



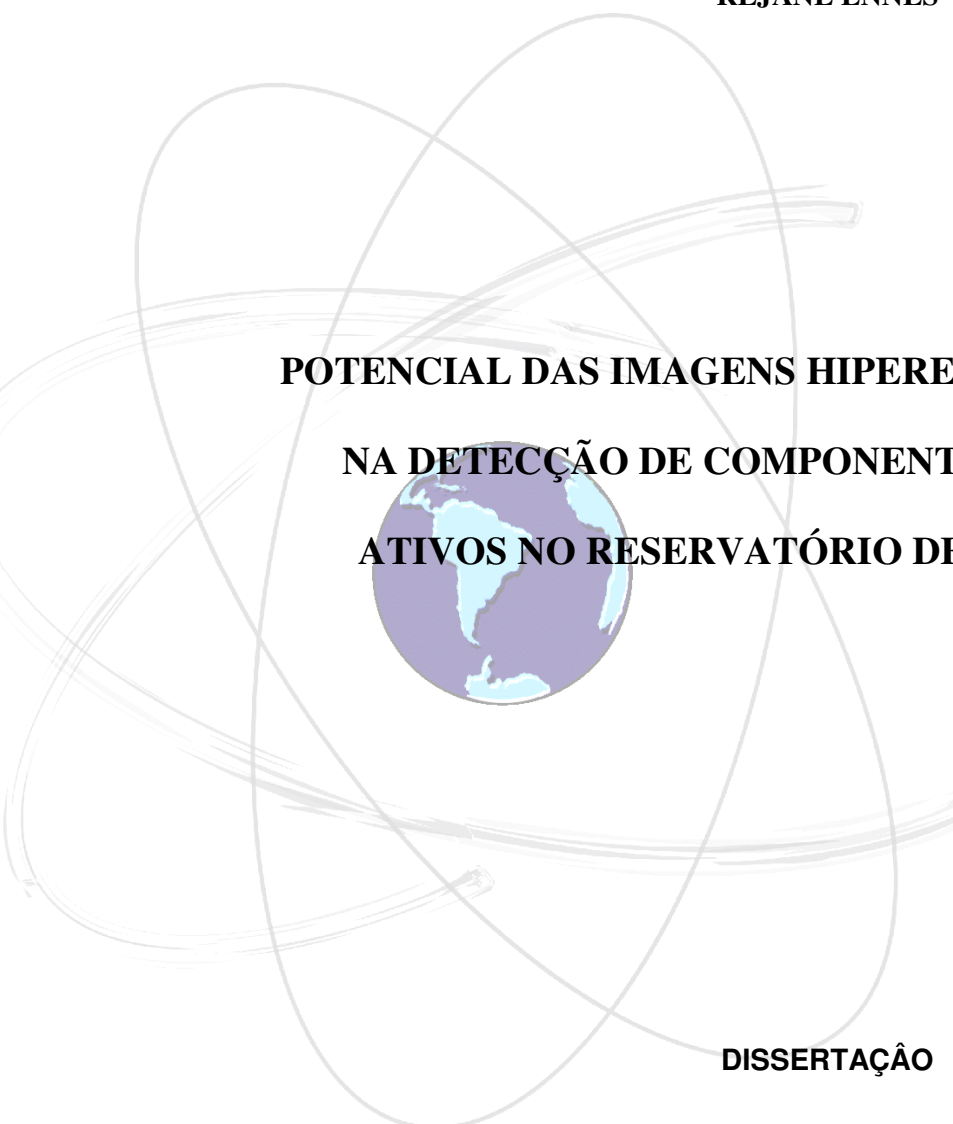
**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**

**CAMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**

*Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas*

---

**REJANE ENNES**



**POTENCIAL DAS IMAGENS HIPERESPECTRAIS ORBITAIS  
NA DETECÇÃO DE COMPONENTES OPTICAMENTE  
ATIVOS NO RESERVATÓRIO DE ITUPARARANGA**

**DISSERTAÇÃO**

**Presidente Prudente  
2008**

**REJANE ENNES**

**POTENCIAL DAS IMAGENS HIPERESPECTRAIS ORBITAIS  
NA DETECÇÃO DE COMPONENTES OPTICAMENTE  
ATIVOS NO RESERVATÓRIO DE ITUPARARANGA**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Universidade Estadual Paulista – Campus de Presidente Prudente, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências Cartográficas.

**Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Maria de Lourdes B.  
T. Galo**

Presidente Prudente  
2008

E49p Ennes, Rejane.  
Potencial das imagens hiperespectrais orbitais na detecção de componentes opticamente ativos no reservatório de Itupararanga / Rejane Ennes. - Presidente Prudente : [s.n], 2008  
xiiiv, 125 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Orientador: Maria de Lourdes Bueno Trindade Galo  
Banca: Renata Ribeiro de Araújo Rocha, Waterloo Pereira Filho  
Inclui bibliografia

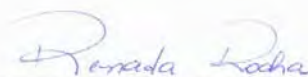
1. Sensoriamento remoto hiperespectral. 2. Análise derivativa. 3. Remoção do contínuo. I. Autor. II. Título. III. Presidente Prudente - Faculdade de Ciências e Tecnologia.

CDD(18.ed.) 621.71

**BANCA EXAMINADORA**



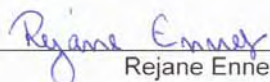
Profa. Dra. Maria de Lourdes B. Trindade Galo  
(Orientadora)



Profa. Dra. Renata Ribeiro de Araújo Rocha  
(FCT/UNESP)



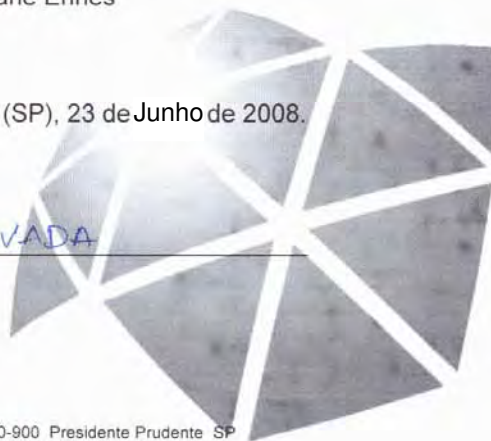
Prof. Dr. Waterloo Pereira Filho  
(UFSM)



Rejane Ennes

Presidente Prudente (SP), 23 de Junho de 2008.

Resultado: APROVADA



## **DEDICATÓRIA**

*À Deus, meu alicerce.*

*Aos meus queridos pais Jose Ennes e Inês, minhas irmãs Angela e Raquel por todo carinho, apoio e compreensão nos momentos de ausência.*

*Ao meu marido Marcelo, por todo amor e incentivo nos momentos de desânimo e compreensão nos momentos de ausência.*

## AGRADECIMENTOS

A realização desta pesquisa contou com a colaboração direta e indireta de diversas pessoas, a quem manifesto meus sinceros agradecimentos:

Em primeiro lugar a Deus, pela minha vida e por me conceder a graça de realizar essa pesquisa.

A minha orientadora Maria de Lourdes B. T. Galo, pela experiência acadêmica que por ela me foi transmitida, pelos momentos de incentivo, dedicação, sugestões e críticas sempre construtivas que me ajudaram a crescer durante esta jornada.

Aos Professores do Nilton Imai, Renata Ribeiro de Araújo, Vilma Tachibana e Evelyn M. L. Moraes Novo pelo incentivo e recomendações que foram essenciais para que eu pudesse terminar este trabalho.

Aos Professores Maurício Galo e Erivaldo A. da Silva que contribuíram em algumas etapas do trabalho.

Ao Professor Lênio S. Galvão, pesquisador do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), que instruiu o processo de pré-processamento da imagem hiperespectral.

Aos pesquisadores da FCA (Faculdade de Ciências Agrárias) - Unesp de Botucatu, Professor Dr. Edivaldo Domingues Velini, que viabilizou o trabalho de campo e aos engenheiros agrônomos Dr. Eduardo Negrisoli e Dr. Marcelo Rocha Corrêa, que realizaram a coleta limnológica nos elementos amostrais definidos no reservatório de Ituparanga.

Ao Professor Paulo César Rocha do Departamento de Geografia da FCT/UNESP, por disponibilizar equipamentos para estimativa da variável clorofila *a*.

A especialista Maria do Carmo Roberto do Núcleo de Pesquisas em Limnologia Ictiologia e Aqüicultura (NUPÉLIA) de Universidade Estadual de Maringá (UEM), que supervisionou o acompanhamento metodológico na determinação de clorofila *a*.

A minha amiga e irmã Priscila, pelos anos convivência de muita descontração, companheirismo e confiança, que me ajudaram a não desanimar diante dos momentos de dificuldade.

Aos amigos Tiago e Adriana pelos momentos de reflexões e discussões sobre o tema da dissertação, trazendo sempre uma palavra amiga nos momentos difíceis.

Aos amigos da FCT/UNESP de Presidente Prudente, pelas longas conversas produtivas, em especial: Érika Akemi, Nilcilene (Aninha), Aline, Guilherme, Gabriel,

Wimerson, Paula, Regina, Rodrigo (Paulista), Guilherme Poleszuk, Maria Ligia, William, Juliano, Letícia Nalin, Fernanda, Lauriana e Letícia Sabo.

Aos colegas do grupo de Estudos “Seminário de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto em Qualidade da Água - SGRQA” pelas diversas sugestões.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro concedido através de uma bolsa pesquisa e a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) por financiar a aquisição da imagem e execução dos trabalhos de campo.

## **EPIGRAFE**

*“Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende”*

*(Leonardo da Vinci)*



## RESUMO

Os recentes avanços na tecnologia de Sensoriamento Remoto proporcionaram o desenvolvimento de sensores orbitais com altíssima resolução espectral, capazes de fornecer medidas radiométricas em bandas estreitas e contínuas para cada pixel da imagem, definindo curvas espectrais com potencial de discriminar diferentes componentes da matéria. Diante disso, o objetivo geral deste trabalho foi de avaliar a contribuição de imagens hiperespectrais na identificação de componentes opticamente ativos presentes em um corpo d'água, considerado de boa qualidade. Para tanto, uma imagem hiperespectral Hyperion foi adquirida simultaneamente com variáveis limnológicas coletadas em alguns pontos georreferenciados no reservatório de Itupararanga. Após a correção atmosférica da imagem, extraíram curvas espectrais nos locais geográficos dos pontos, nos quais se aplicaram técnicas de análise de espectros, tais como, remoção do contínuo, razão de bandas e análise derivativa. Os dados hiperespectrais originais e os resultantes da aplicação de técnicas foram correlacionados com algumas variáveis limnológicas. Das técnicas aplicadas, a análise derivativa proporcionou melhor diferenciação entre os componentes opticamente ativos. Para estimativa da variável limnológica pigmentos totais (indicador indireto de clorofila *a*), modelos de regressão gerados a partir de valores de reflectância original e de primeira derivada forneceram melhores resultados, enquanto que para sólidos em suspensão, o parâmetro largura da feição de absorção em 589 a 640 nm do contínuo removido apresentou coeficiente de correlação superior a 0,65. Os maiores valores de correlação alcançados para a variável limnológica pigmentos totais reforçaram a suposição de que a radiação eletromagnética, ao atravessar a camada superior do corpo d'água, foi absorvida e espalhada principalmente pelo fitoplâncton. Os resultados confirmaram a capacidade das imagens hiperespectrais em detectar componentes opticamente ativos na água, mesmo presentes em pequenas concentrações no corpo d'água.

**Palavras Chaves:** Sensoriamento Remoto Hiperespectral, reservatório, análise derivativa, remoção do contínuo, razão de bandas, componentes opticamente ativos, Hyperion.

## ABSTRACT

The recent improvements in the technology of Remote Sensing are providing the development of sensors with high spectral resolution that can supply radiometric measurements in narrow and continuous bands for each pixel of the image, defining spectral curves with potential of separating several components of the matter. Due to that, the general objective of this work was evaluating the contribution of hyperspectral images in the identification of optically active constituents present in a body of water, considered good quality. To reach the proposed objective, a hyperspectral imagery of EO-1/Hyperion orbital sensor was acquired simultaneously with limnological variables collected in some points in the body of water. After correcting the atmospheric effects, in the geographical locations of those points, spectral curves of the hyperspectral image were extracted, in which techniques of spectral analysis were applied, such as, continuum removal, derivative analysis and ratio analysis. The hyperspectral original data and the resultants of the application of techniques were correlated with some limnological variables. Of the applied techniques, the derivative analysis provided better differentiation among the optically active constituents. For estimating the limnological variables total pigments (indirect indicator of chlorophyll *a*), regression models were generated and the better results were obtained from values of original reflectance and of first spectral derivative, whereas for suspended sediment, the parameter width of the feature of absorption in 589 to 640 nm of the removed continuum presented correlation coefficient of 0,65. The larger correlation values reached for the limnological variables total pigments reinforced the supposition that the electromagnetic radiation, when crossing the superior layer of the body of water, it was absorption and scattering mainly by the phytoplankton. The results confirmed the capacity of hyperspectral image in detecting optically active constituents in the water, even present in small concentrations in the body of water.

**Keywords:** Hyperspectral Remote Sensing, derivative analysis, continuum removal technique, ratio analysis, Hyperion, optically active constituents.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mecanismos de interação da energia eletromagnética incidente com um corpo d'água.....	14
Figura 2 - Curva de Absorção e Espalhamento da luz na água pura.....	17
Figura 3 - Medida de reflectância espectral “ <i>in situ</i> ” da água limpa e da água com diferentes concentrações de sólidos de argila (a) e areia (b).....	19
Figura 4 - Curvas de reflectância com diferentes concentrações de clorofila.....	21
Figura 5 – Porcentagem de reflectância de água com alga e com concentrações variáveis de sólidos em suspensão.....	23
Figura 6 - Reflectância espectral da água para várias concentrações de carbono orgânico dissolvido na coluna d'água.....	25
Figura 7 – Reflectância espectral da água com concentrações alternadas de carbono orgânico dissolvido e concentração fixa de clorofila (a) e sólidos suspensos (b) na coluna d'água.....	26
Figura 8 – Comparação entre dados obtidos por sensores multiespectrais e hiperespectrais no VNIR (Visível e Infravermelho) em termos de dimensão espectral.....	29
Figura 9 - Imagem hiperespectral definindo um gráfico de comportamento espectral para diferentes elementos espaciais.....	30
Figura 10 – Transmitância da atmosfera entre o sol e a superfície da terra.....	33
Figura 10 – Curvas espectrais e de primeira e segunda derivadas. (a) – Água pura. (b) – Água com sólidos em suspensão . (c) – Água com sólidos em suspensão mais clorofila.....	39
Figura 12 – Curvas de reflectância, de primeira e segunda derivadas para diferentes concentrações de componentes opticamente ativos.....	40
Figura 13 – Primeira derivada espectral com variação de clorofila. (a) Alta concentração de clorofila. (b) baixa concentração de clorofila.....	42
Figura 14- Espectro de reflectância com o contínuo e o espectro após remoção do contínuo.....	44
Figura 15 - Definição da profundidade da banda.....	46
Figura 16 – Esquema apresentando bandas de absorção assimétrica.....	47
Figura 17 – Representação esquemática da remoção do contínuo.....	47
Figura 18 – Esquema da localização do Reservatório de Itupararanga.....	52
Figura 19 – Principais etapas previstas para o desenvolvimento da pesquisa.....	60
Figura 20 – Sub-área da represa de Itupararanga.....	63
Figura 21 - Esquema amostral com 35 pontos sobreposto na classificação na imagem de maio de 2003.....	66
Figura 23 – Dendrograma indicando três principais agrupamentos definidos para variáveis limnológicas.....	72
Figura 24 – Imagem Hyperion/EO1 (Banda 50 centrada em 854 nm) em tons de cinza.....	74
Figura 25 – Exemplo de pixels anômalos na forma de faixas verticais escuras obtidas na imagem.....	76
Figura 26 - Imagem Hyperion após aplicação da máscara.....	78
Figura 27 – Efeito da aplicação do filtro de média de três pontos.....	79
Figura 28 – Espectros dos pontos amostrais após aplicação do filtro de três pontos.....	80
Figura 29 - Espectro de reflectância com os limites dos intervalos e visualização dos intervalos.....	82
Figura 30 - Espectros do contínuo removido para intervalos espectrais.....	83

Figura 31 – Espectros originais da água (a); curvas resultantes da aplicação da primeira derivada (b); curvas resultantes da aplicação da segunda derivada (c).....	87
Figura 32 – Espectros dos pontos amostrais com denominação das regiões espectrais maiores variações no valor de reflectância (a); curvas de segunda derivada (b)....	90
Figura 33 – Correlogramas entre os espectros originais e variáveis limnológicas .....	93
Figura 34 – Correlação de pigmentos totais com a primeira e segunda derivada.....	96
Figura 35 – Curva de reflectância do ponto P1, sobreposta ao correlograma entre a segunda derivada e pigmentos totais.....	98
Figura 36 – Coeficientes de Correlação entre os parâmetros das curvas do contínuo removido com a concentração de pigmentos totais .....	99
Figura 37 – Correlograma entre sólidos em suspensão com a curva de primeira derivada espectral.....	100
Figura 38 – Coeficientes de correlação entre os parâmetros das curvas do contínuo removido com concentração de sólidos em suspensão .....	101
Figura 39 - Modelos de regressão estimados para pigmentos totais .....	103
Figura 40 – Distribuição espacial da variabilidade espacial na concentração de pigmentos totais ( $\mu\text{g/L}$ ), estimadas a partir da reflectância obtida no comprimento de onda 823 nm.....	105
Figura 41 - Modelo de regressão para estimativa de sólidos em suspensão a partir do parâmetro largura obtido na curva do contínuo removido entre 589 a 640 nm ...	106

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Locais espectrais de absorção por pigmentos .....	21
Tabela 2 – Aplicativos desenvolvidos para remoção dos efeitos atmosféricos.....	34
Tabela 3 – Características do sensor Hyperion/EO-1 .....	54
Tabela 4 – Síntese da estatística descritiva das variáveis coletadas.....	71
Tabela 5 – Informações sobre condições de aquisição da imagem hiperespectral Hyperion...	74
Tabela 6 – Feições de absorção e Comprimento de onda ( $\lambda$ ) central de cada banda .....	82
Tabela 7 – Parâmetros das bandas de absorção do contínuo removido. ....	85
Tabela 8 – Correlações entre medidas de pigmentos totais e os índices espectrais de razão ...	91

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	Considerações Iniciais.....	10
1.2	Objetivos .....	13
1.3	Estrutura da Dissertação.....	13
2	PROPRIEDADES ÓPTICAS DA ÁGUA.....	14
2.1	Interação da Radiação Eletromagnética (REM) com a água.....	14
2.2	Resposta espectral da água pura .....	16
2.3	Resposta espectral da água na presença de constituintes orgânicos e inorgânicos.....	17
2.3.1	Sólidos em suspensão .....	18
2.3.2	Fitoplâncton.....	20
2.3.3	Material orgânico dissolvido (MOD) .....	24
3	INSTRUMENTOS PARA AQUISIÇÃO DE MEDIDAS ESPECTRAIS E MÉTODOS DE TRATAMENTO E ANÁLISE DE DADOS HIPERESPECTRAIS .....	27
3.1	Sensores Não Imageadores.....	27
3.2	Sensores Imageadores .....	28
3.3	Tratamento e análise de dados hiperespectrais.....	30
3.3.1	Correção dos Efeitos Atmosféricos .....	31
3.3.2	Suavização da curva espectral.....	35
3.3.3	Análise Derivativa .....	37
3.3.4	Análise por Remoção do Contínuo Espectral .....	43
3.3.5	Razão espectral.....	48
4	DESENVOLVIMENTO GERAL DA PESQUISA .....	51
4.1	Estudo de caso: Reservatório de Itupararanga.....	51
4.2	Material utilizado na pesquisa .....	53
4.3	Abordagem metodológica .....	59
4.3	Experimentos: procedimento metodológico, resultados e análise .....	63
4.4.1	Definição da sub-área de pesquisa .....	63
4.4.2	Levantamento das variáveis limnológicas .....	64
4.4.2.1	<i>Definição do esquema de amostragem para coleta e análise da água</i> ....	64
4.4.2.2	<i>Coleta de dados “in situ”</i> .....	68
4.4.4.1	<i>Análise exploratória dos dados limnológicos</i> .....	70
4.4.3	Tratamento de dados hiperespectrais.....	73
4.4.3.1	<i>Aquisição da imagem hiperespectral</i> .....	73
4.4.3.2	<i>Pré-Processamentos da Imagem Hyperion/EO1</i> .....	75
4.4.3.3	<i>Extração de curvas espectrais a partir da imagem Hyperion</i> .....	78
4.4.3.4	<i>Remoção do Contínuo</i> .....	81
4.4.3.5	<i>Análise Derivativa</i> .....	86
4.4.3.6	<i>Razão de Bandas</i> .....	89
4.4.4	Análise de correlação.....	92
4.4.4.1	<i>Correlações entre as variáveis limnológicas e indicadores espectrais</i> ...	93
4.4.4.2	<i>Correlações entre variáveis opticamente ativas com curvas de primeira e segunda derivada e parâmetros das curvas do contínuo removido</i> .....	95
4.4.4.3	<i>Inferência na concentração de pigmentos totais e sólidos em suspensão a partir dos dados espectrais</i> .....	101
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	107
6	REFERÊNCIAS .....	111
	APÊNDICE A .....	120

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Considerações Iniciais

A crescente necessidade de água para o abastecimento doméstico, industrial, além dos usos em irrigação e lazer, faz com que, hoje, a quase totalidade das atividades humanas sejam dependentes da disponibilidade de águas continentais. Neste cenário, a utilização racional dos recursos hídricos torna-se cada vez mais evidente, quando se leva em consideração que, de toda água da Terra, apenas cerca de 3% é água doce (ESTEVES, 1998). Diante disso, cabe a sociedade estabelecer planos e critérios que conservem suas condições naturais e assim garantir seus múltiplos usos.

No Brasil, os reservatórios artificiais são as principais fontes de água para atender as diversas demandas hídricas da população e desempenham importantes papéis ecológicos, econômicos e sociais. Porém, muitos deles, apresentam crescente eutrofização por receberem freqüentes descargas de dejetos domésticos e industriais, especialmente aqueles situados próximos aos grandes centros urbanos. Nas regiões mais afastadas, eles são afetados pelo carreamento do solo, provocado pelo desmatamento, e pelos subprodutos originados de atividades agropecuárias (ESTEVES, 1998). Esse fenômeno reduz a possibilidade de usos múltiplos dos reservatórios e causa um considerável aumento no custo do tratamento da água, principalmente para fins de abastecimento público, onde é exigido um melhor padrão de qualidade da água.

Em vista disso, uma parte significativa dos estudos relacionados com a qualidade da água tem sido desenvolvidos com o intuito de apontar soluções para tomadores de decisões. Mensurações “in situ” e coleta de amostras para análise laboratorial são usualmente realizados para avaliar a qualidade da água. Esses métodos são acurados para medidas pontuais no tempo e no espaço. Entretanto, não são capazes de fornecer uma representação espacial e temporal da qualidade da água, a qual seja adequada para avaliação e manejo de corpos d’água (JENSEN, 2002).

Durante várias décadas, o Sensoriamento Remoto tem sido usado como ferramenta em pesquisas de estimativas de parâmetros sobre a qualidade da água, devido à grande abrangência espacial e temporal de imageamento da superfície terrestre, possibilitando investigar a origem e o deslocamento de substâncias específicas em suspensão ou dissolvidas

na água (BARBOSA, 2005; PEREIRA FILHO, 2000). Tais estimativas são baseadas em relacionamentos entre variáveis de qualidade da água e medidas de reflectância obtidas em uma ou mais bandas espectrais. Contudo, observa-se que estudos realizados em corpos d'água utilizando dados de Sensoriamento Remoto apresentam resultados aquém das expectativas, pois a intensidade de energia refletida pela água, utilizada em estudos envolvendo Sensoriamento Remoto, é muito baixa se comparada com outros alvos. Além disso, a energia refletida encontra-se, principalmente, no intervalo do espectro eletromagnético formado pelas faixas do visível e em menor intensidade na região do infra-vermelho próximo, região espectral onde sensores instalados em satélites como Landsat, Ikonos e *Spot* disponibilizam poucas bandas, que são inadequadas para estudos de ambientes aquáticos. Ainda existem limitações metodológicas, que estão relacionadas principalmente à questão de como isolar a componente da reflectância da água, que traz a informação sobre os componentes opticamente ativos, dos demais fluxos de radiação detectados pelos sensores (RUDORFF, 2006).

A atual disponibilidade de dados hiperespectrais, como os obtidos pelos sensores AVIRIS e Hyperion, trouxe novas perspectivas para as análises em ambientes aquáticos, pois são capazes de fornecer para cada pixel (elemento de resolução espacial), medidas radiométricas em bandas estreitas e contínuas, disponibilizando grande quantidade de informação espectral em seu domínio. Essa característica possibilita a distinção de diferentes componentes da água, visto que as variações na composição de substâncias opticamente ativas na água provocam diferentes padrões de absorção e espalhamento da radiação eletromagnética, passíveis de serem detectadas em dados hiperespectrais. As variações no comportamento espectral da água causadas pela presença dessas substâncias, têm sido explicadas por diversos autores (p.ex. GOODIN et al., 1993; HAN 1997; KIRK, 1994; DEKKER, 1993; RUNDQUIST et al., 1996; QUIBELL, 1991, JENSEN, 2002; BUKATA, 1995). Os dados obtidos por esses sensores podem ser comparados com medições espectrorradiométricas pontuais realizadas em campo ou em laboratório. Porém, para tal comparação, é necessário corrigir os efeitos atmosféricos dos dados hiperespectrais orbitais, já que o sinal recebido por esses sensores, sofre interferências durante sua propagação entre o alvo e o sensor remoto.

O sensor Hyperion, instalado no satélite *Earth Observing One* (EO-1), lançado no ano de 2000, foi o primeiro sensor orbital hiperespectral, permitindo a aquisição de imagens em 242 bandas espectrais, localizadas nas faixas do visível e do infravermelho (comprimentos de onda entre 400 e 2.500 nm), com resolução espectral de 10 nm. (SKIDMORE, 2002).



Esse sensor não foi desenvolvido com o propósito específico de estudo em ambientes aquáticos, mas pesquisas preliminares já demonstraram seu potencial para esse tipo de aplicação. Dentre algumas pesquisas desenvolvidas, pode-se citar Giardino et al. (2007) na estimativa da qualidade da água utilizando modelos bio-ópticos, Rudorff (2006) no estudo da composição das águas da planície amazônica e Kruse (2003) no mapeamento de recife de corais. Esses trabalhos trouxeram grandes contribuições metodológicas e científicas para os mais diversos tipos de ambientes aquáticos.

No caso de reservatórios, ambientes intermediários entre rios e lagos, percebe-se a necessidade de estudos mais aprofundados como os que foram desenvolvidos por esses autores, dado que o conhecimento da dinâmica de matéria e energia é fundamental para se conhecer as características de qualidade e quantidade de água presentes em um dado momento e para planejar ações de uso sustentável destes recursos. Por essa razão, a área de estudo selecionada foi o Reservatório de Itupararanga/SP, pertencente à bacia hidrográfica do Rio Sorocaba – médio Tietê. Trata-se de um dos maiores mananciais de água potável da região, abastecendo as cidades de Sorocaba, Votorantim, Mairinque, Alumínio, Ibiúna e São Roque, num total de aproximadamente 800.000 habitantes; além de ser área de estudo das pesquisas realizadas pela Faculdade de Ciências Agrárias da Unesp-Botucatu, cujos pesquisadores contribuíram na coleta de dados “in situ”, nas análises limnológicas realizadas e na disponibilidade de dados já existentes.

Sabe-se que a principal característica desse reservatório é de possuir água de boa qualidade, de acordo com órgãos oficiais do estado (SÃO PAULO, 1998). Porém, a ocupação de suas margens e as modificações da cobertura e do uso das terras a montante da represa podem estar modificando essa qualidade, através do aporte de sólidos e substâncias de origem difusa e pontual. Logo, o reservatório em questão, por se tratar de um manancial de abastecimento, necessita de indicadores capazes de medir a susceptibilidade ao risco de degradação de uma fonte de abastecimento público. Desse modo, presume-se, que a imagem hiperespectral, proporcione curvas de reflectância espectral que indiquem regiões espectrais que possam fornecer indícios da presença de constituintes opticamente ativos relevantes para a análise da qualidade da água.

Espera-se que esse trabalho forneça informações que sirvam de subsídio ao planejamento e à gestão de recursos hídricos para o reservatório de Itupararanga. Além disso, espera-se que a metodologia utilizada possa também ser aplicada em outras regiões, de modo que o sistema de gestão de recursos hídricos passe a incluir novas tecnologias para atender às demandas presentes e futuras de água.

## 1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a contribuição que o maior detalhamento espectral de uma imagem hiperespectrais Hyperion/EO1 oferece na discriminação de componentes opticamente ativos presentes no reservatório de Itupararanga.

Os objetivos específicos estabelecidos foram:

- Analisar os espectros gerados a partir da imagem hiperespectral, procurando-se identificar intervalos espectrais sensíveis à concentração de alguns componentes opticamente ativos no corpo d'água;
- Analisar as relações entre os dados hiperespectrais e algumas variáveis limnológicas do ambiente aquático, medidas “in situ”.

## 1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação foi dividida em cinco capítulos. No capítulo introdutório, é delineado o assunto da pesquisa, com algumas considerações que sustentam o tema proposto, além dos objetivos gerais e específicos. O segundo capítulo discorre sobre conceitos relativos às propriedades ópticas da água pura e com adição de constituintes orgânicos e inorgânicos.

No terceiro capítulo apresenta-se uma breve descrição dos principais instrumentos de aquisição de medidas espectrais, com ênfase no sensor hiperespectral orbital envolvido no experimento, além de uma apresentação detalhada das principais técnicas de tratamento e análise de dados hiperespectrais.

O experimento desenvolvido, abordado no quarto capítulo, descreve o procedimento metodológico adotado, a área de estudo, os materiais utilizados e o método de forma geral, e posteriormente o expõe de modo detalhado. O quarto capítulo também relata sobre os experimentos realizados, que foram divididos em etapas. Em cada etapa são indicados os resultados com a discussão dos respectivos experimentos. Finalmente, no quinto capítulo, foram apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 PROPRIEDADES ÓPTICAS DA ÁGUA

A água tem uma concepção muito mais ampla do que sua simples caracterização pela fórmula molecular  $H_2O$ . Isto porque a água, devido às suas propriedades de solvente e a sua capacidade de transportar partículas, incorpora outros componentes em sua composição, os quais definem sua qualidade (SPERLING, 1996).

Devido a essa característica, a extração de informação de ambientes aquáticos a partir de Sensoriamento Remoto, só será eficiente com uma boa compreensão dos processos de interação da energia eletromagnética com a água e seus componentes opticamente ativos. Por tanto, fez-se uma revisão dos processos de interação da radiação eletromagnética (REM), com a água.

### 2.1 Interação da Radiação Eletromagnética (REM) com a água

De acordo com Jensen (2000), o total da radiância ( $L_t$ ) registrada por um sensor transportado por um avião ou satélite para um corpo d'água, é função da energia eletromagnética proveniente de quatro componentes, identificados na Figura 1, os quais são descritos a seguir.

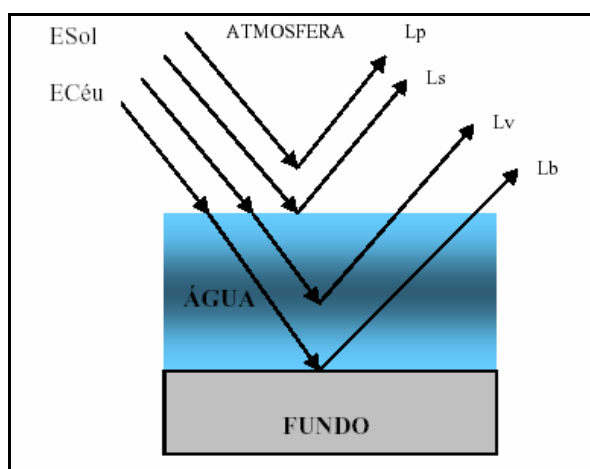


Figura 1 - Mecanismos de interação da energia eletromagnética incidente com um corpo d'água. Adaptado de Jensen (2000)

**Radiância Atmosférica ( $L_p$ ):** porção de radiância registrada pelo sensor, resultante da irradiância direta do sol ( $E_{Sol}$ ) e espalhada pelas nuvens e gases da atmosfera ( $E_{Céu}$ ), que não atinge a superfície da água. Refere-se à radiação espalhada pela atmosfera e proveniente de alvos vizinhos ao elemento de interesse. Além disto, a presença da atmosfera também interfere seletivamente na radiação que atinge a superfície da água, influenciando, na qualidade da radiação que interage com os componentes da água;

**Radiância de Superfície ( $L_s$ ):** parte da irradiância proveniente do Sol e do céu, que atinge a superfície da água, mas penetra somente até os primeiros milímetros da coluna d'água, ou então é refletida diretamente pela superfície d'água. Esse componente é responsável pela reflexão especular, que ocorre quando o ângulo zenital solar e o ângulo de visada do sensor são idênticos;

**Radiância Volumétrica ( $L_v$ ):** parte da irradiância advinda do Sol e do céu, que penetra na interface ar/água e interage com a água e seus constituintes orgânicos e inorgânicos, sem alcançar o fundo, cuja natureza é modificada em decorrência desta interação.

**Radiância de Fundo ( $L_b$ ):** parte da radiância, que penetra na água, alcança o fundo e é propagado de volta para a superfície.

Desse modo, a radiância total que atinge o sistema sensor ( $L_t$ ) é formada pela adição desses quatro componentes e pode ser expressa pela Equação (1).

$$L_t = L_p + L_s + L_v + L_b . \quad (1)$$

O objetivo da maior parte dos trabalhos de Sensoriamento Remoto em ambientes aquáticos é medir a radiância de superfície ( $L_s$ ), que fornece informações úteis para o delineamento dos corpos d'água. Pode-se afirmar que nessas aplicações, a reflectância da superfície do corpo d'água, normalmente é modelada como um evento bidimensional de espalhamento simples, em que somente resultados de superfície da terra são relevantes para a pesquisa. Entretanto, algumas vezes, o Sensoriamento Remoto de ambientes aquáticos é usado para investigar substâncias específicas em suspensão ou dissolvidas no interior do corpo d'água. Nestes casos, a modelagem é bem mais complexa e torna-se inerentemente tridimensional envolvendo espalhamentos múltiplos de diferentes ordens dentro do perfil do corpo d'água (MCCLUNEY, 1974). Assim, quando há interesse na identificação de constituintes orgânicos e inorgânicos na coluna de água, tais como, sólidos suspensos ou clorofila, a componente que fornece informações úteis é a radiância volumétrica ( $L_v$ ), calculada por:

$$L_v = L_t - (L_p + L_s + L_b), \quad (2)$$

Isolar a variável ( $L_v$ ) envolve, usualmente, a correção radiométrica cuidadosa dos dados, eliminando-se a radiância atmosférica ( $L_p$ ), a radiância de superfície ( $L_s$ ), e a radiância do fundo ( $L_b$ ), o que é raramente possível.

## 2.2 Resposta espectral da água pura

A água no meio ambiente, normalmente contém outros elementos em sua composição (materiais orgânicos e inorgânicos) e a REM (radiação eletromagnética), quando incide na sua superfície, é fortemente influenciada por eles. Assim, para um estudo mais detalhado de como a água pura interage com a REM, Bukata et al. (1995) apresentaram um experimento, no qual foram retirados todos os materiais presentes na água. A Figura 2 mostra curvas de absorção e de espalhamento resultantes da água pura, no intervalo espectral de 250 - 800nm.

Observando essa figura, percebe-se que o coeficiente de absorção é elevado na região da luz ultravioleta, em seguida decresce abruptamente com um mínimo na região entre 400 e 500 nm, aumentando rapidamente na região do infravermelho. Através dessa análise, pode-se constatar que no intervalo entre 400 e 500 nm, a absorção pela água pura é desprezível e que praticamente toda energia que atravessa a interface ar/água, penetra em quase toda sua totalidade os primeiros metros. Para curva de espalhamento, verifica-se que os valores são máximos na região do ultravioleta e decresce exponencialmente em direção ao infravermelho. A partir dessas considerações, pode-se dizer que a radiação refletida pelas moléculas da água pura é maior na região do azul (entre 400 - 500 nm), com um máximo entre 460 e 480 nm. Consequentemente, são nesses comprimentos de onda, entre violeta e azul, que há maior penetração da luz na coluna d'água.

Deste modo, o espalhamento molecular no corpo d'água ocorre nos comprimentos de onda da luz violeta e azul (< 520 nm), e a absorção acontece nas faixas espectrais da luz verde, amarela, laranja e vermelha (520 – 700 nm).

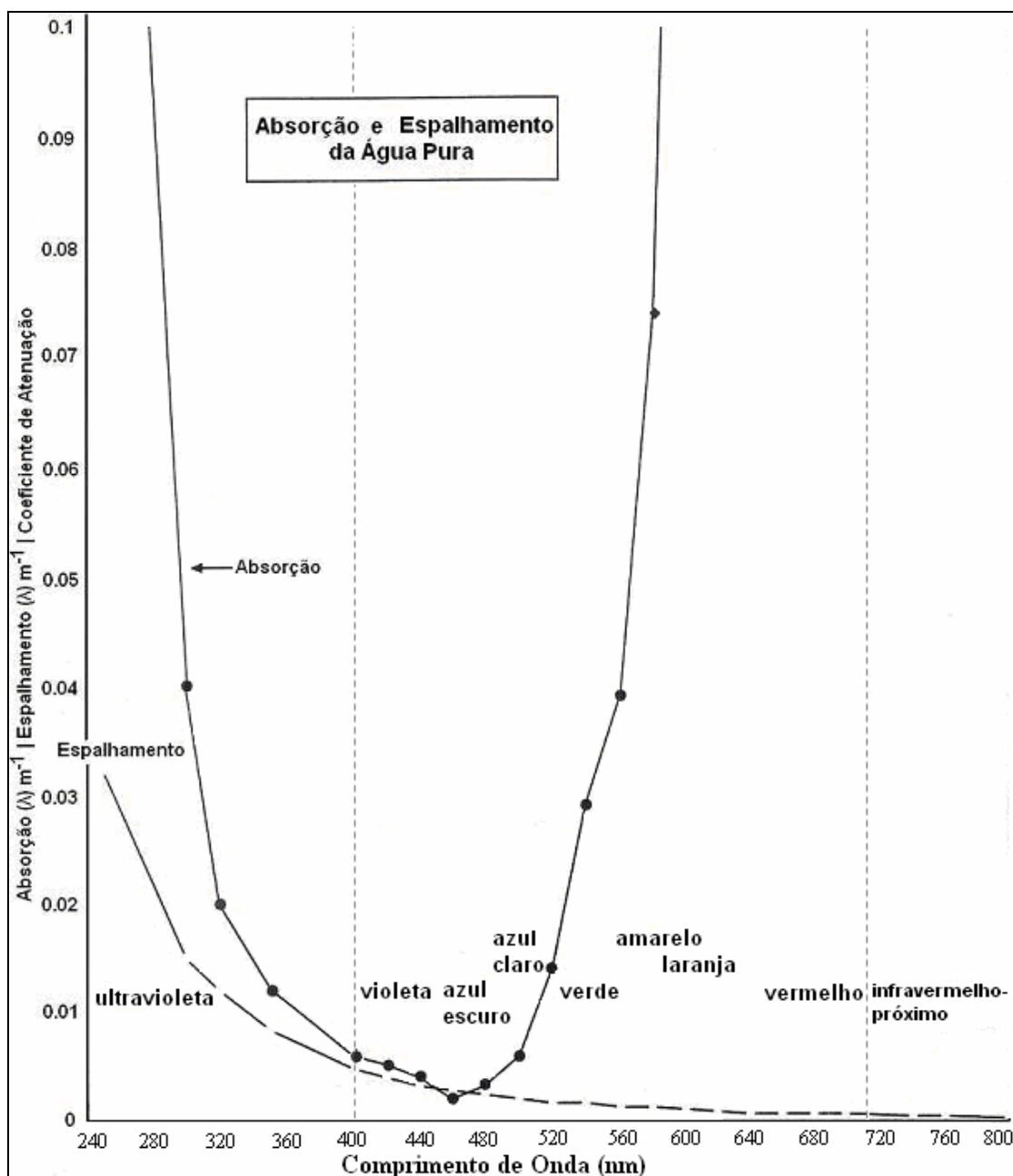


Figura 2 - Curva de Absorção e Espalhamento da luz na água pura. Adaptado de Jensen (2000) e Bukata et al. (1995)

### 2.3 Resposta espectral da água na presença de constituintes orgânicos e inorgânicos

Muitos dos corpos d'água presentes na natureza possuem em sua composição constituintes orgânicos (fitoplânctons, clorofila, entre outros) e inorgânicos

(minerais em suspensão). Quando um corpo d'água contém uma mistura desses materiais, a dificuldade de extrair quantitativamente informações sobre os constituintes específicos através de técnicas de Sensoriamento Remoto, aumenta consideravelmente (GOODIN et al., 1993).

Em estudos sobre a água com a utilização de dados de Sensoriamento Remoto (JENSEN, 2002; BARBOSA, 2005; KRUSE, 2003), a componente  $L_v$  (Figura 1) é a mais importante, já que se refere à parte da irradiância que penetra na água e interage com ela e seus constituintes orgânicos e inorgânicos, sem atingir o fundo. Essa componente é explicada por uma função que considera a concentração de água pura ( $w$ ), sólidos inorgânicos suspensos ( $SM$ ), clorofila ( $Chl$ ), material orgânico dissolvido ( $MOD$ ) e a quantidade total de absorção e espalhamento atenuado devido à presença destes constituintes ( $c(\lambda)$ ) (Equação 3) (JENSEN, 2002).

$$L_v = f [w_{c(\lambda)}, SM_{c(\lambda)}, Chl_{c(\lambda)}, MOD_{c(\lambda)}], \quad (3)$$

Vários estudos foram realizados para a determinação da resposta espectral de cada componente opticamente ativo presente na água, na tentativa de se obter uma melhor compreensão de seus comportamentos espectrais, para a definição de modelos que auxiliem na sua discriminação (GOODIN et al., 1993; HAN 1997; KIRK, 1994; DEKKER, 1993; RUNDQUIST et al., 1996; QUIBELL, 1991; JENSEN, 2002, BUKATA, 1995). Como as propriedades espectrais destes componentes variam com o comprimento de onda incidente, serão descritos a seguir as propriedades de cada um desses constituintes opticamente ativos e sua contribuição na reflectância do corpo d'água para a faixa de 400 a 900 nm.

### **2.3.1 Sólidos em suspensão**

Minerais tais como silício, alumínio, óxidos de ferro são encontrados em suspensão na maioria dos corpos d'água. Esses sólidos surgem em corpos d'água devido à presença de agricultura, desgaste do solo, erosão em regiões costeiras causadas por ondas naturais ou por barcos, intemperismo de rochas e erupções vulcânicas. Os sólidos em suspensão se concentram, principalmente, em corpos d'água continentais (rios, lagos, estuários, entre outros) e em regiões costeiras aos oceanos (JENSEN, 2000).

Entre os constituintes de um corpo d'água, os sólidos em suspensão é o componente de maior peso no comportamento óptico da água e são compostos basicamente por matéria orgânica viva (principalmente fitoplâncton), matéria orgânica morta (detritos) e matéria inorgânica. A soma dos componentes matéria orgânica morta e matéria inorgânica dos sólidos em suspensão é referenciada como tripton ou fração não algal (BARBOSA, 2005).

A Figura 3 ilustra a variação na resposta espectral da água limpa e da água com diferentes concentrações de sólidos em suspensão formados por argila (a) e areia (b), onde a fração tripton é dominante e a fração matéria orgânica viva (clorofila) não é representativa. Nessa figura, pode-se observar que a reflectância espectral da água limpa sofre um decréscimo após 580 nm, devido à absorção da REM pelo corpo d'água. Quando a concentração de sólidos aumenta, a porcentagem de reflectância também aumenta ao longo de todo o espectro, tanto para argila como para areia, definindo um padrão mais claro na imagem, proporcional ao grau de sólidos suspensos no corpo d'água. Percebe-se também, para as curvas de reflectância espectral com variação de concentração de argila (Figura 3 (a)) a porcentagem de reflectância é menor quando comparado com as curvas de reflectância com concentração de areia (Figura 3 (b)).

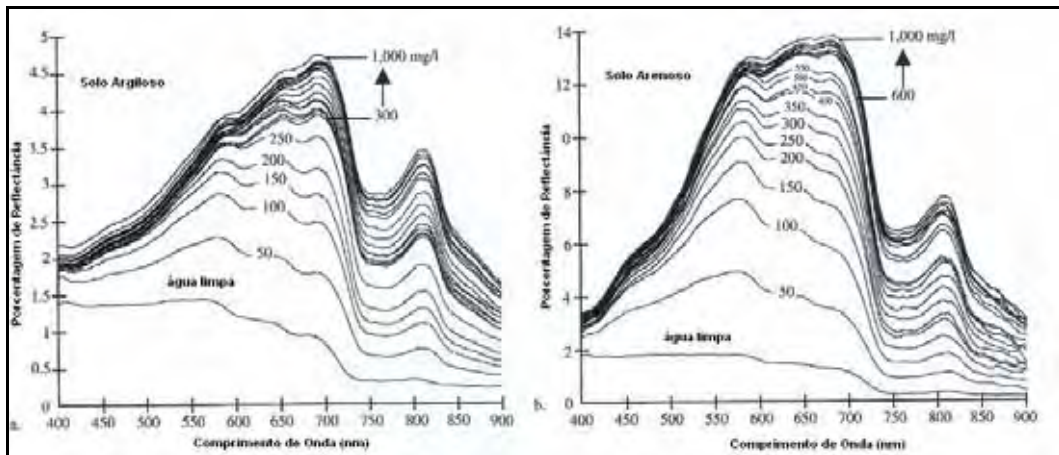


Figura 3 – Medida de reflectância espectral “*in situ*” da água limpa e da água com diferentes concentrações de sólidos de argila (a) e areia (b).

Fonte: Jensen (2002)

Coefficientes de correlação ( $r$ ) foram calculados para descrever o relacionamento entre a concentração de sólidos em suspensão e a reflectância espectral. Para sólidos em suspensão formados por argila, os valores de correlação obtidos foram de 0,28 a 0,97, e para sólidos em suspensão formados por areia, esses valores foram de 0,78 a 0,98.



Para os dois tipos de sólidos, os maiores valores de correlação ( $r > 0,90$ ) ocorreram na região do infravermelho próximo entre 714 e 880 nm (JENSEN, 2002).

O mesmo autor relata que os comprimentos de onda do visível entre 580 - 690 nm fornecem mais informações sobre o tipo de sólidos em suspensão na superfície da água, enquanto que o infravermelho próximo (714 – 880 nm) pode ser usado para se determinar a quantidade de sólidos suspensos na superfície da água. Entretanto, estas relações podem não ser aplicadas universalmente, tendo em vista, que para cada tipo de sedimento em suspensão devem ser investigadas as características espectrais de absorção e espalhamento da água e dos solos da área geográfica de interesse.

Outra característica relevante observada na literatura é a existência de correlação entre sólidos em suspensão e turbidez. A existência dessa relação é compreensível em decorrência da turbidez fornecer o grau de atenuação de intensidade, que um feixe de luz sofre ao atravessar a coluna d'água, devido à presença de sólidos em suspensão, tais como, partículas inorgânicas (areia, silte, argila) e de detritos orgânicos, algas, bactérias, plâncton em geral, etc (CETESB, 2007). Diversos autores têm abordado sobre o assunto, testando a potencialidade da turbidez como preditor de sólidos em suspensão (LEWIS, 1996; LEWIS; EADS, 1998; BARBOSA, 2005).

### **2.3.2 Fitoplâncton**

Em águas interiores podem ser encontrados inúmeros grupos de algas que possuem em sua composição incontáveis pigmentos fotossintetizantes, que são moléculas que captam energia eletromagnética no intervalo de 400 a 700 nm (KIRK, 1993). Teoricamente, a maioria desses pigmentos podem ser detectados remotamente, isto pelo fato deles absorverem fortemente a energia em certas áreas do espectro eletromagnético e definirem assinaturas espectrais próprias. Certos pigmentos já tiveram seus espectros determinados em laboratório e podem fornecer informações importantes sobre feições de absorção diagnósticas. Porém ainda há muito a ser feito para a exploração do comportamento espectral da grande diversidade de pigmentos existentes. Alguns pigmentos fotossintetizantes e regiões do espectro eletromagnético que sofrem absorção por eles são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Locais espectrais de absorção por pigmentos

Absorção (nm)	Pigmento	Tipo de Plâncton
438	clorofila <i>a</i>	todos os tipos
470	hexa-ficoxantina	cianobactérias
480	$\beta$ caroteno	dinoflagelados, diatomáceas, crisófitas
493	ficorobilina	cianobactérias
562	c-ficoeritrina	cianobactérias
567	ficorobilina	cianobactérias
615	c-ficocianina	cianobactérias
624	cp-cianina	cianobactérias
627	ficorobilina	cianobactérias
650	aloficocianina	cianobactérias
676	clorofila <i>a</i>	

Adaptado de: Rudorff (2006); Dekker (1993); Weaver e Wrigley (1994).

Dentre os diversos pigmentos fotossinteticamente ativos, destaca-se a clorofila por ser um dos principais responsáveis pela fotossíntese, constituindo-se de um indicador da biomassa do fitoplâncton. Portanto, a concentração da clorofila é uma medida indireta da quantidade de organismos clorofilados presentes num ambiente hídrico podendo determinar o estado trófico de um determinado sistema aquático (GOODIN et al., 1993).

A Figura 4a-b representa a reflectância espectral em relação à variação de concentração de clorofila em dois experimentos realizados por Rundquist et al. (1996).

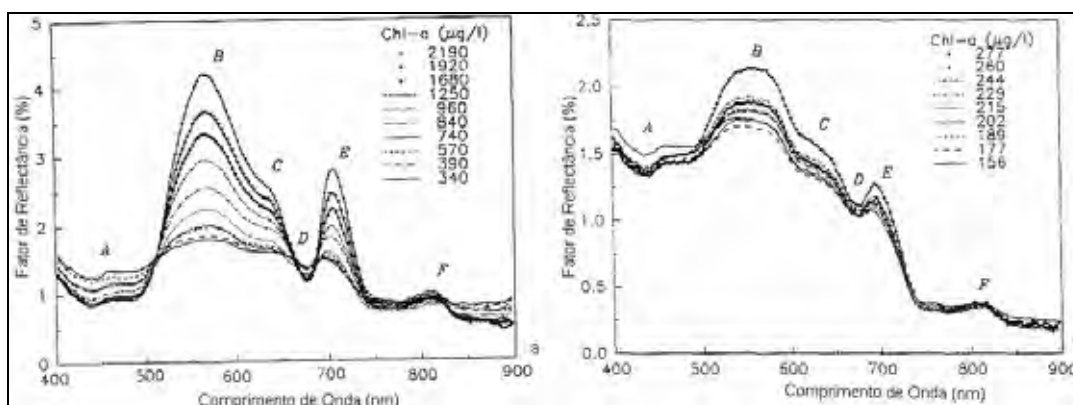


Figura 4 (a-b) - Curvas de reflectância com diferentes concentrações de clorofila (FONTE: Rundquist et al., 1996)

Pela Figura 4 (a e b), pode-se observar que as feições espectrais associadas à presença de clorofila na coluna d'água são representadas por:

- Feição A: a baixa reflectância entre 400 e 500 nm, ocorre devido à absorção da luz azul, com um mínimo em 438 nm, sendo considerado o primeiro feição de absorção pela clorofila *a*;
- Feição B: pico de reflectância máxima no verde entre 560 e 570nm causado pela menor absorção da luz verde pelas algas (GITELSON, 1992);
- Feição C: um pequeno ponto de inflexão em torno de 640 nm, decorrente da absorção causada por pigmentos acessórios (GITELSON, 1992);
- Feição D: tradicional região de absorção no vermelho em aproximadamente 676 nm causada pela clorofila *a*;
- Feição E: pico de reflectância no infravermelho próximo entre 700 e 720 nm, que tem sido explicado por: fluorescência de pigmentos de fitoplâncton (CARDER; STEWARD, 1985); espalhamento de células algais combinado com um efeito mínimo de absorção provocado pela água e pigmentos. A elevação desse pico pode ser usada para estimar a quantidade de clorofila (JENSEN, 2002).
- Feição F: pequeno pico de reflexão que ocorre em cerca de 810 nm que é causado provavelmente pelo espalhamento da matéria orgânica (células algais), combinado com a absorção pela água limpa no infravermelho (RUNDQUIST et al., 1996).

Em geral, para ambos os experimentos apresentados por Rundquist et al. (1996) (Figura 4a-b) o aumento da concentração de clorofila no corpo d'água, ocasiona um aumento da reflectância espectral, nos pontos B, C e E, e diminuição da reflectância nos pontos A e D. Basicamente, quando a concentração de clorofila aumenta na coluna d'água, ocorre uma diminuição significativa da quantidade de energia refletida nas regiões espectrais do azul e do vermelho e um aumento da reflectância na região espectral do verde (JENSEN, 2000).

Contudo, quando se tem a presença de clorofila e sólidos em suspensão simultaneamente no corpo d'água, uma resposta espectral diferenciada é produzida. A Figura 5 apresenta a resposta espectral da água com concentração fixa de clorofila *a* e concentrações

crecentes (de 0 a 500 mg/l) de sólidos. Nessa Figura percebe-se um aumento da reflectância em todo o espectro eletromagnético com o aumento da concentração de sólidos. Percebe também que para água composta somente por algas (0 mg/l), o pico de reflectância se localiza na região do visível em aproximadamente 550 nm, com a adição de sólidos esse pico se desloca em direção a 600 nm, tornando-se mais achatado e menos definido quando a concentração de sedimento aumenta (JENSEN, 2002). Dessa forma, o pequeno ponto de inflexão em torno de 640 nm, decorrente da absorção por clorofila tende a desaparecer. Contudo, as posições do pico reflectância por algas na faixa 700-720 nm e do pico de absorção na faixa 660-670 nm, permanecem inalteradas, mudando somente as profundidades.

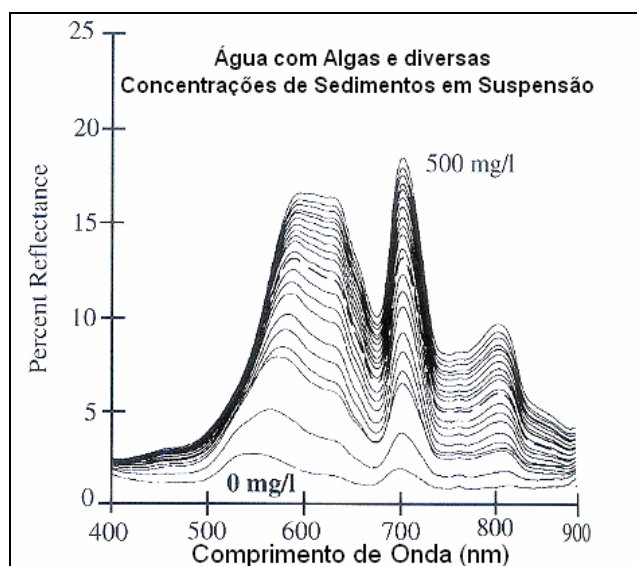


Figura 5 – Porcentagem de reflectância de água com alga e com concentrações variáveis de sólidos em suspensão.

Fonte: Han (1997)

Visualizando a Figura 5, verifica-se também que existe um aumento gradativo no pico de reflectância no intervalo de 700 a 720 nm e na região de absorção entre 660 e 670 nm, com o aumento na concentração de sólidos. No entanto, Quibell (1991) mostrou que a diferença de reflectância nos comprimentos de onda em cerca de 710 nm e 665 nm ( $\rho_{710\text{nm}} - \rho_{665\text{nm}}$ ) permanece constante independente da quantidade de sólidos adicionados. Assim, a diferença de reflectância entre essas duas bandas pode ser utilizada para estimar a concentração de clorofila em condições de turbidez variável causada pela variação na concentração de partículas inorgânicas.

Rundquist et al. (1996) obtiveram estimativas acuradas de concentração de clorofila na coluna d'água usando uma razão simples (infravermelho próximo (705 nm) /

vermelho (670 nm)) para baixas concentrações de clorofila e obtiveram bons resultados analisando a primeira derivada da curva de reflectância por volta de 690 nm, quando a concentração de clorofila era alta.

### **2.3.3 Material orgânico dissolvido (MOD)**

A matéria orgânica dissolvida (MOD) é formada durante o processo de decomposição de matéria orgânica por ação microbiana, antes de se transformar em dióxido de carbono e formas inorgânicas de nitrogênio, enxofre e fósforo (KIRK, 1994).

Ainda de acordo com Kirk (1994), a MOD é classificada em três principais frações: húmus, ácidos húmicos e ácidos fúlvicos. O húmus é a fração da substância húmica que não se dissolve. O ácido húmico é a fração da parte solúvel que se precipita por acidificação, e o ácido fúlvico é a parte que permanece solúvel. Os três componentes tendem a ser quimicamente similares, diferenciando basicamente no peso molecular, visto que moléculas de ácido húmico são mais pesadas que as de ácido fúlvico.

No ambiente aquático, a presença de MOD tem a particularidade de provocar uma resposta espectral diferenciada, afetando principalmente os primeiros comprimentos de onda. A influência da MOD no corpo d'água é apresentada na Figura 6, na qual visualiza-se curvas espectrais em que a concentração de sólidos suspensos e clorofila *a* são insignificantes e a concentração de carbono orgânico dissolvido (COD), considerado um bom indicador de matéria orgânica dissolvida, se altera no intervalo de 0 a 20 mg C/l. Analisando a figura percebe-se que, a adição sistemática de MOD resulta em uma diminuição tênue no valor de reflectância nos comprimentos de onda menores que 600 nm (região espectral do azul e verde) e variações pouco significativas nos valores de reflectância em comprimento de onda maiores de 600 nm (BUKATA et al., 1995).

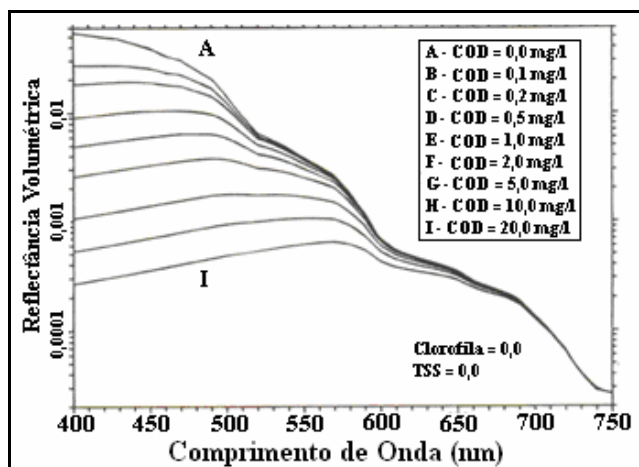


Figura 6 - Reflectância espectral da água para várias concentrações de carbono orgânico dissolvido na coluna d'água

Adaptado de: Bukata et al. (1995)

No caso de corpos d'água com presença simultânea de MOD e outros componentes opticamente ativos, respostas espectrais distintas são produzidas. Para demonstrar o efeito da MOD em conjunto com outros componentes opticamente ativos, a Figura 7 (a) ilustra curvas espectrais com concentração nula de sólidos suspensos, concentração fixa de clorofila e concentrações variadas de MOD enquanto que a Figura 7 (b) expõe curvas espectrais com concentração fixa de sólidos suspensos, concentração nula de clorofila e concentrações variadas de MOD. Segundo Bukata et al. (1995), a análise visual das Figuras 7 (a) e (b) mostram que:

- A adição de MOD em corpos d'água com sólidos em suspensão (Figura 7-b) provoca alterações de maior magnitude nos valores de reflectância quando comparados com corpos d'água com presença dominante de clorofila (Figura 7-a);
- O efeito da MOD é mais notável em corpos d'água com predomínio de clorofila (Figura 7-a) do que corpos d'água contendo apenas sólidos em suspensão (Figura 7-b);
- A reflectância espectral mostrada nas Figuras 7 (a) e (b) reforçam a idéia que a MOD provoca absorção principalmente nos primeiros comprimentos de onda mesmo em curvas espectrais resultantes da mistura de componentes opticamente ativos.

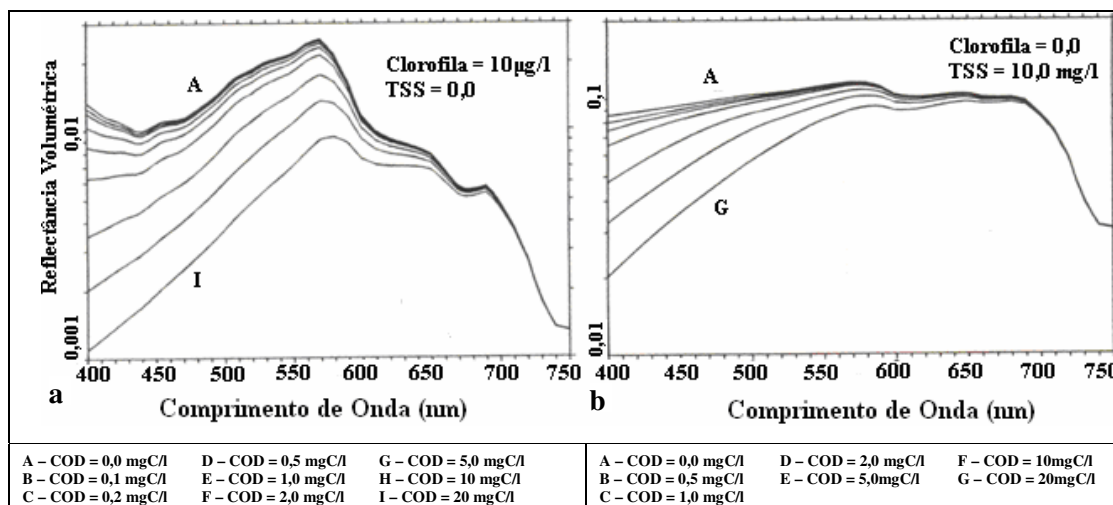


Figura 7 – Reflectância espectral da água com concentrações alternadas de carbono orgânico dissolvido e concentração fixa de clorofila (a) e sólidos suspensos (b) na coluna d'água  
Adaptado de: Bukata et al. (1995)

### **3 INSTRUMENTOS PARA AQUISIÇÃO DE MEDIDAS ESPECTRAIS E MÉTODOS DE TRATAMENTO E ANÁLISE DE DADOS HIPERESPECTRAIS**

Sensores multiespectrais ou hiperespectrais são dispositivos capazes de detectar e registrar a radiação eletromagnética em intervalos estreitos do espectro eletromagnético e gerar informações que possam ser transformadas num produto passível de interpretação, seja na forma de imagem, gráfica ou numérica (MOREIRA, 2005). Os sistemas sensores são normalmente classificados em não imageadores e imageadores.

#### **3.1 Sensores Não Imageadores**

Para se obter uma melhor compreensão dos fenômenos relacionados com a interação da energia eletromagnética com os objetos da superfície terrestre foram desenvolvidos sistemas sensores não imageadores, os quais permitem discriminar diferentes componentes da matéria a partir da análise dos espectros resultantes, que se altera em função das propriedades físicas, químicas e biológicas dos alvos da superfície terrestre (STEFFEN, 1996).

Os instrumentos sensores integram a energia no tempo, no espaço e em comprimento de onda, para produzir uma curva espectral que caracteriza a potência eletromagnética emitida, refletida ou transmitida pelo alvo. Os espectrorradiômetros são exemplos de instrumentos não imageadores que operam em intervalos muito estreitos de comprimento de onda, ao longo de uma ampla faixa espectral de atuação (entre 350 a 2500 nm). O sistema de dispersão utilizado pelo espectrorradiômetro decompõe a radiação incidente em diferentes comprimentos de onda, de tal forma que se possa medir a resposta do alvo quase que de maneira contínua ao longo do espectro eletromagnético (NOVO, 1992).

As medidas pontuais feitas com esse sensor podem ser representadas graficamente e, desta forma, obter comportamento espectral do alvo, dentro do intervalo de comprimento de onda em que opera o sistema (NOVO, 1992). Como exemplo de espectrorradiômetro tem-se o Spectron SE-590, citado por Steffen (1996), que fornece 255 bandas estreitas na faixa espectral entre 400 e 1100 nm e o Field Spec PRO, que atua na faixa espectral de 350 a 2500 nm, descrito em Moreira (2005).



### 3.2 Sensores Imageadores

Os sensores imageadores são equipamentos que fornecem como resultado final uma imagem da área (cena) do terreno (SCHOWENGERDT, 2006).

As características dos sistemas sensores imageadores em geral são definidas por quatro domínios de resolução: espectral, espacial, temporal e radiométrica. A resolução espectral está associada ao número de bandas espectrais que correspondem a cada um dos intervalos de comprimento de onda, nos quais o sensor opera, de modo que, quanto maior o número de faixas e menor sua largura, maior é a capacidade do sistema registrar diferenças espectrais entre os objetos. A resolução espacial define a capacidade do sensor em identificar objetos na superfície terrestre; quanto menor o objeto, maior deve ser a resolução espacial do sistema, para que sua detecção seja possível. Resolução temporal refere-se ao menor intervalo de tempo entre a aquisição de duas imagens sucessivas de uma mesma área. Por último, a resolução radiométrica, que está associada à sensibilidade do sensor, ou seja, sua eficiência em distinguir muitos níveis intermediários de energia incidente (MUSTARD; SUNSHINE, 1999).

Com o avanço da computação e dos sistemas sensores, surgiram novas possibilidades de manipulação no domínio espectral através do Sensoriamento Remoto, utilizando sensores de altíssima resolução espectral, que proporcionam para cada pixel (elemento de resolução espacial), medidas radiométricas em bandas estreitas e contínuas, disponibilizando grande quantidade de informações espectrais em seu domínio, com um nível de resolução mais próximo daquele verificado em espectrorradiômetros de campo ou de laboratório, facilitando o uso de abordagens mais específicas, que permitam quantificar alvos com maior nível de detalhamento espectral (CLARK, 1999).

A importância do uso de imagens fornecidas por esses sensores está na possibilidade de discriminação de tipos de cobertura da superfície terrestre, que possuem características espaciais e componentes estruturais extremamente complexos e por este motivo, definem feições impossíveis de serem determinadas em observações de imagens multiespectrais (duas a seis bandas espectrais). Isto pelo fato das imagens multiespectrais definirem amplos intervalos no espectro, os quais generalizam a resposta espectral e, conseqüentemente, descartam informações úteis para a detecção (FOSTER; TOWNSEND, 2004).

Schowengerdt (2006) relata que os dados de imagens multiespectrais e hiperespectrais podem ser representados como cubos (Figura 8), com duas dimensões ( $x$ ,  $y$ ), representando a posição espacial, e uma terceira dimensão ( $\lambda$ ), representando o comprimento de onda. Cada pequeno retângulo do cubo representa a região de integração espacial e espectral de um pixel da imagem. Na imagem multiespectral, a dimensão espectral é menor e de bandas espectrais mais largas, enquanto que a imagem hiperespectral tem relativa continuidade espectral, com bandas espectrais estreitas.

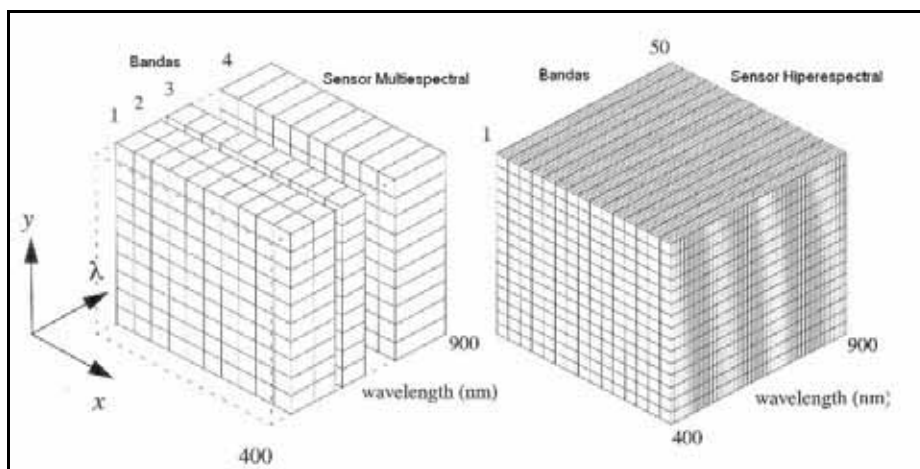


Figura 8 – Comparação entre dados obtidos por sensores multiespectrais e hiperespectrais no VNIR (Visível e Infravermelho) em termos de dimensão espectral.

Fonte: Schowengerdt (2006)

Pode-se observar, na Figura 8, que o eixo  $\lambda$  (vetor comprimento de onda) da imagem hiperespectral é formado por dezenas de bandas espectrais que coletam medidas de radiância espectral. Desse modo, essas imagens são capazes de obter medidas com alto nível de detalhamento espectral, tornando possível a identificação de componentes, através dos padrões de absorção e espalhamento da radiação eletromagnética.

Na Figura 9, é possível visualizar o efeito da alta resolução espectral e da continuidade espectral proporcionada por imagens hiperespectrais. A partir da grande quantidade de informação espectral é possível obter a curva de reflectância espectral característica para cada tipo de alvo terrestre.

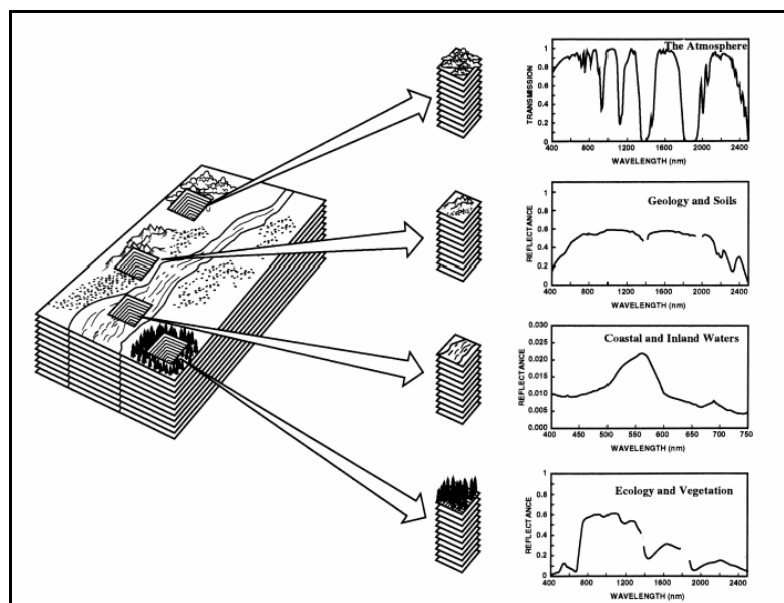


Figura 9 - Imagem hiperespectral definindo um gráfico de comportamento espectral para diferentes elementos espaciais.  
Fonte: Green et. al. (1998)

Percebe-se que imagens hiperespectrais contêm uma grande quantidade de dados e sua interpretação requer um entendimento mais consistente das propriedades dos materiais da superfície e da maneira como eles respondem pontualmente à REM incidente. Além do que, para se estimar uma determinada substância, é importante que o intervalo espectral cubra suficientemente as feições espectrais que caracterizem o alvo em análise.

### 3.3 Tratamento e análise de dados hiperespectrais

Devido ao crescente desenvolvimento de sistemas de Sensoriamento Remoto Hiperespectrais, responsáveis pela obtenção de até centenas de bandas espectrais para cada pixel na cena, tornou-se necessário o desenvolvimento de técnicas adicionais que explorem, de forma mais eficiente e precisa, o potencial destes dados para identificar e mapear os diversos materiais (CLOUTIS, 1996).

Obviamente, as técnicas que são desenvolvidas e aplicadas para este tipo de análise dependem da natureza do problema e do nível de acurácia requerida. Algumas técnicas tradicionais de processamento de dados obtidos por sensores multiespectrais estão sendo utilizadas em dados hiperespectrais com resultados bastante significativos (p. ex.,

Componentes Principais, Transformações IHS e RGB, Adição, e Razão de Bandas e MaxVer). Porém, muitas das técnicas, mesmo otimizadas, podem ser incapazes de disponibilizar toda a informação contida em imagens de natureza hiperespectral (CLOUTIS, 1996). Assim, é do interesse de cada autor encontrar o método que melhor se adapte aos seus objetivos e aos tipos de dados e condições em estudo.

Para estudos de ambientes aquáticos, muitas técnicas têm sido propostas para relacionar dados de reflectância medidos por Sensoriamento Remoto com as concentrações de componentes opticamente ativos. Algumas das técnicas normalmente utilizadas em ambientes aquáticos são citadas por Goodin et al. (1993), Chen et al. (1992), Kruse (2003), entre outros.

A correção dos efeitos atmosféricos é uma técnica amplamente utilizada em todos os dados advindos de plataformas orbitais. A importância de sua aplicação está na distinção das variações relacionadas com a captura dos dados pelos satélites, das variações referentes às próprias grandezas medidas e que realmente condizem com a reflectância das superfícies observadas (ZULLO JR, 1994, p. 1).

As demais técnicas aplicadas foram selecionadas seguindo o objetivo do trabalho, de detectar faixas espectrais sensíveis à variação de componentes opticamente ativos. Desse modo, pesquisaram-se na literatura, técnicas com forte consistência teórica, aplicadas em curvas espectrais da água e técnicas já aplicadas em curvas espectrais de outros alvos, mas que foram pouco exploradas em espectros da água, como é o caso da técnica de remoção do contínuo espectral.

### **3.3.1 Correção dos Efeitos Atmosféricos**

No tratamento e análise de uma imagem de Sensoriamento Remoto, deve-se considerar que entre o sensor e a superfície existe um meio extremamente dinâmico, a atmosfera, que é responsável por significativas alterações no fluxo radiante proveniente do alvo. Os principais efeitos observados nas imagens de satélite, devido à presença real da atmosfera entre o satélite e a superfície terrestre, são a diminuição da faixa de valores digitais possíveis registrados pelo sensor, diminuição de contraste entre superfícies adjacentes e alteração do brilho de cada ponto da imagem. (ZULLO JR, 1994).

Os processos físicos resultantes da interação entre a atmosfera e a fluxo radiante são denominados espalhamento e absorção. A combinação destes dois efeitos é denominada atenuação atmosférica (NOVO, 1992).

A absorção atmosférica é um fenômeno termodinâmico que resulta na perda efetiva de energia para os constituintes atmosféricos. Esse fenômeno envolve a absorção de energia em determinados comprimentos de onda. Os principais constituintes atmosféricos que absorvem radiação no espectro solar, além dos aerossóis e das nuvens são o vapor d'água, dióxido de carbono e ozônio (RICHARDS; JIA, 2006).

O espalhamento é o mecanismo que leva às maiores distorções radiométricas e depende do tamanho dos elementos espalhadores e do comprimento de onda da radiação. Basicamente, o espalhamento pode ser dividido em seletivo e não seletivo. O espalhamento não seletivo ocorre quando os raios das partículas que causam espalhamento são muito maiores do que o comprimento de onda da radiação incidente. Estas partículas têm normalmente diâmetros que variam de 5  $\mu\text{m}$  a 100  $\mu\text{m}$  (ex: nuvens) (LILLESAND, 2004).

O espalhamento seletivo ocorre quando o raio das partículas é menor ou da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda da radiação incidente. Como exemplo de espalhamento seletivo, pode-se citar o do tipo molecular, também denominado Rayleigh, que é inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda da radiação, afetando pequenos comprimentos de onda da região espectral do visível. O espalhamento Rayleigh ocorre quando a radiação interage com moléculas atmosféricas e outros tipos de partículas que possuem raio menor que o comprimento de onda da radiação incidente. Outro tipo de espalhamento é o denominado Mie ou aerossóis, que é resultante do espalhamento da radiação por partículas maiores, que têm o tamanho aproximadamente igual ao do comprimento de onda da energia sensorizada, sendo formada por partículas, como fumaça, névoa e poeira (RICHARDS; JIA, 2006).

Os modelos para correção dos efeitos atmosféricos, geralmente incorporam o tratamento dos efeitos causados pelo espalhamento Rayleigh (molecular) e pelo espalhamento Mie (aerossóis). O espalhamento molecular é tipicamente responsável pelas maiores contribuições. Com relação ao espalhamento pelos aerossóis é necessário considerar-se a distribuição vertical destes aerossóis, sua distribuição efetiva de tamanho e suas propriedades ópticas (KAMBEL; NOVO, 2005).

Devido a esses tipos de interferências da atmosfera na radiação recebida por sensores remotos orbitais, sistemas multiespectrais procuram minimizar os efeitos atmosféricos através do aproveitamento das chamadas janelas atmosféricas, nas quais a

radiação proveniente do alvo registrada pelo sensor, apresenta altos valores de transmitância, ou seja, embora ainda presente, a influência da atmosfera é menor (RICHARDS e JIA, 2006).

Entretanto, sensores hiperespectrais, como Hyperion possibilitam, para cada pixel da imagem, realizar medidas radiométricas quase contínuas em todo o espectro eletromagnético, fornecendo informações sobre o vapor de água e outros gases existentes na atmosfera. Os maiores índices de interferência da atmosfera estão localizados na região espectral entre 400 e 2500 nm (Figura 9) (GAO et al., 2006).

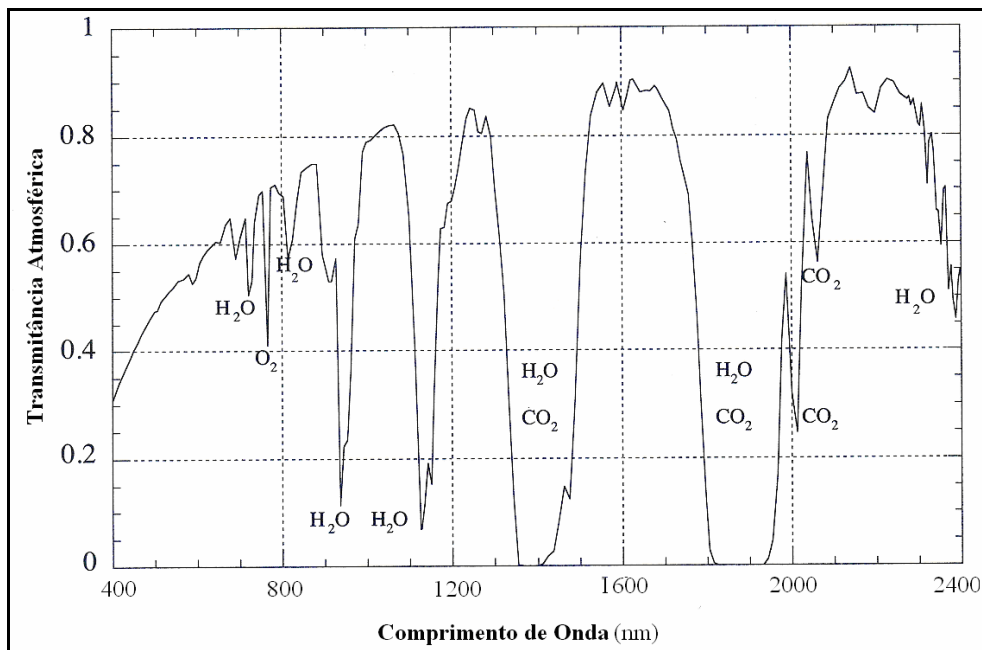


Figura 10 – Transmitância da atmosfera entre o sol e a superfície da terra  
Fonte: Schowengerdt (2006)

Como se visualiza na Figura 10, as regiões que sofrem influência da atmosfera estão centradas em aproximadamente 940, 1140, 1380 e 1880 nm, devido a presença de vapor d'água, em 760 nm, pela influência do oxigênio e em 2080 nm, ocasionada pela presença de dióxido de carbono. Estes intervalos espectrais praticamente não fornecem informações espectrais úteis para a caracterização de alvos presentes na superfície terrestre. Entretanto, trazem grande contribuição para correção dos efeitos atmosféricos em dados hiperespectrais, já que sua alta resolução espectral possibilita a estimativa da quantidade de vapor d'água e outros gases presentes na atmosfera e usar esta informação para facilitar a conversão para reflectância (GAO et al., 2006).

Assim, para a conversão das imagens hiperespectrais de valores de radiância para valores de reflectância, portanto, corrigir os efeitos de absorção e espalhamento atmosféricos, houve a necessidade de se criar novos modelos de correção que incorporassem

parâmetros adicionais e que conseqüentemente utilizassem toda a informação disponibilizada por esses sensores, conduzindo á uma melhor estimativa da contribuição da atmosfera em cada banda espectral.

Para isso, pesquisadores desenvolveram diversos algoritmos robustos de correção atmosférica, utilizando diferentes técnicas para compensação e remoção dos efeitos de absorção e espalhamento ocasionados pela presença da atmosfera. Alguns desses algoritmos são citados na Tabela 2.

Tabela 2 – Aplicativos desenvolvidos para remoção dos efeitos atmosféricos.

<i>Softwares</i>	<b>Referência:</b>	<b>Observação</b>
ACORN ( <i>Atmospheric CORrection Now</i> )	Miller, 2002	Tecnologia MODTRAN “Moderate Atmospheric Radiance and Transmittance”
ATREM ( <i>ATmospheric REMoval</i> )	Gao et al. (1993)	
FLAASH ( <i>Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes</i> )	Matthew et al., 2002	Tecnologia MODTRAN
HATCH ( <i>High-accuracy Atmospheric Correction for Hyperspectral data</i> )	Goetz et al., 2003	Tecnologia ATREM

Fonte: Schowengerdt (2006)

Dentre os modelos de correção atmosférica descritos nesta tabela, destacam-se os que usam o modelo de transferência radioativa “Moderate Atmospheric Radiance and Transmittance” (MODTRAN), por proporcionar melhores resultados na obtenção da reflectância da superfície, devido à sua habilidade em modelar efeitos de espalhamentos por aerossóis e molecular (LATORRE, 1998; STAENZ et al., 2002).

A correção dos efeitos atmosféricos por meio desses aplicativos possibilita a comparação e a análise de imagens hiperespectrais adquiridas por diferentes instrumentos e datas. Outro aspecto relevante é a possibilidade de se comparar diretamente os espectros individuais da imagem hiperespectral com dados espectrais obtidos em campo ou em laboratório, para identificação ou verificação da cobertura da terra (KRUSE, 2003).

Os aplicativos citados na Tabela 2 foram desenvolvidos para aplicações envolvendo alvos terrestres. Porém, os dados de Sensoriamento Remoto coletados em ambientes aquáticos apresentam outros fatores que não são considerados nos modelos. Dentre as correções necessárias podem ser citados os efeitos de reflexão especular e o espalhamento múltiplo pela interface ar/água e pela coluna d’água (RUDORFF, 2006). Apesar das restrições e da falta de modelos mais refinados, alguns autores (KRUSE, 2003; KUTSER, 2004) têm

demonstrado o bom desempenho do modelo ACORN e FLAASH em estudos de ambientes aquáticos, que utilizam a tecnologia MODTRAN.

Desconsiderando-se algumas constantes, os aplicativos FLAASH, ACORN, HATCH e ATREM utilizam o mesmo modelo para radiância espectral de um pixel ( $L^*$ ), fundamentado na superfície plana Lambertiana ou equivalente (Equação 4);

$$L^* = A\rho / (1 - \rho_e S) + B\rho_e / (1 - \rho_e S) + L_a^*, \quad (4)$$

em que  $\rho$  é a reflectância do pixel na superfície;  $\rho_e$  é a reflectância média da superfície sobre o pixel e sobre a região vizinha;  $S$  é o albedo<sup>1</sup> global da atmosfera;  $L_a^*$  é a radiância espalhada pela atmosfera; e  $A$  e  $B$  são coeficientes que dependem das condições atmosféricas e da geometria, mas não da superfície. Cada uma dessas variáveis depende do comprimento de onda, mas o índice foi omitido para simplificar a equação. O primeiro termo da equação corresponde à radiância que é refletida pela superfície em direção ao sensor. O segundo termo corresponde à radiância da superfície que é espalhada pela atmosfera e chega até o sensor, incluindo os efeitos espaciais de mistura ou de adjacência. Nos aplicativos ACORN, HATCH e ATREM,  $\rho$  e  $\rho_e$  são substituídos por uma única variável, resultando na negligência de efeitos adjacentes (MATTHEW et al., 2002).

Os resultados do FLAASH e ACORN tendem a ser similares em condições atmosféricas secas e limpas, mas apresentam respostas um pouco diferentes para tempos chuvosos e nublados (ROCHFORD et al., 2005).

### **3.3.2 Suavização da curva espectral**

Com a disponibilidade de imagens hiperespectrais, pesquisadores propuseram a análise desses dados com a utilização de técnicas usualmente utilizadas em espectroscopia. Entretanto, existem diferenças significantes entre estes dois tipos de dados, visto que, dados utilizados em espectroscopia são normalmente coletados sob condições

---

<sup>1</sup> Albedo: fração de luz incidente sobre a superfície da Terra, que é refletida (LOPES; VALERIANO, 2007)



controladas de laboratório, com total controle de intensidade e distribuição espectral de iluminação, bem como a geometria de visada (TSAI e PHILPOT, 1998).

Por outro lado, dados de Sensoriamento Remoto hiperespectral são coletados sob condições naturais de iluminação, com resolução espacial maior que vários metros e resolução espectral menor, quando comparada com instrumentos de laboratório. Seus dados sofrem considerável interferência da atmosfera, além da influência de oscilações radiométricas dos sensores. Desse modo, dados coletados em nível orbital e aéreo são mais sensíveis á ruídos aleatórios, sendo necessário primeiramente suavizar ou minimizar esses ruídos.

Dentre os vários métodos de suavização de dados espectrais, podem-se citar os algoritmos baseados no ajustamento pelo método dos mínimos quadrados. O método mais comum proposto por Savitzky e Golay<sup>2</sup> (1964 apud TSAI; PHILPOT, 1998), assume que o ruído aleatório tem característica similar em todo o espectro e que pode ser tratado como um processo constante. Kawata e Minami<sup>3</sup> (1984, apud TSAI; PHILPOT, 1998) desenvolveram outra técnica, na qual se aplica um ajustamento de curva polinomial que altera a forma do sinal, ao invés de eliminar o ruído. Este algoritmo também se baseia no MMQ, mas leva em consideração, que o ruído aleatório pode variar com o comprimento de onda.

Outra técnica muito utilizada para suavização da curva espectral é o filtro da média móvel, que também suaviza os dados localmente com a definição prévia de uma janela. Para a efetiva suavização, este método não necessita de qualquer curva de ajuste polinomial ou método por mínimos quadrados. Ao invés disso, o filtro da média usa um valor médio dos elementos dentro de uma janela de suavização local como o novo valor do ponto central da janela de amostragem (TSAI; PHILPOT, 1998).

Testes realizados por Tsai e Philpot (1998) revelaram que o filtro da média alcançou melhores resultados de suavização, enquanto que os métodos de Kawata e Minami (1984) e de Savitzky-Golay (1964) não removeram adequadamente o ruído. O filtro da média também se destaca por ser mais objetivo e consumir menor tempo computacional.

O filtro de média móvel calcula uma média dos valores espectrais de todos os pontos dentro de um intervalo discreto, com tamanho pré-especificado. Essa média então é definida como o novo valor do ponto central da janela (Equação 5):

---

<sup>2</sup>SAVITZKY, A., AND GOLAY, M. J. E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. **Anal. Chem.** v. 36. 1964. p. 1627–1639.

<sup>3</sup>KAWATA, S., AND MINAMI, S. Adaptive smoothing of spectroscopic data by a linear mean-square estimation. **Appl. Spectrosc.** v. 38. n. 1. 1984. p. 49–58.

$$\hat{s}(\lambda_j) = \frac{\sum s(\lambda_i)}{n}, \quad (5)$$

em que  $\hat{s}(\lambda_j)$  é o espectro estimado livre de ruído;  $s(\lambda_i)$  é o espectro original com ruído;  $n$  é número de elementos considerados na janela e  $j$  é o índice de ponto central do filtro. O desempenho deste algoritmo dependerá principalmente do tamanho do filtro utilizado, pois com o aumento do tamanho do filtro, há um aumento gradativo até a relativa suavização espectral ou remoção de detalhes espectrais.

### 3.3.3 Análise Derivativa

Análise Derivativa é uma técnica de espectroscopia com forte consistência teórica para o uso em dados de Sensoriamento Remoto. Isso pelo fato das derivadas de segunda ordem ou de ordens maiores serem relativamente insensíveis a variações de intensidade de iluminação, se causados por mudanças no ângulo solar, cobertura de nuvens, ou pela topografia do local (TSAI; PHILPOT, 1998).

Para se obter derivadas utilizando dados hiperespectrais, é necessária a elaboração de módulos para o cálculo de derivadas em análises espectrais. Uma alternativa simples é através da técnica de aproximação por diferença simétrica, definida genericamente como aproximação simétrica. O resultado da aproximação é dependente da resolução (separação entre as bandas) e o tamanho do filtro ou da largura da banda. O benefício de utilizar a técnica de aproximação finita é que se trata de um método de fácil manipulação computacional. Desta forma a primeira derivada do espectro de reflectância com relação ao comprimento de onda  $\lambda$ , em um determinado ponto  $n$ , pôde ser aproximada numericamente por um esquema de diferenças finitas usando a aproximação central ou simétrica. A equação (6) pode ser usada para estimar a primeira derivada de uma curva espectral (RUDORFF, 2006):

$$\left. \frac{ds}{d\lambda} \right|_n \approx \frac{\rho(\lambda_{n+1}) - \rho(\lambda_{n-1})}{2\Delta\lambda} \quad (6)$$

no 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  $\lambda_n$ . A segunda derivada pode ser obtida aplicando-se a equação 6 na curva resultante da primeira derivada e assim por diante. Dessa forma, derivadas de altas ordens são calculadas iterativamente de modo que qualquer ordem de derivada é possível, com o uso da aproximação central simétrica.

Conceitualmente, a aplicação de uma operação de derivada sobre uma função, representa uma forma de quantificar a taxa de variação de uma determinada variável em relação à outra. No caso de um espectro, representa a taxa de variação de reflectância espectral do alvo em relação à variação do comprimento de onda da energia incidente (BARBOSA, 2005).

As primeiras aplicações de análise derivativa em dados hiperespectrais foram propostas por Demetriades-Shah et al. <sup>4</sup> (1990, apud GOODIN et al., 1993) para separar efeitos do solo e da vegetação no espectro em áreas agrícolas, e sugeriram sua utilização para decompor outros sinais compostos, como os de corpos d'água.

Os trabalhos existentes usando análise derivativa em corpos d'água relatam a utilização da técnica para decompor espectros de ambientes aquáticos, visando discriminar os efeitos e quantificar a concentração de sólidos em suspensão<sup>5</sup> e clorofila na água (GOODIN et al., 1993; MALTHUS; DEKKER, 1994; RUNDQUIST et al., 1996; LOUCHARD et al., 2002; CHEN et al., 1992).

Na análise derivativa, a reflectância espectral de um corpo d'água pode ser entendida como um sinal composto representando a soma ponderada de três componentes: água, sólidos em suspensão e clorofila. Cada componente tem um padrão ou assinatura espectral distintos, e a mistura destes padrões produz uma assinatura espectral de um corpo d'água (GOODIN et al., 1993). Essa assinatura pode ser representada como um polinômio de ordem N, sendo que N varia diferentemente para cada componente. Então, pela diferenciação sucessiva da assinatura espectral original, pode-se remover sistematicamente os efeitos dos componentes de menor ordem (GOODIN et al., 1993).

Para demonstrar o efeito de sucessivas diferenciações na curva espectral do corpo d'água, apresenta-se na Figura 11, as curvas de derivadas espectrais de ordens zero,

---

<sup>4</sup> DEMITRIADES-SHAH et al., T. H. et al. High Resolution Derivative Spectra in Remote Sensing, **Remote Sens. Environ.** Vol. 33, 1990, p. 55-64.

<sup>5</sup> O termo sólidos em suspensão, refere-se à fração tripton (partículas inorgânicas mais detrito). O termo clorofila refere-se à matéria orgânica viva (fitoplâncton).

primeira e segunda para água limpa, água com sólidos em suspensão e água com sólidos em suspensão e com clorofila.

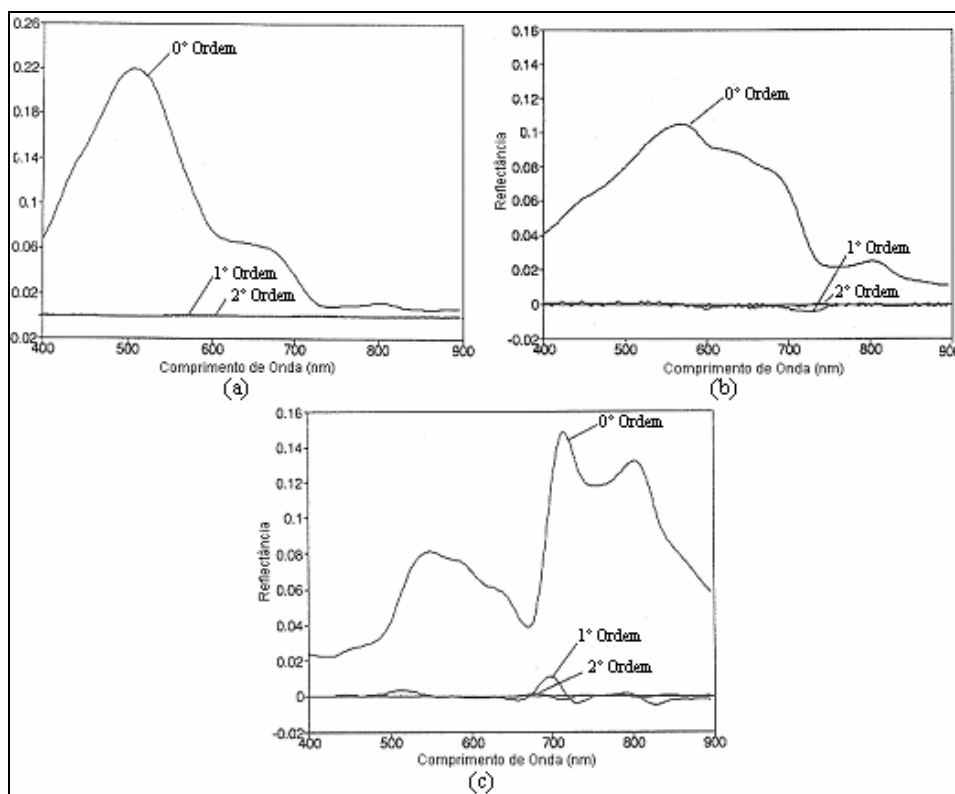


Figura 10 – Curvas espectrais e de primeira e segunda derivadas. (a) – Água pura. (b) – Água com sólidos em suspensão . (c) – Água com sólidos em suspensão mais clorofila.

FONTE: Goodin et al. (1993)

Como se verifica na Figura 11-a, a água limpa (curva de ordem zero), apresenta altos valores nas bandas do visível (400 a 700 nm), com o pico em 500 nm, mas baixa reflectância no infravermelho próximo (700 a 900 nm). Nota-se que tanto os valores das curvas da primeira e segunda derivadas apresentam-se homogêneos (sem pico de variação), sugerindo que os efeitos espectrais dos constituintes na reflectância da água pura são efetivamente eliminados na primeira derivada. Em função disto, a reflectância da água pura é considerada um efeito de primeira ordem. (GOODIN et al., 1993).

A Figura 11-b aponta que sólidos em suspensão são efeitos de segunda ordem, pois a curva de primeira ordem apresenta uma depressão centrada em 720 nm e, na segunda ordem, a curva elimina este efeito.

Para água com sólidos em suspensão e clorofila (Figura 11-c), a curva de ordem zero é mais complexa que as apresentadas em (a) e (b), pois na região do visível tem-se um pico na região verde (500 a 600 nm) do espectro, que é característico da clorofila.

Ocorrem também um alto pico de reflectância por volta de 700 nm, que é reduzido na região do infravermelho. A curva de primeira ordem apresenta um pico em aproximadamente 530 nm e distintos padrões de picos positivos e negativos entre 680 e 750 nm, enquanto que a curva de segunda ordem mantém um padrão regular de picos positivos e negativos em 660 e 710 nm. Isto sugere que a segunda derivada removeu os efeitos de sólidos em suspensão, mas os efeitos de clorofila permanecem.

A discussão anterior torna evidente que os efeitos de alguns componentes da água podem ser removidos pela primeira derivada e efeitos de turbidez pela segunda, deixando uma curva que consiste somente de feições associadas à clorofila. Goodin et al. (1993) testaram esta hipótese com dados de alta resolução espectral coletados sobre ambientes controlados, em tanques experimentais com diferentes concentrações de clorofila e turbidez (NTU) que representou indiretamente sólidos em suspensão. Alguns resultados obtidos nesta pesquisa são ilustrados na Figura 12.

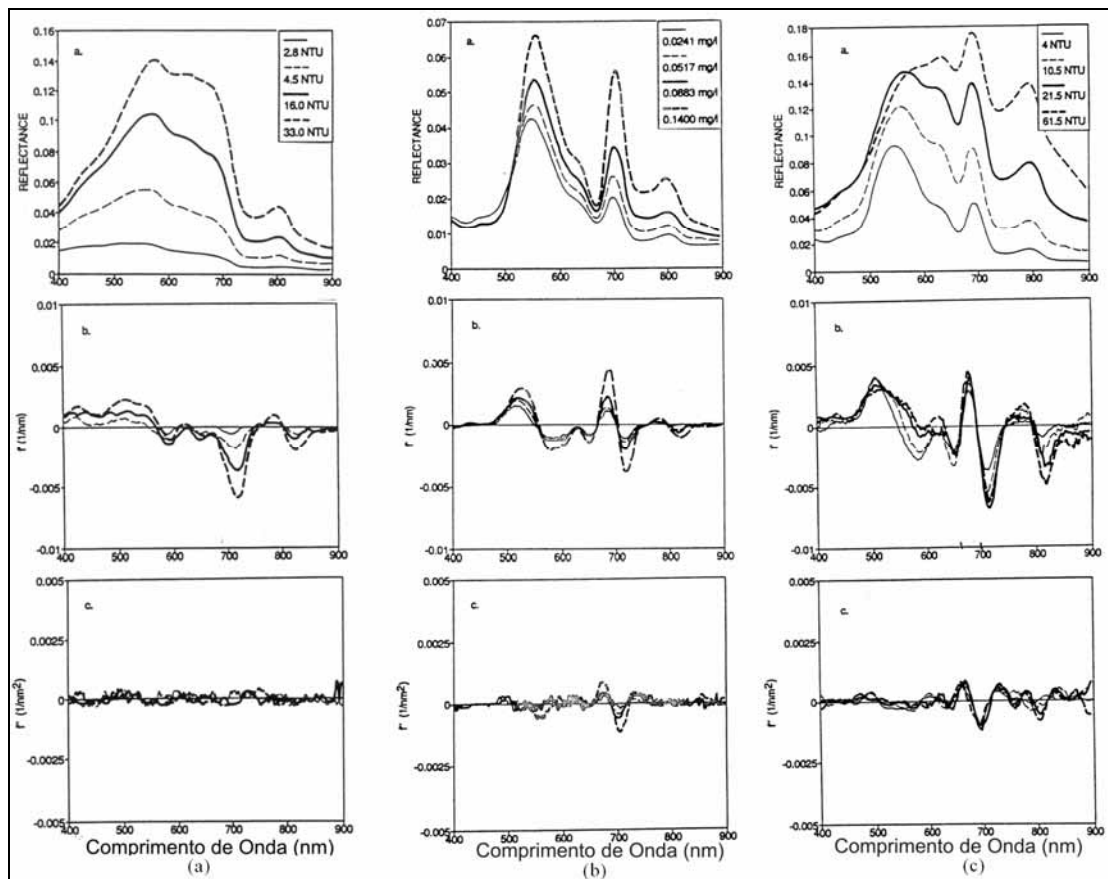


Figura 12 – Curvas de reflectância, de primeira e segunda derivadas para diferentes concentrações de :  
(a) – Sedimento em suspensão. (b) – Clorofila. (c) Sólidos em suspensão e concentração fixa de clorofila.

Fonte: Goodin et al. (1993)

A Figura 12-a apresenta a curva de ordem zero e as curvas derivadas de primeira e segunda ordens para sólidos em suspensão em quatro diferentes concentrações. A curva de ordem zero mostra o aumento da reflectância da água com o aumento de turbidez. Os autores também mencionam que a forma da curva permanece constante. O cálculo da primeira derivada permite a análise das principais feições de absorção, realçando feições espectrais relacionadas com sólidos em suspensão presentes na água, como em 720 nm. Os autores obtiveram um alto coeficiente de correlação ( $r = -0,95$ ;  $p < 0,0001$ ) entre o valor absoluto da primeira derivada em 720 nm e a concentração de sólidos em suspensão. Já a segunda derivada apresentou valores pequenos, sem nenhuma relação com a concentração de sólidos em suspensão para a faixa espectral em questão.

A Figura 12-b ilustra a curva de ordem zero e as curvas derivadas de primeira e segunda ordens para diferentes concentrações de clorofila, nas quais essa concentração foi sistematicamente reduzida com a adição de água pura. Na primeira derivada apresenta-se um padrão de picos positivos e negativos, em 670 e 750 nm, sendo que o pico negativo ocorre na mesma região do pico negativo da primeira derivada de água com sólidos em suspensão (Figura 12-a). Essa coincidência indica que a primeira derivada é pouco eficiente para discriminação dos efeitos entre os dois componentes. Já na segunda derivada, o padrão com picos positivos e negativos também aparece, mas os mínimos e máximos ocorrem em locais ligeiramente diferentes e devido à presença da clorofila. Goodin et al. (1993) também encontraram um coeficiente de correlação significativo ( $r = -0,89$ ;  $p < 0,001$ ) entre a diferença do valor da segunda derivada<sup>6</sup> no pico positivo e negativo e a concentração de clorofila, embora esse valor não tenha sido tão alto quanto o obtido pelos dados de turbidez.

Na Figura 12-c, mostra que as curvas de reflectância e das derivadas de primeira e segunda ordens associadas à variação na concentração de sólidos em suspensão e quantidade fixa de clorofila. Em baixas concentrações de sólidos suspensos, o pico da clorofila no verde (550 nm) ainda aparece realçado, ficando mascarado com o aumento significativo na taxa de concentração de sólidos em suspensão. Entretanto, o pico em 710 nm permanece bem definido, assim como a absorção entre 670 e 680 nm. O valor absoluto da primeira derivada apresenta um crescimento sistemático em 720 nm com o aumento da concentração de sólidos em suspensão, como era de se esperar (Figura 12-a). Já na curva da segunda derivada, o valor em torno de 720 nm manteve-se constante para todas as concentrações de sólidos em suspensão. Como a concentração de clorofila foi mantida

---

<sup>6</sup> No experimento foi feita a diferença do valor da segunda derivada em 660 pelo valor da derivada em 695 nm. ( $d''(660) - d''(695)$ ).

constante neste experimento, este resultado reforça a hipótese de que os valores de segunda derivada em torno de 720 nm refletem as variações na concentração de clorofila.

Rundquist et al. (1996) investigaram relações da primeira derivada em curvas de reflectância com diferentes concentrações de clorofila<sup>7</sup>, e as curvas derivadas obtidas nos seus experimentos são apresentadas na Figura 13. Segundo os autores, para os experimentos realizados com alta concentração de clorofila (Figura 13-a) e baixa concentração de clorofila (Figura 13-b), as cinco localizações espectrais apresentadas (*d1*, *d2*, *d3*, *d4* e *d5*), representam regiões com maior grau de modificação nas curvas de primeira derivada, à medida que se alterou a concentração de clorofila.

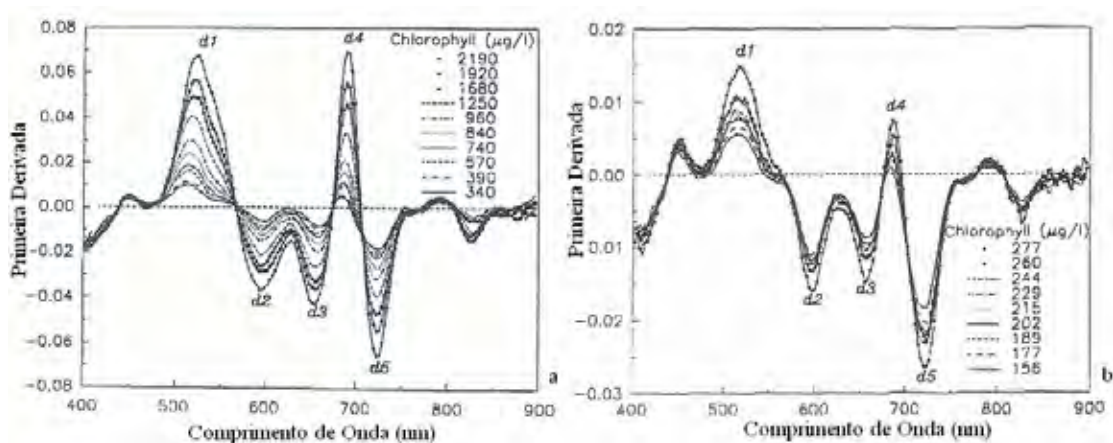


Figura 13 – Primeira derivada espectral com variação de clorofila. (a) Alta concentração de clorofila. (b) baixa concentração de clorofila.

Fonte: Rundquist et al. (1996)

Chen et al (1992) também aplicaram a técnica de análise derivativa para a estimativa do total de sólidos em suspensão em corpos d'água, a partir de curvas espectrais obtidas em laboratório e em campo. O coeficiente de correlação máximo obtido entre sólidos em suspensão e a curva de ordem zero, foi de +0,68, e entre sólidos em suspensão e a curva derivada de primeira ordem foram de +0,89 e -0,91. A partir de alguns experimentos controlados, os autores mostraram que esta grande diferença entre os coeficientes é devida à reflexão especular na superfície da água e concluíram que a técnica de análise derivativa mostrou-se eficiente na sua remoção.

<sup>7</sup> As curvas espectrais originais obtidas por Rundquist et al. (1996) são representadas na Figura 4 do Capítulo 2.

### **3.3.4 Análise por Remoção do Contínuo Espectral**

A Remoção do Contínuo é uma função matemática utilizada para isolar bandas de absorção particulares dos espectros de reflectância, permitindo qualificar feições contínuas e individuais dos espectros que retratam características intrínsecas dos alvos (CLARK et al., 2003; KRUSE et al., 1993). Sua aplicação é importante, pois permite acentuar estas feições, reduzir os efeitos externos e identificar os elementos causadores (CLARK; ROUSH, 1984).

A remoção do contínuo se aplica sobre feições de absorção representadas por bandas que definem um conjunto de medidas de reflectância entre dois comprimentos de onda. Esta técnica normaliza a reflectância espectral de modo a permitir um melhor detalhamento das feições nas bandas de absorção, possibilitando a comparação das feições de absorção individuais com valores de referência comuns. Diversos autores desenvolveram pesquisas utilizando a remoção do contínuo, nas mais diversas áreas do conhecimento, propondo melhorias e extensões ao método, dentre os quais podemos citar Clark e Roush (1984), Nobrega (2002), Kruse et al. (1993), Clark et al. (2003), Mutanga e Skidmore (2003); Kokaly e Clark (1999) e Curran et al. (2001).

Para isolar uma feição utilizando a remoção do contínuo necessita-se, primeiramente, criar uma linha denominada espectro do contínuo, que é uma superfície envolvente convexa ajustada à parte superior do espectro, que utiliza segmentos retilíneos que conectam os máximos locais da curva (pontos de reflectância máximos). A superfície convexa pode ser considerada como sendo a forma que a curva espectral alcançaria se não existissem regiões de absorção (MUTANGA; SKIDMORE, 2003).

Para isolar uma feição de absorção específica, define-se um ponto inicial e um final para a feição de absorção particular. A escolha dos limites superior e inferior da feição de absorção deve ser feita de modo a ressaltar as feições de absorção dos elementos (BREUNIG et al., 2007a). Assim, uma linha contínua pode ser ajustada entre os pontos final e inicial da feição de absorção e, então, a remoção do contínuo pode ser aplicada (Figura 14) (KRUSE et al., 1993).



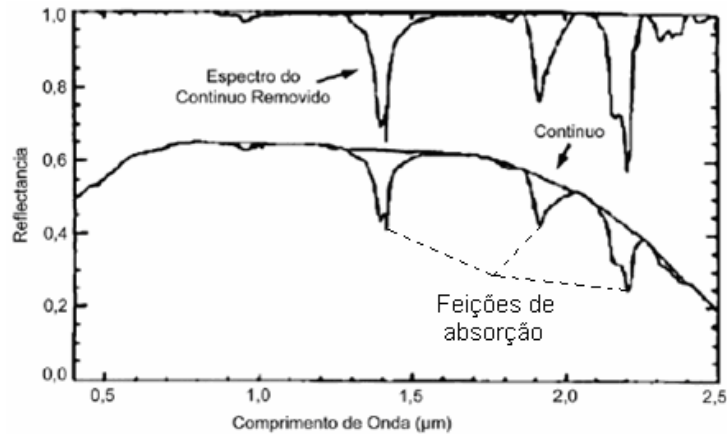


Figura 14- Espectro de reflectância com o contínuo e o espectro após remoção do contínuo.  
 FONTE: Adaptado de Kruse et al. (1993)

De acordo com Mutanga e Skidmore (2003), as curvas de saída do contínuo removido têm valores entre 0 e 1, em que feições de absorção são realçadas. O primeiro e o último valores espectrais da curva do contínuo removido localizam-se no topo da curva e por isso seus valores são iguais a 1. (Figura 14).

A formulação matemática para a remoção do contínuo, denominada fator de reflectância do contínuo  $\rho_{CR\lambda}$  pode ser expresso pela divisão do valor da reflectância  $\rho_{Original\lambda}$  para cada banda da feição de absorção pela linha do espectro do contínuo (superfície convexa)  $\rho_{contínuo\lambda}$ . O  $\lambda$  representa o comprimento de onda (Equação 7) (CLARK; ROUSH, 1984; MUTANGA E SKIDMORE, 2003; CLARK et al., 2003).

$$\rho_{CR\lambda} = \frac{\rho_{Original\lambda}}{\rho_{contínuo\lambda}}, \quad (7)$$

Vale ressaltar que o espectro do contínuo ( $\rho_{contínuo\lambda}$ ) pode ser formulado matematicamente pela equação da reta, definida na equação (8), em que  $\lambda$  representa o comprimento de onda para cada banda que define feição de absorção. O coeficiente angular (k) é definido pela Equação (9) e o coeficiente linear (w) é obtido pela equação (10), ajustadas aos limites superiores e inferiores de cada feição de absorção, definidos pelo analista (BREUNIG, 2007a).

$$y = k\lambda + w \quad (8)$$

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\lambda_2 - \lambda_1}, \quad (9)$$

$$w = \frac{[\rho_1 \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)] + [-\lambda_1 \cdot (\rho_2 - \rho_1)]}{\lambda_2 - \lambda_1}, \quad (10)$$

no qual tem-se,  $\rho_2$  representando a reflectância espectral observada no limite superior feição de absorção;  $\rho_1$  a reflectância espectral observada no limite inferior da feição de absorção;  $\lambda_2$  representa o comprimento de onda do limite superior da feição de absorção; e  $\lambda_1$  o comprimento de onda do limite inferior da feição de absorção.

Uma feição de absorção resultante da aplicação da técnica de remoção do contínuo normalmente possui vários parâmetros associados a ela, como: profundidade, posição, largura e assimetria. Esses parâmetros servem como indicadores quantitativos das propriedades espectrais das amostras analisadas. Normalmente esses parâmetros são utilizados na comparação entre as curvas de reflectância normalizada de cada amostra com curvas espectrais de referência, obtidas a partir de amostras cujas propriedades sejam conhecidas. Esta técnica pode servir também para desenvolver modelos que relacionem diretamente os parâmetros da banda de absorção com variáveis limnológicas das amostras (NOBREGA, 2002).

Para obter a profundidade da banda (BD) para cada banda da feição de absorção, utiliza-se a equação (11) (KOKALY; CLARK, 1999; MUTANGA; SKIDMORE, 2003). A profundidade da banda de absorção, apresentada por Clark e Roush (1984), está associada à quantidade de energia absorvida:

$$BD = (1 - \rho_{CR\lambda}) \quad , \quad (11)$$

em que  $\rho_{CR\lambda}$  é o fator de reflectância do contínuo para o comprimento de onda  $\lambda$ . Deve-se salientar que o contínuo deve ser removido por subtração quando relacionado ao espectro de absorção, e por divisão quando se trabalha com o espectro da reflectância (CLARK; ROUGH, 1984). Para melhor entendimento, a Figura 15 representa a relação da reta do espectro do contínuo com a feição de absorção para a definição da profundidade da banda.

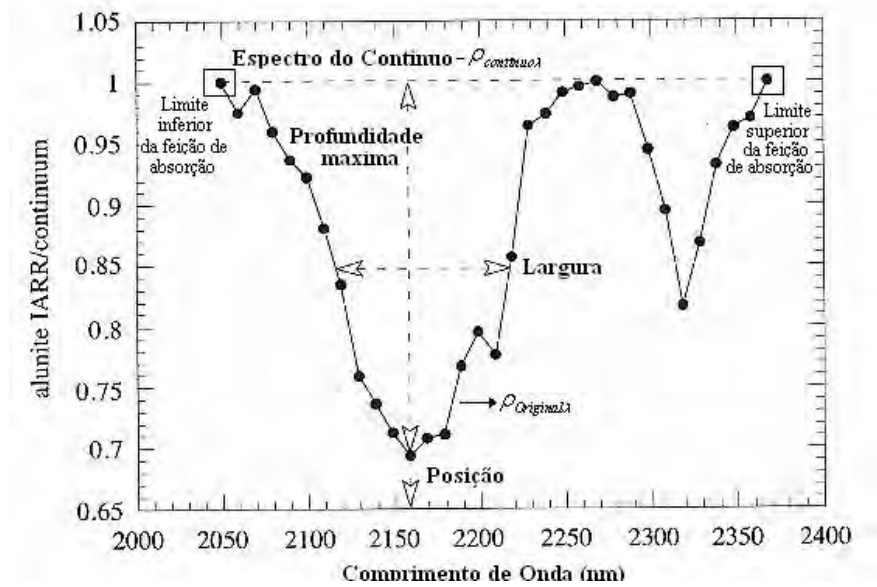


Figura 15 - Definição da profundidade da banda.  
 Fonte: Adaptado de Schowengerdt (2006)

As áreas das feições de absorção podem ser calculadas através da aproximação numérica que considera a área do trapézio entre cada  $\lambda$  discretizado pelo sensor em relação à profundidade da banda (BD), para os limites escolhidos das bandas de absorção:

$$A_b = \sum_{i=m}^M \frac{(BD_i + BD_{i-1})}{2} \cdot (\lambda_i - \lambda_{i-1}), \quad (12)$$

em que,  $A_b$  é a área da feição de absorção; e  $i$  representa o passo de cálculo que vai de  $m$ , limite inferior da feição de absorção a  $M$ , limite superior.

Para o cálculo de alguns parâmetros, é necessário definir a posição de um  $\lambda$  de referência, representativo das bandas de absorção que irá formar a feição de absorção. Uma das maneiras consiste em localizar o  $\lambda$  em que ocorreu a maior profundidade. A outra maneira é fixar um  $\lambda$ , com base em estudos preliminares (BREUNIG et al., 2007a).

Pu et al. (2003) optaram pela utilização da profundidade máxima da feição de absorção. Assim, o valor da largura da feição de absorção foi obtido na metade da profundidade máxima da feição como representa a Figura 15.

A assimetria é definida pela razão da soma dos valores de reflectância para as bandas da feição de absorção à direita do  $\lambda$  de referência, e pela soma dos valores de reflectância para as bandas de feição de absorção à esquerda do  $\lambda$  de referência. Assim,

feições de absorção simétricas possuem assimetria com valor zero (a área da esquerda e da direita do  $\lambda$  de referência são iguais). Bandas de absorção que são assimétricas em direção a menores comprimentos de onda têm assimetria negativa, enquanto bandas que têm assimetria em direção a altos valores de comprimentos de onda têm assimetria positiva. A magnitude deste valor indica o grau de assimetria (Figura 16) (KRUSE et al., 1993).

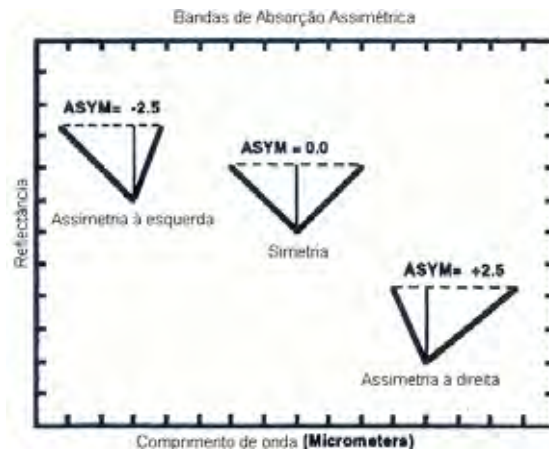


Figura 16 – Esquema apresentando bandas de absorção assimétrica.  
Fonte: Kruse et al. (1993)

A Figura 17 representa, esquematicamente, o efeito da aplicação da remoção do contínuo sobre uma banda de absorção (BREUNIG et al., 2007a).

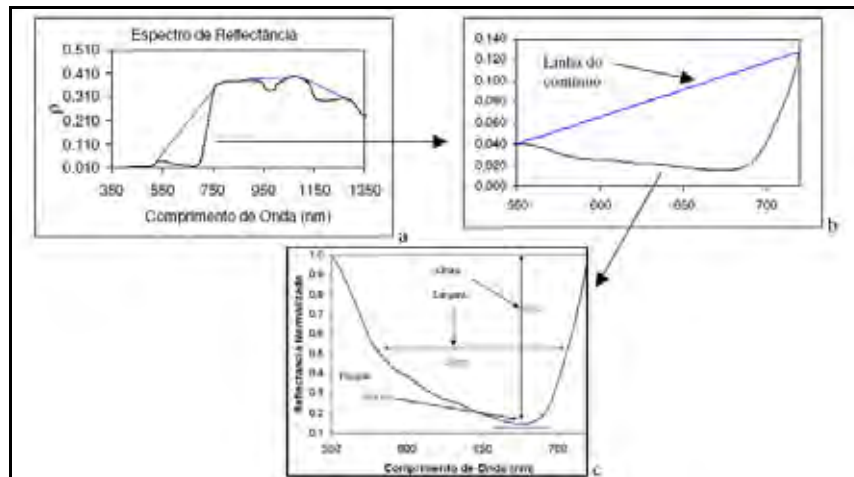


Figura 17 – Representação esquemática da remoção do contínuo. a) Espectro de refletância com os limites das bandas; b) Banda de absorção antes da remoção do contínuo; e c) Banda de absorção com a remoção do contínuo.

Fonte: Breunig et al.(2007a)

As informações derivadas da aplicação deste método são disponibilizadas na forma de tabelas com os valores dos parâmetros e sob forma de curvas do contínuo removido. Assim, estes dados podem ser comparados com outros dados e determinar, se as feições de

absorção extraídas do espectro representam o material e a composição dos alvos em análise, ou se são somente resultantes da presença de ruídos.

Devido ao fato de não existirem muitos trabalhos divulgados sobre a remoção do contínuo em espectros de água, torna-se importante o reconhecimento prévio das feições de absorção do espectro da água. A seleção de feições de absorção para aplicação da técnica de remoção do contínuo na água é definida a partir de estudos realizados sobre o comportamento espectral dos principais componentes opticamente ativos presentes na água.

Um dos trabalhos recentemente realizados envolvendo a aplicação da remoção do contínuo foi o elaborado por Breunig et al. (2007b), que avaliaram a separabilidade de classes de água, a partir da remoção do contínuo em um corpo d'água, com dados hiperespectrais medidos em campo. A técnica foi aplicada aos espectros de campo em quatro intervalos de bandas de absorção. Os parâmetros de remoção do contínuo das bandas de absorção analisados foram: profundidade, área e largura. Deve-se ressaltar que os intervalos espectrais devem ser selecionados, de acordo com as feições de absorção observadas nas curvas espectrais específicas do ambiente aquático analisado, Nobrega (1992), por exemplo, aplicou a remoção do contínuo para toda faixa espectral, sem a definição de intervalos espectrais e identificou feições espectrais mais pronunciadas.

### 3.3.5 Razão espectral

As razões entre imagens constituem-se de realces resultantes da divisão de valores de reflectância de uma banda espectral ( $m$ ) pelos valores correspondentes em outra banda ( $n$ ) pixel a pixel (Equação 13). Quando aplicada com uma formulação lógica e em dados espectrais adequados, trata-se de uma ferramenta simples e efetiva para análise de dados espectrais (SCHOWENGERDT, 2006).

$$R_{mn}(x, y) = \frac{\rho_m(x, y)}{\rho_n(x, y)} \quad (13)$$

Esse método é frequentemente usado para discriminação das variações espectrais súbitas na cena, que são mascaradas pelas variações de brilho em uma banda

espectral individual, ou nas composições coloridas padrão (DEKKER, 1993). A maior vantagem da razão de bandas é que preserva as características espectrais das feições da imagem, desconsiderando as variações decorrentes de condições de iluminação da cena. Entretanto, antes do cálculo da razão de bandas, certos cuidados devem ser tomados como a remoção de ruídos e correção dos efeitos atmosféricos, uma vez que esses efeitos aditivos podem ser realçados causando resultados errôneos (MUSTARD; SUNSHINE, 1999).

Devido sua simplicidade empírica, esse método é usado em ambientes aquáticos para estimar concentração clorofila, sólidos em suspensão e matéria orgânica dissolvida, por análises estatísticas diretas com dados limnológicos coletados em campo, formando modelos que quantificam esses componentes (HOGE et al., 1987). Contudo, para que sua aplicação forneça resultados aceitáveis, em relação a componente opticamente ativa analisada, é necessário selecionar regiões espectrais que forneçam informações apenas da componente em análise (DEKKER, 1993).

Cipollini e Corsini (1994) propuseram a utilização de razões nas regiões espectrais do azul e verde para detectar presença de matéria orgânica dissolvida. Doxoran et al. (2004) observaram altas correlações entre a razão  $\rho_{850}/\rho_{550}$  com total de sólidos suspensos e entre a razão  $\rho_{400}/\rho_{600}$  com matéria orgânica dissolvida.

Razões espectrais entre as feições de absorção e refletância observadas nas regiões do vermelho e infravermelho próximo (IVP), por exemplo, são muito utilizadas para a estimativa de clorofila *a* (GITELSON, 1992; GITELSON; KONDRATYEV, 1991; MITTENZWEY et al., 1992; RUNDQUIST et al., 1996, RUDDICK, 2001; YACOBI et al., 1995; HOGE et al., 1987). Ruddick et al. (2001) afirma que a feição de absorção ocasionada pela presença de clorofila *a* existente no na região do vermelho ( $\approx 670$  nm) é atrativa para a formulação de razões espectrais, em decorrência dessa região, minimizar interferências de absorção do tripton e da matéria orgânica dissolvida, principalmente em ambientes aquáticos com alto grau de turbidez.

Resultados significativos também foram obtidos para razão entre o pico de reflectância máxima do verde ( $\pm \rho$  (560nm)) pelo pico de reflectância máxima na região do infravermelho ( $\pm \rho$  (700nm)) ( $\rho_{700}/\rho_{560}$ ) na estimativa de concentração de clorofila (GITELSON, 1992; GITELSON; KONDRATYEV, 1991).

Kirk (2004) e Hoge et al. (1987) relatam que métodos empíricos têm sido desenvolvidos para estimar concentração de clorofila *a*, utilizando calculo de razões ou diferença entre a região do azul (400 a 551 nm) e verde (515 a 600 nm). Isto, pelo fato desses

intervalos apresentarem consideráveis mudanças de reflectância com a variação de concentração de clorofila  $a$  na água.

Segundo esses autores, a utilização da razão espectral nesses intervalos tem gerado resultados bastante robustos para a estimativa de concentração de componentes opticamente ativos na água, porém é necessário ter uma concentração mínima da componente em análise no ambiente aquático para que a estimativa seja acurada.

## **4 DESENVOLVIMENTO GERAL DA PESQUISA**

Neste capítulo é apresentada uma breve descrição da área de estudo, os materiais utilizados no desenvolvimento da pesquisa e o método adotado no levantamento e processamento dos dados. Posteriormente, serão detalhados os processamentos aplicados na imagem hiperespectral e as ferramentas de análise usadas para atingir o objetivo proposto que é avaliar a contribuição dos dados hiperespectrais na identificação de alguns componentes opticamente ativos em um corpo d'água. Os Resultados e análise das técnicas aplicadas também serão discutidos nesse capítulo.

### **4.1 Estudo de caso: Reservatório de Itupararanga**

O Reservatório de Itupararanga/SP, pertencente à bacia hidrográfica do Rio Sorocaba – médio Tietê é um dos maiores mananciais de água potável da região, abastecendo as cidades de Sorocaba, Votorantim, Mairinque, Alumínio, Ibiúna e São Roque, num total de aproximadamente 800.000 habitantes. Segundo Fehidro (1998). Suas águas são consideradas pelos órgãos oficiais do Estado como de boa qualidade.

A represa de Itupararanga é formada pelo Rio Sorocaba, que possui como principais afluentes os rios Sorocabuçu e Sorocamirim. A Represa foi construída pela empresa Light, a partir de 1911, e teve seu funcionamento iniciado em 1914. O reservatório controla uma área de drenagem de 936,50 Km<sup>2</sup>, com aproximadamente 26 km de canal principal, 192,88 Km de margem e 33 km<sup>2</sup> de área inundada. Possui vazão máxima de 39,12m<sup>3</sup>/s e seu volume é de aproximadamente 286 milhões de m<sup>3</sup>. A captação de água é realizada pelo SAAE de Sorocaba, que utiliza 1,51 m<sup>3</sup>/s deste manancial, representando 63% das demandas para abastecimento público das cidades de Sorocaba, Votorantim, Mairinque, Alumínio, Ibiúna e São Roque (SMITH e PETRERE, 2001).

A Figura 18 ilustra a localização do reservatório no estado de São Paulo. As coordenadas no sistema de projeção UTM, fuso 23 e Datum WGS84, referentes à parte central do reservatório são E (m): 264090,185 e N (m): 7385377,742.



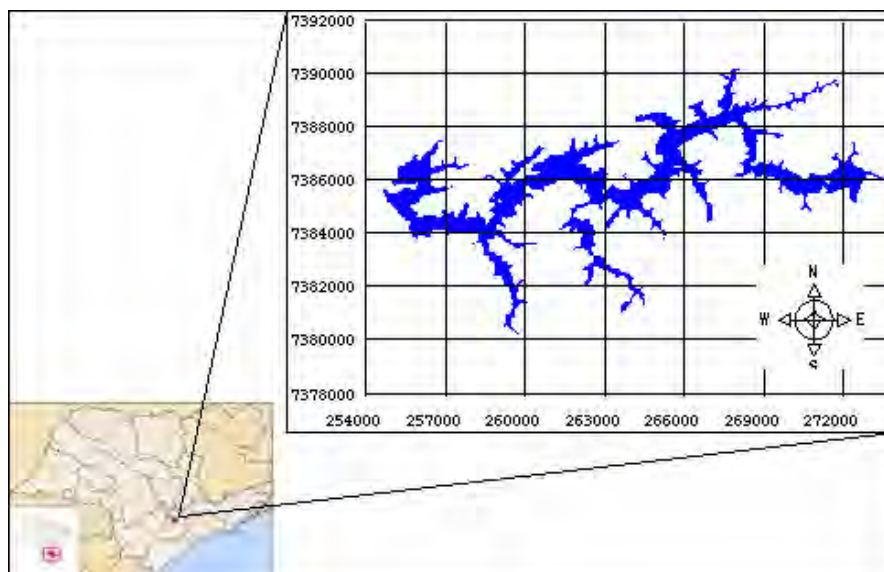


Figura 18 – Esquema da localização do Reservatório de Itupararanga no Estado de São Paulo

Nos trabalhos de campo preliminares realizados na região, observou-se que no entorno da represa há intenso uso agrícola, constando basicamente de pequenos proprietários que cultivam produtos hortifrutigranjeiros, que na maioria dos casos localizam-se “morro abaixo”, os quais são irrigados pelas águas da represa. As margens da represa também são ocupadas por empreendimentos imobiliários, como chácaras e casas de veraneio que estão degradando a vegetação local. A atividade pecuária na região caracteriza-se por ser um sistema extensivo de baixa produtividade, o que pode ser aferido pela má conservação das pastagens. Estas atividades antrópicas podem estar exercendo uma pressão negativa sobre o reservatório.

O reservatório possui, principalmente em sua margem direita, grande porção contínua de área natural, constituindo importante remanescente vegetal de refúgio para fauna e de grande relevância para conservação da qualidade da água na represa. Assim, o governo do Estado definiu como Área de Proteção Ambiental (APA) as áreas do entorno do reservatório de Itupararanga e da bacia do rio Sorocaba, através da Lei Estadual nº 10.100/98. A preservação destes fragmentos florestais remanescentes constitui-se numa ação direta e de fundamental importância para a proteção deste manancial (SÃO PAULO, 1998). Logo, percebe-se a necessidade de planejamento do uso e da ocupação destas áreas, compatível com o desenvolvimento da região e com a preservação dos recursos naturais.

## 4.2 Material utilizado na pesquisa

Basicamente, os dados utilizados neste trabalho foram:

- Imagem hiperespectral Hyperion/EO-1 adquirida no dia 09 de outubro de 2007;
- Imagens multiespectrais e multitemporais ETM+/Landsat;
- Coordenadas medidas no sistema de projeção UTM e Datum WGS84, oriundos de GPS de navegação modelo Garmin 12 XL usado no posicionamento de pontos medidos “*in situ*”;
- Variáveis limnológicas: temperatura, pH, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido, transparência, sólidos em suspensão, sólidos dissolvidos, sólidos totais, turbidez e pigmentos totais.

A imagem hiperespectral utilizada no trabalho foi adquirida no dia 09 de outubro de 2007, pelo sensor Hyperion, o primeiro sensor orbital a produzir imagens hiperespectrais da superfície da Terra, instalado no satélite *Earth Observing One* (EO-1) e lançado em 21 de novembro de 2000 pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) a uma órbita de 705 km da superfície.

Esse sensor provê dados na região do espectro eletromagnético entre 356 nm e 2577 nm, em intervalos espectrais de 10 nm, com resolução espacial de 30 m e resolução radiométrica de 16 bits. O sistema possui um imageador espectrorradiométrico para o VNIR (Visível-Infravermelho-Próximo) e um para o SWIR (Infravermelho de Ondas Curtas), para garantir a melhor relação sinal/ruído. Este instrumento opera igualmente no modo de escaneamento linear ao longo da órbita. A cena padrão tem 7,7 km de largura e 42 km de extensão com a opção de extensão de comprimento da cena até 185 km. O volume de dados coletado pelo Hyperion é aproximadamente 75 vezes maior quando comparado às seis bandas óticas do sensor ETM+ Landsat (THENKABAIL et al., 2004).

Das 242 bandas produzidas pelo sensor Hyperion, apenas 196 são radiometricamente calibradas. Por meio deste grande número de bandas espectrais, ecossistemas terrestres complexos podem ser imageados e identificados com melhor precisão quando comparado com sensores multiespectrais (GALVÃO et al., 2005; THENKABAIL et al., 2004). A Tabela 3 apresenta algumas características deste sensor.

Tabela 3 – Características do sensor Hyperion/EO-1

<b>Características</b>	<b>Hyperion</b>
<b>Abrangência espectral</b>	356 - 2577 nm
<b>Resolução espacial</b>	30 m
<b>Comprimento da faixa</b>	42 X 7.7km a 185 X 7.7km
<b>Cobertura espectral</b>	Contínua
<b>Número de bandas</b>	242
<b>Resolução espectral</b>	10 nm
<b>Bandas VNIR</b>	1-70 (356-1058 nm)
<b>Bandas SWIR</b>	71-242 (852-2577 nm)
<b>Ordem dos pixels</b>	BIL
<b>Dimensão da Imagem</b>	256x6460

FONTE: *Earth Resources Observation & Science (EROS) Data Center.*

Os dados brutos do sensor (Nível 0) são pré-processados para o nível 1 A (radiométricamente corrigida e nenhuma correção geométrica) e disponibilizados para o usuário em arquivos de dados no formato *Hierarchical Data Format* (HDF). As medidas de radiância radiometricamente corrigida são disponibilizadas na unidade  $\text{watts}/(\text{sr} \times \mu\text{m} \times \text{m}^2) \times 40$  para as bandas do VNIR e  $\text{watts}/(\text{sr} \times \mu\text{m} \times \text{m}^2) \times 80$  para as bandas do SWIR (HAN et al., 2002). Como as regiões espectrais VNIR e SWIR são coletadas por sensores diferentes, os escalares 40 para VNIR e 80 para SWIR são utilizados compatibilizar as unidades. Cabe ressaltar que outros níveis de processamento também são fornecidos para o usuário.

Também foram utilizadas imagens multiespectrais ETM+/Landsat obtidas em maio de 2003 e maio de 2001 para a definição de uma sub-área e um esquema amostral para a realização do levantamento de campo.

Para o posicionamento de pontos medidos “in situ”, utilizou-se receptores GPS de navegação. Tratam-se de receptores que rastreiam apenas o código C/A e são destinados a levantamentos expeditos que requerem precisão horizontal da ordem de 10m (SEEBER, 2003). Como as imagens utilizadas neste trabalho apresentam uma resolução espacial de 30m, o emprego desses receptores foi adequado por se tratarem de receptores portáteis de fácil manuseio e que atendem aos requisitos básicos para a execução do trabalho.

As variáveis limnológicas opticamente ativas coletadas foram sólidos suspensos e pigmentos totais (medida indireta de clorofila *a*). As variáveis turbidez e transparência, consideradas auxiliares a medidas de componentes opticamente ativos também foram obtidas. A variável transparência é medida pelo mergulho de um disco branco de 20 a 30 cm na água, denominado disco de Secchi, em que é observado a profundidade de seu desaparecimento. A leitura da profundidade é feita em uma corda graduada fixada ao disco. O

valor do disco de Secchi expressa uma relação direta com a transparência da água, sendo que quanto menor for a transparência da água, menor será a profundidade em que é possível a visualização do disco, devido à maior dispersão da luz. Por outro lado, a profundidade do disco de Secchi é inversamente proporcional à quantidade de compostos no percurso da luz e ao coeficiente de atenuação da irradiância (ESTEVES, 1988; CETESB, 2007).

Além dessas variáveis, outras medidas relacionadas com sólidos em suspensão como sólidos dissolvidos e sólidos totais foram coletadas. Sólidos dissolvidos são partículas de sólidos que passam por uma membrana filtrante e sólidos totais é a soma de sólidos em suspensão com sólidos dissolvidos (ESTEVES, 1988).

Também foram consideradas algumas variáveis limnológicas não opticamente ativas como temperatura, pH, condutividade elétrica e oxigênio dissolvido. A descrição detalhada de cada uma dessas variáveis é apresentada a seguir, segundo Esteves (1988) e Cetesb (2007).

- **Temperatura:** Variações de temperatura são parte do regime climático normal, e corpos de águas naturais apresentam variações sazonais e diurnas, bem como estratificação vertical. A temperatura superficial é influenciada por fatores tais como latitude, altitude, estação do ano, período do dia, taxa de fluxo e profundidade. A temperatura desempenha um papel principal de controle no meio aquático, condicionando as influências de uma série de parâmetros físico-químicos. Em geral, à medida que a temperatura aumenta (0 a 30°C) a viscosidade, tensão superficial, compressibilidade, calor específico, constante de ionização e calor latente de vaporização diminuem, enquanto a condutividade térmica e a pressão de vapor aumentam as solubilidades, com a elevação da temperatura;
- **Potencial Hidrogeniônico (pH):** A basicidade ou acidez de uma solução é frequentemente expressa em termos de concentração de íons  $H^+$ , que é denominada pH. Ecossistemas aquáticos que apresentam com mais frequência valores baixos de pH têm elevadas concentrações de ácidos orgânicos dissolvidos de origem alóctone e autóctone. Os três grandes processos que interferem nos valores de pH são a fotossíntese, a respiração e a assimilação de nitrogênio pelo fitoplâncton. A influência do pH sobre os ecossistemas aquáticos naturais dá-se diretamente devido a seus efeitos sobre a fisiologia das diversas espécies. Também o efeito

indireto é muito importante, pois, determinadas condições de pH podem contribuir para a precipitação de elementos químicos tóxicos como metais pesados; outras condições podem exercer efeitos sobre as solubilidades de nutrientes;

- **Condutividade elétrica:** Condutividade elétrica corresponde à capacidade do meio de conduzir eletricidade. A capacidade de condução de eletricidade no meio aquático é dependente de valores médios de pH e da composição iônica. Os íons diretamente responsáveis pela condutividade elétrica são denominados macronutrientes, como, por exemplo, cálcio, magnésio, potássio, sódio, carbonato, sulfato, cloreto. A temperatura e o pH também modificam o valor de condutividade elétrica. A variação diária da condutividade fornece informações sobre processos importantes nos ecossistemas aquáticos, como a produção primária e a decomposição. Uma vez que a mesma está associada a composição iônica da água, ela pode ajudar a identificar fontes poluidoras, além de diferenças geoquímicas entre afluentes;
- **Oxigênio dissolvido:** Dentre os gases dissolvidos na água, o oxigênio é um dos mais importantes na dinâmica e na caracterização de ecossistemas aquáticos. Quando a água recebe uma determinada carga de matéria orgânica, parte do seu oxigênio dissolvido será utilizada na oxidação biológica da matéria orgânica introduzida, reduzindo, desta forma, a saturação do mesmo na água. Portanto, a concentração de oxigênio dissolvido em um curso d'água pode ser usada como um dos parâmetros de determinação da qualidade da água. Quanto mais reduzida é a concentração de oxigênio, pode-se dizer que mais poluído o curso d'água se encontra.

No processamento e análise dos dados espectrais e limnológicos espacializados foram utilizados aplicativos específicos, dentre os quais pode-se citar os *softwares*:

- ENVI (*Environment for Visualizing Imagens*)

O ENVI 4.4 foi desenvolvido pela empresa “*RSI Mission Statement*” e é um sistema de processamento de imagens que permite interações gráficas entre as funções e os dados com grande facilidade. Este sistema é comercializado de duas formas: com e sem a linguagem de programação IDL “Interactive Data Language”, que é base do ENVI para realizar procedimentos complexos em modo *batch* (não-interativo) e agregar novas funcionalidades. Esse aplicativo possui várias ferramentas para análise e extração de dados de Sensoriamento Remoto, trabalhando com análise espectral, imagens georreferenciadas, imagens de radar e superfícies 3D. Possui suporte para imagens de várias fontes e ferramenta SIG (Sistema de Informações Geográficas) para dados raster e vector. O ENVI não possui limitações quanto ao número de bandas, portanto é possível processar conjuntos de dados multiespectrais ou hiperespectrais. O sistema também inclui rotinas de novas programações e melhorias para ferramentas de programação existentes (ENVI, 2007).

O ENVI também incorpora um módulo de correção atmosférica FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*), desenvolvido pela Spectral Sciences – Inc e Air Force Research Laboratory, com assistência da Spectral Information Technical Applications Center (SITAC), que se baseia no modelo de transferência radioativa MODTRAN. O FLAASH inclui uma ferramenta de correção de “efeitos adjacentes” e fornece uma opção para calcular a visibilidade média para a cena (a partir da quantidade de aerossóis e névoa atmosférica). O vapor d’água é estimado pelos valores de brilho dos pixels nas bandas espectrais de absorção ocasionadas pela presença do vapor d’água da atmosfera em 940, 1135 e 820 nm (ENVI FLAASH, 2005).

O FLAASH requer como parâmetros de entrada para a calibração radiométrica: tipo do sensor e sua altitude, resolução espacial da imagem, altitude média da região, data e hora de aquisição da imagem, latitude e longitude da cena e a elevação média, juntamente com outros parâmetros de modelagem atmosférica, tais como: seleção de um modelo atmosférico de acordo com as condições climatológicas da região, modelo de aerossol referente à visibilidade média da cena e quantidade de vapor d’água estimado (MATTHEW et al., 2002).

- IDRISI Andes

O *software* IDRISI for Windows constitui-se de um Sistema de Informações Geográficas e de processamento de imagens desenvolvido pelo “Graduate School of Geography”, da “Clark University”, projetado para a análise de dados geográficos em formato matricial. Consiste de um programa principal de interface e mais de 150 módulos que fornecem facilidades da entrada, visualização e análise de dados geográficos. O IDRISI trabalha de forma analítica matriz (imagem), cobrindo um amplo espectro de necessidades de SIG (Sistema de Informação Geográfica) e de Sensoriamento Remoto, desde consulta a banco de dados e modelagem espacial, até realce e classificação de imagens (EASTMAN, 1998). Além das tradicionais imagens multiespectrais, esse aplicativo também fornece ferramentas para o tratamento de imagens hiperespectrais.

Esse aplicativo foi utilizado na definição do esquema de amostragem para coleta de dados em campo.

- SPRING (Sistema de Processamento da Informação Georreferenciadas)

O Spring é um SIG (Sistema de Informações Geográficas) com funções de processamento de imagens, análise espacial, modelagem numérica de terreno e consulta a bancos de dados espaciais. Esse aplicativo opera como um banco de dados geográfico sem fronteiras e suporta grande volume de dados (sem limitações de escala, projeção e fuso), mantendo a identidade dos objetos geográficos ao longo de todo banco. Administra tanto dados vetoriais como dados matriciais e realiza a integração de dados de sensoriamento remoto e SIG. Também possui uma linguagem espacial facilmente programável pelo usuário (LEGAL – Linguagem Espaço – Geográfica baseada em Álgebra) (CAMARA, 1996).

O sistema Spring constitui-se de três aplicativos ou programas executáveis, o Impima – utilizado para leitura de imagens e conversão para o formato GRIB, o Spring – programa principal do sistema no qual são modelados os dados e o Scarta – que permite a elaboração de cartas a partir de dados previamente tratados no programa Spring (CAMARA, 1996). O SPRING tem se mostrado uma opção altamente atrativa na área de geoprocessamento, desde que passou a ser considerado um software de domínio público. Além disso, constitui um produto desenvolvido com tecnologia totalmente nacional pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, em São José dos Campos/SP.

Este aplicativo foi utilizado para tratamento das imagens multiespectrais utilizadas no início do trabalho.

Além desses, também foram utilizados softwares para o tratamento dos dados hiperespectrais e limnológicos, dentre os quais podemos citar o Matlab, Microsoft Office Excel e Minitab usados em cálculos estatísticos e geração de gráficos e tabelas.

### **4.3 Abordagem metodológica**

Considerando-se o propósito geral da investigação, ou seja, avaliar a contribuição das imagens hiperespectrais na detecção de alguns componentes opticamente ativos em ambientes aquáticos, houve a necessidade de se realizar uma análise de correlação para examinar a associação entre medidas espectrais extraídas dos dados orbitais e a ocorrência dos vários componentes, obtidos nos levantamentos “in situ”. Para tanto, desenvolveu-se uma seqüência de atividades, conforme ilustra o fluxograma da Figura 19, que apresenta as principais etapas do desenvolvimento da pesquisa.



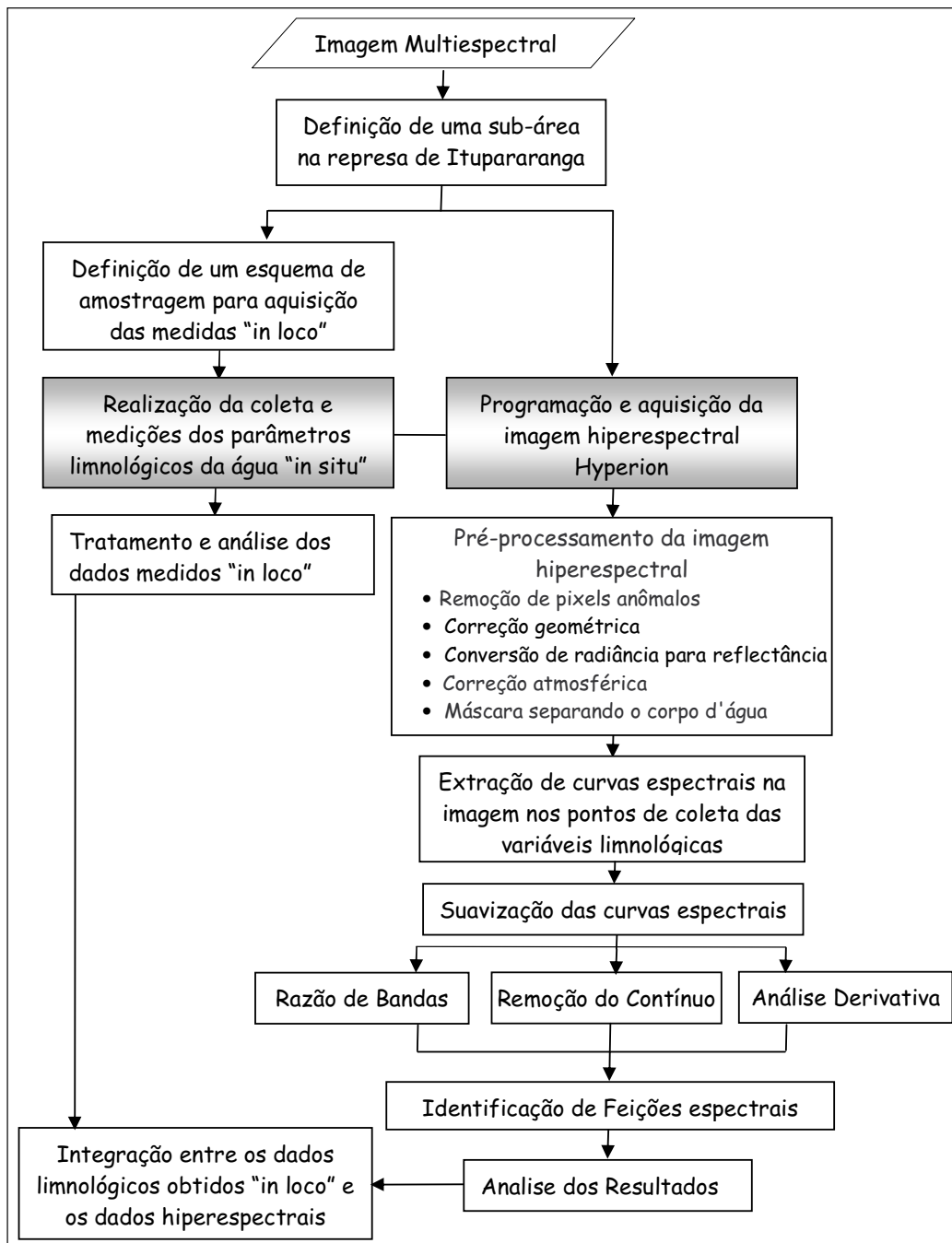


Figura 19 – Principais etapas previstas para o desenvolvimento da pesquisa

A pesquisa teve início com a seleção de imagens multiespectrais ETM+/Landsat da área de estudos, obtidas em maio de 2003 e maio de 2001, usadas na definição de uma sub-área sobre a represa. Essa operação foi necessária pelo fato da imagem Hyperion disponibilizar uma cobertura longitudinal de apenas 7,7 km, menor que a extensão

total do reservatório. É oportuno ressaltar que essas imagens também auxiliaram na definição de uma estratégia de amostragem para a realização da coleta de dados “*in situ*”.

Na seqüência, foi necessário viabilizar um cronograma junto à USGS (*United States Geological Survey*) para que a imagem hiperespectral fosse adquirida simultaneamente com as variáveis limnológicas, devido ao caráter extremamente dinâmico dos ambientes aquáticos.

Portanto, no mesmo dia previsto para aquisição da imagem hiperespectral, foram realizadas medições “*in situ*” e coleta de água em cada ponto amostral definido no esquema de amostragem, utilizando um sistema de posicionamento (GPS) para o rastreamento dos pontos de coleta/medição. Os dados limnológicos obtidos foram: profundidade de Secchi, pH, condutividade elétrica, temperatura, sólidos em suspensão, sólidos dissolvidos, sólidos totais, oxigênio dissolvido, turbidez e pigmentos totais (medida indireta de clorofila).

Após a obtenção dos dados “*in situ*”, estes foram submetidos a uma inspeção qualitativa observando-se, basicamente, a consistência interna das amostras e, em seguida, foram realizados processamentos e tratamentos estatísticos para verificar a qualidade da água no reservatório.

Na imagem hiperespectral Hyperion, foram realizados os pré-processamentos necessários (remoção de pixels anômalos - ruídos, ajuste geométrico, aplicação de máscaras para isolar o corpo d’água, conversão de radiância para reflectância e correção atmosférica). Um dos tratamentos mais importantes foi à correção dos efeitos atmosféricos, dado que a atmosfera provoca perturbações nos valores digitais da imagem, sendo necessário minimizar seus efeitos para se representar grandezas físicas que se relacionam diretamente com a superfície imageada.

Após os tratamentos preliminares, foram extraídos valores radiométricos da imagem hiperespectral, nos pontos de coleta dos dados limnológicos, visando a construção de curvas espectrais que caracterizam a água em cada ponto.

Para a análise das curvas espectrais geradas a partir da conversão dos dados em reflectância de superfície utilizou-se, neste trabalho, as seguintes técnicas:

- Análise derivativa: a concentração de determinada substância é relacionada com a derivada da reflectância em relação ao comprimento de onda, sendo este um dos parâmetros usados para verificação de correlação (CHEN et al., 1992). A análise derivativa pode ser útil para ressaltar as regiões em que a curva espectral apresenta mudanças bruscas de comportamento ocasionadas pela presença de componentes que

favorecem a absorção ou o espalhamento pelo alvo (CARVALHO, 2003).

- Remoção do contínuo: normalização do espectro de reflectância em relação a uma linha de base, para realizar as comparações das feições individuais de absorção presentes nas curvas de reflectância.
- Razão de bandas: detecção das variações significativas no comportamento espectral em relação a alguma variável limnológica, sendo útil para realçar mudanças na curva espectral, que ocorrem em decorrência da presença de componentes opticamente ativos.

Também foram verificadas correlações entre as variáveis limnológicas e dados hiperespectrais originais, além daqueles resultantes dos processamentos aplicados (ex. análise derivativa e remoção do contínuo).

Em síntese, as etapas realizadas na pesquisa foram:

- 1) Definição de uma estratégia de amostragem para a realização de medidas e coletas de água “in situ”, baseada na análise de imagens multiespectrais;
- 2) Programação e aquisição da imagem hiperespectral, aplicação de pré-processamentos como correção dos efeitos atmosféricos, remoção de pixels anormais considerados ruídos, ajuste geométrico entre outros;
- 3) Realização das medições espectrais na água, nos pontos de amostragem posicionados com GPS (Sistema de Posicionamento Global por Satélite), em período equivalente à tomada da imagem Hyperion;
- 4) Realização do pré-processamento, tratamento e análise dos dados medidos “in situ”;
- 5) Tratamento e análise da imagem hiperespectral, utilizando-se métodos adequados para extração da informação de interesse;
- 6) Análise de correlação entre os valores assumidos pelas variáveis limnológicas e os dados hiperespectrais.

### 4.3 Experimentos: procedimento metodológico, resultados e análise

Neste item são detalhados os experimentos realizados quanto á metodologia aplicada, apresentação e análise dos resultados obtidos. Inicialmente apresentam-se os aspectos relacionados á aquisição e análise dos dados limnológicos, em seguida são relatados os tratamentos aplicados aos dados hiperespectrais e, finalmente, é feita uma análise das correlações obtidas, tecendo-se considerações quanto aos valores obtidos.

#### 4.4.1 Definição da sub-área de pesquisa

Para a aquisição da imagem hiperespectral, foi necessário selecionar uma sub-área do reservatório, visto que a cena padrão do sensor Hyperion possui largura de 7,7 km, não sendo suficiente para cobrir toda a extensão longitudinal do reservatório, que é de aproximadamente 19 km.

Dessa forma, foi identificada uma área de menor abrangência cuja cobertura do solo em seu entorno fosse diversificada e que possuísse uma cobertura considerável de água. A Figura 20 representa a sub-área selecionada para esta pesquisa. Deve-se ressaltar que a área definida apresenta uma cobertura longitudinal de 8 km, levando em consideração possíveis desvios na coordenada central no momento da aquisição da imagem.

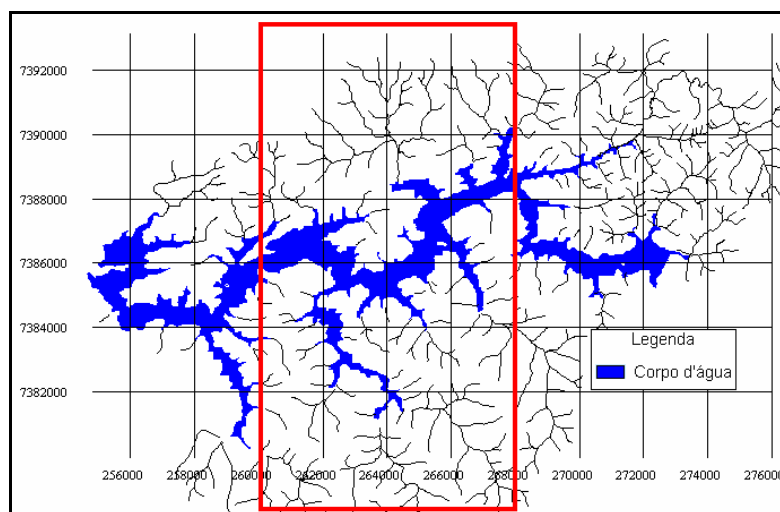


Figura 20 – Sub-área da represa de Itupararanga

A sub-área selecionada (Figura 20), serviu de base para o planejamento do trabalho de campo e definição do plano de amostragem para a coleta de dados limnológicos no reservatório, sendo essa considerada área de cobertura da imagem hiperespectral.

#### **4.4.2 Levantamento das variáveis limnológicas**

##### *4.4.2.1 Definição do esquema de amostragem para coleta e análise da água*

Os reservatórios apresentam características relacionadas com a qualidade da água que variam de maneira complexa e interdependente ao longo de sua extensão. Considerando-se que cada fenômeno da natureza, dependendo da sua localização, apresenta uma escala de variabilidade diferente, então o tamanho da amostra e a distribuição dos elementos amostrais devem ser adequados à estrutura de variabilidade do fenômeno em questão (ou correlação espacial entre as amostras) (LAMPARELLI et al., 2001).

A etapa de definição do esquema de amostragem para a coleta e análise da água teve início com a seleção de imagens multiespectrais, adquiridas em período sazonal próximo ao de aquisição da imagem Hyperion, para que as características do período hidrológico se mantivessem equivalentes. Tais imagens foram selecionadas a partir da disponibilidade de imagens temporais para a área de estudo, sendo que as imagens utilizadas foram cenas ETM+/Landsat tomadas em maio de 2003 e de maio de 2001.

A distribuição dos pontos de amostragem seguiu, inicialmente, um esquema de amostragem sistemático não-alinhado, por proporcionar uma cobertura abrangente da área de interesse e, simultaneamente, preservar a casualidade. O princípio desse tipo de amostragem é a divisão da região a ser amostrada no número de pontos a ser obtido e, na seqüência, é gerado aleatoriamente um ponto em cada uma das sub-regiões. Esse esquema combina o baixo potencial para tendências do processo aleatório com a propriedade de maior cobertura geográfica do padrão sistemático (LAMPARELLI et al., 2001).

Para a identificação de águas espectralmente distintas, que necessitam de maior atenção quanto o número e posição dos elementos amostrais, aplicou-se uma máscara nas imagens de ambas as datas, para a extração do contorno e das variações espectrais no interior do corpo d'água. Posteriormente, realizou-se uma classificação não supervisionada,

pela qual se verificou que as classes espectrais obtidas nas duas imagens apresentavam-se similares. O resultado desse processamento mostrou que o comportamento espectral da água não se alterou consideravelmente com a mudança temporal. Dessa forma, selecionou-se a imagem mais recente (maio/2003) como referência para a distribuição dos elementos amostrais.

Esta operação foi realizada no *software* Idrisi, que possui uma função que distribui os pontos aleatoriamente dentro de cada região formada, os quais foram sobrepostos à imagem classificada. Em seguida, a distribuição dos pontos foi refinada, excluindo e/ou lançando-se pontos amostrais adicionais, de acordo com o seguinte critério:

- Águas espectralmente distintas;
- Locais de entrada dos principais afluentes da represa;
- Adição de pontos na parte central da represa que, pela falta de informação de relevo submerso, supõe-se que seja a região do talvegue, possuindo maior fluxo de água e profundidade;
- Inserção de alguns pontos na região litorânea.

No total, foram definidos 35 pontos amostrais, os quais foram inseridos em uma planilha com as respectivas coordenadas (UTM). Esse esquema amostral, juntamente com o mapa da represa, foi utilizado no trabalho de campo realizado no dia 01 de julho de 2007, para a localização dos pontos amostrais e coleta de dos dados “*in situ*”. Contudo, a aquisição da imagem não foi realizada nesta data.

O esquema amostral sobreposto à classificação é mostrado na Figura 21, no qual se pode verificar que o reservatório, de maneira geral, apresenta um comportamento homogêneo, com poucas classes espectrais. Variações mais significativas são observadas nas margens e no afluente de dimensão mais expressiva.

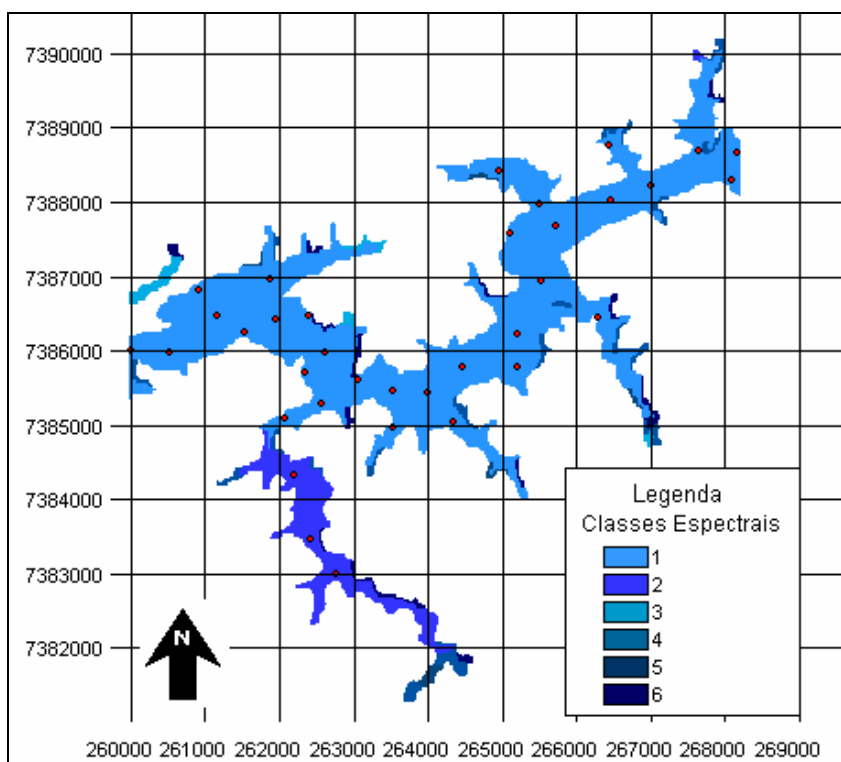


Figura 21 - Esquema amostral com 35 pontos sobreposto na classificação na imagem de maio de 2003

Verifica-se na Figura 21 que as localizações dos elementos amostrais abrangem toda a região do reservatório com uma boa distribuição. Entretanto, como a aquisição da imagem não foi realizada na primeira campanha, os dados limnológicos obtidos foram considerados para uma redução do tamanho da amostra na segunda campanha, pois foi possível perceber associações entre elementos amostrais, ou seja, reconhecer um grau de similaridade suficiente para reuni-los sem perda de variabilidade. Para essa operação, aplicou-se a técnica de classificação, denominada análise por agrupamento pelo método de ligação simples, com medida de similaridade de distância euclidiana quadrática, conforme definido em Johnson e Wichern (2007).

Com o resultado obtido, procurou-se selecionar pontos mais heterogêneos, pertencentes a classes espectrais diferentes e manter uma boa distribuição dos pontos na área de interesse. Foram selecionados 28 pontos que incorporaram o novo esquema amostral para o trabalho de campo realizado em 09 de outubro de 2007, dia em que houve a aquisição da imagem.

A Figura 22 representa a localização dos 28 elementos amostrais na represa de Itupararanga. Para a aquisição da variável clorofila, foi possível realizar a coleta de água

em apenas alguns pontos do esquema amostral (15 pontos), visto que a inexperiência da equipe no preparo das amostras de água e a posterior análise em laboratório significariam um processo demorado e dispendioso.

Na Figura 22, os pontos demarcados com um quadrado correspondem aos locais de coleta de água para obtenção das variáveis clorofila e pigmentos totais. Os quadrados preenchidos em cinza mostram os 7 pontos em que a estimativa de clorofila *a* foi possível.

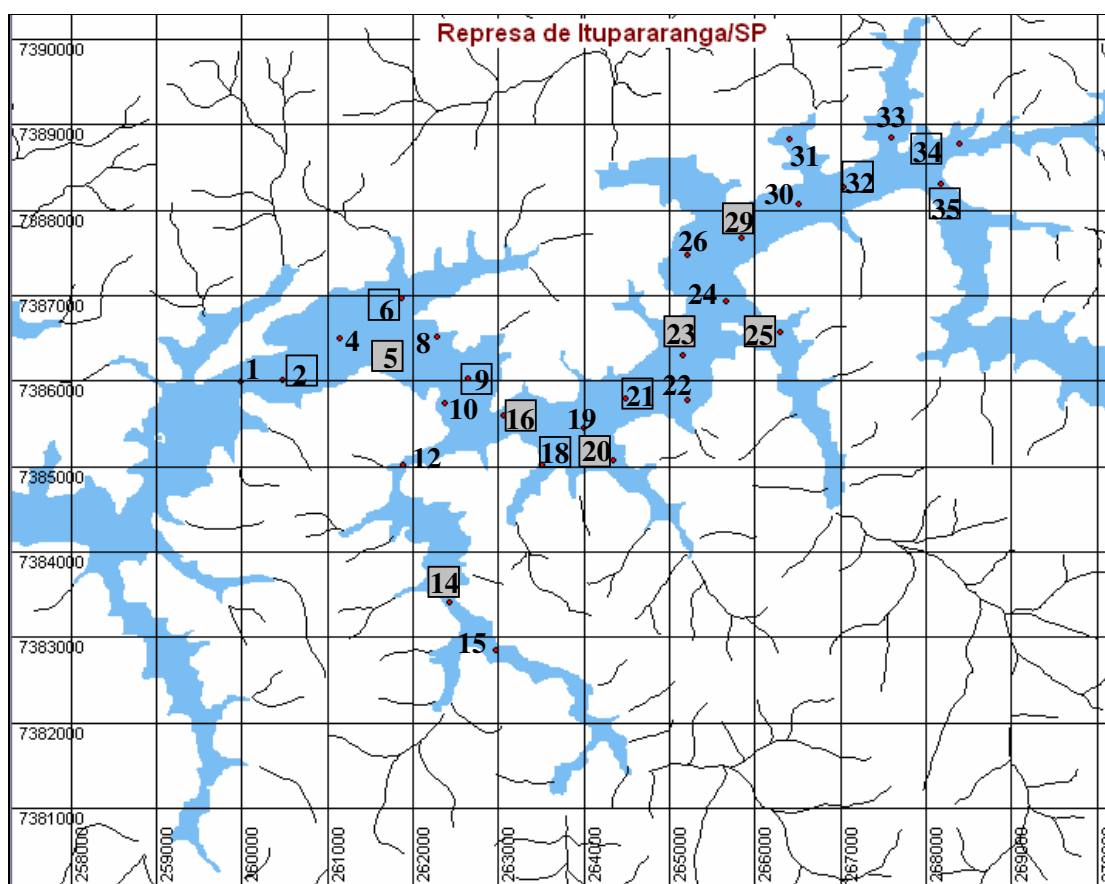


Figura 22 – Localização dos pontos de coleta para obtenção das variáveis limnológicas.

A cobertura longitudinal do esquema amostral representada na Figura 22 é de 8 km e a imagem hiperespectral de 7,7 km, assim dois pontos de coleta (34 e 35) não foram imageados pelo sensor. Deste modo, as variáveis limnológicas obtidas nesses pontos foram descartadas das análises subsequentes, permanecendo 13 pontos para obtenção da variável pigmentos totais e 26 pontos para as demais variáveis.



#### 4.4.2.2 Coleta de dados “in situ”

Para o levantamento dos dados “in situ”, foi necessário realizar um planejamento para que os dados obtidos fossem coletados quase simultaneamente à aquisição da imagem hiperespectral, devido ao caráter extremamente dinâmico dos ambientes aquáticos, que poderia alterar as características físicas, químicas e biológicas do ambiente, se os dados fossem adquiridos em períodos diferentes.

A coleta dos dados limnológicos para a análise da qualidade da água foi realizada com o apoio logístico da equipe de pesquisadores da Faculdade de Ciências Agrárias – FCA, da Unesp-Botucatu, que forneceram barco para locomoção no reservatório, além de equipamentos para coleta da água e para obtenção de algumas variáveis “in situ”.

Foram realizadas duas campanhas para coleta de dados em campo. A primeira campanha foi realizada no dia 01 de julho de 2007, porém não houve aquisição da imagem Hyperion. Já a segunda campanha, realizada no dia 09 de outubro de 2007, a imagem foi adquirida com sucesso, pois as condições de tempo foram adequadas para aquisição dos dados, ou seja, predominância de sol, ausência de vento ou brisa e com superfície da água calma ou com pequenas ondulações.

O trabalho de campo da segunda campanha cobriu os 28 pontos definidos no segundo esquema amostral. Os parâmetros limnológicos, oxigênio dissolvido, temperatura e transparência da água foram medidos no local da coleta. Os valores das variáveis limnológicas: pH, condutividade elétrica, turbidez, sólidos em suspensão, sólidos dissolvidos e sólidos totais foram determinados através de análises em laboratório da amostra da água.

Na segunda campanha de campo, também foi realizada a coleta em alguns elementos amostrais para estimativa da variável clorofila *a*. A coleta da água para obtenção dessa variável foi realizada na superfície do corpo d’água em 15 pontos destacados no esquema de amostragem da Figura 22. Para as demais variáveis, a coleta de água foi realizada na profundidade do Disco de Secchi em todos os pontos do esquema de amostragem.

Para determinação de clorofila *a*, as amostras de água foram armazenadas em frascos esterilizados e com o término do levantamento de campo estas foram filtradas, utilizando-se filtros de fibra de vidro Whatmann GF/C (com tamanho de poro que varia de 0,5 a 0,7 $\mu$ m) e uma bomba de vácuo. O volume filtrado foi de 300 ml para cada ponto. Em seguida, os filtros foram envolvidos em papel alumínio etiquetados e posteriormente

aconicionados em um frasco e mantidos a temperaturas de 0 °C até o momento da análise. Em relação às demais variáveis, as amostras de água foram armazenadas em recipientes plásticos, previamente esterilizados, até sua chegada, no mesmo dia, no laboratório, em que foram preparadas para análises posteriores.

Em cada ponto de coleta foram também registradas as seguintes informações: temperatura do ar, hora de coleta, condições de iluminação, cor da água, características da vegetação presente no entorno e fotografias do local. Medidas e informações subjetivas como profundidade Secchi e cor da água, foram feitas sempre pelo mesmo observador.

Para o posicionamento dos pontos medidos “in situ”, utilizou-se receptores GPS de navegação, pois como a resolução espacial da imagem hiperespectral é de 30 m, este receptor atende a precisão requerida para o posicionamento. Foram usados, no campo, dois receptores, sendo um designado para a localização dos pontos definidos no esquema de amostragem e outro para registrar as coordenadas no instante da coleta dos dados limnológicos. Este registro foi necessário, pois a coleta das variáveis limnológicas dificilmente é realizada exatamente sobre o ponto definido no esquema de amostragem.

A determinação das variáveis: pH, condutividade elétrica, turbidez foi realizada no laboratório da Faculdade de Ciências Agrárias – FCA, seguindo a metodologia descrita por Cavenagui (2003). Para obtenção das variáveis sólidos em suspensão, sólidos dissolvidos e sólidos totais utilizou-se a metodologia descrita em Eaton et al. (1998).

A análise em laboratório para obtenção da variável clorofila *a* foi realizada no Núcleo de Pesquisas em Limnologia Ictiologia e Aqüicultura (NUPÉLIA) da Universidade Estadual de Maringá (UEM), no qual foi possível acompanhar o processo. O método aplicado foi o espectrofotométrico, descrito por Gotterman (1978).

Na aplicação desse método, constatou-se a impossibilidade de estimar concentração de clorofila *a* em muitos dos pontos analisados. Isto ocorreu devido ao fato do material retido nas membranas filtrantes das amostras, destinado à estimativa de clorofila *a*, apresentar um percentual de feofitina (estado deteriorado da clorofila *a* – morte das células fitoplanctônicas) muito maior que o de clorofila, impossibilitando a estimação do pigmento, segundo a metodologia utilizada.

Sobre esta questão, presume-se que durante a etapa da coleta de água as amostras não foram devidamente refrigeradas e armazenadas. A refrigeração e o armazenamento inadequado promovem o processo conhecido como feofitinação, no qual o

magnésio da molécula de clorofila é substituído por hidrogênio e se transforma em feofitina (STREIT et al., 2005).

A solução encontrada para minimizar a falta dessa variável nas análises subseqüentes, foi de utilizar valores de pigmentos totais (clorofila *a* + feofitina *a*) que, como descrito por alguns autores, é um indicador indireto da biomassa fitoplanctônica do ambiente aquático (LAMPARELLI, 2004; MAINARDES-PINTO; MERCENTE, 2003; SIBAÚBA-TAVARES, 1995; PIVA-BERTOLETTI, 2001; PIERSON; STROMBECK, 2000, DEKKER, 1993).

#### 4.4.4.1 *Análise exploratória dos dados limnológicos*

A etapa de análise exploratória teve um papel importante na fase inicial de organização e pré-análise dos dados, na qual todos os dados limnológicos foram submetidos à uma inspeção qualitativa. Essa análise indicou a variabilidade das medidas (valor máximo, mínimo, média, desvio padrão) e permitiu a identificação daquelas medidas atípicas (*outliers*) e a correção de erros de digitação. Os dados também foram comparados com valores de referência para análise da qualidade da água do reservatório.

A Tabela 4 apresenta as estatísticas descritivas das variáveis limnológicas amostrados em campo. Para consultar todos os dados limnológicos obtidos para cada elemento amostral, ver Apêndice A.

Tabela 4 – Síntese da estatística descritiva das variáveis coletadas.

Variáveis	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	Referência *
pH	7.411	7.346	0.177	7.067	7.773	6,0 a 9,0
condutividade (µS/cm)	91.558	90.950	3.323	86.2	97.5	-
turbidez (FTU) <sup>8</sup>	3.702	3.800	0.528	2.37	4.64	100 UNT
transparência <sup>9</sup> (m)	1.427	1.400	0.185	1	1.7	-
O <sub>2</sub> diss. (mg/L)	5.646	5.600	0.354	5.1	6.7	> 5 mg/L
temp. água (°C)	23.158	23.250	0.950	21.9	25.1	-
sólidos dissolvidos (mg/L)	0.042	0.038	0.016	0.022	0.076	-
sólidos suspensos (mg/L)	0.472	0.493	0.129	0.155	0.805	-
sólidos totais (mg/L)	0.515	0.540	0.131	0.191	0.861	500 mg/L
pigmentos totais (µg/L)	5.762	5.993	1.043	3.745	7.865	

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

Na Tabela 4, a coluna denominada referência representa os valores máximos permitidos pela legislação, de acordo com a Resolução 357 do CONAMA, para águas destinadas para o abastecimento doméstico, recreação e irrigação de hortaliças, considerando a classe na qual se enquadra o reservatório de Itupararanga. Analisando esses parâmetros de referência verifica-se que, para as variáveis analisadas, a represa está dentro das especificações dos padrões de qualidade da água para abastecimento.

Verifica-se ainda que, as variáveis sólidos dissolvidos e turbidez apresentam valores inferiores a 1 mg/L e 5 FTU, respectivamente. Tais valores são definidos como valores máximos para o consumo humano de acordo com a Portaria 518 de 25 de março de 2004 do Ministério da Saúde.

Para verificar se as variáveis limnológicas obtidas para cada elemento amostral obedecem a uma distribuição normal, ou seja, possuem uma distribuição simétrica em torno da média e não possuem alterações bruscas nos valores medidos, foi realizado o teste estatístico de normalidade Anderson Darling (AD). Segundo esse teste, as variáveis limnológicas analisadas apresentam uma distribuição normal, pois, os valores de *p* (significância estatística) foram maiores que 5%, exceto para variável sólidos suspensos. Portanto, pode-se afirmar que, as variáveis em sua maioria possuem grande concentração de valores em torno da média e 95% desses, estão no intervalo de  $2\sigma$  (desvios padrões).

Os pontos amostrais também foram submetidos a uma análise por agrupamento, com o objetivo de evidenciar as associações entre elementos amostrais, ou seja, reconhecer aqueles com grau de similaridade suficiente para reuni-los em um mesmo

<sup>8</sup> Unidades Nefelométricas de Turbidimetria (UNT) são numericamente equivalentes às Unidades de Turbidez em Formazina (FTU).

<sup>9</sup> A variável transparência foi obtida utilizando o disco de Secchi.

conjunto, visando descrever de maneira mais clara e sintética possível, a estrutura do corpo d'água, determinando a composição e extensão de seus extratos. Para essa operação, aplicou-se a técnica de análise por agrupamento, pelo método de ligação completa com medida de similaridade de distância euclidiana quadrática (JOHNSON; WICHERN, 2007). Deve-se ressaltar que a variável pigmentos totais foi descartada dessa análise, por possuir uma quantidade de elementos amostrais inferior das demais variáveis. A Figura 23 representa um diagrama de similaridade denominado dendrograma com os três principais agrupamentos, quanto maior a medida de similaridade, mais semelhantes são as observações.

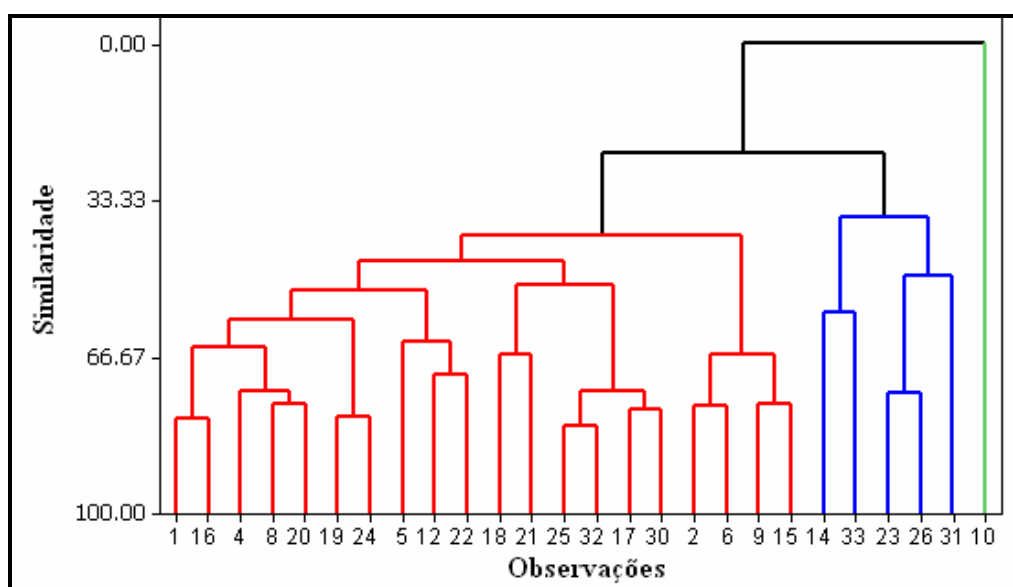


Figura 23 – Dendrograma indicando três principais agrupamentos definidos para variáveis limnológicas

A Figura 23 ilustra que a maioria dos pontos amostrais resultou em um único grupo representado pela cor vermelha. Verifica-se também, alguns pontos na classe de cor azul, indicando menor similaridade em relação aos pontos classificados na cor vermelha. O ponto 10 apresentou pouca similaridade com os demais pontos, sendo representado individualmente no grupo de cor verde. Globalmente, esses resultados indicam que as variáveis limnológicas apresentaram um comportamento similar nos pontos amostrais medidos para o reservatório, com apenas alguns pontos mais discrepantes, não apresentando unidades funcionais altamente diferenciadas.

Vale ressaltar, que as variáveis limnológicas analisadas foram obtidas juntamente com aquisição da imagem Hyperion, representando somente a época de aquisição da imagem. Assim, essas podem sofrer alterações no decorrer do ciclo hidrológico.

### **4.4.3 Tratamento de dados hiperespectrais**

#### *4.4.3.1 Aquisição da imagem hiperespectral*

Toda a negociação para a aquisição da imagem foi feita através da USGS (*United States Geological Survey*), que encaminhou o pedido à empresa EROS (*Earth Resources Observation & Science*), responsável pela obtenção das imagens. Por sua vez, a empresa EROS solicitou a definição de um período de três meses para a obtenção da imagem, mediante programação do sistema EO-1. O período selecionado para a aquisição, foram os meses de maio, junho e julho de 2007, definido a partir de uma análise temporal das condições meteorológicas da região. No que se refere à aquisição da imagem hiperespectral, a empresa EROS possibilita duas outras aquisições quando a imagem adquirida contém mais de 20% de cobertura de nuvens.

Assim, foram realizadas duas aquisições de imagem, a primeira em maio e a segunda em julho de 2007. No dia da aquisição da primeira cena, também foi planejada a aquisição dos dados em campo, entretanto, observou-se que as condições meteorológicas apresentavam-se inadequadas, sendo o trabalho de campo cancelado. Conforme esperado, a imagem adquirida nesta data apresentava-se totalmente coberta por nuvens.

Na aquisição da segunda imagem, as condições meteorológicas apresentavam-se propícias e, assim, foi realizada a primeira campanha de campo para medidas das variáveis limnológicas. No entanto, a imagem não foi coletada sobre a região geográfica de interesse e o período de aquisição da cena foi adiado para os meses entre agosto e outubro/2007.

Dessa forma foram programadas e realizadas novas aquisições da imagem nos dias 16 de setembro e 09 de outubro de 2007. Como as datas de aquisições eram muito próximas, realizaram-se consultas a bancos de dados meteorológicos pela Internet e planejou-se uma nova campanha de campo para o dia 09 de outubro de 2007, devido à previsão de tempo indicar condições mais favoráveis.

Como previsto, a imagem obtida no dia 16 de setembro, apresentou-se parcialmente coberta de nuvens, porém a imagem adquirida em 09 de outubro de 2007, codificada como EO1H2190762007282110PX\_SGS\_01, apresentou nuvens fora da área de interesse, sendo esta selecionada. A Figura 24 mostra a cena obtida, em tons de cinza, na qual,

visualiza-se o reservatório de Itupararanga na parte central da faixa de imageamento, bem como a área selecionada para o trabalho. A Tabela 5 resume as condições de aquisição da cena.

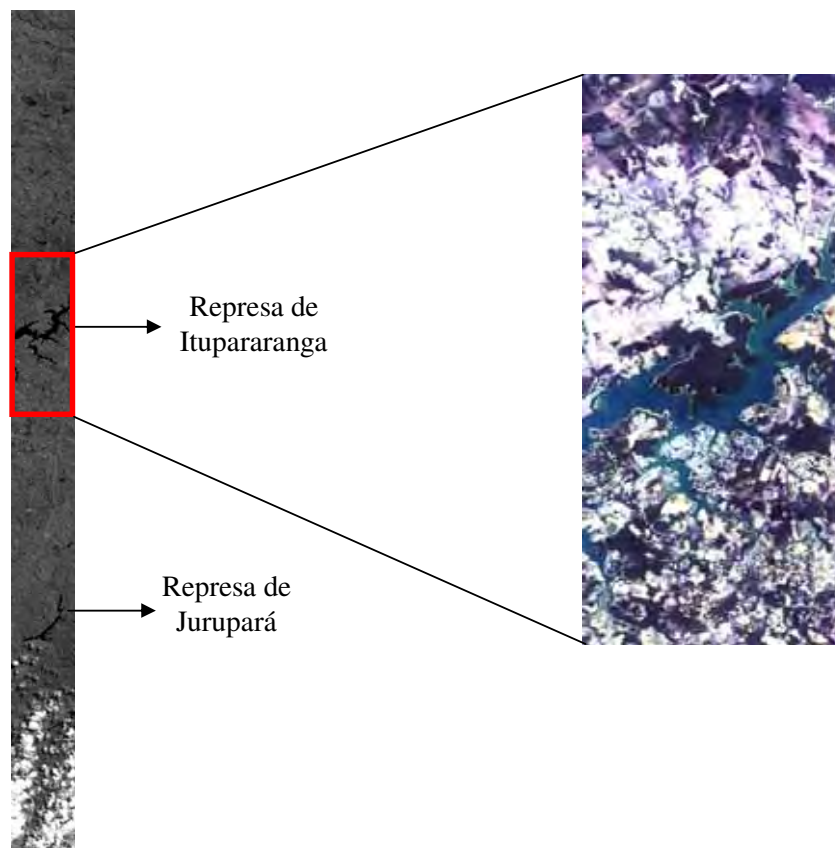


Figura 24 – Imagem Hyperion/EO1 (Banda 50 centrada em 854 nm) em tons de cinza, adquirida sobre o reservatório de Itupararanga no dia 09/10/2007 e recorte sobre a região do reservatório em composição colorida: (R-28, G-17, B-8)701,5 nm (vermelho); 589,6 nm (verde); 498 nm (azul).

Tabela 5 – Informações sobre condições de aquisição da imagem hiperespectral Hyperion.

Identificação – ID	EO1H2190762007282110PX_SGS_01
Data de aquisição	09/10/2007
Canto NO	23°19'47.68"S, 47°16'54.36"O
Canto NE	23°20'41.41"S, 47°12'32.60"O
Canto SO	24°14'03.03"S, 47°30'03.96"O
Canto SE	24°14'57.07"S, 47°25'40.29"O
Início da Gravação da cena (GMT)	2007:282:12:52:54.272*
Fim da Gravação da cena (GMT)	2007:282:12:53:10.272
Azimute do sol (graus decimais)	64,457296
Elevação solar (graus decimais)	55,469727
Ângulo de Visada (graus decimais)	-3,1326
Inclinação do satélite	98,1

\*A esquema representa ano:dia Juliano:horas:minutos:segundos.décimos de segundo (GMT)  
 Fonte: U. S. Geological Survey (<http://edcns17.cr.usgs.gov/EarthExplorer>)

Conforme se verifica na Tabela 5 os cantos NO, NE, SO e SE representam as coordenadas geográficas dos cantos superiores e inferiores da esquerda e direita respectivamente, ou seja, definem o retângulo envolvente da cena imageada. Percebe-se que a imagem foi gravada em menos de um minuto e que o satélite adquiriu a cena em posição aproximadamente nadir.

Para as etapas posteriores da pesquisa, foi necessário realizar o recorte da imagem Hyperion, isolando-se somente a região do reservatório.

#### 4.4.3.2 Pré-Processamentos da Imagem Hyperion/EO1

Para comparação dos dados espectrais fornecidos pela imagem hiperespectral com os dados limnológicos, foi necessário realizar diversas operações preliminares na imagem hiperespectral, para que esta realmente forneça informações sobre o corpo d'água. Os pré-processamentos<sup>10</sup> realizados são descritos nos tópicos a seguir:

- Remoção de Pixels Anômalos

O conjunto de dados Hyperion nível 1A fornecido aos usuários é derivado do conjunto de dados Hyperion nível 0, que passa por vários processamentos para correção radiométrica. No entanto, após uma inspeção nos dados no nível 1A, ainda é possível encontrar pixels ruidosos ou anômalos, principalmente na forma de “faixas verticais escuras contínuas” (*stripes*) perpendiculares à linha de varredura, que são causados por fatores como: não-linearidade dos detectores, deslocamento da abertura do componente óptico em relação ao plano focal, falha nos detectores, erros durante a transferência dos dados e até mesmo correção imprópria dos dados (HAN et al., 2002; GOODENOUGH et al., 2003; RUDORFF, 2006).

O sensor Hyperion é vulnerável a problemas desse gênero, pelo fato de adquirir dados no modo *pushbroom*, com um detector separado para cada coluna de pixels e para cada banda. A figura 25 (a) apresenta um exemplo dessas faixas de pixels anômalos que podem ser visualizados em algumas bandas individuais.

---

<sup>10</sup> Todo o processo de pré-processamento da imagem hiperespectral contou com a colaboração do Prof. Lênio S. Galvão, pesquisador do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais).



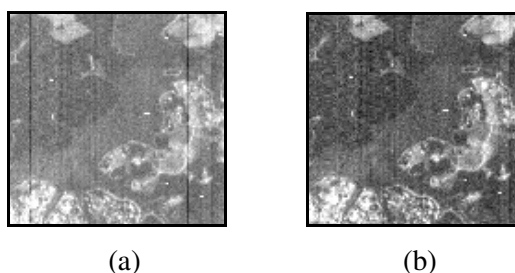


Figura 25 – (a) Exemplo de pixels anômalos na forma de faixas verticais escuras obtidas na imagem Hyperion (Banda 10 – 447 nm) da cena EO1-09/10/2007. (b) Imagem resultante da correção

Como se verifica na Figura 25, a imagem adquirida para o desenvolvimento do trabalho precisou passar por correções para remoção dos pixels anômalos. Han et al. (2002) implementaram um algoritmo que remove os pixels anômalos que aparecem na imagem de quatro formas distintas: valores de nível de cinza atípicos, valores de nível de cinza contínuos e constantes, intermitentes com valores de nível de cinza atípicos e intermitentes com valores de nível de cinza baixos.

Para correção dos pixels anômalos na imagem, utilizou-se a metodologia proposta por Goodenough et al. (2003) e Han et al. (2002), que consiste na substituição da resposta radiométrica dos pixels nas faixas ruidosas pela média de seus vizinhos na direção horizontal. A Figura 25 (b) representa um exemplo do resultado após a correção.

- Correção Atmosférica e Geométrica

Imagens obtidas por sensores orbitais contêm informações sobre a atmosfera e sobre o alvo de interesse. Para corrigir os efeitos atmosféricos sobre a imagem Hyperion, optou-se em utilizar o módulo FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*) que tem como base o código MODTRAN4, disponível comercialmente no *software* ENVI 4.4 (ver Seção 3.3.1).

Das 242 bandas espectrais disponíveis selecionaram-se apenas aquelas radiometricamente calibradas (196 bandas), nos canais entre 8 a 56 para o VNIR- Visível-Infravermelho-Próximo (*Visible-Near-Infrared*) e 77 a 224 para o SWIR Infravermelho de Ondas Curtas (*Short Wave Infrared*). Com o intuito de melhorar o desempenho da correção atmosférica, a imagem hiperespectral foi recortada para definir uma área de estudo menor, visando obter estimativas mais precisas dos parâmetros que consideram as características atmosféricas da área de interesse e que são calculados pelo modelo. Em seguida, criou-se um

arquivo ASCII com valor de fator de escala para cada banda a fim de compatibilizar as unidades, pois as bandas do SWIR têm como fator de escala o valor 80, enquanto as bandas do VNIR o fator de escala é 40.

O conjunto de parâmetros e especificações do instrumento sensor e de condições de aquisição da imagem que foram solicitados pelo modelo FLAASH para correções são: 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, além de alguns parâmetros atmosféricos como modelo atmosférico, modelo de aerossol, feição de absorção d'água e visibilidade da atmosfera.

Os modelos atmosférico e aerossóis foram selecionados a partir de modelos padrões que melhor representariam a região de interesse. O FLAASH também inclui um método para obter a quantidade de aerossóis e estimar a visibilidade média, usando a reflectância de pixels escuros, baseado em Kaufman et al. (1997). Essa opção foi testada, entretanto, os resultados obtidos para área de interesse não foram satisfatórios, visto que as curvas espectrais resultantes para os alvos terrestres não apresentavam comportamento compatível com o comportamento espectral característico de alguns alvos conhecidos. Assim, houve a necessidade de, inicialmente, estimar o parâmetro visibilidade e depois reajustá-lo, até que os espectros de reflectância resultantes do modelo fossem compatíveis com o do comportamento espectral esperado para esses alvos. Por exemplo, sabe-se que a resposta espectral da água no infravermelho próximo define valores de brilho próximos a zero, portanto diferentes valores de visibilidade foram testados até que a curva espectral da água apresentasse valor nulo nessa região espectral. Para área de estudo o valor de visibilidade que melhor se ajustou foi 25 km.

O conteúdo de vapor d'água foi estimado pelo modelo que considera os efeitos de absorção da radiação eletromagnética nas bandas posicionadas em 1050-1240 (feição de absorção centrada em 1135 nm). Além dessa feição de absorção, o ENVI também estima vapor d'água da atmosfera nas bandas localizadas em 940 e 820 nm.

O georreferenciamento da imagem foi realizado no *software* ENVI utilizando-se quatorze pontos de controle sobre feições correspondentes entre a imagem Hyperion e uma imagem ETM+/Landsat, que serviu como referência. Para a transformação foi usado um polinômio do primeiro grau, adotando-se o sistema de projeção UTM, datum WGS-84 e zona UTM 23. Após o georreferenciamento, foi avaliado o resíduo em unidades de pixel, seguido pela reamostragem dos pixels da cena Hyperion pelo método de vizinho mais próximo.

- Criação de Máscara para extração do corpo d'água

Para extrair o corpo d'água e assim facilitar sua análise espectral, criou-se uma máscara para separar o corpo d'água dos outros alvos terrestres. Para essa operação considerou-se que a água absorve praticamente toda a radiação incidente na região espectral do infravermelho médio, enquanto que os outros alvos da superfície terrestre apresentam maior reflectância.

Assim, realizou-se uma classificação não supervisionada nas bandas do intervalo espectral de 760 – 900 nm (intervalo equivalente da banda 4 do sensor ETM Lansat). O número de identificação (ID) da classe espectral que representou o corpo d'água na imagem classificada, foi utilizado como limiar para a elaboração da máscara. A máscara nada mais é que uma imagem binária, na qual, os pixels sobre corpos d'água apresentam valor um e os pixels sobre demais alvos terrestre apresentam valor zero. Essa máscara foi sobreposta na imagem original, definindo valores de brilho apenas para os pixels inseridos no corpo d'água (Figura 26).

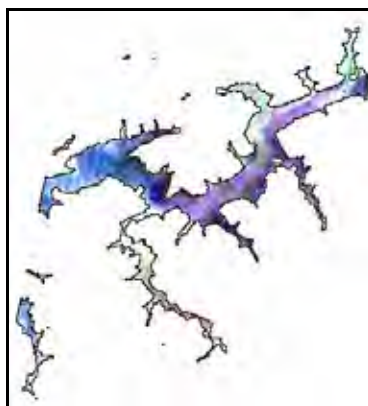


Figura 26 - Imagem Hyperion após aplicação da máscara, visualizada como uma composição colorida normal: (R-28, G-17, B-8)701,5 nm (vermelho); 589,6 nm (verde); 498 nm (azul).

#### 4.4.3.3 *Extração de curvas espectrais a partir da imagem Hyperion*

Após o georreferenciamento da imagem Hyperion, gerou-se um arquivo ASCII com as coordenadas de todos os pontos de coleta dos dados limnológicos. Esse arquivo foi sobreposto à imagem Hyperion para identificar os pixels referentes aos pontos de coleta dos dados limnológicos. Nesses pixels foram extraídos, valores de reflectância de superfície,

em cada banda no intervalo de 426 nm a 905 nm, formando curvas espectrais com 48 valores de reflectância, dado que a resolução espectral do sensor é de 10 nm. As curvas espectrais foram delimitadas nesse intervalo espectral devido a melhor definição da resposta espectral da água e em decorrência ao alto nível de ruído nos comprimentos de onda localizados fora dessa faixa.

Observou-se que algumas curvas extraídas apresentavam comportamento aleatório indicando a presença de ruídos. Assim, para minimizar a influência desses ruídos, houve necessidade de realizar uma filtragem, em que, foram novamente extraídas curvas espectrais da imagem para cada ponto de coleta de dados limnológicos, considerando dessa vez, uma janela de 3x3 pixels, cujo pixel central representou geograficamente o local de coleta. Gerou-se um arquivo ASCII com as nove curvas espectrais (pixel central e oito pixels vizinhos), e calculou-se a média para a definição de uma nova curva espectral para o ponto.

Para suavizar ainda mais as curvas e evitar a presença de possíveis ruídos remanescentes e também reduzir as oscilações radiométricas, ainda observadas nos espectros Hyperion, realizaram-se testes utilizando filtros de média móvel simples com três e cinco pontos (bandas) (TSAI; PHILPOT, 1998). Observou-se que o filtro de média simples de três pontos, apresentou melhor resultado por não obscurecer feições espectrais, aparentemente relevantes. Para exemplificar o efeito da aplicação do filtro de média de três pontos sobre o espectro, apresenta-se na Figura 27, a curva espectral obtida para o ponto P1 antes e depois da aplicação do filtro.

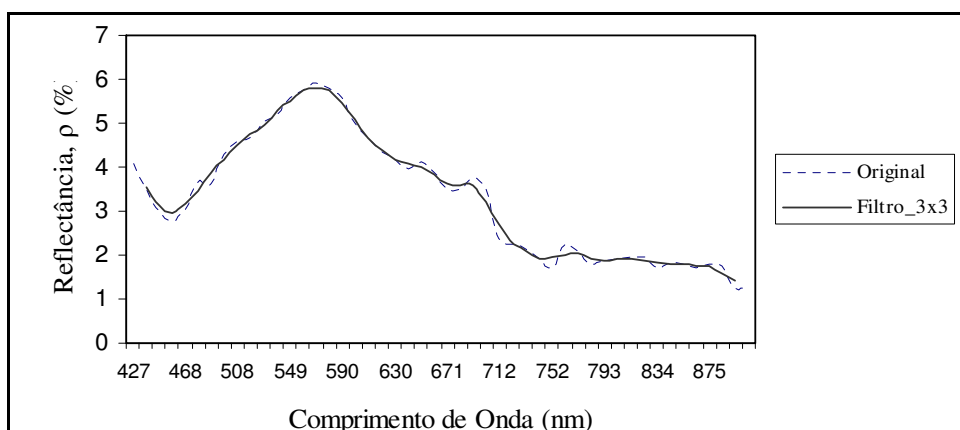


Figura 27 – Efeito da aplicação do filtro de média de três pontos sobre o espectro do ponto P1 obtido pela imagem Hyperion

Na Figura 28, observa-se as curvas espectrais de todos os pontos após a realização da filtragem.

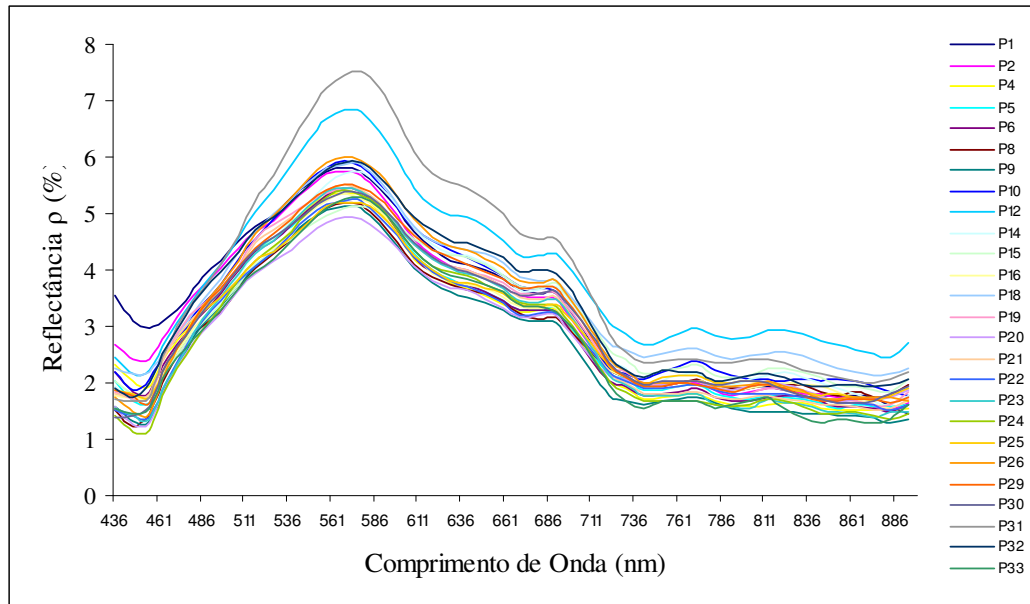


Figura 28 – Espectros dos pontos amostrais após aplicação do filtro de três pontos

Nos espectros apresentados na Figura 28, verifica-se que todas as curvas coletadas na imagem Hyperion do reservatório de Itupararanga apresentam forma similar, com baixa reflectância em toda a faixa espectral analisada, com um valor máximo médio em torno de 6 % de reflectância, conforme esperado para alvos desta natureza (DEKKER et al., 1991; GOODIN et al., 1993). Apenas os espectros dos pontos P12 e P31 excederam esse valor.

Espectralmente, as curvas obtidas da imagem Hyperion revelaram uma baixa reflectância da água na faixa dos menores comprimentos de onda (entre 436 e 450 nm, principalmente), apesar da radiação eletromagnética na faixa do azul possuir maior penetração na água. A baixa reflectância nesse intervalo tem sido explicada por alguns autores como pela forte absorção da matéria orgânica dissolvida e clorofila (GITELSON, 1992; HAN et al., 1994; KIRK, 1994; BUKATA et al., 1995).

Nota-se um pico de reflectância máxima no verde entre 560 - 570nm, um pequeno ponto de inflexão em torno de 630 nm, uma região de absorção no vermelho 671 nm e um pico de reflectância no infravermelho próximo (700 nm). Também se percebe a presença de dois outros picos pouco representativos em 770 nm e 820 nm. Essas variações nos valores de reflectância mostram-se muito similares àquelas analisadas nas curvas obtidas por Rundquist et al. (1996) para concentrações variadas de clorofila *a*, que são representadas na seção 2.3.2 desse trabalho. Nesse caso, a semelhança dos espectros torna-se evidente na Figura 4-b, que representa um experimento com baixa concentração de clorofila *a*. Essa

relação também comparece nas curvas obtidas por Han et al. (1994), Kirk (1994) e Bukata et al. (1995) para corpos d'água com presença predominante de clorofila *a*. Além disso, deve-se considerar que as semelhanças são evidentes, mesmo verificando que os valores de concentração estimados para clorofila *a* em alguns pontos do reservatório de Itupararanga, são muito inferiores aos valores de concentração utilizados nos experimentos desses autores, os quais foram realizados sob condições controladas de laboratório.

A partir destas verificações, presume-se que a concentração de sólidos na água do reservatório de Itupararanga não é suficiente para mascarar os efeitos da clorofila *a* na resposta espectral. Com base no exposto, é possível dizer que a radiação eletromagnética, ao atravessar a camada superior do corpo d'água, tenha sido absorvida e espalhada principalmente pelo fitoplâncton.

#### 4.4.3.4 *Remoção do Contínuo*

A Remoção do contínuo foi aplicada aos intervalos espectrais que definiram feições de absorção mais evidentes nas curvas espectrais extraídas da imagem hiperespectral. Após uma análise criteriosa dessas curvas espectrais, foram adotados intervalos espectrais que realçaram as feições representativas de variáveis opticamente ativas. A atenção foi redobrada para importantes feições de absorção da variável clorofila, visto que os espectros obtidos possuem padrão muito similar aos espectros dessa variável, obtidos em estudos anteriores (RUNDQUIST, 1996; KIRK, 1994; HAN et al.; 1994).

No total, selecionaram-se cinco intervalos espectrais, que após a obtenção das curvas com contínuo removido, estimaram-se alguns parâmetros relacionados com as bandas de absorção, como: profundidade, área, largura e assimetria, os quais foram posteriormente correlacionados com os dados limnológicos. A Tabela 6 indica os limites das feições de absorção e o comprimento de onda ( $\lambda$ ) central escolhido como referência neste trabalho.

Tabela 6 – Feições de absorção e Comprimento de onda ( $\lambda$ ) central de cada banda

Feições de Absorção	Central $\lambda$ (nm)	Limite inferior $\lambda$ (nm)	Limite superior $\lambda$ (nm)
1° Feição de absorção	457,341	436	508
2° Feição de absorção	620,146	589	640
3° Feição de absorção	671,022	650	691
4° Feição de absorção	742,249	691	772
5° Feição de absorção	793,126	772	813

Na Figura 29, observa-se o espectro de reflectância obtido para o ponto P1 com os limites dos intervalos, além da representação gráfica dos intervalos isolados para melhor visualização da sua curva espectral.

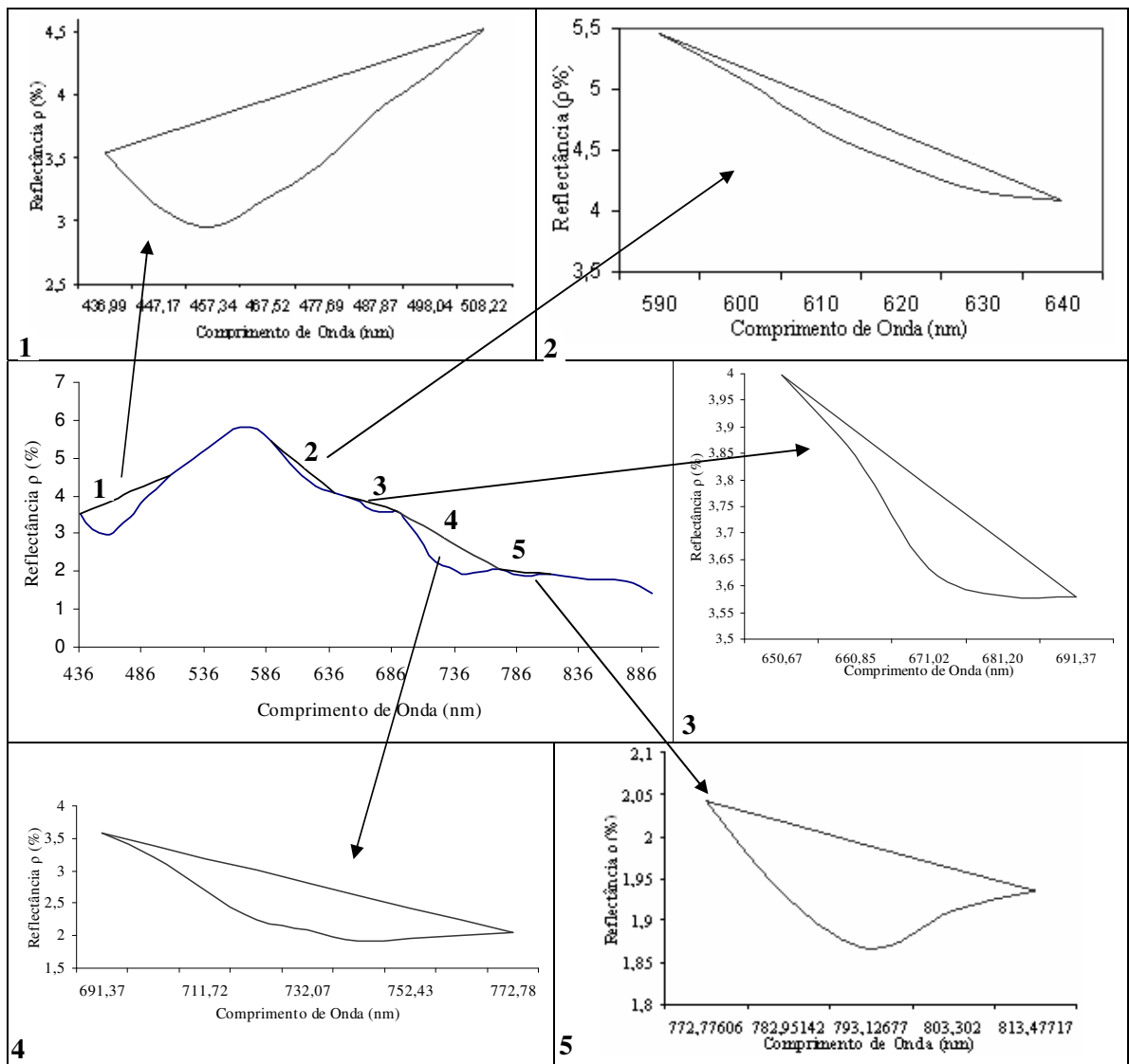


Figura 29 - Espectro de reflectância (ponto P1) com os limites dos intervalos e visualização dos intervalos: 1: 436 – 508 nm; 2: 589 – 640 nm; 3: 650 – 691 nm; 4: 691 – 772 nm; 5: 772 – 813 nm.

A Figura 30 esquematiza as feições de absorção, para todos os pontos, após a aplicação da remoção do contínuo.

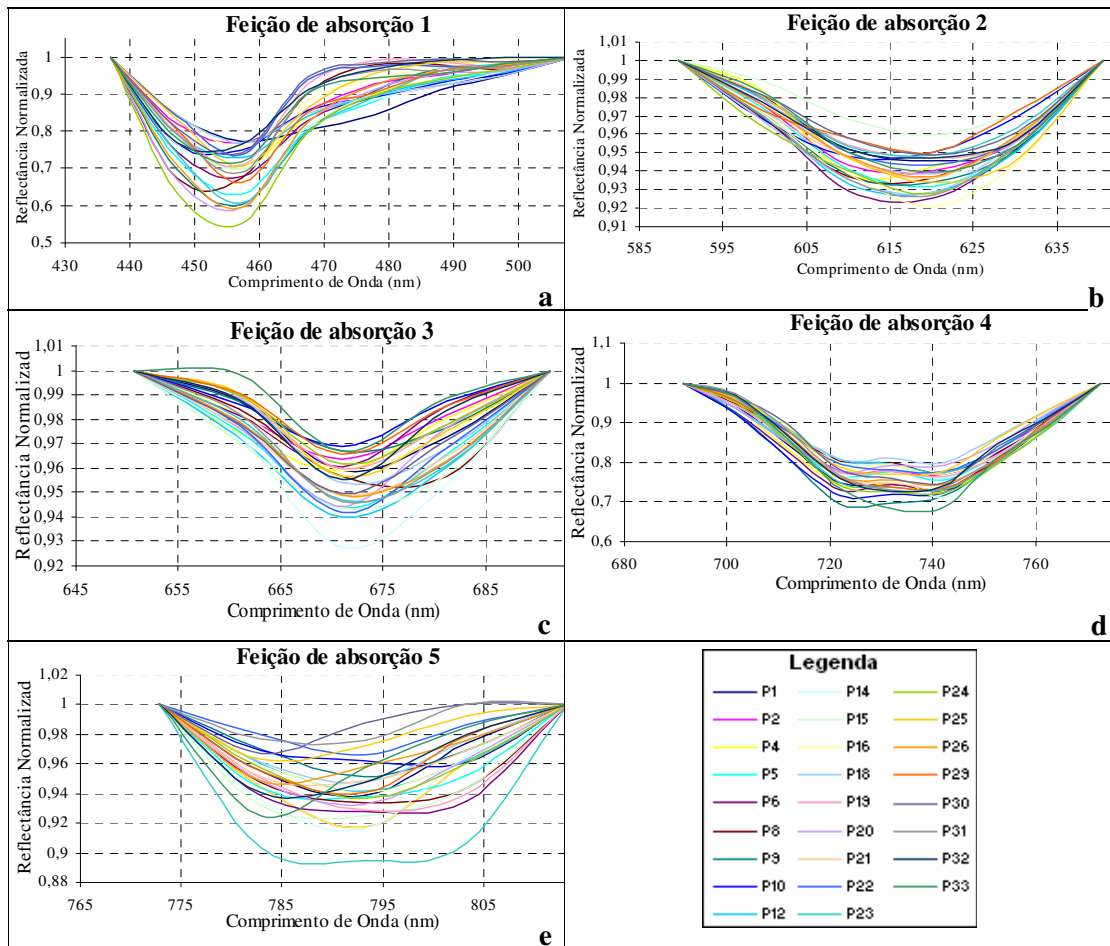


Figura 30 - Espectros do contínuo removido para intervalos espectrais de: a) 436 – 508 nm; b) 589 – 640 nm; c) 650 – 691 nm; d) 691 – 772 nm; e) 772 – 813 nm.

Analisando a Figura 30 observa-se que as curvas do contínuo removido para as feições de absorção 1, 2, 3 e 4 apresentam um comportamento similar, em termos de forma, para as curvas de todos os pontos. No entanto, para a feição 5 não há um padrão no comportamento geral dos pontos. Sabe-se que a região espectral dessa feição de absorção tem a característica de ser altamente influenciada por ruídos, assim, apesar dos dados terem sido suavizados pela filtragem, percebe-se que os ruídos se sobressaem.

Observando a escala no eixo das ordenadas da segunda feição de absorção (589nm – 640 nm), verifica-se que a profundidade de banda sofre poucas variações nos espectros dos diversos pontos. Nessa feição, os pontos amostrais P16 e P6 apresentaram as maiores absorções e o ponto P15 apresentou o menor valor de absorção. Alguns autores



relacionam maiores valores de absorção nessa feição com maior concentração de clorofila e menores valores com concentrações reduzidas de clorofila (BREUNIG et al., 2007b; HAN , 1997; RUNDQUIST, 1996). Conforme se verificou nas curvas espectrais apresentadas na literatura, a feição espectral existente nessa região do espectro eletromagnético também tende a sofrer alterações com o acréscimo de sólidos em suspensão (JENSEN, 2000; GOODIN et al.,1993).

Na terceira feição de absorção (650 nm – 691 nm), os maiores valores de profundidade são observados para os pontos P12 e P14 e as menores para os pontos P10 e P33, porém, as diferenças de profundidades entre maiores e menores valores são relativamente pequenas. Alguns autores relatam que essa terceira feição de absorção sofre forte influência de sólidos em suspensão (BREUNIG et al., 2007b) e de clorofila (HAN , 1997; RUNDQUIST, 1996; GITELSON, 1992).

Observa-se também que as profundidades das feições 1 e 4 possuem valores relativamente maiores em relação às outras feições, sendo esse comportamento esperado, devido à baixa reflectância ocasionada pela absorção da luz azul e do infravermelho. Como já mencionado anteriormente, à baixa reflectância na feição 1 tem sido explicada por alguns autores pela forte absorção ocasionada pela matéria orgânica dissolvida e clorofila (GITELSON, 1992; HAN et al., 1994; KIRK, 1994). Já a baixa reflectância da feição 4 tem sido explicada pela forte absorção da água na região espectral do infravermelho próximo.

A Tabela 7 apresenta os resultados médios dos parâmetros para as quatro feições de absorção analisadas.

Tabela 7 – Parâmetros das bandas de absorção do contínuo removido.

		<b>Feição 1: 436 – 508 nm</b>		<b>Feição 2: 589 – 640 nm</b>	
<b>Parâmetros</b>		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Posição central ( $\lambda_{nm}$ )		457,341		620,146	
Profundidade		0,309458	0,063129	0,061526	0,009236
Largura		24,36303	4,749446	31,238	1,142154
Assimetria		0,654185	0,094977	1,341424	0,11898
Área		8,479815	1,818696	1,8624	0,276192
		<b>Feição 3: 650 – 691 nm</b>		<b>Feição 4: 691 – 772 nm</b>	
<b>Parâmetros</b>		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Posição central ( $\lambda_{nm}$ )		671,022		742,249	
Profundidade		0,046299	0,010002	0,255461	0,028368
Largura		19,64477	2,688061	48,37437	2,920355
Assimetria		3,48614	0,67981	1,734301	0,120152
Área		0,929757	0,249793	12,1384	1,308482
		<b>Feição 5: 772 – 813 nm</b>			
<b>Parâmetros</b>		Média	Desvio Padrão		
Posição central ( $\lambda_{nm}$ )		793,126			
Profundidade		0,06059	0,018446		
Largura		23,6716	3,9839		
Assimetria		4,629549	1,781432		
Área		1,432721	0,538291		

Verifica-se pela Tabela 7, que os valores de desvio padrão para o parâmetro largura são relativamente altos se comparados com os outros parâmetros analisados. Já o parâmetro profundidade foi o que apresentou menores valores de desvio padrão, de modo que, essa baixa variabilidade dos dados pode tornar as análises posteriores mais susceptíveis a erros de medida. A feição 5, localizada entre 772 e 813 nm, apresentou maior variabilidade nos parâmetros analisados, sustentando observações anteriores sobre a presença de ruídos nessa região espectral.

Em análises posteriores, foram estimadas as correlações entre a variável pigmentos totais (medida indireta de clorofila *a*) com todos os parâmetros das feições de absorção resultantes da aplicação do método de remoção do contínuo, dado que foram selecionados importantes feições de absorção ocasionadas por clorofila. As feições de absorção entre 650 nm a 691 nm e 589nm a 640 nm, também foram correlacionadas com sólidos em suspensão, visto que diversos trabalhos mostram variações de reflectância nessas regiões espectrais associadas com a variação de sólidos em suspensão na água.

#### 4.4.3.5 *Análise Derivativa*

Determinadas feições espectrais que ocorrem em curvas de reflectância são geralmente relacionadas à presença de componentes opticamente ativos que favorecem a absorção e o espalhamento da radiação. Além dessas observações diretas sobre curvas de reflectância, frequentemente tratadas na literatura (GITELSON, 1992), ainda existe a possibilidade de utilizar a técnica de análise derivativa para evidenciar informações úteis que caracterizem componentes opticamente ativos de interesse.

A vantagem da aplicação de 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, então, a subtração de medidas radiométricas entre duas bandas espaçadas pode reduzir os seus efeitos (RUDORFF, 2006). Assim, efeitos causados pela variação de intensidade de iluminação, comuns em ambientes aquáticos, podem ser minimizados.

Genericamente, o cálculo da derivada de primeira ordem representa a inclinação angular dos espectros de reflectância a cada 10 nm. A derivada de segunda ordem é calculada de forma análoga, partindo-se da curva de derivada de primeira ordem (BRAGA, 1998). Dessa forma, variações no coeficiente angular das curvas derivadas permitem identificar pontos de inflexão (mínimos e máximos) representativos de feições de absorção e reflectância, causadas por componentes opticamente ativas da água, que são característicos de feições menos evidentes nos espectros de ordem inferior (GOODIN et al., 1993; CHEN et al., 1992; BRAGA, 1998).

Para este trabalho, foram calculadas curvas derivadas de primeira e segunda ordem nos 26 espectros de reflectância em relação ao comprimento de onda. A Figura 31 apresenta as curvas obtidas após aplicação da primeira derivada (b) e segunda derivada (c) dos espectros de reflectância medidos nos 26 pontos de coleta, bem como as curvas dos espectros originais (a) para melhor compreensão.

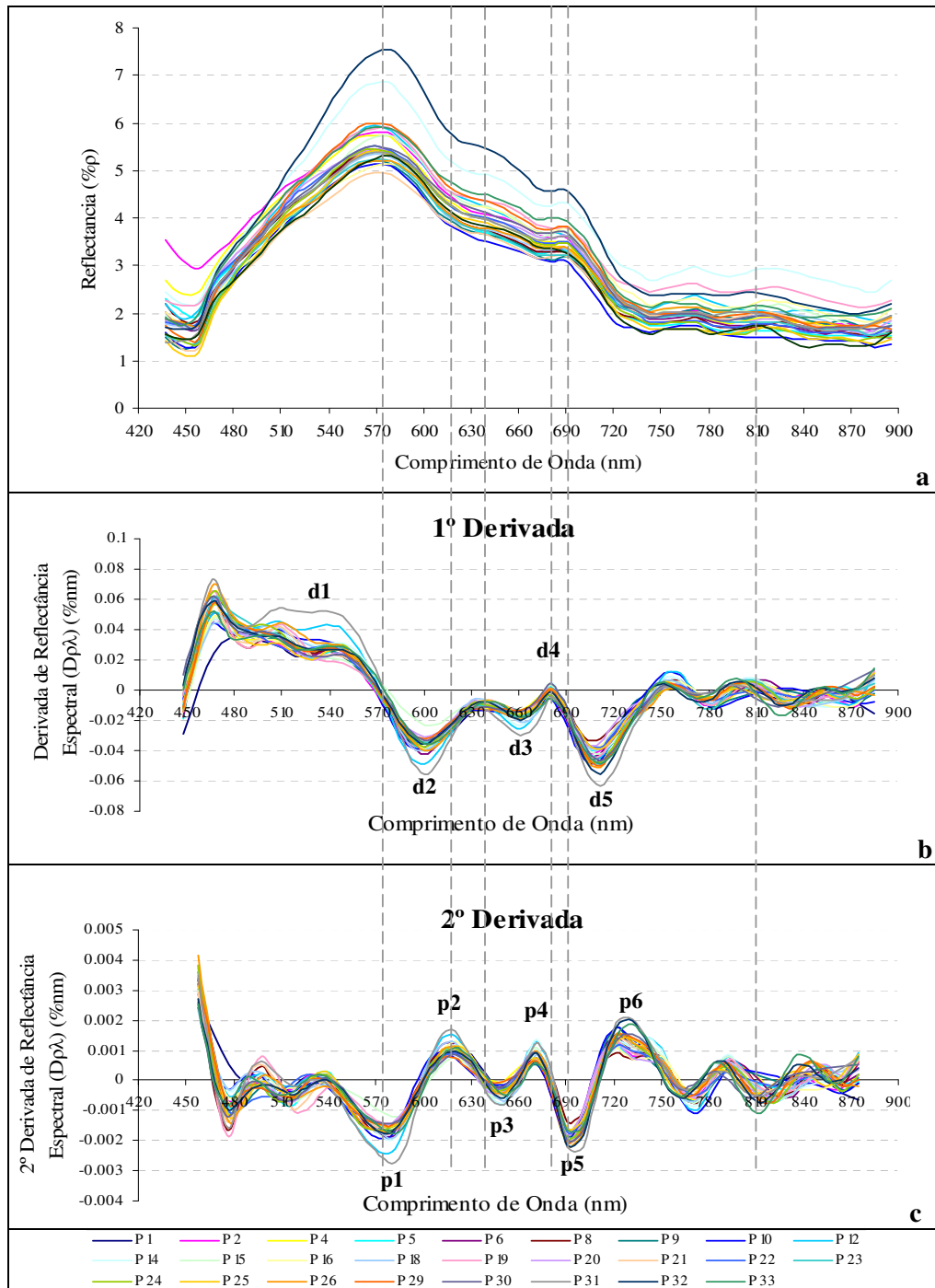


Figura 31 – Espectros originais da água (a); curvas resultantes da aplicação da primeira derivada (b); curvas resultantes da aplicação da segunda derivada (c)

Como colocado anteriormente, a aplicação de derivadas nos espectros de reflectância tem como função principal salientar feições de absorção e espalhamento pouco evidentes nos espectros de reflectância, que podem corresponder a baixas concentrações de substâncias opticamente ativas. Na Figura 31 (a), verifica-se que os maiores picos de absorção

ou de reflexão observados nas curvas originais, equivalem aos pontos de cruzamento no eixo das abscissas da curva de primeira derivada. Já as feições observadas na curva de primeira derivada representam regiões espectrais de maior inclinação da curva de reflectância original. De maneira análoga, os picos de absorção e de reflexão observados na curva de primeira derivada são referentes aos pontos de cruzamento das abscissas no eixo da curva de segunda derivada e as feições da curva de segunda derivada representam regiões espectrais de maior inclinação da curva de primeira derivada. Para curvas de segunda derivada, os resultados garantem um realce das feições características das curvas de primeira derivada (BRAGA, 1998).

Segundo Goodin et al. (1993) essas características permitem a eliminação progressiva, a cada derivação, do efeito de cada uma das substâncias com comportamento óptico ativo presentes na água.

Analisando a Figura 31 (b), observa-se na primeira derivada um ponto de cruzamento no eixo das abscissas em aproximadamente 569 nm, no intervalo de  $d1$  (520 nm) a  $d2$  (600nm), correspondente ao pico de maior valor de reflectância no espectro original na região do verde. Mesmo os picos de reflexão de menores proporções que ocorrem na curva original em 660 nm a 690 nm, definem um ponto de cruzamento no eixo das abscissas, na região de  $d3$  (654 nm) a  $d4$  (671 nm) que caracteriza o declive acentuado pela absorção mínima no vermelho no espectro original.

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 essa feição considerada menos efetiva para discriminar os efeitos ocasionados por esses dois componentes. Nos dados desse autor, verifica-se que os picos definidos em  $d4$  são de maior grandeza que os picos obtidos nesse trabalho.

Analisando ainda a curva de primeira derivada, é possível visualizar pontos de inflexão em 630 e 751 nm que correspondem aos comprimentos de onda, nos quais, se identificaram 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.

Verifica-se também que as curvas de primeira derivada, obtidas para o reservatório, mantêm um padrão muito similar das curvas de primeira derivada apresentadas por Rundquist et al. (1996), mostradas na Figura 13 da seção 3.3.2.1 para água com presença de clorofila em pequenas concentrações.

Nas curvas de segunda derivada representadas na Figura 31 (c), que segundo Goodin et al. (1993) mantêm realçadas somente feições que manifestam a presença de clorofila na água, verificam-se feições expressivas nas regiões denominadas *p1*, *p2*, *p3*, *p4* e *p5*. O autor mencionado anteriormente, obteve correlações significativas ( $r = 0,89$ ) entre a diferença dos picos máximos e mínimos observados nas regiões *p4* e *p5* com ocorrência de clorofila.

Comparando a curva de segunda derivada com o espectro de reflectância original, pode-se dizer que:

- *p1* realçou o pico de reflectância máxima na região do verde da curva original;
- *p2* mostra uma suave feição de absorção da curva original com centro em 615 nm;
- *p3* indica um aumento sutil de reflectância curva original em 640 nm;
- *p4* mostra a feição de absorção causada pela absorção no vermelho na curva original em 671 nm;
- *p5* destacou o pico de reflectância no infravermelho próximo;
- *p6* realçou a feição de absorção com maior profundidade em 721 nm.

Sustentando o que foi exposto por Goodin et al. (1993), ou seja, que a segunda derivada realça feições que manifestam a presença de clorofila na água, percebe-se que as regiões indicadas por *p1*, *p2*, *p3*, *p4* e *p5* apresentam fortes relações com as curvas de reflectância original, que possui comportamento aparentemente associado à presença de clorofila *a*.

#### 4.4.3.6 Razão de Bandas

Conforme discutido no item anterior, curvas de segunda derivada têm a particularidade de realçar somente feições ocasionadas pela presença de clorofila (GOODIN et al., 1993). Observando os resultados da aplicação da segunda derivada nas curvas espectrais da imagem Hyperion, verifica-se que a técnica salientou importantes feições observadas na curva original. Diante do exposto, a técnica de razão de bandas foi empregada visando identificar razões espectrais sensíveis à variação da biomassa fitoplanctônica.

Na Figura 32 é possível visualizar as feições espectrais (A, B, C, D, E e F) que resultaram em feições na curva de segunda derivada e que possuem embasamento teórico sobre suas ocorrências relacionadas com presença de clorofila *a*

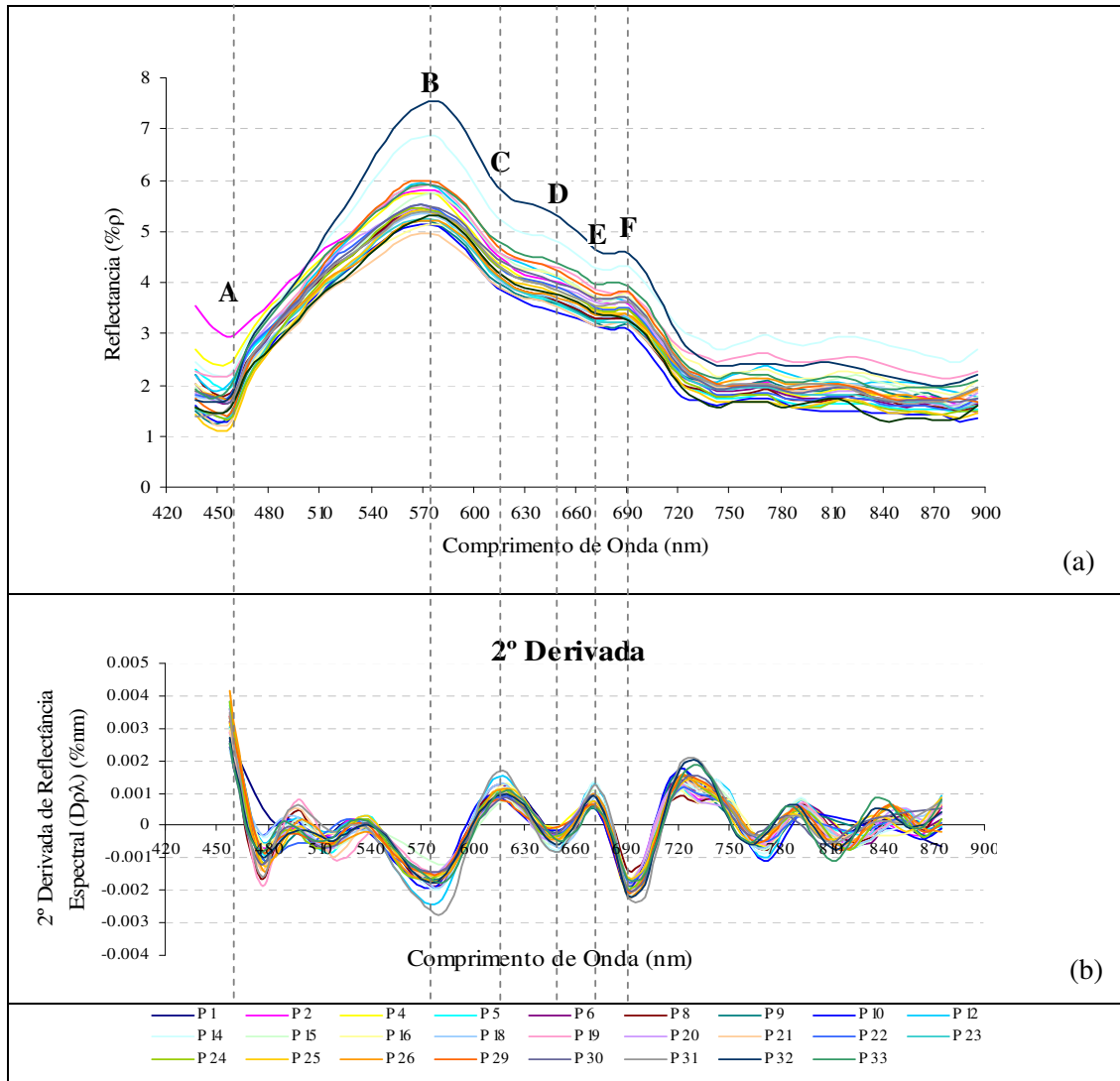


Figura 32 – Espectros dos pontos amostrais com denominação das regiões espectrais maiores variações no valor de reflectância (a); curvas de segunda derivada (b).

Para a definição de modelos de razão selecionaram-se feições que, conforme descrito na literatura, ocorrem devido a presença de clorofila *a* no corpo d'água. Assim, utilizaram-se as seguintes feições: A, baixa reflectância da luz azul entre 400 e 500 nm, ocasionada pela clorofila; B, reflexão da luz verde pelas algas; C e D, decorrentes da presença de pigmentos acessórios; E, provocada pela clorofila *a* (GITENSON, 2002) e pico

de reflexão F, causado pela fluorescência de pigmentos de fitoplâncton (CARDER; STEWARD, 1985).

Considerando o exposto e após várias combinações de bandas, os modelos de razão calculados sobre a curva de reflectância original consideraram as seguintes feições:  $A/B \rightarrow \rho_{457}/\rho_{579}$ ,  $C/B \rightarrow \rho_{620}/\rho_{579}$ ,  $E/F \rightarrow \rho_{671}/\rho_{691}$ ,  $E/D \rightarrow \rho_{671}/\rho_{650}$ ,  $E/B \rightarrow \rho_{671}/\rho_{579}$  e  $C/F \rightarrow \rho_{620}/\rho_{690}$ .

A princípio, calcularam-se as razões somente nos pontos em que a concentração de pigmentos totais foi estimada, para a análise de correlação, visando identificar razões que possuíssem maior relação com o comportamento fitoplanctônico no reservatório. Para o cálculo da razão  $E/F \rightarrow \rho_{671}/\rho_{691}$ , optou-se em utilizar as curvas espectrais sem aplicação do filtro de média de três pontos, dado que, os valores de reflectância encontrados nessas regiões espectrais apresentavam-se muito similares, antes e após a aplicação do filtro. A Tabela 8 apresenta os valores de correlações entre pigmentos totais com as razões calculadas. Deve-se lembrar ainda que, a variável pigmentos totais foi utilizada para contornar a ausência da variável de interesse clorofila *a*.

Tabela 8 – Correlações entre medidas de pigmentos totais e os índices espectrais de razão

<b>Razão</b>	<b>Correlações com Pigmentos totais</b>
$A/B \rightarrow \rho_{457}/\rho_{579}$	0,48
$C/B \rightarrow \rho_{620}/\rho_{579}$	0,13
$E/F \rightarrow \rho_{671}/\rho_{691}$	-0,09
$E/D \rightarrow \rho_{671}/\rho_{650}$	0,25
$E/B \rightarrow \rho_{671}/\rho_{579}$	0,25
$C/F \rightarrow \rho_{620}/\rho_{690}$	-0,39

Analisando a Tabela 8 percebe-se que os coeficientes de correlação não apresentam valores elevados. Porém, deve-se considerar que pigmentos totais é apenas uma variável derivada clorofila. Além disso, o reservatório apresentou baixos índices de concentração de clorofila com valores homogêneos, o que pode ter dificultado a análise de correlação.

Ainda conforme mostra a Tabela 8, o coeficiente de correlação obtido para razão  $\rho_{457}/\rho_{579}$  (0,48) foi mais significativo em relação às demais razões. Para esse modelo de



razão, foi realizada uma análise de regressão para estimativa de pigmentos totais que será posteriormente apresentado.

#### 4.4.4 Análise de correlação

Com o objetivo de verificar se as medidas espectrais extraídas da imagem hiperespectral Hyperion estão associadas com a concentração de componentes opticamente ativos, realizou-se uma análise da correlação entre esses valores espectrais originais, bem como aqueles resultantes da aplicação de técnicas e variáveis limnológicas.

Inicialmente, valores de coeficiente de correlação de *Pearson* (correlação simples entre duas variáveis contínuas) foram calculados entre a reflectância de superfície extraída da imagem Hyperion e algumas variáveis limnológicas. A identificação de coeficientes de correlação significativos determinou os componentes responsáveis pelo comportamento espectral do reservatório de Itupararanga e as melhores faixas espectrais para sua detecção.

Os componentes considerados opticamente ativos que foram obtidos neste estudo (pigmentos totais e sólidos suspensos) tiveram sua correlação avaliada com os espectros resultantes da aplicação de análise derivativa e parâmetros da remoção do contínuo. Para o cálculo dos coeficientes de correlação, foram utilizados os 13 pontos de coleta para pigmentos totais e 26 pontos de coleta para as demais variáveis.

Para a identificação de coeficientes de correlação significativos, ou seja, coeficientes de correlação resultantes, capazes de garantir a dependência entre dados hiperespectrais e variáveis limnológicas, considerando o número de elementos amostrais e o grau de significância, foi utilizado o teste significância de Fisher, que considera a hipótese da existência de correlação entre dados espectrais e amostras de variáveis limnológicas. Fisher definiu que a estatística desse teste é dada pela seguinte equação (14) (BUSSAB; MORETTIN, 1987):

$$t = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}}, \quad (14)$$

em que  $t$  representa a distribuição  $t$  de Student, com  $n-2$  graus de liberdade e  $r$  o coeficiente de correlação. Aplicando o teste, ao nível de significância de 1% e limiar de aceitação de 99 %,

teve-se que para a variável pigmentos totais ( $n = 13$ ), valores de correlação maiores que 0,65 foram considerados significativos e para as demais variáveis ( $n = 26$ ), consideraram-se significativos os valores acima de 0,45.

#### 4.4.4.1 Correlações entre as variáveis limnológicas e indicadores espectrais

Neste item, serão apresentados os correlogramas entre concentração de variáveis limnológicas e as curvas de reflectância obtidas a partir dos dados do sensor Hyperion, sobre toda a faixa espectral. O correlograma apresentado na Figura 33 expressa a relação entre os valores assumidos pelas variáveis limnológicas e os valores de reflectância ao longo da região do espectro eletromagnético de interesse.

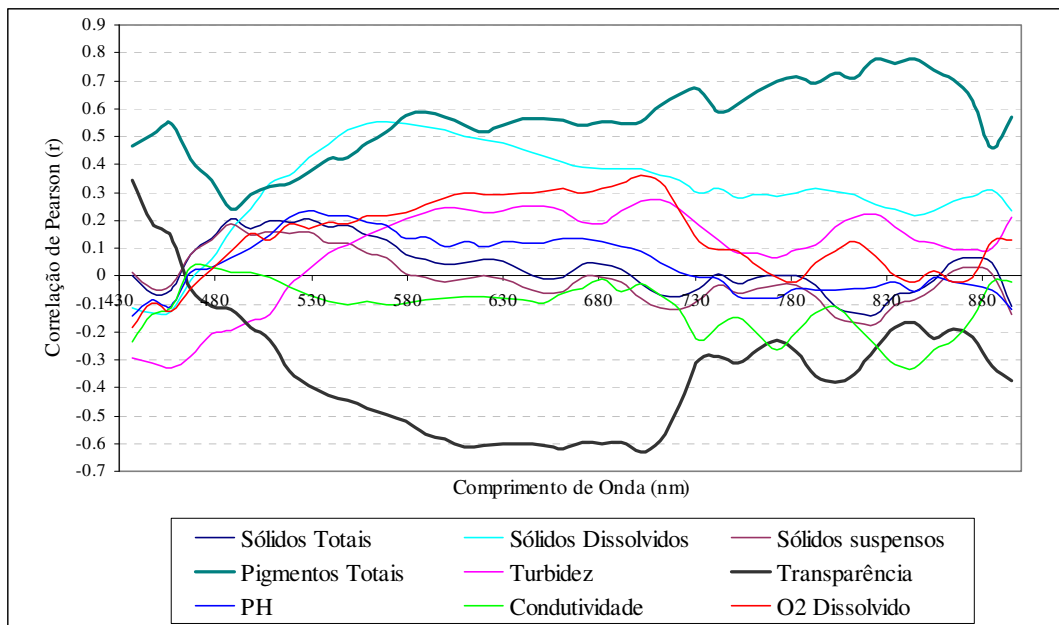


Figura 33 – Correlogramas entre os espectros originais e variáveis limnológicas

Pela análise da Figura 33 verificam-se valores de correlação não significativos para algumas variáveis limnológicas, principalmente para sólidos totais, sólidos suspensos,  $O_2$  dissolvido, condutividade, turbidez e pH. Analisando os valores medidos em campo para as variáveis sólidos suspensos, sólidos totais e turbidez observam-se que suas concentrações são baixas e homogêneas para os pontos avaliados, o que pode causar os baixos valores de correlação. Para as variáveis  $O_2$  dissolvido, condutividade e pH, os valores de

correlação obtidos estão mais adequados, já que não se tratam de componentes opticamente ativos.

Nota-se que os valores de correlação entre sólidos em suspensão e sólidos totais têm comportamentos bastante parecidos, com apenas uma pequena diferença, que pode estar relacionada com os sólidos dissolvidos, já que esta é a diferença entre sólidos totais e suspensos. Contudo, verificou-se que a variável sólidos dissolvidos apresentou um comportamento diferenciado, com valores de correlação mais elevados principalmente na faixa do visível. Na literatura, os autores estudados não abordam essa variável como tendo características ópticas mensuráveis, sendo suas discussões voltadas apenas para a variável sólidos em suspensão, que é encontrada em maior abundância nos ambientes analisados. No caso do reservatório de Itupararanga, sabe-se que a concentração de sólidos suspensos é pequena e, por essa razão é bem provável que o feixe de luz, ao atravessar a coluna d'água, possa estar sofrendo interferência de sólidos dissolvidos. Um fato que fortalece essa idéia é o correlograma resultante da variável transparência que tem um comportamento oposto ao variável sólidos dissolvidos. Para ambas as variáveis, os correlogramas apresentam valores menos significativos a partir do infravermelho próximo. Contudo, para entender claramente a razão desse comportamento, estudos mais aprofundados precisam ser realizados, de modo a definir a composição dos sólidos dissolvidos, bem como de outras variáveis envolvidas no processo .

Para a variável pigmentos totais, o correlograma resultante apresentou valores de correlação elevados para todos os comprimentos de onda, exceto na região espectral próxima a 487 nm. Analisando especificamente esse correlograma, observam-se altos valores de correlação nos comprimentos de onda iniciais (436 a 477 nm) que, de acordo com alguns autores, a clorofila é responsável por consideráveis alterações na resposta espectral nesse intervalo (GITELSON, 1992; RUNDQUIST et al. 1996). A presença predominante de clorofila na água também provoca um pico de reflectância máxima na região espectral próxima a 560 nm e, analisando o correlograma observam-se altos valores de correlação nessa região, principalmente em 589 nm, no qual ocorre o pico de maior reflectância do verde.

Analisando ainda o correlograma para variável pigmentos totais, em 640 nm também é possível visualizar uma pequena alteração no comportamento da curva do correlograma que, segundo a literatura pesquisada, a presença dominante de clorofila na água provoca um pequeno ponto de inflexão na curva original nessa região (GITELSON, 1992; RUNDQUIST et al. 1996; JENSEN, 2000). A literatura também descreve sobre um pico de

reflectância no infravermelho próximo, entre 690 e 720 nm (CARDER; STEWARD, 1985; JENSEN, 2002; GITELSON, 1992; RUNDQUIST et al. 1996), identificado nas curvas espectrais originais deste trabalho (Figura 28) em 691 nm. Porém observando o correlograma, percebe-se que nesta região espectral a correlação se mantém constante em torno de 0,54. Após 691 nm (transição do vermelho para o infravermelho) a curva de correlação passa a apresentar altos valores de coeficientes de correlação, considerados significativos de acordo com o teste de significância de Fisher. As referências pesquisadas também discutem sobre um pequeno pico de reflexão que ocorre em aproximadamente 810 nm ocasionado pela presença de clorofila (RUNDQUIST et al., 1996), observando a curva de reflectância original, este pico é menos pronunciado, contudo no correlograma resultante é possível verificar que essa região espectral apresentou altos valores de correlação com pigmentos totais, principalmente em 823 nm.

#### 4.4.4.2 *Correlações entre variáveis opticamente ativas com curvas de primeira e segunda derivada e parâmetros das curvas do contínuo removido*

Os correlogramas mostrados anteriormente (Figura 33) são um primeiro indicativo das variáveis que respondem espectralmente na água da represa de Itupararanga. Observou-se nesses correlogramas, que as curvas espectrais obtidas na imagem Hyperion do reservatório respondem principalmente à variável pigmentos totais (indicador indireto da variável clorofila *a*). Assim, as respostas espectrais das curvas originais mostram que a radiação, ao atravessar a camada superficial da coluna d'água, foi absorvida e espalhada principalmente pelo fitoplâncton. Essa variável opticamente ativa foi correlacionada com as curvas de primeira e segunda derivada e parâmetros obtidos na remoção do contínuo.

Para a variável sólidos em suspensão, outra componente opticamente ativa, também foram realizadas análises de correlação com as curvas de primeira e segunda derivadas e parâmetros resultantes do contínuo removido para as principais feições de absorção (589 a 640 nm e 671 nm a 681 nm), que apresentam variação de reflectância com a variação de sólidos suspensos na água.

- Correlações entre curvas de primeira e segunda derivada e parâmetros do contínuo removido com concentração de pigmentos totais

A Figura 34 apresenta os correlogramas entre as curvas de primeira e segunda derivada com concentração de pigmentos totais.

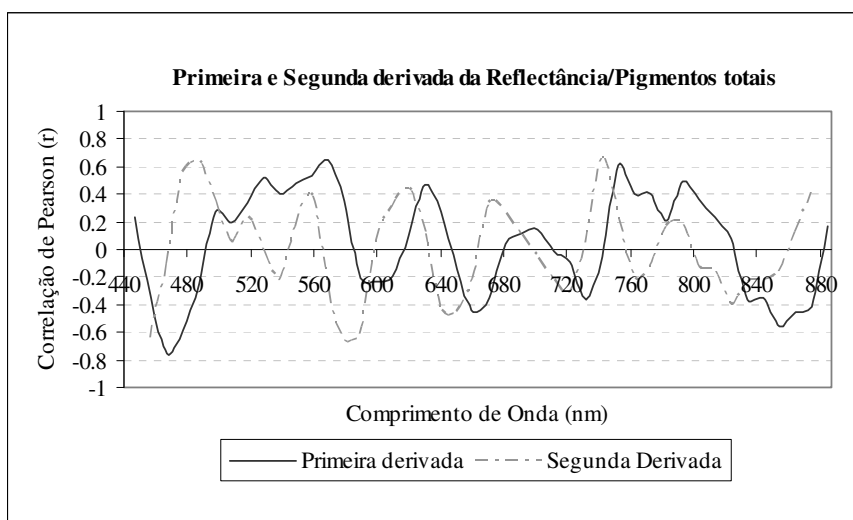


Figura 34 – Correlação de pigmentos totais com a primeira e segunda derivada

No correlograma de primeira derivada (Figura 34), verificam-se maiores valores de correlação nos primeiros comprimentos de onda, principalmente em 467 nm (-0,7), onde é possível visualizar um ponto de alta correlação negativa. Comparando com os valores obtidos no correlograma entre a curva espectral original e pigmentos totais (Figura 33), a primeira derivada forneceu maiores correlações que a curva original, nessa região espectral. Deve-se ressaltar que nesse intervalo, a reflectância é mais sensível à presença de clorofila *a* (GITELSON, 1992; JENSEN, 2000; RUNDQUIST et al, 1996).

Posteriormente, o correlograma de primeira derivada mostra um ponto de alta correlação positiva em 569 nm, com valor de 0,65. Sabe-se que nessa região, a presença de clorofila *a* na água provoca um pico de reflectância, que é claramente visualizado nas curvas espectrais originais obtidas na imagem Hyperion (Figura 28). Observou-se que, a correlação entre pigmentos totais e reflectância original (Figura 33), nessa região espectral também foram menores que os obtidos para primeira derivada. Em 630 nm e 660 nm observam-se picos de correlação positivos e negativos, respectivamente, que podem estar relacionados com a presença de clorofila.

Goodin et al. (1993) observaram em suas curvas de primeira derivada um pico positivo próximo a 670 nm. Segundo o autor, este pico permite uma melhor

diferenciação entre a clorofila e componentes opticamente ativos. Esse pico também foi visualizado, em menor proporção, nas curvas de primeira derivada deste trabalho representado por  $d4$  (681 nm) da Figura 31 (b) do item 5.3.1. Analisando o correlograma entre a curva de primeira derivada e pigmentos totais, na região espectral onde ocorre esse pico, observam-se, coeficientes de correlação pouco expressivos, se comparado com os valores de correlação alcançados por esse autor. Entretanto, deve-se considerar que Goddin et al. (1993) utilizou concentrações de clorofila muito superiores das que foram observadas no reservatório de Itupararanga, tornando esse pico mais evidente do que o observado na curva espectral deste trabalho.

Outro pico de correlação acentuado observado no correlograma de primeira derivada ocorre em 752 nm com valores maiores que 0,6. Na curva de reflectância (Figura 28), verifica-se que essa região espectral mostra uma feição de absorção na transição da luz vermelha para o infravermelho. Nos comprimentos de onda maiores, a primeira derivada não apresentou valores de correlação acentuados como aqueles obtidos entre valores de reflectância original e pigmentos totais.

O correlograma entre a curva de segunda derivada e pigmentos totais, também representado na Figura 34, mostra alta correlação (0,65) para a feição de absorção formada na curva original entre 436 a 487. Posteriormente, valores elevados de correlação (-0,66) foram observados em 579 nm, onde a curva de segunda derivada possui uma feição denominada  $p1$  (Figura 31 (c)), associada ao pico de reflectância máxima do verde. Nesse mesmo ponto, a segunda derivada resultou em maiores valores de correlação, quando comparados com as correlações obtidas entre pigmentos totais e a curva de reflectância original. Além do mais, em 671 nm visualiza-se um ponto de menor correlação (0,33), relacionado à feição descrita por Goodin et al. (1993) que, apesar de correlação pouco expressiva, parece ter sido realçada na segunda derivada.

Analisando os demais picos de correlação do correlograma da curva de segunda derivada, verifica-se que os coeficientes de correlação são similares aos obtidos no correlograma da curva de primeira derivada, porém, observa-se um pequeno deslocamento entre os picos de correlação, que ocorre pelo fato da primeira derivada representar as feições de reflexão e absorção da curva original no cruzamento do eixo das abscissas.

Recordando que, a curva de segunda derivada realça feições espectrais da curva de reflectância original exatamente nos locais espectrais em que elas ocorrem e que segundo Goodin et al. (1993), a segunda derivada salienta somente feições espectrais ocasionadas pela presença de clorofila, a Figura 35 apresenta o correlograma entre a segunda

derivada e pigmentos totais, sobreposto à curva de reflectância original do ponto P1. Através dessa figura é possível perceber que, alguns picos de correlação ocorrem exatamente sobre feições espectrais da curva original que foram preliminarmente relacionadas à presença de clorofila *a* na água (item 4.3.3.3). Esse fato, sustenta a hipótese de que a segunda derivada realça importantes feições espectrais ocasionadas pela presença de pigmentos totais na água e confirma a existência dessas feições na curva original em decorrência da presença de pigmentos totais na água.

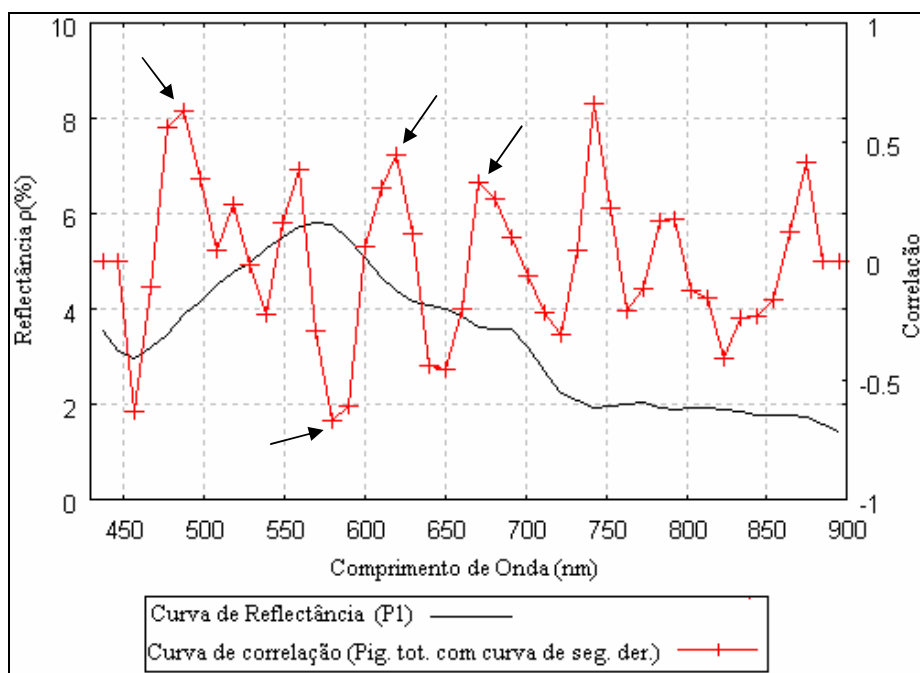


Figura 35 – Curva de reflectância do ponto P1, sobreposta ao correlograma entre a segunda derivada e pigmentos totais

As correlações obtidas para os parâmetros das bandas de absorção resultantes do contínuo removido e a concentração de pigmentos totais são apresentadas no gráfico da Figura 36.

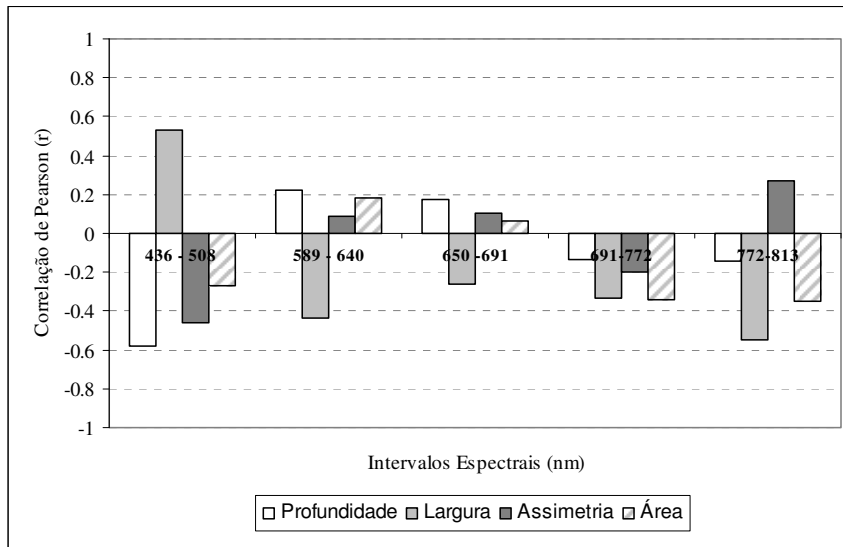


Figura 36 – Coeficientes de Correlação entre os parâmetros das curvas do contínuo removido com a concentração de pigmentos totais

Conforme mostra a Figura 36, as maiores correlações foram obtidas no intervalo 436 a 508 nm, no qual, todos os parâmetros analisados apresentam alguma correlação. Por outro lado, percebe-se que o parâmetro largura da banda de absorção é o que apresenta maiores correlações com pigmentos totais para a maioria dos intervalos espectrais analisados.

No segundo intervalo considerado (589 a 640 nm), o parâmetro largura foi o mais influenciado pela presença de pigmentos totais na água. Os intervalos 589 a 640 nm, 650 a 691 e 691 a 772 nm apresentaram resultados não significativos para os parâmetros analisados, mostrando que a variação de pigmentos totais na água não provocou alterações espectrais na curva. Já na feição de absorção formada entre 772 a 813nm, o parâmetro largura foi o que sofreu maior influência pela presença de pigmentos totais na água.

De acordo com referências como Goodin et al.,1993; Rundquist et al. 1996; Quibell, 1991 e Kirk, 1994, a variação de concentração de clorofila na água causa importantes variações nas curvas espectrais nos intervalos 589 a 640, 650 a 691 e 691 a 772 nm, porém, os estudos apresentados por esses autores foram realizados em ambientes com altas concentrações de clorofila na água, diferentemente das concentrações encontradas para o reservatório de Itupararanga. Essa constatação sugere que essas feições de absorção são menos sensíveis a pequenas variações na concentração de pigmentos totais. Entretanto, deve-se considerar que as correlações não significativas visualizadas nesses intervalos, podem ter



ocorrido pela homogeneidade na concentração de pigmentos totais nos pontos analisados, o que pode ter prejudicado as análises das correlações.

- Correlações entre as curvas de primeira e segunda derivada e parâmetros do contínuo removido e sólidos em suspensão

A Figura 37 apresenta os correlogramas entre as curvas de primeira e segunda derivada e a concentração sólidos suspensos. É possível verificar nesta figura, que os coeficientes de correlação obtidos para a maioria dos comprimentos de onda são pouco significativos, ocorrendo várias oscilações nas curvas. A maioria dos picos positivos e negativos observados na primeira derivada resultou em coeficientes de correlação próximos a  $\pm 0,4$ . Observou-se um pico de correlação significativo (0,56) em 650 nm no correlograma de segunda derivada. Poder-se-ia supor que esse pico de correlação estivesse relacionado com uma pequena feição de reflexão que ocorre na curva original e que também apresenta alterações com a variação de sólidos em suspensão na água (JENSEN, 2000; GOODIN et al., 1993; BREUNIG et al., 2007b), mas o trabalho de Goodin *et al.* (1993) demonstrou que o efeito de sólidos em suspensão é eliminado dos espectros de água a partir da curva de segunda derivada.

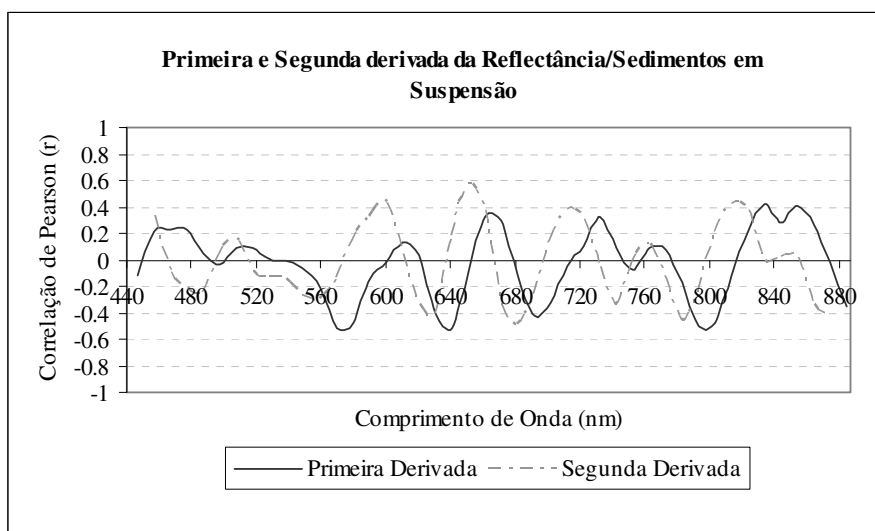


Figura 37 – Correlograma entre sólidos em suspensão com a curva de primeira derivada espectral

No que tange as curvas do contínuo removido, foram analisadas as correlações entre sólidos em suspensão e parâmetros fornecidos pelas curvas do contínuo removido das feições de absorção entre 589 a 640 nm e 650 a 691 nm, pelo fato destas serem as regiões que sofrem alterações na presença de sólidos em suspensão (JENSEN, 2000;

GOODIN et al.,1993). As correlações obtidas entre parâmetros do contínuo removido e concentração de sólidos em suspensão são apresentadas no gráfico da Figura 38.

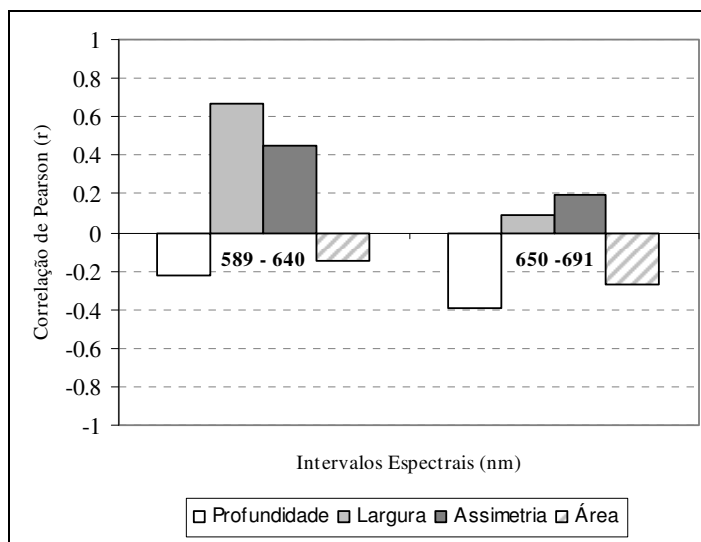


Figura 38 – Coeficientes de correlação entre os parâmetros das curvas do contínuo removido com concentração de sólidos em suspensão

Pela Figura 38, verifica-se que o parâmetro largura da feição de absorção 589 a 640 nm apresentou coeficiente de correlação superior a 0,65. Assim, pode-se dizer, que o aumento na largura da feição, representa maior concentração de sólidos em suspensão. Esse resultado é consistente com as curvas obtidas para diferentes concentrações de sólidos em suspensão apresentadas por Goodin et al. (1993), Kirk (1994), Dekker (1993), Jensen (2002) e Bukata (1995). Nos correlogramas de primeira e segunda derivada também se percebe um pico de correlação significativo nessa região espectral.

Para o segundo intervalo analisado (650 a 691 nm), nota-se que o parâmetro profundidade é o que mais se altera com a variação na concentração de sólidos suspensos, outra característica corroborada pelos autores anteriores.

#### 4.4.4.3 Inferência na concentração de pigmentos totais e sólidos em suspensão a partir dos dados espectrais

Vários autores discutem sobre técnicas de análise da correlação entre as concentrações de componentes opticamente ativos e informações extraídas de assinaturas

espectrais de corpos de água obtidas em laboratório e em trabalhos de campo (RUNDQUIST et al., 1996; LOUCHARD et al., 2002; GOODIN et al., 1993; CHEN et al., 1992; BRAGA, 1998). A estimativa destes componentes a partir de valores de reflectância medidos “in situ”, além de permitir uma maior representatividade espacial da variável (técnicas de análise espacial), reduz os custos do projeto com a redução das análises de laboratório. No caso de dados orbitais, as vantagens são ainda maiores, pois, além da diminuição dos custos, é possível garantir uma maior abrangência espacial dos pontos de coleta e realizar estudos multitemporais (BARBOSA, 2005).

Com o objetivo de avaliar o potencial dos dados espectrais extraídos da imagem hiperespectral Hyperion em estimar a concentração de duas das variáveis opticamente ativas presentes na água do reservatório de Itupararanga, foram estimados modelos de regressão para relacionar esses dados espectrais com concentrações de pigmentos totais (medida indireta de clorofila *a*) e sólidos suspensos nos pontos coletados em campo.

Normalmente, os modelos sugeridos na literatura para representar a biomassa fitoplanctônica utilizam a clorofila *a*. Porém, como a estimativa de clorofila não foi possível para a maioria dos elementos amostrais, foram consideradas as medidas de pigmentos totais. É oportuno ressaltar ainda que, para um melhor ajuste dos modelos de regressão na estimativa de pigmentos totais, foi necessário desconsiderar dois elementos amostrais, que se comportavam como valores atípicos (*outliers*), não permitindo que os modelos se ajustassem adequadamente. Para a estimativa de sedimentos em suspensão, os dados foram normalizados e desconsiderou-se um elemento amostral.

Na análise de pigmentos totais procurou-se, a princípio, recuperar modelos propostos na literatura como aqueles sugeridos por Goddin et al. (1993), que avaliou a correlação entre a concentração de clorofila e a diferença da segunda derivada da reflectância em 660 nm e 691 nm. Também se aplicou o modelo sugerido por Quibell (1992), que considera a concentração de clorofila e a diferença de reflectância em 691 nm e 681 nm em cada ponto. O modelo que relaciona concentração de clorofila e a primeira derivada da reflectância em 690 nm, sugerido por Rundquist et al. (1996), também foi avaliado. Estimou-se ainda, um modelo relacionando clorofila e razão da reflectância em 691 por 681 nm, para cada ponto, conforme sugerido em Mittenzwey et al. (1992) e Rundquist et al. (1996). Contudo, os ajustes de regressão desses modelos não forneceram bons resultados.

Diante disso, outros modelos de regressão foram considerados, com base nos maiores valores de correlação obtidos nos correlogramas das curvas de reflectância

original, curvas de primeira e segunda derivadas e parâmetros do contínuo removido para uma inferência preliminar da concentração de pigmentos totais e sólidos suspensos.

Conseqüentemente, para estimativa de pigmentos totais foram testados valores de reflectância em 579 nm, 691 nm, 823 nm, 671 nm e 457 nm da curva original; para a primeira derivada foram estimados modelos de regressão em 467 nm e 569 nm e, para a segunda derivada em 487 nm, 589 nm e 671 nm. O modelo de regressão da razão  $\rho_{457}/\rho_{579}$  calculado no item 4.3.3.6, também foi empregado. A Figura 39 mostra os modelos de regressão que apresentaram melhores resultados e seus respectivos  $r^2$  (coeficientes de determinação).

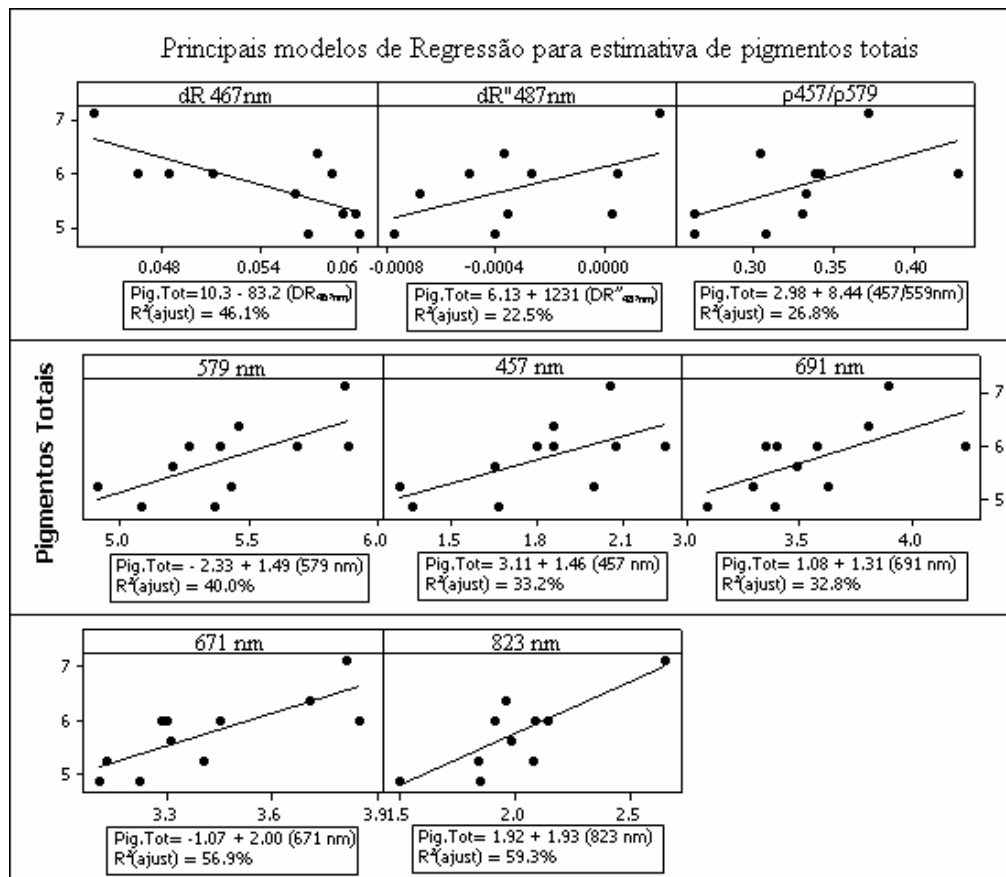


Figura 39 - Modelos de regressão estimados para pigmentos totais

A Figura 39 mostra que para os ajustes entre os dados Hyperion e concentrações de pigmentos totais foram considerados modelos de regressão lineares. Verifica-se também que os valores de  $r^2$  obtidos foram excessivamente baixos, não possuindo caráter explanatório. Alguns dos modelos não explicam mais que 22% da variação em

pigmentos totais, portanto, não permitiram um ajuste satisfatório da reta. Entre os valores usados para a estimativa da concentração de pigmentos totais no reservatório de Itupararanga, aquele que forneceu maior  $r^2$  foi a reflectância em 813 nm. Sabe-se que essa região do espectro eletromagnético é muito influenciada por ruídos, porém, o valor de  $r^2$  foi maior que 59%. Na sequência faz-se uma breve explanação das possíveis causas das baixas correlações encontradas:

- Para o reservatório de Itupararanga, foram encontradas baixas concentrações de pigmentos totais, em torno de 8  $\mu\text{g/L}$  com pequena variância. Desse modo, as técnicas normalmente empregadas para estimativa de concentração de pigmentos totais podem ser menos efetivas, e as correlações podem ser estatisticamente não significativas;
- A quantidade de pontos de coleta e medição de pigmentos totais no reservatório é considerada pequena para fornecer uma boa estimativa, como as obtidas nos trabalhos de Barbosa (2005) e Rudorff (2006).
- Pesquisas relatadas na literatura como aquelas desenvolvidas por Quibell (1992) e Rundquist et al. (1996) foram feitas em condições bem controladas de laboratório (altas concentrações de clorofila *a* com sólidos com tamanhos uniformizados de partícula). Seus resultados devem ser vistos como específicos para as suas condições de estudo.

A Figura 40 ilustra a representação espacial obtida através da aplicação do modelo de regressão considerando a reflectância de superfície medida em 823 nm, para estimar a concentração de pigmentos totais. A variação na concentração de pigmentos totais indica baixas concentrações na parte central do reservatório, onde provavelmente se tenha maior fluxo d'água e em direção a barragem (sentido oeste). A concentração de pigmentos totais aumentou em direção às margens e a leste do reservatório, região mais próxima do rio Sorocaba.

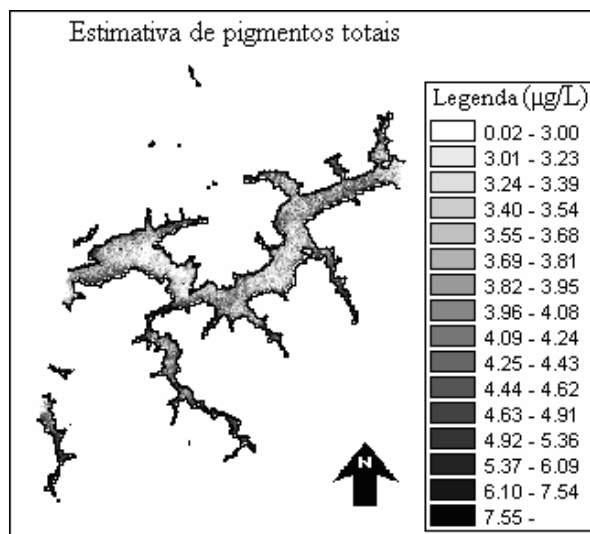


Figura 40 – Distribuição espacial da variabilidade espacial na concentração de pigmentos totais ( $\mu\text{g/L}$ ), estimadas a partir da reflectância obtida no comprimento de onda 823 nm.

Face ao exposto anteriormente sobre a correlação entre parâmetros espectrais e a variável opticamente ativa sólidos suspensos (item 4.3.4.1), verificou-se que os valores de correlação obtidos não são significativos. Porém, após a aplicação da técnica do contínuo removido nas curvas espectrais e realizada a análise da correlação entre seus parâmetros e sólidos suspensos, observou-se a ocorrência de maior correlação no intervalo de 589 a 640 nm para o parâmetro largura da feição de absorção. Conforme observado nas curvas apresentadas na literatura, nesta região espectral os valores de reflectância são alterados com a variação na concentração de sólidos suspensos (JENSEN, 2000; GOODIN et al., 1993; DEKKER, 1993). Esse comportamento sugere que a variável sólidos suspensos, apesar de estar presente no reservatório em pequenas concentrações, pode estar causando variações súbitas da resposta espectral da água, nesse pequeno intervalo espectral. Diante disso, aplicou-se um modelo de regressão linear para o parâmetro largura da feição de absorção entre 589 a 640 nm e sólidos suspensos, sendo as características desse modelo apresentadas na Figura 41.

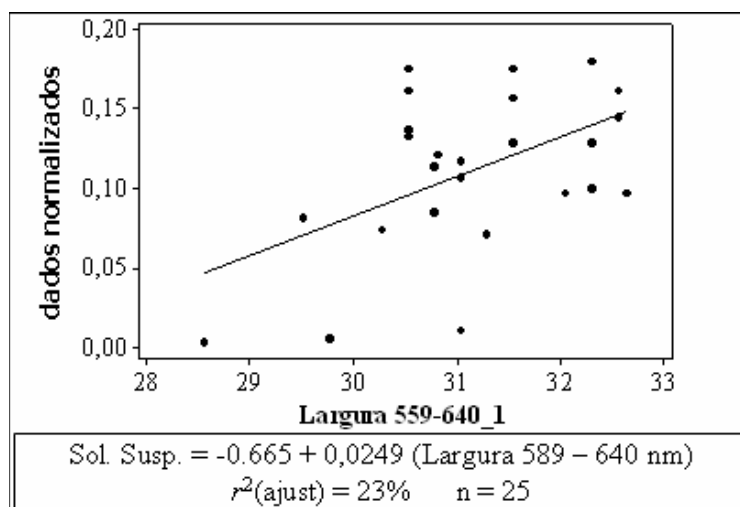


Figura 41 - Modelo de regressão para estimativa de sólidos em suspensão a partir do parâmetro largura obtido na curva do contínuo removido entre 589 a 640 nm

A Figura 41 mostra que o ajuste da regressão entre o parâmetro largura e concentração de sólidos em suspensão foi linear. Verifica-se também, pelo valor  $r^2$  obtido, que a reta não se ajustou aos pontos perfeitamente, explicando apenas 23% da variação de sólidos suspensos. Uma possível justificativa para esses baixos valores de correlação é a dificuldade no estabelecimento de relações entre os parâmetros de reflectância espectral e componentes opticamente ativos presentes em baixas concentrações e pouca variabilidade.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos confirmam o pressuposto inicial do trabalho de que, o detalhamento espectral fornecido por uma imagem hiperespectral Hyperion/EO1 tem potencial para discriminar componentes opticamente ativos presentes no reservatório de Itupararanga.

Uma etapa crítica da pesquisa foi a obtenção da imagem Hyperion simultaneamente com a realização da coleta das variáveis limnológicas “in situ”. Uma vez que as datas de passagem do satélite e previsão de aquisição da imagem foram fornecidas com pouca antecedência, prejudicando a elaboração de um planejamento cuidadoso para a execução do trabalho de campo, principalmente em face da necessidade de deslocamento de toda a equipe de campo. No caso do reservatório de Itupararanga, distante de Presidente Prudente, contou-se com o suporte logístico e técnico, contudo ainda assim ocorreram vários contratemplos, principalmente no condicionamento e transporte da água coletada para posterior análise química.

A análise visual prévia das curvas espectrais obtidas para o reservatório e sua comparação com curvas espectrais explicativas da presença de componentes opticamente ativos na água mostradas na literatura (RUNDQUIST, 1996; KIRK, 1994; HAN et al.; 1994), sugeriu que a água do reservatório de Itupararanga tem presença de clorofila *a* e permitiu inferir que, a radiação ao atravessar a camada superior do corpo d'água, é absorvida e espalhada principalmente pelo fitoplâncton. Essa afirmativa foi confirmada posteriormente pelas análises de correlação entre as curvas de reflectância original e variáveis limnológicas, sendo que a variável pigmentos totais (medida indireta de clorofila *a*) foi a que apresentou maior correlação com os valores de reflectância original.

A aplicação da técnica de remoção do contínuo em feições de absorção específicas das curvas de reflectância do reservatório de Itupararanga mostrou-se adequada para realçar feições de absorção, tornando-se possível visualizar pequenas variações no comportamento da curva espectral. Verificou-se que essas feições mostraram-se bastante similares para todas as feições analisadas, com exceção da feição formada em 772 a 813 nm, localizada numa região espectral altamente influenciada por ruídos. No cálculo dos parâmetros das curvas do contínuo removido, alguns problemas foram encontrados devido às curvas espectrais coletadas na imagem hiperespectral Hyperion/EO1 terem resolução



espectral de 10 nm, conseqüentemente, certas feições de absorção extraídas da curva espectral continham apenas cinco valores de reflectância, dificultando a obtenção de certos parâmetros como largura, o qual, foi calculado manualmente.

A análise derivativa mostrou-se eficiente para realçar feições espectrais, tanto na primeira derivada, quanto na segunda derivada. Observou-se que a curva resultante da aplicação da primeira derivada, salientou feições das curvas espectrais originais que não eram muito evidentes. Para a curva de segunda derivada, observou-se que feições da segunda derivada realçaram feições da curva espectral original exatamente nos locais espectrais que elas ocorrem. Essa coincidência facilitou as análises, principalmente pelo fato de Goddin et al. (1993) terem comprovado que as feições representadas no cálculo da segunda derivada realçam feições ocasionadas pela presença de clorofila.

Para a seleção de modelos de razão de bandas, foi utilizada a abordagem exposta por Goddin et al. (1993), ou seja, considerou-se o fato da segunda derivada ter realçado importantes feições observadas na curva original. Para este conjunto de dados, a razão entre as bandas  $\rho_{457}/\rho_{579}$  foi o modelo que melhor se ajustou à variação de concentração de pigmentos totais no reservatório, pois apresentou um coeficiente de correlação maior do que os outros modelos de razão testados.

Nas análises de correlação entre as curvas de reflectância original e variáveis limnológicas, as variáveis que merecem destaque pelos maiores valores de correlação foram pigmentos totais, transparência e sólidos dissolvidos. As variáveis pigmentos totais e transparência se comportam conforme o esperado, entretanto, para a variável sólidos dissolvidos os altos valores de correlação não apresentam justificativa na literatura. Para uma análise mais criteriosa, seria necessário um estudo mais aprofundado dos compostos presentes nos sólidos dissolvidos e verificar como essa variável está influenciando na resposta espectral da água do reservatório de Itupararanga.

A correlação entre variáveis opticamente ativas e curvas de primeira e segunda derivada e parâmetros do contínuo removido, mostrou que a variável pigmentos totais forneceu melhores resultados de correlação, indicando sua ocorrência no reservatório.

Analisando os resultados da aplicação das três técnicas e suas correlações com pigmentos totais, verifica-se que a feição de absorção centrada em 457 nm e o pico de reflectância localizado em 579 nm indicaram maiores valores de correlação. Na literatura, além dessas feições, normalmente outras feições também apresentam altas correlações com clorofila. As possíveis explicações para os dados deste trabalho não oferecerem correlações significativas em outras regiões observadas na literatura são:

- A variável pigmentos totais usada para compensar a ausência da clorofila *a*, pode ser um indicador pouco confiável da biomassa fitoplanctônica;
- As concentrações de pigmentos totais encontradas no reservatório são pequenas e apresentam pouca variabilidade, diferente das condições observadas na literatura, ou seja, para altas concentrações e variabilidade de clorofila *a*;
- Foram coletados poucos elementos amostrais, principalmente para a variável pigmentos totais.

Para sólidos em suspensão a técnica remoção do contínuo mostrou que a região espectral de 589 a 640 nm, pode ser útil para detectar pequenas variações na concentração desse componente.

Provavelmente, devido à maior homogeneidade na resposta espectral nos pontos analisados no reservatório de Itupararanga, em decorrência da baixa variação na concentração de seus constituintes opticamente ativos e o pequeno número de elementos amostrais, houve dificuldade na estimativa da concentração de variáveis opticamente ativas. Os modelos lineares de regressão que melhor permitiram a estimativa da concentração de pigmentos totais foram obtidos com a primeira derivada em 467 nm e com os valores de reflectância original em 671 nm e 823 nm. A representação espacial resultante da aplicação do modelo de regressão para os valores de reflectância em 823 nm mostrou-se coerente, 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. Para a estimativa de sólidos suspensos, o parâmetro largura da feição de absorção obtido na curva do contínuo removido para o intervalo 589 a 640 nm é capaz de explicar somente 23 % da concentração de sólidos suspensos na água, sendo esse valor considerado não significativo.

Observando os modelos de regressão resultantes, percebe-se que os valores obtidos expõem apenas resultados preliminares, já que seriam necessárias análises mais aprofundadas com elementos amostrais adicionais para, talvez, generalizar os padrões observados. Deve-se recordar também, que as variáveis foram analisadas somente para uma época, e por mais que a área de estudo seja controlada (represa), existem diferenças ao longo do ciclo hidrológico e sazonal.

Com os resultados obtidos, percebe-se que a água do reservatório de Itupararanga possui características de água limpa apropriada para o consumo humano levando em consideração somente as variáveis limnológicas analisadas e os dados hiperespectrais

apontam a presença de clorofila *a*, mesmo considerando que o parâmetro relacionado com a ocorrência de fitoplâncton foi pigmentos totais, descrito pela literatura como um indicador indireto da presença de clorofila.

O fato dos dados hiperespectrais identificar a presença de clorofila *a* no reservatório, mesmo em concentrações relativamente baixas, revela uma habilidade pouco testada, visto que os trabalhos desenvolvidos por outros autores, foram realizados em ambientes aquáticos bem definidos e/ou controlados, ou em sistemas complexos, como da Amazônia, que possui alta concentração dos componentes opticamente ativos. Diante disso, sugere-se que estudos deste gênero, devam continuar sendo realizados para aumentar a precisão das estimativas e se testar novas metodologias para análise de imagens hiperespectrais orbitais.

Levando em consideração os resultados obtidos, algumas recomendações podem ser feitas:

- Para estimativas mais eficientes há necessidade de se coletar mais elementos amostrais para geração de modelos que expliquem o ambiente, além da necessidade de se fazer um estudo sazonal do ambiente em estudo;
- Obtenção de variáveis limnológicas adicionais, tais como carbono orgânico dissolvido para obtenção de resultados mais concludentes;

## 6 REFERÊNCIAS

BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto da dinâmica da circulação da água do sistema planície de Curuai/Rio Amazonas**. 2005. 255 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos.

BRAGA, C. Z. F. **Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da concentração de clorofila-a, transparência e profundidade da água na Lagoa de Araruama, RJ**. 1998. 147 f. Tese (Doutorado em Geociências) Universidade Federal Fluminense - UFF, Niterói.

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.

BRASIL. Portaria n° 518, de 25 de março de 2004. O Ministério da Saúde aprova normas e padrões de potabilidade da água destinada ao consumo humano. **Diário Oficial**, Brasília, 26 mar. 2004a, Seção 1, p.266-70.

BREUNIG, F. M. et al. (a) Aplicação da técnica de remoção do contínuo para a discriminação espectral de diferentes dosagens de Nitrogênio aplicadas ao trigo (*Triticum aestivum*, L. - IAC-370). In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13. 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007. p. 91-98.

BREUNIG, F. M. et al. (b) Análise das propriedades ópticas da água do reservatório Rodolfo Costa e Silva – Itaara, RS, Brasil, usando dados espectrais de campo e imagens orbitais multiespectrais. **Revista Ambiente e Água**, Taubaté, v. 2, n. 2, p. 88-102, 2007.

BUKATA, R. P. J. KOONDRATYEV, K.Y.; POZOZDNYAKOV, D.V. **Optical properties and remote sensing of inland and coastal waters**. Boca Taton: CRC, 1995. 362p.

BUSSAB, W.; MORETTIN, P. **Estatística Básica**. Editora Saraiva, São Paulo. 1987, v. 4.

CAMARA G. et al. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & Graphics**, v. 20, n. 3, p. 395-403, mai. 1996.

CARDER, K. L.; STEWARD, R. G. A Remote-Sensing Reflectance Model of a Red-Tide Dinoflagellate Off West Florida. **Limnology and Oceanography**, Tester, v. 30, n. 2, p. 286-298, mar. 1985.

CARVALHO, J.C. et al. Applications of Quantitative Analysis Techniques to Monitor Water Quality of Curuai Lake, Brazil. **IGARSS-2003**, France, Jul., p. 2362-2364, 2003.

CAVENAGUI, A. L. **Caracterização da qualidade da água e sedimento relacionados com a ocorrência de plantas aquáticas em cinco reservatórios da bacia do rio Tietê**. 2003. 73f. Tese (Doutorado em agronomia) Universidade Estadual Paulista – UNESP, Botucatu.

CETESB variáveis da qualidade da água: Governo do Estado de São Paulo. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/Agua/rios/variaveis.asp#topo>>. Acesso em: 15 jun. 2007.

CHEN, Z. et al. Derivative reflectance spectroscopy to estimate suspended sediment concentration. **Remote Sensing Environment.**, St. Paul, v. 40, p. 46-59, 1992.

CIPOLLINI, P.; CORSINI, G. The Effect of Yellow Substance on Pigment Concentration Retrieval Using 'Blue to Green' Ratio. **IEEE Proceedings on Oceans** ,. Brest, v. 1, n.94, p. 772 – 777, 1994.

CLARK, R. N. et al. Reflectance spectroscopy as rapid assessment tool for the detection of amphiboles from the Libby, Montana Region. **USGS Spectroscopy Lab**, Denver, p. 1-41, 2003.

CLARK, R. N. Spectroscopy of Rocks and Minerals and Principles of Spectroscopy. In: RENCZ A. N. **Remote Sensing for the Earth sciences**. New York: John Wiley & Sons, v. 3, n.1, p. 3-59, 1999.

CLARK, R. N.; ROUSH, T. L. Reflectance spectroscopy: quantitative analysis techniques for remote sensing applications. **J. Geophys. Res.**, Hawaii, v. 89, p. 6329–6340, jul. 1984.

CLOUTIS, E. A. Hyperspectral geológica remote sensing: evaluation of analytical techniques. **International Journal of Remote Sensing**, Abingdon, v. 17, n.12, p. 2215-2242, 1996.

CURRAN, P. J. et al. Estimating the foliar biochemical concentration of leaves with reflectance spectrometry testing the Kokaly and Clarke methodologies. **Remote sensing of Environment.**, St. Paul, v. 76, p. 349-359, 2001.

DEKKER, A.G.; MALTHUS, T. J.; SEYHAN, E. Quantitative modelling of inland water quality for highresolution MSS systems. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Amsterdam, v. 29, n.1, Jan. 1991.

DEKKER, A G. **Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing**. 1993. 211 f. Tese (PhD theses) Free University, Amsterdam.

DOXORAN, D.; CHERUKURU, R.C.N.; LAVENDER, S.J. Use of reflectance band ratios to estimate suspended and dissolved matter concentrations in estuarine waters. **International Journal of Remote Sensing**. Abingdon, v. 26, n.8, p. 1763-1769, 2005.

EARTH Resources Observation & Science (EROS) Data Center, 2006. Disponível em: <<http://eo1.usgs.gov/index.php>>. acesso em: 10 abr. 2006.

EASTMAN, J.R. **Idrisi for windows – User’s guide**. Worcester, Clark Labs for Cartographic Technology and Geographic Analysis, Clark University. v. 2,1998.

EATON, A. D.; CLESCERI, L. S., GREENBERG, A. E. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 19 ed., Ed. Maryland: American Public Health Association, 1998.

ENVI FLAASH, FLAASH Module User’s Guide. Research System, Inc, 2005. p.55.

ENVI, ENVI User’s Guide. Research System, Inc, 2007. p.1142.

ESTEVEES, F. A. **Fundamentos de limnologia**. Rio de Janeiro: Interciência/Finep. 2.ed. 575p. 1998.

FOSTER J. R.; TOWNSEND P. A. Linking hyperspectral imagery and forest inventories for forest Assessment in the central Appalachians. **Proceedings**. 14th Central Hardwood Forest Conference. p. 76-86, mar. 2004.

GAO, B. C. et al. Derivation of scaled surface reflectances from AVIRIS data. **Remote Sensing of Environment**, St. Paul, v. 44. p. 165-178, 1993.

GAO, B. C.; DAVIS, C.; GOETZ, A. A review of atmospheric correction techniques for hyperspectral remote sensing of land surfaces and ocean color. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2006. IGARSS 2006. **IEEE International Conference on**. p. 1979-1981, 2006.

GALVÃO, L.S.; FORMAGGIO, A.R.; TISOT, D.A. Discrimination of sugarcane varieties in southeastern Brazil with EO-1 Hyperion data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.94, n.4, p.523-34, 2005.

GIARDINO et al. Assessment of water quality in Lake Garda (Italy) using Hyperion. Elsevier. **Remote Sensing of Environment**, Canberra, v.109, p. 183-195, dez. 2007.

GITELSON, A., 1992. 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. nov. 1992.

GITELSON, A. A.; KONDRATYEV, K. Y. Optical models of mesotrophic and eutrophic water bodies. **International Journal of Remote Sensing**, v. 12, n. 3, p. 373–385, 1991.

GREEN, R. O. et al. Imaging Spectroscopy and the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). Elsevier. **Remote Sensing of Environment**, St. Paul, v. 65, n. 3, p. 227-248, jul. 1998.

GOETZ, A. F. H. et al. HATCH: Results from simulated radiances, AVIRIS and Hyperion. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. Boulder, v. 41, n. 6, p. 1215-1222, 2003 .

GOODENOUGH, D. G. et al.. Processing Hyperion and ALI for forest classification. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n.6, p. 1321- 1331, 2003.

GOODIN, D. G. et al. Analysis of suspended solids in water using remotely sensed high resolution derivate spectra. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. Manhattan, v. 59, n. 4, p. 505-510, abr. 1993.

GOTERMAN, H. L. **Methods for physical and chemical analysis of fresh waters**. **Limnological institute**. Oxford. Blackwell Scientific.2.ed, 213 p., 1978.

HAN, L. Spectral reflectance with varying suspended sediment concentrations in clear and algae-laden waters. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. Tuscaloosa, v. 63, n. 6, p. 701 – 705, jul. 1997.

HAN, L. et al. The Spectral responses of algal chlorophyll in water with varying levels of suspended sediment. **International Journal of Remote Sensing**. Abingdon, v. 15, n. 18, p. 3707-3718. 1994.

HAN, T.; GOODENOUGH, D. G.; DYK, A.; LOVE, J. Detection and correction of abnormal pixels in Hyperion images. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. Toronto, Canada. **Proceedings...** IEEE International, 2002. p. 1327-1330.

HOGUE, E. F., WRIGHT, C. W., & SWIFT, R. N. Radiance ratio algorithm wavelengths for remote oceanic chlorophyll determination. **Applied Optics**, v. 26, n. 11, p. 2082–2094, 1987.

JENSEN, J. R., **Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective**, Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2000, 544 p.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **applied multivariate statistical analysis**. New Jersey: Prentice-Hall, 2007. v. 6.

KAMBEL, M.; NOVO, E. M. L. M. O Sensoriamento Remoto da cor da água. In: SOUZA, R. B. **Oceanografia por satélites**. São Paulo: Oficina de textos, 2005. p. 179-196.

KAUFMAN, Y. J. et al. The MODIS 2.1- m Channel—Correlation with Visible Reflectance for Use in Remote Sensing of Aerosol. **IEEE Transactions on geoscience and remote sensing**, Greenbelt, v. 35, n.2, set. 1997.

KIRK, J.T.O. **Light & Photosynthesis in Aquatic Ecosystems** , London, Cambridge University Press, 1994, v. 2, p. 507.

KOKALY, R. F.; CLARK, R. N. (1999). Spectroscopic determination of leaf biochemistry using band-depth analysis of absorption features and stepwise multiple linear regression. **Remote Sensing of Environment**, St. Paul, v. 67, p. 267– 287, 1999.

KRUSE, F. A. Preliminary results - hyperspectral mapping of coral reef systems using EO-1 Hyperion, Buck Island, U.S. Virgin Islands. In: JPL Airborne Earth Science Workshop, 12., 2003, Pasadena, USA. **Proceedings**. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory. p. 157-173. 2003.

KRUSE, F. A. et al. Expert system-based mineral mapping in northern death valley, California/Nevada, using the Airbone Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). **Remote Sensing of Environment**, St. Paul, v.44, n. 2-3, p. 309 – 336, 1993.

KUTSER T. Quantitative detection of chlorophyll in cyanobacterial blooms by satellite remote sensing. **Limnol. Oceanogr.** v. 49, n. 6, p. 2179–2189, 2004.



LAMPARELLI, R. A.; ROCHA, J.; BORGHI, E. **Geoprocessamento e agricultura de precisão: fundamentos e aplicações**. Guaíba: Agropecuária, UNICAMP, 2001. 118p.

LAMPARELLI, M. C. **Grau de trofia em corpos d'água do Estado de São Paulo: Avaliação dos métodos de monitoramento**. 2004. 235 f. Tese (Doutorado em Ciências na área de ecossistemas terrestres e aquáticos) Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo – USP, São Paulo

LATORRE, M. L. **Utilização de um método de correção atmosférica para o processamento de dados hiperespectrais do sensor AVIRIS em regiões tropicais**. 1998. 106 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J.W. **Remote Sensing and Image Interpretation**. Wiley. 2004, v. 5, p. 763.

LEWIS, J. Turbidity-controlled suspended sediment sampling for runoff-event load estimation. **Water Resour**, Arcata, v.32, n.7, p.2299-2310, 1996.

LEWIS, J. E EADS, R. Automatic real-time control of suspended sediment sampling based upon high frequency in situ measurements of nephelometric turbidity. **In: Proceedings**. Federal Interagency Workshop: Sediment Technology for the 21st Century. St. Petersburg, FL, February 17-19. 1998.

LOUCHARD, E. M. et al. Derivative analysis of absorption features in hyperspectral remote sensing data of carbonate sediments. **Optical express**. v. 10, n. 26, p.1573, 2002.

LOPES, P. M. O.; VALERIANO, D. M. Validação do albedo da superfície terrestre obtido dos dados do sensor MODIS em regiões montanhosas. **Anais... XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 2805-2812.

MAINARDES-PINTO, C. S. R.; MERCENTE, C. T. J. Avaliação de variáveis limnológicas e suas relações com uma floração de Euglenaceae pigmentada em viveiro povoado com tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus* Linnaeus), São Paulo, Brasil. **Acta Scientiarum. Biological Sciences**, Maringá, v. 25, no. 2, p. 323-328, 2003.

MALTHUS T. J.; DEKKER A. G. First derivative indices for the remote sensing of inland water quality using high spectral resolution reflectance. **Environment International**. v. 21, n. 2, p. 221-232, 1994.

MATTHEW et al. Atmospheric Correction of Spectral Imagery: Evaluation of the FLAASH Algorithm with AVIRIS Data. In: Applied Imagery Pattern Recognition Workshop, 31., 2002, **Proceedings...** p. 157- 163, 2002.

MCCLUNEY, W.R.; "Ocean Color Spectrum Calculations". **Applied Optics**, v.13, n.10, p. 2422-2429, 1974.

MILLER, C. J. Performance assessment of ACORN atmospheric correction algorithm. In algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery VII, **SPIE**, 2002. v.4725, p. 438-449.

MITTENZWEY, K. -H.; GITELSON A. A.; KONDRATYEV, K.Y. Determination of Chlorophyll *a* of Inland Waters on the Basis of Spectral Reflectance. **Limnology and Oceanography**, v. 37 p. 147-149, 1992.

MOREIRA, M. A.. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2005.

MUSTARD, J. F.; SUNSHINE, J. M. Spectral Analysis for Earth science: Investigations Using Remote Sensing Data. In: RENCZ A. N. **Remote Sensing for the Earth sciences**. New York: John Wiley & Sons, Inc.1999.v. 3, c. 5, p. 251-374.

MUTANGA, O.; SKIDMORE A. D. Integrating imaging spectroscopy and neural networks to map grass quality in the Kruger National Park, South Africa. **Remote Sensing of Environment**. v.90, p. 104-115, 2003.

NOBREGA, I. W. **Análise espectral de sistemas aquáticos da amazônia para a identificação de componentes opticamente ativos**. 2002. 87 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos.

NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Edgard Blucher, 1992. 308p.

PEREIRA FILHO, W. **Influência dos diferentes tipos de uso da terra em bacias hidrográficas sobre sistemas aquáticos da margem esquerda do Reservatório de Tucuruí – Pará**. São Paulo, 2000. 130 f. Tese (Doutorado em Geografia) - USP, São Paulo.

PIERSON, D. C.; STROMBECK, N. A modelling approach to evaluate preliminary Remote Sensing algorithms: Use of water quality data from Swedish Great Lakes.*Geophysica*, v. 36, p. 177-202.

PIVA-BERTOLETTI, S. A. E. Zooplâncton dos lados do Parque Estadual das Fontes do Ipiranga (SP) e relações entre espécies zooplanctônicas e estado trófico em compôs d'água do Estado de São Paulo, 2001. 253 f. Tese (Doutorado em Saúde Pública) - USP, São Paulo.

PU, R. et al. Spectral absorption features as indicators of wates status in coast live oak (*Quercus agrifolia*) leaves. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n.9, p. 1799 – 1810. 2003.

QUIBELL, G. The effect of Suspended Sediment on Reflectance from Freshwater Algae. **International Journal of Remote Sensing**, v. 12, n.1, p. 177 – 182, jan.1991.

RICHARDS, J. A.; JIA, X. **Remote Sensing digital image analysis: An Introduction**. 4. ed. Australia: Springer, 2006.

ROCHFORD, P. A. et al. Hyperspectral/Multespectral atmospheric compensation using shadowband radiometers. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 43, n. 12, p. 2898-2907, 2005.

RUDDICK, K. G. et al. Optical remote sensing of chlorophyll a in case 2 waters by use of an adaptive two band algorithm with optimal error properties. **Applied Optics**, v. 40, p. 3575–3585, 2001.

RUDORFF, C. M. **Estudo da composição das águas da planície amazônica por meio de dados de reflectância do sensor Hyperion/eo-1 e de espectrorradiômetro de campo visando à compreensão da variação temporal dos seus constituintes opticamente ativos**. 2006. 138 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos.

RUNDQUIST D. C. et al. Remote measurement of Algal Chlorophyll in surface waters: the case for the first derivative of reflectance near 690 nm. **Photogrammetric Engineering e Remote Sensing**, Lincoln, v. 62, n. 2, p. 195-200, fev. 1996.

SÃO PAULO. **Caracterização geral da UGRH 10**, 1998. Disponível em: <<http://www.rededasaguas.org.br/comite/relsmstseg.pdf>>. Acesso em: jun. 2007.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy**. Water de Gruyter. New York, v. 2, p. 589, 2003.

SCHOWENGERDT, R. A. **Remote Sensing: models and methods for image processing**. v. 3. London: Academic Press, 2006.

SIBAÚBA-TAVARES, L. H.; DURINGAN, J. G. Variação dos fatores abióticos e pigmentos totais em dois viveiros de criação de peixes em regime semi-intensivo. **Acta Limnológica Brasiliensia**, v. 7, p. 10-22, 1995.

SKIDMORE, A. **Environmental modelling with GIS and Remote Sensing**. London: Taylor & Francis, 2002.

SPERLING, M. V. **Introdução á qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1996.

SMITH, W.S.; PETRERE, M. Peixes em represas: o caso de Itupararanga. **Ciências Hoje**, v. 29, n. 190. p. 74-77, 2001.

STAENZ et al. Radiative transfer codes applied to hyperspectral data for the retrieval of surface reflectance. **Journal of Photogrammetry e Remote Sensing**. v. 57, p. 194-203, 2002.

STEFFEN, C. A. Técnicas radiométricas com o Spectron SE-590. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. , 1996, Salvador, **Anais...**, INPE. v. 8, p. 969-975, 1996.

STREIT, N. M. As clorofilas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35, n.3, p.748-755, mai-jun, 2005

THENKABAIL, P. S. et al. Hyperion, IKONOS, ALI and ETM plus sensors in the study of African rainforests. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, p. 23-43, 2004.

TSAI F., PHILPOT W. Derivative Analyses of Hyperspectral Data. **Remote sensing Environment**, St. Paul, v. 66, p. 41–51, 1998.

YACOBI, Y. Z., GITELSON, A., & MAYO, M. (1995). Remote sensing of chlorophyll in Lake Kinneret using high spectral resolution radiometer and Landsat TM: Spectral features of reflectance and algorithm development. **Journal of Plankton Research**, Tiberias, n. 17, p. 2155–2173., 1995.

WEAVER, E. C.; WRIGLEY, R. **Factors affecting the identification of phytoplankton groups by means of remote sensing**. Moffet Field: NASA, 1994. 124p.

ZULLO JR., J. Correção atmosférica de imagens de satélite e aplicações. 1994. 194p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1994.

## APÊNDICE A

### Variáveis Limnológicas

Pontos	Coordenadas		Hora	pH	Cond. μS	Turb. FTU	Prof. Secchi (m)	O2 Diss.
	E	N						
1	260004,24	7386024,666	11:30	7,42	89,6	3,58	1,6	5,4
2	260488,415	7386037,122	11:38	7,20	89,7	3,08	1,7	5,4
4	261155,92	7386522,194	11:46	7,33	96,8	3,85	1,6	5,5
5	261576,408	7386289,407	11:53	7,27	90,3	3,13	1,6	5,3
6	261869,45	7387000,376	11:58	7,29	90,3	2,76	1,7	5,7
8	262292,047	7386549,92	12:07	7,33	90,1	4,28	1,5	5,4
9	262659,034	7386062,925	12:13	7,23	87	3,92	1,7	5,1
10	262389,474	7385767,967	12:18	7,55	90,2	2,37	1,4	5,1
12	261885,653	7385050,139	12:26	7,36	87,5	4,3	1,3	5,8
14	262435,508	7383443,946	12:34	7,32	86,2	4,64	1,3	5,8
15	262971,503	7382894,11	12:39	7,07	86,6	3,87	1,5	5,5
16	263065,142	7385630,897	12:49	7,58	89,2	3,8	1,5	5,5
18	263518,009	7385040,512	12:54	7,57	92,5	3,19	1,5	5,6
19	264012,472	7385476,103	12:59	7,65	91,2	3,79	1,3	5,5
20	264350,072	7385097,887	13:03	7,29	91,5	4,24	1,7	5,2
21	264491,154	7385830,966	13:08	7,74	93,1	3,6	1,3	5,9
22	265220,249	7385807,08	13:13	7,47	93,8	3,99	1,3	5,6
23	265159,789	7386336,636	13:18	7,49	87,7	3,8	1,4	6,7
24	265670,151	7386962,818	13:32	7,77	94,4	4,01	1,5	5,5
25	266303,765	7386597,094	13:24	7,34	95	3,33	1,4	6,1
26	265208,638	7387502,977	13:47	7,63	90,7	3,89	1,3	6,1
29	265853,389	7387690,653	13:52	7,54	96,1	3,59	1,3	5,8
30	266507,003	7388096,023	13:57	7,25	97,5	3,16	1,3	5,6
31	266402,558	7388848,485	14:03	7,44	91,9	4,5	1	5,8
32	267032,135	7388287,022	14:08	7,33	96,8	3,85	1,3	6,1
33	267592,146	7388879,663	14:13	7,26	94,8	3,72	1,1	5,8

## APÊNDICE A

### Variáveis Limnológicas

Pontos	T. água °C	T. ar °C	Umi. Ar %	Sólidos em suspensão mg/L	Sólidos dissolvidos mg/L	Sólidos totais mg/L	Clorofila µg/L
1	23,4	32,7	35	0,46	0,028	0,488	-
2	21,9	30,5	35	0,54	0,044	0,584	-
4	22,5	32,7	37	0,515	0,042	0,557	-
5	23,1	30,6	38	0,49	0,068	0,558	1,82
6	22,3	30,1	39	0,475	0,022	0,497	-
8	22	30,2	40	0,505	0,038	0,543	-
9	22,2	31,4	34	0,525	0,024	0,549	-
10	23,4	33,2	36	0,805	0,056	0,861	-
12	23,2	32	36	0,465	0,072	0,537	-
14	23,4	32	37	0,155	0,036	0,191	8,19
15	21,9	32	35	0,435	0,024	0,459	-
16	22,2	29	39	0,42	0,026	0,446	2,73
18	24,1	31	42	0,225	0,038	0,263	-
19	22,3	31	45	0,56	0,03	0,59	-
20	23,4	31	38	0,485	0,048	0,533	3,64
21	24,3	31	38	0,44	0,028	0,468	-
22	22,1	31,4	39	0,415	0,06	0,475	-
23	23,1	32	38	0,505	0,058	0,563	2,73
24	22,1	31	41	0,565	0,042	0,607	-
25	23,3	31,4	39	0,51	0,024	0,534	5,46
26	23,5	33	46	0,56	0,058	0,618	-
29	24,2	33	44	0,545	0,038	0,583	2,73
30	24,1	34	40	0,545	0,038	0,583	-
31	25,1	36	39	0,495	0,076	0,571	-
32	24,2	36	35	0,46	0,028	0,488	0,91
33	24,8	36	36	0,18	0,054	0,234	-

## APÊNDICE A

### Variáveis Limnológicas

Pontos	Pigmentos Totais	Tempo	Observações
			(cor da água, espelho d'água, paisagem)
1	-	Sol	Verde, ligeiramente ondulado
2	5,993	Sol	Verde Escuro
4	-	Sol	Verde Escuro - Com alga
5	4,869	Sol	Verde Escuro - Levemente Ondulado
6	5,993	Sol	Verde Escuro - Levemente Ondulado
8	-	Sol	
9	4,869	Sol	Verde Escuro - Liso
10	-	Sol	Suavemente ondulado - Poucas algas
12	-	Sol	Verde Escuro - Levemente Ondulado - Poucas Algas
14	7,865	Sol	Verde Escuro - Levemente Ondulado - Não tem algas
15	-	Sol	Verde Escuro - Braço - Poucas algas
16	5,993	Sol	Verde Escuro - Levemente Ondulado - tem algas
18	7,116	Sol	Verde Escuro - Levemente Ondulado - tem algas
19	-	Sol	Verde Escuro - Liso - tem algas
20	5,243	Sol	Verde Escuro - Levemente Ondulado - Poucas Algas
21	5,243	Sol	Verde Escuro - Levemente Ondulado - Poucas Algas
22	-	Sol	Verde Escuro - Levemente Ondulado - Poucas Algas
23	3,745	Sol	Verde Escuro - Liso - Poucas algas
24	-	Sol	Verde Escuro - Levemente Ondulado - Poucas Algas
25	5,618	Sol	Verde Escuro - Levemente Ondulado - Poucas Algas
26	-	Sol	Verde Escuro - Levemente Ondulado
29	6,367	Sol	Verde Escuro - Levemente Ondulado - Poucas Algas
30	-	Sol	Verde Escuro - Quase Liso
31	-	Sol	Verde Escuro - Liso - Poucas algas
32	5,993	Sol	Verde Escuro - Quase Liso - Poucas Algas
33	-	Sol	Verde Escuro - Liso - Poucas algas