da aplicação da primeira derivada e (c) da segunda derivada.



Analisando a Figura 2b, observa-se um ponto de cruzamento no eixo das abscissas, em aproximadamente 570 nm, correspondente ao pico de maior valor de reflectância no espectro original na região do verde. Mesmo o pico de reflexão de menor proporção, que ocorre na curva original, em 690 nm, define um ponto de cruzamento no eixo das abscissas, na região *d3* (654 nm) a *d4* (671 nm). Segundo Goodin et al. (1993), o pico definido em *d4* na curva de primeira derivada indica a região em que a clorofila apresenta melhor distinção dos outros componentes opticamente ativos. Já a feição de absorção representada em *d5*, ocorre tanto na presença de clorofila, quanto na presença de sólidos em suspensão, sendo considerada menos efetiva para discriminar os efeitos ocasionados por esses dois componentes. É possível visualizar ainda, pontos de inflexão em 630 e 751 nm que correspondem a feições de absorção nos espectros de reflectância originais. Nota-se que esse comportamento também ocorre, de modo mais sutil, para a feição de absorção em 800 nm.

Nas curvas de segunda derivada (Figura 2c) que, de acordo com Goodin et al. (1993), mantêm realçadas feições que indicam a presença de clorofila na água, verificam-se feições expressivas nas regiões denominadas *p1*, *p2*, *p3*, *p4* e *p5*. Comparando a curva de segunda derivada com o espectro de reflectância original (Figura 2a), pode-se dizer que *p1* realça o pico de reflectância máxima na região do verde da curva original; *p2* mostra uma suave feição de absorção centrada em 615 nm; *p3* indica um aumento sutil na curva de reflectância original em 640 nm; *p4* mostra a feição de absorção causada pela absorção no vermelho na curva original em 671 nm; *p5* destaca o pico de reflectância no infravermelho próximo e *p6* realça a feição de absorção com maior profundidade em 721 nm. Em concordância com o que foi exposto por Goodin et al. (1993), percebe-se que as regiões indicadas nesses cinco pontos apresentam fortes relações com as curvas de reflectância original, definindo um comportamento aparentemente associado à presença de clorofila *a*. A curva de segunda derivada destacou também uma feição espectral em comprimentos de onda maiores que 820nm, não descrita pelo referido autor.

3.2 Correlação das Respostas Espectrais com as Variáveis Limnológicas

Para caracterizar as variáveis limnológicas analisadas no reservatório de Itupararanga, a Tabela 1 apresenta as principais estatísticas descritivas das medidas amostradas “in situ”. Nessa tabela, a coluna denominada Ref* (Referência) indica os valores máximos permitidos pela legislação, de acordo com a Resolução 357 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), para águas destinadas ao abastecimento doméstico, recreação e irrigação de hortaliças (Classe II), em que se enquadra o reservatório.

Tabela 1 – Síntese da estatística descritiva das variáveis limnológicas coletadas.

Variáveis	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	Ref*
pH	7,411	0,177	7,067	7,773	6,0 a 9,0
condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	91,558	0,323	86,200	97,500	-
turbidez (NTU)	3,702	0,528	2,370	4,640	100 NTU
transparência (m)	1,427	0,185	1,000	1,700	-
O₂ dissolvido (mg/L)	5,646	0,354	5,100	6,700	> 5 mg/L
temperatura água (°C)	23,158	0,950	21,900	25,100	-
sólidos dissolvidos (mg/L)	0,042	0,016	0,022	0,076	-
sólidos suspensos (mg/L)	0,472	0,129	0,155	0,805	-
sólidos totais (mg/L)	0,515	0,131	0,191	0,861	500 mg/L
pigmentos totais ($\mu\text{g}/\text{L}$)	0,762	1,043	3,745	7,865	

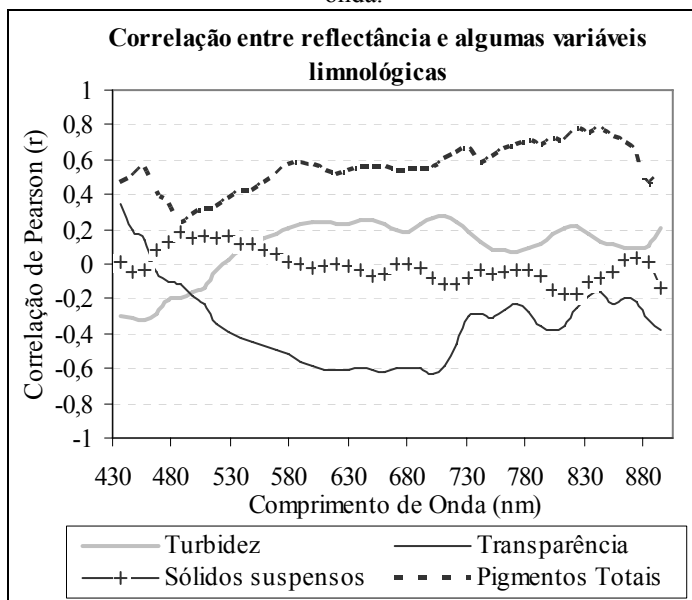
* valores de referência segundo a resolução CONAMA 357/2005 para classe II

Analisando os parâmetros de referência (Ref*) verifica-se que, para as variáveis analisadas, a represa encontra-se dentro das especificações que definem padrões de qualidade da água para abastecimento público. A Tabela 1 permite verificar ainda que as concentrações de sólidos em suspensão, turbidez e pigmentos totais, componentes opticamente ativos considerados neste estudo, apresentam valores significativamente baixos. Normalmente, em estudos similares, os autores procuram estimar COAs em concentrações muito maiores do que as observadas nesse reservatório (RUNDQUIST et al., 1996; HAN et al., 1994 e KIRK, 1994).

A Figura 3 mostra os correlogramas obtidos entre os valores de reflectância originais, na faixa espectral entre 436 e 894 nm (46 bandas do Hyperion) e as variáveis limnológicas avaliadas. Para sólidos em suspensão e turbidez, observam-se valores não significativos de correlação, os quais podem ser explicados pelas baixas concentrações e variabilidade desses constituintes no reservatório. As maiores correlações positivas com a reflectância foram obtidas para pigmentos totais, o que é corroborado pelos valores negativos de correlação entre reflectância e transparência da água. De fato, pigmentos totais e profundidade de Secchi são inversamente correlacionados, ou seja, quanto maior for a concentração de pigmentos na água, menor será a sua profundidade de Secchi.

Os altos valores de correlação para pigmentos totais, nos comprimentos de onda de 436 nm e 477 nm (Figura 3), estão associados à clorofila (GITELSON, 1992; RUNDQUIST et al. 1996). A presença predominante de clorofila na água também provoca um pico de reflectância na faixa do verde, consistente com os altos valores de correlação observados em torno de 589 nm. Os valores de correlação aumentaram na direção do infravermelho próximo (823 nm), onde predominam efeitos de espalhamento por células algais (RUNDQUIST et al., 1996).

Figura 3 – Correlação entre valores de reflectância medidos pelo sensor Hyperion/EO1 e algumas variáveis limnológicas em função do comprimento de onda.

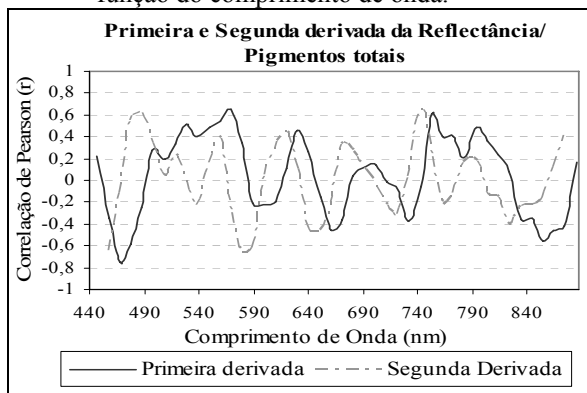


Os COAs (pigmentos totais e sólidos suspensos) também tiveram sua correlação avaliada com os espectros resultantes da aplicação de análise derivativa. A Figura 4 apresenta os correlogramas entre primeira e segunda derivadas da reflectância com pigmentos totais.

Para a primeira derivada, verificaram-se maiores valores de correlação nos comprimentos de onda iniciais, principalmente em 467 nm ($r = -0,7$) e 569 nm ($r = +0,65$). Sabe-se que nesses comprimentos de onda, a presença de clorofila *a* na água provoca picos de absorção e de reflectância que são claramente visualizados nas curvas espectrais originais obtidas na imagem Hyperion (Figura 2a). Outro pico acentuado de correlação ocorreu em 752 nm ($r > +0,6$) devido ao espalhamento por células algais.

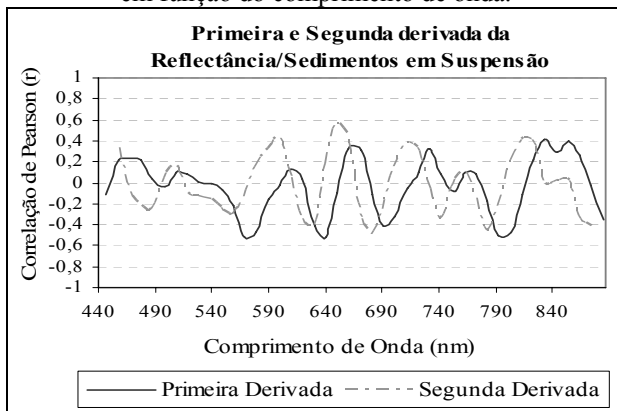
Os resultados para a curva de segunda derivada mostraram correlação positiva ($r = +0,65$) para a feição de absorção formada na curva original entre 436 e 487 nm. Um valor significativo de correlação ($r = -0,66$) também foi observado em 579 nm, onde a curva de segunda derivada possui uma feição denominada *p1* (Figura 2c), associada ao pico de reflectância máxima na faixa do verde.

Figura 4 – Correlação entre os valores de reflectância do sensor Hyperion resultantes da aplicação da primeira e segunda derivadas com pigmentos totais, em função do comprimento de onda.



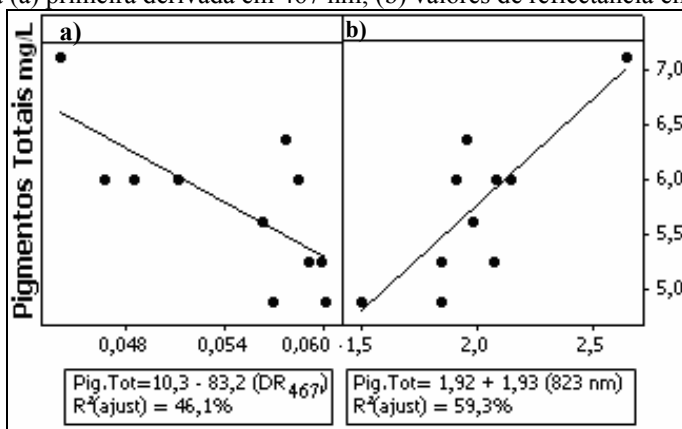
As correlações entre primeira e segunda derivadas da reflectância com a concentração de sólidos em suspensão não se mostraram estatisticamente significantes (Figura 5). O melhor resultado obtido foi com a segunda derivada em 650 nm ($r = +0,56$), na faixa do vermelho, indicada por vários autores como a mais sensível às variações de sólidos em suspensão (CHEN et al., 1992; GOODIN et al., 1993). No geral, ao se comparar os correlogramas das Figuras 4 (pigmentos totais) e 5 (sólidos em suspensão), verifica-se que o reservatório de Itapararanga apresentou resposta espectral influenciada predominantemente por pigmentos totais, na data de aquisição da imagem Hyperion.

Figura 5 – Correlação entre os valores de reflectância do sensor Hyperion resultantes da aplicação da primeira e segunda derivada com sólidos em suspensão, em função do comprimento de onda.



Considerando então a maior influência espectral de pigmentos totais no reservatório, foram testados apenas modelos de regressão para relacionar dados espectrais com as concentrações desse constituinte. Para tal análise, foi necessário desconsiderar dois elementos amostrais, que se comportavam como valores atípicos (*outliers*), não permitindo um ajuste adequado dos modelos. Foram testados vários modelos de regressão linear simples (MONTGOMERY et al., 2001), com base nos maiores valores de correlação em certos comprimentos de onda (bandas) do Hyperion, visualizados nos correlogramas de pigmentos totais (Figura 3 e 4). A Figura 6 mostra os modelos de regressão linear que melhor descrevem a variável pigmentos totais. Verifica-se, pelos valores de R^2 (coeficiente de determinação), que ambos os modelos explicam menos de 60% da variação em pigmentos totais. Uma possível justificativa para esses baixos valores de correlação é a dificuldade em estabelecer relações entre os parâmetros de reflectância espectral e COAs presentes em concentrações muito baixas e com pouca variabilidade.

Figura 6 - Modelo de regressão linear para estimativa de pigmentos totais com dados da (a) primeira derivada em 467 nm; (b) valores de reflectância em 823 nm.



Verificou-se também que, apesar dos valores de correlação para os dados de análise derivativa terem sido satisfatórios (Figura 4), a maior correlação encontrada foi entre a banda espectral centrada em 823 nm (B823) e pigmentos totais (PT). A esse conjunto de dados foram aplicados testes estatísticos e posteriormente, realizada sua validação estatística. A equação de regressão e testes estatísticos considerados na análise são apresentados na Tabela 2, para um nível de significância de 10%.

Tabela 2 – Modelo de regressão a Banda 823 x Pigmentos Totais e testes estatísticos.

Equação: PT = 1,923 + 1,928 (B823)	
R²_{ajust}	59,3%
F	15,55
DW	2,43
AD	0,25

Observa-se, pelo coeficiente de determinação (R^2) que o modelo de regressão estimado explica 59,3% dos dados. Na análise de variância, o valor encontrado para a estatística F foi maior que o valor crítico tabelado ($F_{1,9}(0,10) = 3,36$), indicando que há evidências estatísticas que a concentração dos pigmentos totais está relacionada com a banda espectral centrada em 823 nm. Com relação à análise de resíduos, o valor do teste de Durbin Watson (DW) encontrado foi maior que o tabelado, indicando que os resíduos não são autocorrelacionados, e pelo teste de Anderson-Darling (AD), verificou-se que eles têm distribuição normal (p-valor = 0,674), atendendo assim as exigências do modelo de regressão linear.

3.3 VALIDADE DO MODELO

A Tabela 3 apresenta o intervalo de predição (IP) para a estimativa de pigmentos totais utilizando os modelos de validação calculados com a aplicação da adaptação do método *jackknife*.

Tabela 3 – Intervalos de predição para pigmentos totais a partir dos modelos de validação com a aplicação do método *jackknife* adaptado.

Elemento amostral excluído	Modelos de Validação PT = $\beta_0 + \beta_1$ (B823)	ρ % (B823)	PT – medido (mg/L)	Limite inferior IP	Limite superior IP
1	<i>PT = 1,796 + 1,971(B823)</i>	1,908	5,992	4,710	6,409
2	<i>PT = 2,240 + 1,799(B823)</i>	1,841	4,868	4,766	6,339
3	<i>PT = 1,786 + 1,976(B823)</i>	1,903	5,992	4,699	6,394
4	<i>PT = 1,763 + 2,002(B823)</i>	1,492	4,868	3,650	5,852
5	<i>PT = 1,932 + 1,920(B823)</i>	2,081	5,992	5,031	6,824
6	<i>PT = 2,330 + 1,710(B823)</i>	2,647	7,116	5,431	8,290
7	<i>PT = 1,826 + 2,010(B823)</i>	2,073	5,243	5,246	6,743
8	<i>PT = 2,042 + 1,879(B823)</i>	1,838	5,243	4,607	6,280
9	<i>PT = 1,937 + 1,926(B823)</i>	1,982	5,617	4,869	6,644
10	<i>PT = 1,922 + 1,927(B823)</i>	1,955	6,367	4,876	6,370
11	<i>PT = 1,905 + 1,939(B823)</i>	2,138	5,992	5,147	6,959

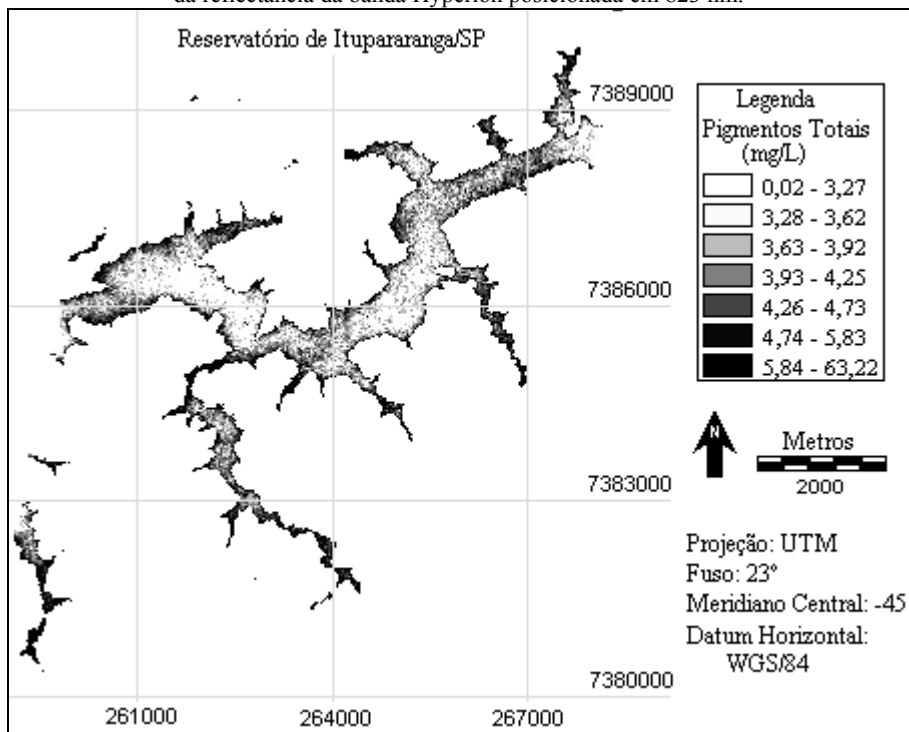
Conforme se observa na Tabela 3, os valores medidos ‘in situ’ de pigmentos totais para todos os elementos amostrais apresentam-se incluídos no Intervalo de Predição (IP) dos modelos, com exceção do ponto 7 que embora o valor de

pigmentos totais não esteja no intervalo, ficou muito próximo do limite inferior, indicando uma ótima precisão do modelo

Para uma aceitação mais significativa do modelo original, realizou-se uma análise dos coeficientes β_0 e β_1 de cada modelo de validação, observando se tais coeficientes pertencem ao Intervalo de Confiança (IC) do modelo original, considerando $\alpha = 10\%$. Sendo os intervalos de confiança β_0 e β_1 , expressos por $0,29456 < \beta_0 < 4,139$ e $0,8222 < \beta_1 < 3,033$, verificou-se que todas as estimativas dos coeficientes β_0 e β_1 estão contemplados no Intervalo de Confiança do modelo original. Esses aspectos, aliados aos resultados obtidos nas análises de variância dos coeficientes β_1 e β_0 em relação ao modelo original e de resíduos dos onze modelos de validação gerados, levam à aceitação do modelo original, que descreve a relação da banda 823 nm do sensor Hyperion com pigmentos totais.

Considerando-se válido o modelo, apresenta-se na Figura 7, a distribuição espacial da variabilidade na concentração de pigmentos totais no Reservatório de Itupararanga, estimada a partir da aplicação do modelo de regressão, segundo a reflectância de superfície medida em 823 nm.

Figura 7 - Distribuição espacial da concentração de pigmentos totais ($\mu\text{g/L}$), estimada a partir da reflectância da banda Hyperion posicionada em 823 nm.



Observando-se os valores definidos nos intervalos de concentração de pigmentos totais (Figura 7), percebe-se que as menores concentrações em pigmentos totais estão distribuídas no corpo central do reservatório, onde se tem maior fluxo d'água em direção a barragem (sentido oeste). A concentração de pigmentos totais aumenta nos tributários e onde o canal se estreita, além das áreas marginais e a leste do reservatório, região mais próxima do rio Sorocaba.

4. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos confirmam o pressuposto inicial da pesquisa de que a imagem adquirida pelo sensor hiperespectral Hyperion tem potencial para detecção e mapeamento de COAs presentes em um corpo d'água de boa qualidade (destinado ao abastecimento público), neste caso o reservatório de Ituparanga. A água desse reservatório é de boa qualidade, porém, os resultados obtidos revelaram a presença de fitoplâncton e atividade algal.

O fato da resolução espectral do sensor Hyperion ser em torno de 10 nm pode ter dificultado a caracterização de algumas feições espectrais da água que ocorrem em comprimentos de onda específicos. Essa particularidade, possivelmente pode ter generalizado a resposta espectral em certos intervalos espectrais, inibindo a indicação do COA predominante no reservatório. Por outro lado, a análise derivativa aplicada às curvas de reflectância de superfície, geradas a partir da imagem Hyperion, mostrou-se eficiente para realçar feições espectrais, tanto na primeira, quanto na segunda derivadas, destacando feições de absorção e espalhamento que não foram muito evidentes nas curvas espectrais originais. As correlações entre valores de reflectância original e resultantes de análise derivativa com as variáveis limnológicas mostraram maiores valores para a variável pigmentos totais (medida indireta de clorofila *a*).

Provavelmente, devido à maior homogeneidade na resposta espectral nos pontos analisados no reservatório de Ituparanga, em decorrência da baixa variação na concentração de seus COAs e do pequeno número de estações de amostragem, houve dificuldade na estimativa mais acurada da concentração desses constituintes. Os modelos lineares de regressão que permitiram uma estimativa da concentração de pigmentos totais foram obtidos com os valores de reflectância original em 823 nm e com a primeira derivada em 467 nm. A representação espacial resultante da aplicação do modelo de regressão para os valores de reflectância em 823 nm mostrou-se consistente, pelo fato das maiores concentrações de pigmentos totais ocorrerem nas margens e nos principais afluentes do reservatório, onde a velocidade da água diminui, facilitando a criação de comunidades fitoplanctônicas.

O fato dos dados hiperespectrais serem sensíveis à presença de pigmentos totais (medida indireta de clorofila *a*) no reservatório, mesmo em concentrações relativamente baixas, revela um potencial ainda pouco testado. Os trabalhos desenvolvidos por outros autores foram realizados em ambientes aquáticos bem definidos e/ou controlados, ou em sistemas complexos, como os da Amazônia, que possuem alta concentração de COAs. Diante disso, sugere-se a continuidade desses

estudos para aumentar a precisão das estimativas e para testar novas metodologias na análise de imagens hiperespectrais orbitais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às seguintes instituições e pessoas: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo auxílio financeiro destinado a essa pesquisa na forma de uma bolsa de estudo; aos pesquisadores da Faculdade de Ciências Agrárias – Unesp, Campus de Botucatu, Dr. Eduardo Negrisoli e Dr. Marcelo Rocha Corrêa, por realizarem a coleta e análise limnológica nos elementos amostrais definidos no reservatório de Itupararanga e ao Dr. Lênio S. Galvão, pesquisador do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), que instruiu todo o processo de pré-processamento da imagem hiperespectral Hyperion.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARBOSA, C. C. F. *Sensoriamento remoto da dinâmica da circulação da água do sistema planície de Curuai/Rio Amazonas*. São José dos Campos, 2005, 255, Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
- BRAGA, C. Z. F. *Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da concentração de clorofila-a, transparência e profundidade da água na Lagoa de Araruama*. Niterói. 1998, 147, Tese (Doutorado em Geociências) Universidade Federal Fluminense - UFF.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução CONAMA n. 357, de 17 de março de 2005*. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama>>. Acesso em: 01 de fevereiro de 2008.
- CHEN, Z. et al. *Derivative reflectance spectroscopy to estimate suspended sediment concentration*. St. Paul, 1992, v. 40, p. 46-59, Remote Sensing Environment.
- EATON, A. D.; CLESCERI, L. S., GREENBERG, A. E. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 1998, 19 ed., Ed. Maryland: American Public Health Association.
- GITELSON, A. *The peak near 700 nm on radiance spectra of algae and water: relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration*. nov. 1992, v. 13, n. 17, p. 3367-3373. International Journal of Remote Sensing.
- GOODIN, D. G. et al. *Analysis of suspended solids in water using remotely sensed high resolution derivate spectra*. Manhattan, v. 59, n. 4, p. 505-510, abr. 1993, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.
- GOODENOUGH, D. G. et al.. *Processing Hyperion and ALI for forest classification*. 2003, v. 41, n.6, p. 1321- 1331, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing

- GOTTERMAN, H. L. *Methods for physical and chemical analysis of fresh waters*. Oxford, 1978, 2.ed, 213 p., Blackwell Scientific - Limnological Institute.
- GREEN, R. O. et al. *Imaging Spectroscopy and the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS)*. St. Paul, jul. 1998, v. 65, n. 3, p. 227-248, Remote Sensing of Environment.
- HAN, L. et al. *The spectral responses of algal chlorophyll in water with varying levels of suspended sediment*. Abingdon, v. 15, 1994, n. 18, p. 3707-3718, International Journal of Remote Sensing.
- HAN, T. et al. *Detection and correction of abnormal pixels in Hyperion images*, Toronto, 2002, p. 1327-1330, In: Geoscience and Remote Sensing Symposium - IEEE International.
- KIRK, J.T.O. *Light & Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*, London, Cambridge University Press, 1994, v. 2, p. 507.
- MONTGOMERY, D. C., PECK, E. A., VINING, G. G. *Introduction to linear regression analysis*. New York : John Wiley & Sons, 2001, 3rd. ed.
- NEOPHYTOU, E.; CHARITOU, A.; CHARALAMBOUS, C. *Predicting corporate failure: empirical evidence for the UK*. University of Southampton, Sep. 2000, Working Paper.
- NOVO, E. *Monitoramento de quantidade e qualidade da água e Sensoriamento Remoto*, São Paulo, 2007, p.1-20, In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 17. – Anais: Associação Brasileira de Recursos Hídricos.
- PEREIRA, A.C.F. et al. *Amostragem em corpos d'água: Definição de elementos amostrais, posicionamento e coleta de dados*, Presidente Prudente, 2007, p. 866-874, In: V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, 2007. Anais do V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésica e II Simpósio Brasileiro de Geomática.: Editora UFPR.
- RUDORFF, C. M. et al. *Análise derivativa de dados hiperespectrais medidos em nível de campo e orbital para caracterizar a composição de águas opticamente complexas na Amazônia*, 2007, v. 37, n. 2, p. 269-280, Acta Amazônica.
- RUNDQUIST, D. C. et al. *Remote measurement of Algal Chlorophyll in surface waters: the case for the first derivative of reflectance near 690 nm*. Lincoln, 1996, v. 62, n. 2, p. 195-200, Photogrammetric Engineering e Remote Sensing.
- SEEBER, G. *Satellite Geodesy*. Water de Gruyter. New York, v. 2, p. 589, 2003.
- THENKABAIL, P. S. et al. *Hyperion, IKONOS, ALI and ETM plus sensors in the study of African rainforests*, 2004, v. 90, p. 23-43. Remote Sensing of Environment.
- TSAI F., PHILPOT W. *Derivative Analyses of Hyperspectral Data.*, St. Paul, 1998, v. 66, p. 41-51, Remote Sensing Environment.

(Recebido em agosto de 2008. Aceito em outubro de 2009.)