

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA E
GEOCIÊNCIAS**

**SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO
ESTUDO DO COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA
ÁGUA NO RESERVATÓRIO PASSO REAL – RS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Aline Biasoli Trentin

Santa Maria, RS, Brasil – 2009

**SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO ESTUDO DO
COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA ÁGUA NO
RESERVATÓRIO PASSO REAL – RS**

por

Aline Biasoli Trentin

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Geografia, Área de Concentração em Análise Ambiental e Dinâmica Espacial, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Geografia.**

Professor Orientador: Dr. Waterloo Pereira Filho

Santa Maria, RS, Brasil

2009

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA E
GEOCIÊNCIAS**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO ESTUDO DO
COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA ÁGUA NO RESERVATÓRIO
PASSO REAL – RS**

elaborada por
Aline Biasoli Trentin

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Geografia

Comissão Examinadora:

Waterloo Pereira Filho, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Nilton Nobuhiro Imai, Dr. (UNESP/Presidente Prudente)

Roberto Cassol, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 28 de Outubro de 2009.

AGRADECIMENTOS

A Deus – pela proteção.

A Universidade Federal de Santa Maria – pela possibilidade de cursar um Ensino de Pós-Graduação gratuito e de qualidade.

Aos meus pais – pelos ensinamentos de vida, pelo apoio em momentos difíceis, pelos conselhos, pela paciência, pelo amor e carinho que nunca deixaram faltar; aos meus irmãos – pela ajuda, carinho e apoio em todas as etapas deste curso; e ao meu namorado – pela compreensão, paciência e carinho em todos os momentos.

Ao professor e orientador Waterloo Pereira Filho – pelo companheirismo, amizade, responsabilidade e dedicação na orientação desta pesquisa.

Aos colegas do Laboratório de Geotecnologias – pela aprendizagem, apoio, incentivo e amizade em todos os momentos.

Aos verdadeiros amigos – pelo fato de existirem e estarem sempre presentes.

Ao Programa de Cooperação Acadêmica (PROCAD)/CAPES – pelo apoio na busca de conhecimentos com o mestrado-sanduiche no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais em São José dos Campos; em disciplina concentrada na Universidade Estadual Paulista de Presidente Pudente; e em eventos científicos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – pelo apoio através do Projeto Universal n. 484712/2007-1.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Geografia e Geociências
Universidade Federal de Santa Maria

SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO ESTUDO DO COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA ÁGUA NO RESERVATÓRIO PASSO REAL – RS

AUTORA: ALINE BIASOLI TRENTIN
ORIENTADOR: WATERLOO PEREIRA FILHO
Santa Maria, 28 de Outubro de 2009

A construção de reservatórios para fins de geração de energia ou controle de fluxo de água gera alterações em ambiente de rios e provoca modificações nas características do ambiente fluvial. Nesse contexto, o sensoriamento remoto é uma ferramenta que torna possível a aquisição de informações para análise espacial e temporal de ambientes aquáticos. Este trabalho apresenta o estudo sobre o comportamento espectral da água no reservatório Passo Real - RS, localizado na bacia hidrográfica do Rio Jacuí, a fim de avaliar os fatores condicionantes às diferenças espectrais na água. Para isso, a metodologia compreendeu a coleta de dados espectrais em campo com a utilização de espectroradiômetro no mês de setembro de 2008; dados orbitais a partir de imagem do satélite Landsat para o mês de abril de 2009 e de dados limnológicos para os meses de setembro de 2008, fevereiro, abril e junho de 2009 (total de sedimentos em suspensão (TSS), clorofila-*a* (Chl-*a*), disco de Secchi (DS), potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica (CE), carbono orgânico (CO) e temperatura da água). Além disso, realizou-se a simulação de respostas espectrais a partir dos dados limnológicos. Os resultados encontrados mostraram a distribuição das variáveis limnológicas de acordo com o período do ano e com os setores do reservatório. Observou-se que a transparência da água possui uma relação inversamente proporcional a presença de sólidos suspensos, sendo que estas variáveis estão bastante relacionadas aos setores do reservatório, principalmente nos afluentes e na área próxima ao dique. A presença de sólidos em suspensão no Rio Jacuí, principalmente, refletiu na reflectância da água observada nos espectros de campo e nos dados orbitais. Porém, as correlações entre dados limnológicos e os dados espectrais de campo se mostraram pouco significativas, sendo que as melhores correlações foram encontradas entre os dados orbitais e limnológicos. No entanto, os dois conjuntos de dados (espectros de campo e orbitais) demonstraram a mesma tendência para os resultados. Em síntese, a utilização de dados espectrais de campo e orbitais são ferramentas importantes e que podem ser utilizadas como soluções viáveis para a análise das feições de reflectância da água e sua relação com dados limnológicos.

Palavras-chave: Comportamento espectral, reservatório, variáveis limnológicas.

ABSTRACT

Master Dissertation
Program of Post Graduation on Geography
Federal University of Santa Maria – Brazil

REMOTE SENSING APPLIED TO THE STUDY ON WATER SPECTRAL BEHAVIOR IN PASSO REAL – RS RESERVOIR

AUTHORA: ALINE BIASOLI TRENTIN
ADVISOR: WATERLOO PEREIRA FILHO
Santa Maria, October 28th, 2009

The building of reservoirs for energy generation and water flow control generated river environmental changes as well as modifications on fluvial environment. In such context, remote sensing is a tool that enables spatial analysis and temporal aquatic environmental information acquisition. This research present a study on water spectral behavior in Passo Real reservoir, that is located in the Jacuí River watershed, in Rio Grande do Sul state, Brazil. Such study aims to evaluate leading factors to water spectral differences. The methodology comprehends spectral data collection on field by the use of spectroradiometer in September 2008; orbital data collection by Landsat satellite image in April 2009 and limnological data in September 2008, February, April and June 2009 (total of sediments in suspension (TSS), Chlorophyll-a (Chl-a), Secchi disk (SD), hydrogenionic potential (pH), electrical conductivity (EC), organic carbon (CO) and water temperature. Besides that, one realized a simulation of spectral answers based on limnological data. The results show that the distribution of limnological variables is in accordance with the times of the year and reservoir sections. One noticed that water transparency is in an inverse proportionality in relation to solids in suspension, taking into account that such variables are quite related to reservoir sections, mainly, to tributary that are close to dike areas. The presence of solids in suspension in the Jacuí River has mainly reflected in water reflectance that was observed in field specters and orbital data. However, correlations between limnological and field spectral data appeared to be less meaningful, once the best correlations were found between orbital and limnological data. Nevertheless, both groups of data (spectra field and orbital) exhibited the same trend to results. In sum, the use of field spectral and orbital data is an important tool that may be used as a possible solution for the analysis of reflectance appearance of the water and its relationship with limnological data.

Key-Words: Spectral behavior, reservoir, limnological variables.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Mapa de localização do Reservatório Passo Real.....	15
Figura 2.1 – Processos da radiação solar na atmosfera e na interface ar/água.....	22
Figura 2.2 – Curva de espalhamento (A) e absorção (B) da água pura.....	23
Figura 2.3 – Coeficiente de absorção dos principais constituintes presentes na água.....	25
Figura 2.4 – Curvas espectrais com diferentes concentrações de sedimentos em suspensão medidos em Unidade de Turbidez Nefelométrica (NTU).	27
Figura 2.5 – Espectro de reflectância com diferentes concentrações de <i>clorofila-a</i> no Lago Kinneret.	29
Figura 2.6 – Etapas da remoção do contínuo espectral.	32
Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia do trabalho.....	35
Figura 3.2 – Classificação por fatiamento das bandas 2 e 3 do satélite Landsat 5 TM – imagem do dia 16 de março de 2008 do reservatório Passo Real.	36
Figura 3.3 – Localização dos pontos amostrais no reservatório Passo Real.	37
Figura 4.1 – Representação das diferentes tonalidades da cor da água no reservatório Passo Real – RS indicadas pelos números correspondentes aos pontos amostrais distribuídos no mapa.	51
Figura 4.2 – Precipitação diária em 30 dias anteriores aos trabalhos de campo nos meses de setembro de 2008 e fevereiro, abril e junho de 2009.....	53
Figura 4.3 – Distribuição da CE no reservatório nos meses de setembro de 2008 e fevereiro, abril e junho de 2009.	54
Figura 4.4 – Espacialização da CE no reservatório nos meses de Setembro de 2008 e Fevereiro, Abril e Junho de 2009.	55
Figura 4.5 – Distribuição do pH no reservatório nos meses de setembro de 2008 e fevereiro, abril e junho de 2009.....	56
Figura 4.6 – Distribuição do COD no reservatório nos meses de fevereiro, abril e junho de 2009.....	57

Figura 4.7 – Espacialização do COD no reservatório nos meses de Fevereiro (A), Abril (B) e Junho (C) de 2009.	57
Figura 4.8 – Distribuição da Transparência no reservatório nos meses de setembro de 2008, fevereiro, abril e junho de 2009.	58
Figura 4.9 – Espacialização da transparência da água no reservatório nos meses de Setembro de 2008 e Fevereiro, Abril e Junho de 2009.	59
Figura 4.10 – Distribuição da temperatura no reservatório nos meses de setembro de 2008, fevereiro, abril e junho de 2009.	60
Figura 4.11 – Espacialização da temperatura da água no reservatório nos meses de Setembro de 2008 e Fevereiro, Abril e Junho de 2009.	61
Figura 4.12 – Distribuição do TSS no reservatório nos meses de setembro de 2008, fevereiro, abril e junho de 2009.	62
Figura 4.13 – Espacialização do TSS no reservatório nos meses de Setembro de 2008 e Fevereiro, Abril e Junho de 2009.	64
Figura 4.14 – Distribuição da Chl-a no reservatório nos meses de fevereiro, abril e junho de 2009.	65
Figura 4.15 – Espacialização da Chl-a no reservatório nos meses de Fevereiro (A), Abril (B) e Junho (C) de 2009.	65
Figura 4.16 – Reflectância da água no reservatório Passo Real no mês de setembro de 2008 – as linhas verticais no gráfico indicam o patamar de reflectância.	68
Figura 4.17 – Correlograma das variáveis DS e TSS com a reflectância em setembro de 2008	71
Figura 4.18 – Diagrama de dispersão entre razão de bandas (680/590nm) e DS (a) e razão de bandas (680/590nm) e TSS (b).	72
Figura 4.19 – Diagrama de dispersão entre diferença de bandas (590-680nm) e DS (a) e diferença de bandas (590-680nm) e TSS (b).	72
Figura 4.20 – Primeira derivada da reflectância para setembro de 2008.	74
Figura 4.21 – Correlograma das variáveis DS e TSS com base na primeira derivada da reflectância em setembro de 2008	75
Figura 4.22 – Remoção do contínuo para os dados de reflectância de setembro de 2008.	76
Figura 4.23 – Diagrama de dispersão entre profundidade de banda (740nm) e DS (a) e profundidade de banda (740nm) e TSS (b).	77
Figura 4.24 – Reflectância em nível de cinza das bandas 1, 2, 3 e 4 do Landsat TM5 em 04/04/2009.	78

Figura 4.25 – Curvas espectrais da água do reservatório Passo Real adquiridas na imagem Landsat 04/04/2009.	80
Figura 4.26 – Correlograma das variáveis TSS, COD, Chl-a, DS, SOS e SIS com base na reflectância da água adquirida nas bandas 1, 2, 3 e 4 da imagem Landsat TM5 de 04/04/2009	81
Figura 4.27 – Remoção do contínuo para os dados de reflectância de abril de 2009.....	83
Figura 4.28 – Fatiamento das bandas 2 e 3 do satélite Landsat TM5 de 04/04/2009.....	84
Figura 4.29 – Curvas espectrais da água do reservatório Passo Real simuladas no WASI para fevereiro de 2009.....	86
Figura 4.30 – Curvas espectrais da água do reservatório Passo Real simuladas no WASI para abril de 2009.....	87
Figura 4.31 – Curvas espectrais da água do reservatório Passo Real simuladas no WASI para junho de 2009.....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Porcentagem da área alagada nos municípios atingidos pelo reservatório.....	15
Tabela 3.1 – Tipos de dados utilizados de acordo com cada período de análise.....	36
Tabela 4.1 – Valores médios, mínimos e máximos das variáveis limnológicas no reservatório Passo Real.....	67
Tabela 4.2 – Variáveis TSS e DS nos pontos amostrais no reservatório no mês de setembro/2008.	70
Tabela 4.3 – Dados de correlação de <i>Spearman</i> entre variáveis limnológicas e razão e diferença de bandas no mês de setembro de 2008.....	73
Tabela 4.4 – Dados da correlação entre variáveis limnológicas e razão de bandas (b4/b3) para o mês de abril 2009.....	82
Tabela 4.5 – Dados da correlação entre variáveis limnológicas e profundidade de banda (660nm) para o mês de abril 2009.	83

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	13
1. INTRODUÇÃO	13
1.1 Localização e caracterização da área de estudo	14
1.2 Organização do documento	16
CAPÍTULO II	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 Limnologia	17
2.2 Sensoriamento Remoto	18
2.2.1 Princípios Físicos do Sensoriamento Remoto	18
2.2.2 Integração alvo e sensor	19
2.2.3 Níveis de coleta de dados	20
2.2.4 Comportamento espectral de alvos	21
2.2.4.1 Comportamento espectral da água.....	21
2.3 Propriedades Ópticas da Água e seus Constituintes	24
2.3.1 Sólidos em Suspensão	26
2.3.2 Fitoplâncton	28
2.3.3 Matéria Orgânica Dissolvida	29
2.4 Processamento de imagens	30
2.4.1 Correção atmosférica.....	30
2.5 Tratamento de dados espectrais	31
2.5.1 Análise Derivativa	31
2.5.2 Remoção do Contínuo	32
2.5.3 Razão e diferença de bandas.....	33
2.6 Water Color Simulator (WASI)	33
2.7 Análise estatística entre dados espectrais e limnológicos	34
CAPÍTULO III	35
3. METODOLOGIA	35
3.1 Definição dos pontos amostrais e dos períodos de análise	36

3.2 Aquisição e processamento da imagem Landsat	37
3.2.1 Correção geométrica.....	38
3.2.2 Atenuação atmosférica	38
3.2.3 Classificação da imagem	39
3.3 Trabalho de campo.....	39
3.3.1 Coleta de dados de reflectância	40
3.3.2 Variáveis limnológicas	41
3.3.2.1 Total de sólidos suspensos.....	41
3.3.2.2 Carbono orgânico dissolvido.....	42
3.3.2.3 Transparência da água	43
3.3.2.4 Condutividade elétrica.....	44
3.3.2.5 Temperatura da água	44
3.3.2.6 Clorofila- <i>a</i>	44
3.3.3 Espacialização das variáveis limnológicas.....	45
3.3.4 Dados de precipitação.....	45
3.4 Simulação Water Color Simulator (WASI)	46
3.5 Processamento dos dados de reflectância.....	46
3.5.1 Remoção do contínuo	47
3.5.2 Análise derivativa	48
3.5.3 Razão e diferença de bandas.....	48
3.6 Técnicas estatísticas.....	49
CAPÍTULO IV.....	51
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
4.1 Dados limnológicos	52
4.1.1 Condutividade elétrica.....	54
4.1.2 Carbono orgânico dissolvido.....	56
4.1.3 Transparência da água	58
4.1.4 Temperatura da água	60
4.1.5 Total de sólidos em suspensão	62
4.1.6 Clorofila- <i>a</i>	63
4.2 Discussão dos dados limnológicos	66
4.3 Dados espectrais de campo	68
4.3.1 Espectros de reflectância de campo.....	68
4.3.2 Razão e diferença de bandas.....	71

4.3.3 Análise derivativa	73
4.3.4 Remoção do contínuo	75
4.4 Dados espectrais da imagem.....	77
4.4.1 Espectros de reflectância da imagem.....	77
4.4.2 Razão de bandas	82
4.4.3 Remoção do contínuo	82
4.4.4 Classificação da imagem	83
4.5 Water Color Simulator (WASI)	85
CAPÍTULO V	89
5. CONCLUSÕES.....	89
CAPÍTULO VI.....	91
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

1. INTRODUÇÃO

A água é um dos recursos que está sendo atingido e conseqüentemente sofrendo alterações em suas características naturais. As diferenças entre as condições da água em meios aquáticos podem ser percebidas em relação às transformações que ocorrem nesses ambientes, como por exemplo, na construção de reservatórios com objetivos diversos, entre eles a geração de energia elétrica. Os reservatórios que atingem grandes áreas provocam impactos e modificações significativas referentes a fauna, flora, na qualidade da água e alteram o fluxo normal do ambiente fluvial.

Segundo Kallio et. al. (2001), as águas de lagos são opticamente complexas, sendo que as concentrações de substâncias opticamente ativas variam entre esses ambientes, devido principalmente a diferença na origem das substâncias que podem estar vinculadas a erosão devido a falta de preservação do entorno. Como exemplo disso, a acumulação de sedimentos pode indicar o potencial da estrutura, ou a vida útil do reservatório (THORNTON, 1990).

Para o estudo especificadamente do recurso água, destaca-se a utilização de técnicas, como o Geoprocessamento, que propicia ao pesquisador realizar análises sobre as principais características deste recurso e como estas se comportam frente a um desequilíbrio ocasionado no meio ambiente local. Dessa forma, pode-se considerar como principal instrumento o Sensoriamento Remoto com dados adquiridos em campo ou a nível orbital, o qual aliado aos Sistemas de Informações Geográficas permite a aquisição e manipulação de dados para a investigação de determinado fenômeno.

O Sensoriamento Remoto como um instrumento de análise dos recursos terrestres, é utilizado de diferentes maneiras dependendo dos objetivos a serem alcançados. Nesta pesquisa considera-se o comportamento espectral de alvos com ênfase no ambiente aquático, o qual apresenta características bastante distintas em relação a outros alvos, uma vez que a energia refletida pela água é consideravelmente menor. Ainda assim, ocorrem faixas espectrais onde apenas uma característica dominante está presente, representada principalmente por materiais dissolvidos e em suspensão nos corpos hídricos, sendo o sensoriamento remoto espectral útil para determinar a qualidade das águas interiores.

Nesse sentido, esta pesquisa é parte de um projeto maior que engloba a caracterização espectral e limnológica de ambientes lênticos no Rio Grande do Sul com abordagem espaço-temporal. Outros trabalhos estão sendo desenvolvidos com este pressuposto, porém com objetivos diferentes, como a relação das variáveis espectrais e limnológicas com o uso e ocupação das bacias hidrográficas que deságuam no reservatório e com a precipitação.

Nessa pesquisa o objetivo principal consiste no estudo do comportamento espectral da água no reservatório Passo Real, por meio da utilização e análise de dados de sensoriamento remoto, com o propósito de avaliar os fatores condicionantes às diferenças espectrais na água, como os dados limnológicos, em uma das principais bacias hidrográficas do Estado do Rio Grande do Sul, o Rio Jacuí. Especificamente os objetivos são:

- Analisar a composição espectral da água no Reservatório Passo Real por meio de curvas de reflectância com a utilização de espectrorradiômetro e imagem de sensores remotos;
- Discutir as características limnológicas que podem causar as diferenças espectrais na água do reservatório;
- Correlacionar dados de reflectância e dados limnológicos a fim de estabelecer as variáveis que contribuem nas características específicas do reservatório.
- Simular espectros de reflectância da água a partir de dados limnológicos no Water Color Simulator (WASI);

1.1 Localização e caracterização da área de estudo

O reservatório Passo Real considerado o maior lago artificial do Rio Grande do Sul está localizado em uma das principais bacias hidrográficas do estado, a Bacia Hidrográfica do Rio Jacuí, situada no centro-norte do estado (Figura 1.1). A extensão deste corpo de água varia em função do nível da água aproximando-se de 220 km², alagando área de sete municípios conforme a Tabela 1.1. É a maior área alagada do leito deste rio, com contribuição de três afluentes principais, o Rio Jacuí propriamente, o Rio Jacuí-Mirim e o Rio Ingaí.

Dentre os municípios atingidos pelo reservatório Passo Real, Fortaleza dos Valos teve a maior área alagada, de 46,5% do município. A partir dessa porcentagem os municípios são beneficiados com compensação financeira, onde é calculada e destinada parte da renda adquirida pela utilização do recurso hídrico e concessão da energia que é gerada e distribuída.

A formação do reservatório Passo Real e a construção da usina hidrelétrica com seis comportas foi inaugurada em 1973 e faz parte de um sistema de geração de eletricidade

concedida pela CEEE (Companhia Estadual de Energia Elétrica). A potência energética do reservatório é de 158 MW, utilizando um volume útil de água em janeiro de 2009 de 88,95%. Possui uma vazão natural afluyente medida no período de junho de 2005 a junho de 2006 de $36\text{m}^3/\text{s}$ em função do período de estiagem. Porém este reservatório ainda garante o fornecimento de água para três reservatórios à jusante, sendo Jacuí, Itaúba e Dona Francisca.

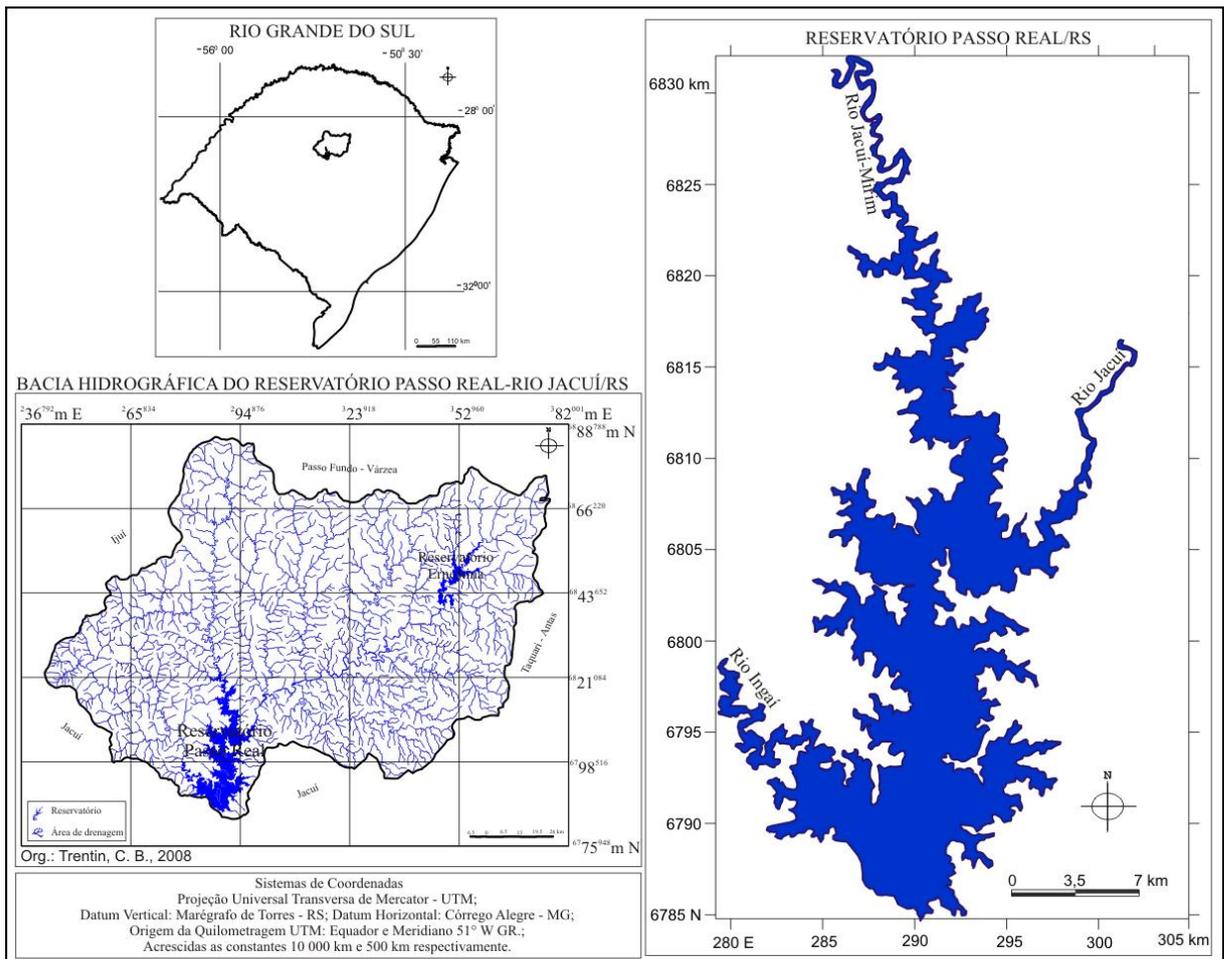


Figura 1.1 – Mapa de localização do Reservatório Passo Real.
Organização: Trentin, A, 2009.

Tabela 1.1 – Porcentagem da área alagada nos municípios atingidos pelo reservatório

<i>Municípios atingidos</i>	<i>Área alagada (%)</i>
Fortaleza dos Valos	46,52
Salto do Jacuí	21,18
Campos Borges	14,32
Quinze de Novembro	14,19
Ibirubá	2,06
Alto Alegre	1,10
Selbach	0,60

Fonte: Nota técnica – ONS, 2006.

Em relação as características físicas e geográficas do local de estudo, o reservatório Passo Real esta situado no planalto médio Riograndense, na região do Alto Jacuí, com relevo predominantemente de colinas suaves. O relevo é um dos condicionantes para a prática da agricultura com culturas de soja, milho e trigo que são predominantes nos municípios do entorno do reservatório e em algumas áreas que deveriam ser preservadas.

Os primeiros colonizadores da região que faz parte da Rota das Terras, onde se situam os municípios que tiveram parte de sua área alagada pelo lago da barragem Passo Real, são italianos e alemães vindos da região da Quarta Colônia de Imigração Italiana e do Vale do Taquari. Com a construção do lago da barragem os municípios optaram pelo desenvolvimento do turismo, porém de acordo com Pereira Filho e Galvão (1997) à montante do reservatório as áreas são intensamente agricultáveis, suscetíveis as práticas de preparo e plantio do solo.

1.2 Organização do documento

O Capítulo I trás a apresentação da dissertação, que foi desenvolvida a partir dos assuntos referentes ao tema, os objetivos, bem como algumas considerações sobre a área de estudo. Esta dissertação está composta por mais cinco capítulos. No Capítulo II realizou-se uma revisão bibliográfica que contém tópicos sobre os estudos de limnologia, sensoriamento remoto com seus aspectos físicos, e o comportamento espectral de alvos abordando principalmente as características ópticas dos ambientes aquáticos. No Capítulo III estão descritas todas as etapas realizadas para a obtenção dos resultados, como a coleta dos dados, o processamento e a análise. No Capítulo IV são apresentados os resultados da pesquisa. No Capítulo V as considerações finais e por fim as referências bibliográficas no Capítulo VI.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Limnologia

O conceito de limnologia refere-se ao estudo de ambientes aquáticos continentais. Até 1950 as pesquisas tinham caráter descritivo sobre a tipologia dos lagos e as relações de causa e efeito que se observavam. Após essa data as pesquisas passaram a conter fases experimentais em campo e em laboratório, principalmente devido ao avanço da tecnologia. Atualmente as técnicas matemáticas e estatísticas auxiliam no conhecimento das interrelações entre os componentes dos ecossistemas aquáticos (ESTEVES, 1998).

A formação de lagos pode ter diversas origens, sendo uma o represamento de rios formando reservatórios para diferentes finalidades como a geração de energia. De acordo com Esteves (1998), lagos são “corpos d’água interiores sem comunicação direta com o mar e suas águas tem em geral baixo teor de íons dissolvidos, quando comparadas às águas oceânicas”.

A construção de reservatórios implica em diferentes mecanismos físicos que ocorrem no ambiente, como os processos de movimento e mistura de matéria particulada e dissolvida. Esses mecanismos dentro de um corpo de água resultam em transportes físicos que influenciam nas características do ambiente, como na temperatura e luz.

A distribuição espacial dos sedimentos é diferenciada em lagos e reservatórios. Em lagos a distribuição é equitativa em direção as bordas do ambiente. Os reservatórios geralmente recebem maior contribuição de seus tributários, o que promove o desenvolvimento de gradientes químicos e físicos dentro de reservatórios implicando na produtividade biológica e na qualidade da água. Nesse caso, os sedimentos suspensos e outras matérias particuladas são advindos em maior quantidade em eventos de chuva e conseqüente elevação do fluxo dependendo da dimensão longitudinal do reservatório (FORD, 1990; THORNTON, 1990).

O transporte e a deposição de sedimentos são processos dominantes em reservatórios influenciando na resposta ecológica do sistema. O transporte de material para lagos e reservatórios pode ser influenciado por fatores como a forma e a localização da bacia fluvial e

a sazonalidade devido às condições de uso e cobertura da terra em épocas de chuva, interceptando ou não a carga de sedimentos para o sistema (THORNTON, 1990).

2.2 Sensoriamento Remoto

A partir da década de 1960 o sensoriamento remoto aparece nas pesquisas científicas e seu conceito era restrito a aquisição de informações de um objeto sem contato físico com ele. A partir da evolução da tecnologia de aquisição de dados essa técnica passou a ser conceituada como a utilização de modernos sensores para a aquisição, processamento e transmissão de dados com objetivo de estudar o ambiente terrestre por meio do registro e análise das interações entre a radiação eletromagnética e os alvos da superfície (NOVO, 1998).

Para entender a conceituação da técnica sensoriamento remoto, é necessário o estudo entre os elementos que fazem parte do processo: a energia, o objeto e o sensor, integrados pela radiação eletromagnética. A energia proveniente do sol, utilizada no caso dos estudos referentes aos recursos naturais, se destaca como fonte de energia eletromagnética; o objeto refere-se ao alvo ou elemento do qual se extrai a informação; e o sensor corresponde ao instrumento que coleta e registra a informação refletida ou emitida pelo objeto.

A energia captada e utilizada pelos sensores é a radiação eletromagnética, representada pelo espectro eletromagnético, o qual possui regiões com diferentes comprimentos de onda. As faixas mais utilizadas pelos sensores para estudos relacionados aos recursos naturais estão entre as regiões do visível e do infravermelho, correspondentes as faixas de comprimento de onda entre 0,38 – 0,72 μ m, região do visível, onde o olho humano pode diferenciar as cores, e entre 0,72 – 3,0 μ m, região do infravermelho próximo e médio, onde detecta-se o calor (NOVO, 1998; FLORENZANO, 2002).

2.2.1 Princípios Físicos do Sensoriamento Remoto

Quando se utiliza um dado de sensor remoto, precisa-se entender uma das áreas mais importantes do Sensoriamento Remoto, a radiometria espectral, que é definida como a medida quantitativa da intensidade de radiação. Por meio da radiometria é que se diferencia o

comportamento espectral de cada objeto possível de identificação em uma imagem, neste caso utilizando a radiação eletromagnética que ele apresenta (NOVO, 1998; MENESES, 2001).

As principais medidas radiométricas ligadas a técnica do sensoriamento remoto referem-se a irradiância, radiância, absortância, reflectância e transmitância. A irradiância corresponde ao fluxo de energia que incide sobre uma determinada superfície por unidade de área. A radiância é determinada pelo fluxo radiante por ângulo que deixa uma fonte em uma dada direção por unidade de área (SLATER, 1980; NOVO, 1998).

O fluxo radiante ao incidir sobre o alvo pode apresentar três formas de interação, absortância, reflectância e transmitância. A absortância se refere a razão entre o fluxo de energia absorvido e a energia incidente em uma superfície. A reflectância é dada pela quantidade de energia refletida em razão da energia que incide na superfície. E a transmitância é a razão entre o fluxo transmitido pelo fluxo incidente numa dada superfície (NOVO, 1998).

2.2.2 Integração alvo e sensor

A radiação dos objetos terrestres é emitida em diferentes magnitudes e composições espectrais. Independente da fonte, a radiação detectada pelos sensores remotos percorre determinada distância na atmosfera. O efeito do sinal recebido pelo sensor varia devido as condições da atmosfera, com as diferentes distâncias percorridas pela radiação, a magnitude do sinal da energia recebida pelo sensor e o comprimento de onda envolvido (LILLESAND e KIEFER, 1994).

Em função da natureza variada dos efeitos atmosféricos, a atmosfera pode interferir na intensidade, composição e mudança da distribuição espectral da radiação disponível em qualquer sistema sensor. Estes efeitos são causados principalmente por mecanismos de espalhamento e absorção atmosféricos (LILLESAND e KIEFER, 1994; KIRK, 1994; BARBOSA et. al., 2003).

O espalhamento atmosférico é a difusão da radiação por partículas na atmosfera. É classificado de acordo com a interação entre a radiação e o tamanho das partículas presentes na atmosfera, que variam de tamanho como as moléculas de água até poeira e gotículas. Em um determinado tamanho de partícula a radiação será espalhada em comprimentos de onda específicos do espectro eletromagnético, sendo que quanto menores as partículas o

espalhamento tende as regiões do espectro com menores comprimentos de onda (ZULLO JR, 1994).

A absorção atmosférica é outro mecanismo de interação entre a atmosfera e a radiação eletromagnética. Para Zullo Jr (1994) a absorção atmosférica ocorre quando as moléculas presentes na atmosfera, principalmente ozônio, gás carbônico e vapor de água, absorvem a radiação em diversos comprimentos de onda, resultando na perda de energia incidente na superfície.

2.2.3 Níveis de coleta de dados

A intensidade do sinal registrado por determinado sensor depende, além das características do alvo e da configuração do sensor, da altitude do sensor que está sendo utilizado (NOVO, 1998). Em estudos de sensoriamento remoto, os dados podem ser obtidos por meio de sensores orbitais, aerotransportados ou terrestres. A partir dessa diferença é que se determinam as formas de análise dos dados e o nível de informação a ser obtida.

Os sensores podem ser classificados quanto a forma de utilização ou não de energia própria (MOREIRA, 2005). Em sensores de radar, por exemplo, a energia para o imageamento de alvos é advinda do próprio sensor, caracterizando um sensor ativo. Em contrapartida, satélites como o Landsat e outros, e os espectroradiômetros, não possuem fonte de energia própria, sendo denominados sensores passivos.

A espectroscopia de campo consiste na interrelação entre as características espectrais dos objetos e seus atributos biofísicos medidos em ambiente de campo (MILTON, 1987). Os espectroradiômetros medem a energia eletromagnética refletida pelos objetos em diferentes comprimentos de onda, resultando em curvas espectrais. Nos corpos de água, a radiância tem interferência dos fenômenos de absorção e espalhamento dado pelos constituintes presentes na água, da radiância do céu refletida no corpo aquático e dos reflexos de radiação solar causados pela movimentação da água (STEFFEN, 1996).

Em dados orbitais a energia refletida pelo alvo da superfície até o sensor é modificada pelos processos que ocorrem na atmosfera, na trajetória da radiação. Nesse caso, a interferência provém de moléculas presentes na atmosfera e que afetam a qualidade do dado.

2.2.4 Comportamento espectral de alvos

Na definição dada por profissionais que atuam na aplicação do Sensoriamento Remoto em estudos de recursos naturais, o comportamento espectral de alvos é o estudo da reflectância espectral de recursos como a vegetação, solos, minerais e rochas, água, entre outros.

Para o estudo e interpretação do comportamento espectral dos recursos naturais é necessário o conhecimento das condições em que os dados são tomados para que possam ser avaliados os fatores que interferem na resposta do alvo, como a geometria do imageamento, o método de aquisição, os parâmetros atmosféricos e os que são relativos ao alvo (NOVO, 1998). Para Milton (1987) a geometria da radiação utilizada em medidas de campo está ligada a posição da fonte (fluxo incidente) e do sensor, resultando na função de distribuição da reflectância bi-direcional para representar a reflectância espectral de alvos naturais.

Para Meneses (2001), existem três fatores que dificultam as interpretações espectrais nas imagens de sensores remotos, como a largura e a posição do espectro das bandas utilizadas pelo sensor, a radiação refletida da superfície dos materiais, como também a influência da atmosfera e a variação do ângulo de visada em função da reflexão dos materiais.

A fim de estudar mais detalhadamente os aspectos referentes à feição de um objeto na superfície por meio da utilização das imagens de sensoriamento remoto, utiliza-se a espectralradiometria, definida por Meneses (2001) como a medida da distribuição da energia radiante por um objeto. Assim, a medida de reflectância pode ser obtida através das curvas de reflectância, registrada por espectralradiômetros ou ainda por meio de imagens orbitais. Conforme o mesmo autor, as imagens interpretadas por meio da análise espectral trazem maiores níveis de segurança de informações em relação aos dados adquiridos pelas técnicas baseadas em atributos espaciais.

2.2.4.1 Comportamento espectral da água

Existe grande diferença entre o comportamento espectral da água em relação aos demais alvos da superfície, uma vez que a energia refletida por ela é consideravelmente menor que de outros alvos, sendo este o fator de maior relevância na diferenciação a partir de estudos por imagens de satélite (NOVO, 2001). O fato é que o comportamento espectral da água caracteriza-se por baixos valores de radiância concentrados numa faixa de radiação entre 350

e 700nm considerada variável. A maior parte da radiação refletida corresponde às informações dos compostos que estão presentes devido ao espalhamento múltiplo que ocorre no corpo d'água, ilustrado na Figura 2.1 (DEKKER, 1993; NOERNBERG et. al., 1996; BARBOSA, 2005).

Numa comparação entre os sistemas aquáticos e sistemas terrestres, a diferenciação das componentes radiativas é importante, pois a energia proveniente da água é baixa. A radiação que atinge o sensor possui componentes advindos do espalhamento pela atmosfera, da reflexão especular da radiação solar direta e difusa, e do fluxo de radiação emergente da água, o qual traz informações sobre as substâncias em suspensão na coluna d'água, sendo o único de interesse (STEFFEN, 1996; RUDORFF, 2006).

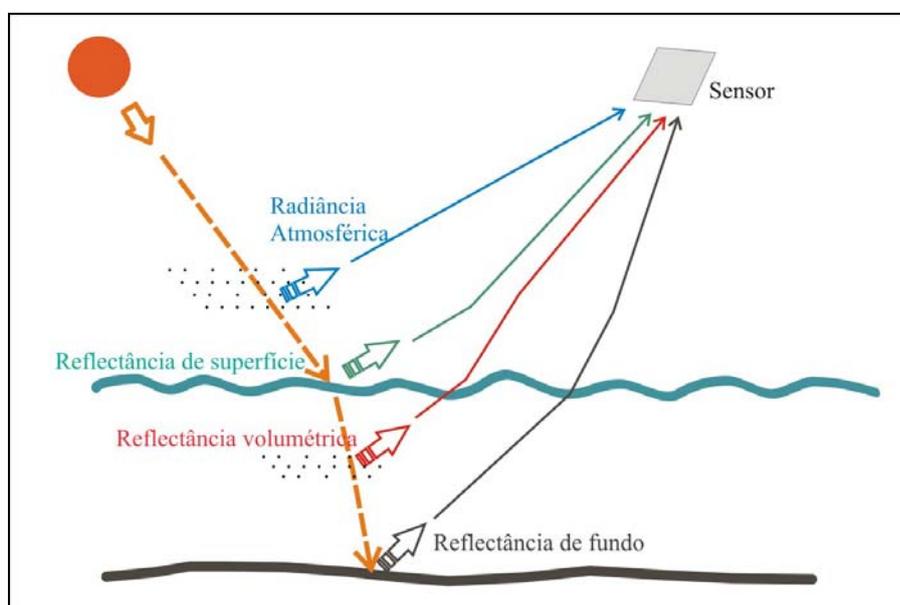


Figura 2.1 – Processos da radiação solar na atmosfera e na interface ar/água.
Fonte: Adaptado de Barbosa, 2005.

Da mesma forma, Novo (2001) avalia que no caso específico da água, a interpretação dos dados é mais complexa devido a interferência atmosférica na região de maior penetração da luz na água, a transmitância variável e alta em função das diferentes profundidades, aos componentes opticamente ativos no corpo hídrico que apresentam espectros semelhantes e à reflectância da água que é baixa em termos de volume e alta na superfície quando afetada por outros fatores.

A água possui comportamento espectral distinto de acordo com as formas como se apresenta: líquida, sólida ou gasosa. A água líquida apresenta reflectância (menor que 10%) em comprimentos de onda na faixa do visível (entre 0,38 - 0,70 μ m), sendo que nas demais

regiões do espectro óptico há absorção da radiação incidente. A água em estado sólido apresenta reflectância em comprimentos de onda diversos, alcançando alta reflectância (80%) entre 0,7 e 1,2 μm e decrescendo para valores variáveis e inferiores a 20% de reflectância em comprimentos de onda acima de 1,4 μm . Para a água no estado gasoso a reflectância se mantém alta (aproximadamente em 70%) em todo o espectro óptico, porém apresentando algumas bandas de absorção em 1,0, 1,3 e 2,0 μm (NOVO, 1998).

De acordo com Sturm (1980) o espalhamento da água pura é determinado principalmente pela matéria orgânica e inorgânica em suspensão, enquanto a absorção é influenciada pela matéria dissolvida. Da mesma forma, Esteves (1998), Dekker (1993), Novo (2001) e Barbosa et. al. (2003), concordam ao afirmar que o comportamento espectral da água pura é determinado pelo espalhamento das moléculas nos comprimentos de onda mais curtos, correspondendo ao coeficiente de absorção mínimo entre 400-600nm, aumentando na região do infravermelho próximo, enquanto o coeficiente de espalhamento é máximo na região do azul e se anula exponencialmente em direção ao infravermelho (Figura 2.2).

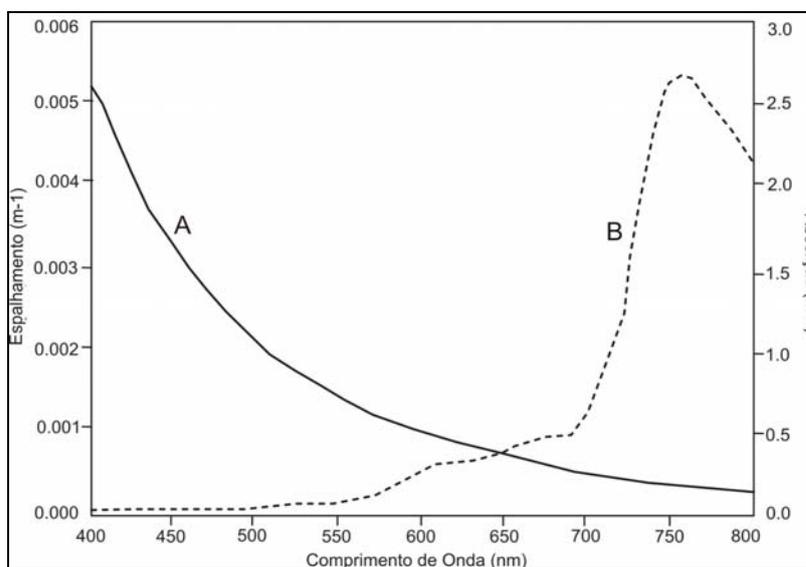


Figura 2.2 – Curva de espalhamento (A) e absorção (B) da água pura.
Fonte: Dekker (1993).

Com a combinação dos coeficientes de absorção e espalhamento entre os parâmetros da água, Kirk (1994) considera que o espalhamento da luz em águas naturais é dominado pela presença de partículas, sendo que estas aumentam o espalhamento em proporção à concentração de partículas suspensas. As pesquisas realizadas por Dekker (1993) e Kirk (1994) concluíram que ocorrem faixas espectrais onde apenas uma característica dominante está presente, sendo o sensoriamento remoto espectral útil para determinar a qualidade das

águas interiores. Esses processos são produzidos por materiais dissolvidos e em suspensão nos corpos hídricos. A presença de matéria orgânica dissolvida desloca o máximo de reflectância espectral para o verde-amarelo, enquanto que a matéria inorgânica em suspensão resulta num deslocamento do pico de reflectância em direção ao vermelho.

2.3 Propriedades Ópticas da Água e seus Constituintes

A partir de medidas provenientes dos instrumentos de sensoriamento remoto é realizado o estudo da inferência de variáveis relacionadas à qualidade da água, de acordo com a análise das feições espectrais da radiação solar refletida pelo volume de água em subsuperfície (LONDE et. al., 2006; BINDING et. al., 2007).

Nas águas naturais, o comportamento da resposta espectral depende da concentração e das características em função da presença de determinados constituintes, principalmente sedimentos suspensos e dissolvidos, fitoplâncton e matéria orgânica (ESTEVES, 1998; NÓBREGA, 2002; HELLWEGGER et. al., 2004). De maneira similar, Kirk (1994); Binding et. al. (2007) compreendem que a radiação visível de um corpo natural de água é determinada pelas propriedades ópticas inerentes a partir dos constituintes opticamente ativos (COAs) que se encontram dentro d'água.

No entanto, sistemas aquáticos de águas continentais apresentam características óticas complexas que normalmente apresentam a combinação de diversos COAs. Porém, em alguns casos a influência de apenas um determinado COA auxilia a identificar e compreender de que forma as feições existentes nos espectros de reflectância podem estar relacionadas a determinadas substâncias (DIAS et. al., 2005; RUDORFF, 2006; BINDING et. al., 2007).

O efeito das diferenças entre as composições das substâncias opticamente ativas presentes na água resulta em propriedades ópticas inerentes de absorção e o espalhamento da radiação eletromagnética, indicando a distinção de assinaturas espectrais para cada tipo de água. Esteves (1998) descreve que a radiação absorvida pela água é máxima em maiores comprimentos de onda como o vermelho e infravermelho, decrescendo em direção a região do azul. Esse coeficiente é influenciado tanto pelas próprias moléculas de água como pelas substâncias húmicas dissolvidas, organismos clorofilados e partículas em suspensão.

Na Figura 2.3 está representado o coeficiente de absorção dos principais constituintes presentes na água em comparação com a água pura de acordo com Bukata et. al. (1991). O coeficiente de absorção dos sólidos suspensos apresenta-se maior em comprimentos de onda

menores, decrescendo até um pico mínimo próximo a 570nm e após aumentando novamente. Para o carbono orgânico dissolvido, medida da matéria orgânica, o coeficiente de absorção é semelhante aos sólidos suspensos, maior em menores comprimentos de onda e decrescendo em direção a região do vermelho. O coeficiente de absorção da clorofila-*a* é baixo, apresentando maiores valores em menores comprimentos de onda decrescendo suavemente até um pico mínimo próximo a 600nm.

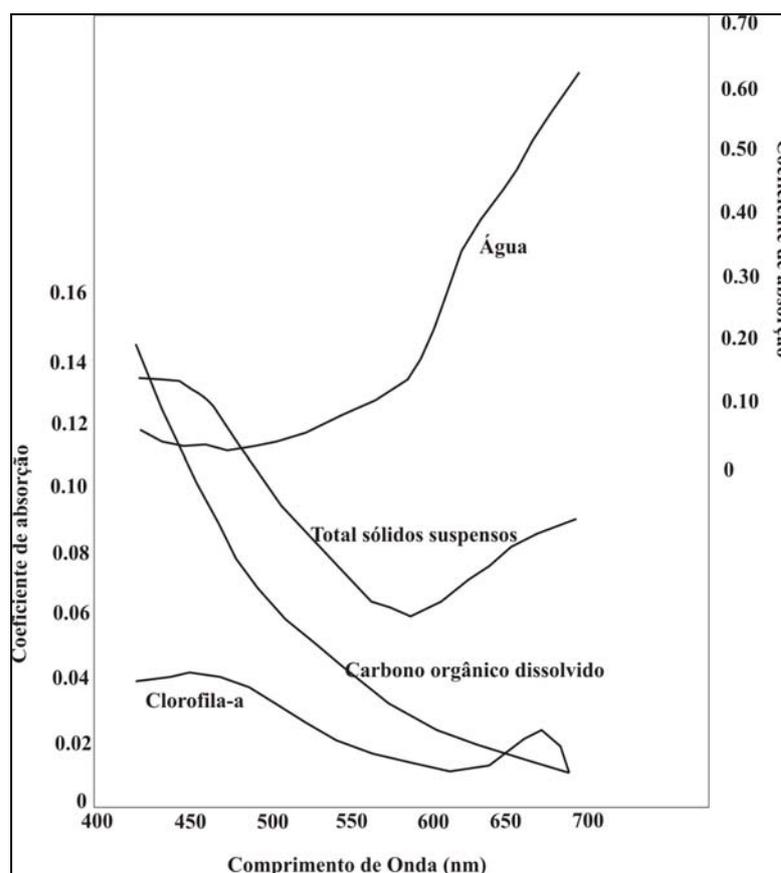


Figura 2.3 – Coeficiente de absorção dos principais constituintes presentes na água.
Fonte: Bukata et. al. (1991).

Barbosa (2005) entende que a parte da radiação que é absorvida se transforma em energia que aquece o corpo d'água ou é utilizada pela fotossíntese, enquanto a radiação que entra em contato com as partículas dentro do corpo d'água é espalhada e altera os comprimentos de onda da radiação que chega ao sensor. A magnitude dessas propriedades é diretamente influenciada pela composição da massa de água.

Para Kirk (1994) o aumento da concentração de partículas suspensas em um corpo d'água trás como consequência o aumento do coeficiente de retroespalhamento. Assim ocorre uma relação diretamente proporcional entre o fluxo de energia detectado pelo sensor e o

coeficiente de retroespalhamento, enquanto uma relação inversamente proporcional ocorre para o coeficiente de absorção (NOVO, 2001).

Outras propriedades ópticas são as aparentes e compreendem o coeficiente de atenuação difusa, a reflectância irradiante de subsuperfície e a reflectância medida pelo sensor (MOBLEY, 2004; BARBOSA, 2005). Essas propriedades são dependentes da direção do fluxo de energia, do ângulo de elevação solar e da refração causada pelas ondas na superfície da água (PREISENDORFER, 1986).

2.3.1 Sólidos em Suspensão

Os sólidos presentes em um corpo hídrico podem causar danos a vida aquática quando ocorre a sedimentação ou retenção de bactérias e resíduos no leito dos rios destruindo organismos que fornecem alimentos aos peixes. Além disso, altos teores de sais minerais como sulfato e cloreto estão associados a corrosão em sistemas de distribuição e ao sabor na água (CETESB, 2001).

A partir de medidas coletadas em campo com o auxílio de espectrorradiômetro é possível determinar a influência de constituintes na resposta espectral da água. Em relação ao total de sólidos em suspensão (TSS), a resposta está associada a uma faixa ampla do espectro, principalmente um patamar na região entre 600 e 700nm, aumentando a reflectância na região do infravermelho de acordo com o aumento da concentração e do tipo do sedimento (SOUZA, et. al., 1991; NOVO, 1998; ARRAUT et. al., 2005; RUDORFF et. al., 2005).

A análise de sólidos suspensos na água também foi estudada por Goodin et. al. (1993) utilizando análise derivativa em dados de alta resolução espectral. Na Figura 2.4 é apresentada a variação das curvas de reflectância de um corpo d'água em função do acréscimo da concentração de material em suspensão. A forma das curvas permanece semelhante em toda a faixa (400-900nm), porém a amplitude entre a reflectância máxima e a feição de absorção aumenta. Ocorre um deslocamento do máximo de reflectância em direção aos maiores comprimentos de onda e maior distanciamento entre as curvas na faixa entre 550-700nm.

Para Ritchie et. al. (1976) o melhor ajuste entre a reflectância e a concentração de sedimentos suspensos ocorre na faixa entre 700-800nm. Em pesquisa desenvolvida por Lodhi et. al. (1998), concluíram que a faixa do espectro entre 700-900nm (infravermelho próximo) é a mais adequada para estimar a concentração de sedimentos, uma vez que nesta faixa o

aumento gradativo de sedimentos, aumenta de maneira uniforme a reflectância do corpo aquático.

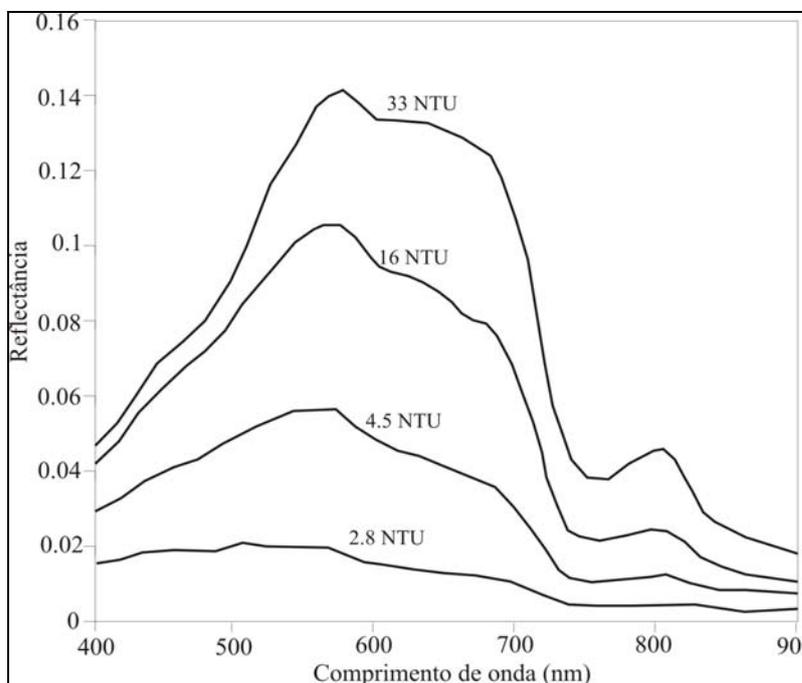


Figura 2.4 – Curvas espectrais com diferentes concentrações de sedimentos em suspensão medidos em Unidade de Turbidez Nefelométrica (NTU).

Fonte: Adaptado de Goodin et. al., 1993.

Em relação ao estudo propriamente da avaliação da qualidade da água no reservatório Passo Real, um exemplo dos trabalhos pioneiros na área de estudo foi desenvolvido por Pereira Filho e Galvão (1997), estudando a relação entre a reflectância da água obtida em campo e orbital com a concentração de sedimentos. Neste trabalho os dados mostraram concordância entre os valores de reflectância dos sensores utilizados e as correlações realizadas entre os dados de reflectância e sedimentos demonstraram tendência de quanto maior a concentração de sedimentos, maior a reflectância.

Em experimento de laboratório desenvolvido por Novo et. al. (1989) estudando a relação dos efeitos da geometria de visada e do comprimento de onda entre a reflectância e a concentração de sedimentos suspensos mostrou que as relações positivas variaram com o comprimento de onda e o ângulo de visada do sensor, principalmente em nadir e entre 0.55-0.65 μ m e 0.75 μ m.

O TSS compõe dois tipos diferentes de sedimentos em suspensão, os orgânicos (SOS) e inorgânicos (SIS). Os sedimentos orgânicos em suspensão estão relacionados principalmente à cor da água. A alteração da cor da água deve-se a forte absorção da radiação

eletromagnética nos menores comprimentos de onda da faixa do visível, principalmente na região do azul. Com várias bandas de absorção sobrepondo-se, estes compostos apresentam uma curva de absorção semelhante a matéria orgânica dissolvida, com valores altos no ultravioleta e azul, decrescendo até o verde e valores muito baixos no vermelho (MANTOVANI e NOVO, 1996; NOVO, 2001).

Uma concentração típica de sedimentos inorgânicos não favorece o espectro de absorção da luz que depende das propriedades químicas do material, porém ocorre intensamente o espalhamento da radiação. Com o aumento da concentração de material inorgânico, a forma da curva do pico principal de reflectância tende a se apresentar mais íngreme devido ao aumento da sua altura (KIRK, 1994).

2.3.2 Fitoplâncton

O fitoplâncton é um dos elementos responsáveis pela absorção da luz no meio aquático em função dos elementos utilizados para a fotossíntese, principalmente a clorofila-*a*. As propriedades de absorção do fitoplâncton fazem com que o aumento da concentração de algas acarreta a diminuição da reflectância da água na região do azul, passando o máximo de reflectância para a região do verde e um aumento da energia refletida no vermelho devido a fluorescência de clorofila-*a* (DEKKER, 1993; NOVO, 2001; BARBOSA, 2005).

Dekker (1993) analisando os espectros de absorção da água com presença de toda a matéria particulada (orgânica e inorgânica) suspensa na água, encontrou picos de absorção mais acentuados em 438nm e 676nm referentes a clorofila-*a*. Em estudo realizado por Han (2005) utilizando dados de espectrometria de campo e a primeira derivada dos dados, concluiu que ocorrem regiões de absorção espectrais específicas (630–645nm, 660–670nm, 680-687nm e 700- 735nm) que demonstra a concentração de clorofila-*a*.

Gitelson et. al. (1994) em estudo realizado para diferentes concentrações de clorofila no Lago Kinneret encontrou o máximo de reflectância entre 560-570nm atribuído a mínima absorção de todos os pigmentos de fitoplâncton, sendo que o aumento da concentração da clorofila vincula-se diretamente ao aumento da reflectância. Próximo a 600nm a reflectância espectral apresentou declive nítido atribuído ao coeficiente de absorção de pura água (Figura 2.5).

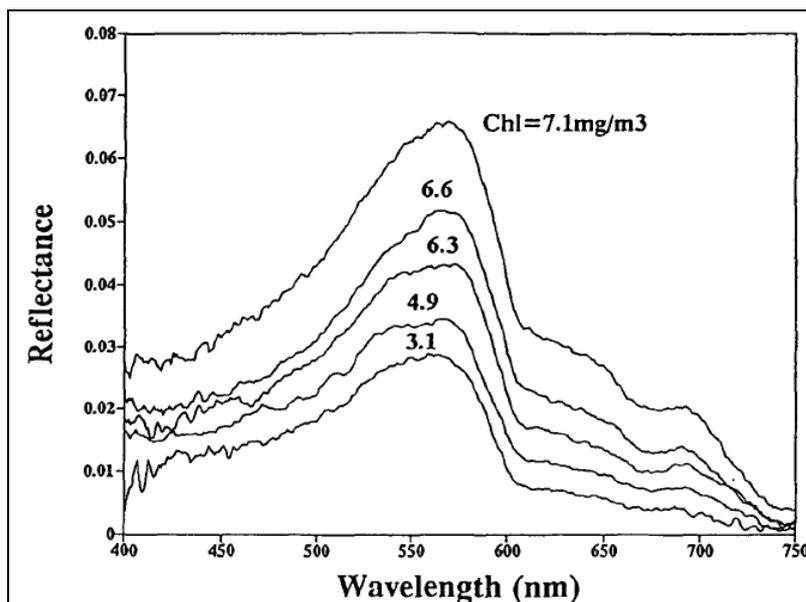


Figura 2.5 – Espectro de reflectância com diferentes concentrações de *clorofila-a* no Lago Kinneret.
Fonte: Gitelson et. al., 1994.

2.3.3 Matéria Orgânica Dissolvida

A matéria orgânica como substância húmica é uma das formas de encontrar o carbono orgânico dissolvido na água e é originada principalmente pela decomposição de organismos vivos terrestres ou aquáticos, principalmente o fitoplâncton durante sua senescência (ESTEVES, 1998). A grande variabilidade de substâncias que podem interferir na composição da matéria orgânica também pode ter gerado as diversas denominações para matéria orgânica dissolvida, como “gilvin”, substância amarela, compostos húmicos totais, entre outros (MANTOVANI, 1993).

A matéria orgânica dissolvida no meio aquático interfere no coeficiente de absorção do fluxo de energia, alterando a cor da água pura. Mobley (2004) descreve a curva de absorção da matéria orgânica ou substância amarela, onde estas substâncias absorvem muito pouco na região do vermelho, aumentando nas faixas de menores comprimentos de onda, podendo se apresentar significante no azul e ultravioleta.

Quando há o aumento da concentração dessas substâncias na água como em áreas litorâneas ou interiores onde principalmente ocorre a descarga de solo para o interior do corpo de água, a curva espectral tende a deslocar o máximo de reflectância que ocorreria na região do azul para as regiões do verde e vermelho, fazendo com que a cor da água passe a se apresentar amarelada (BRICAUD et. al., 1981; NOVO, 2001).

2.4 Processamento de imagens

A utilização de dados de sensoriamento remoto para diferentes fins provocou uma crescente evolução de técnicas na área de tratamento desses dados, principalmente em função da aquisição da informação devido a interação que ocorre entre o alvo em superfície e a atmosfera. As imagens utilizadas para análises de dados sobre os alvos da superfície dependem de algumas etapas para que possam representar os fenômenos que se deseja estudar.

Uma etapa anterior ao processamento de imagens é o pré-processamento, que consiste na preparação do dado para ser interpretado. Nessa fase ocorre a correção geométrica, atmosférica e radiométrica das imagens de satélite. Na fase de processamento ocorre a classificação da imagem, onde o pesquisador pode ou não influenciar na determinação de temas para auxiliar no resultado final a ser interpretado.

2.4.1 Correção atmosférica

Os dados de sensores orbitais têm contribuição dos constituintes presentes na atmosfera, como gases e particulados, uma vez que a radiação recebida pelo sensor para caracterizar os alvos da superfície interage com essa dinâmica da atmosfera (LATORRE et. al., 2002). O deslocamento da energia, da fonte de radiação para o alvo e deste para o sensor, interage com os componentes que estão presentes na atmosfera. Devido a essa interação, ocorrem os fenômenos de absorção e espalhamento da energia, causado pelas moléculas de gases e particulados.

A fim de diminuir os efeitos causados pela interação da energia com a atmosfera, existem métodos de correção atmosférica que visam a melhoria da qualidade dos dados, principalmente quando se relaciona uma data de aquisição com outra ou uma banda espectral de um sensor com outra (ZULLO JR, 1994).

Alguns métodos físicos trabalhados na literatura são: Modelo 5S (ZULLO JR, 1994; LATORRE et. al., 2002), 6S (LATORRE et. al., 2002), MODTRAN (LATORRE et. al., 1998; LATORRE et. al., 2002; CARVALHO JR et. al., 2005) e LOWTRAN (MUKAI, 1990; LATORRE et. al., 2002). Esses métodos são caracterizados pela teoria da transferência radiativa, a qual expressa a interação da radiação com a matéria, definindo como a presença

de partículas opticamente ativas na atmosfera pode afetar a propagação da radiação devido ao espalhamento ou absorção (ECHER et. al., 2001).

2.5 Tratamento de dados espectrais

Para atender aos estudos e interpretações dos dados de espectros de reflectância coletados em campo ou a partir das imagens de satélite atenuados os ruídos da atmosfera, procedem-se algumas técnicas que favorecem a visualização de feições específicas contidas nos dados, entre elas análise derivativa, remoção do contínuo e razão e diferença de bandas.

2.5.1 Análise Derivativa

O método da análise derivativa compreende o realce de feições que se destacam na assinatura espectral de um alvo, tanto em picos de reflectância como bandas de absorção. Essa técnica calcula uma taxa de mudança da reflectância em relação ao comprimento de onda (RUNDQUIST et. al., 1996; HAN, 2005). O conceito de derivada por aproximação finita, que compreende a diferença de reflectância de acordo com uma resolução de banda finita, foi aplicada a dados hiperespectrais por Tsai & Philpot (1998).

Diversos são os trabalhos realizados na área de sensoriamento remoto com dados espectrais que utilizaram técnicas de análise derivativa considerando as variáveis limnológicas sedimentos suspensos e clorofila, entre eles: Chen et. al., 1992; Goodin et. al., 1993; Rundquist et. al., 1996; Arraut et. al., 2005; Han, 2005; Rudorff et. al., 2006, 2007; Giardino et. al., 2007.

Em experimento de laboratório Chen et. al. (1992) concluíram que a utilização da primeira derivada é viável para estimar a reflectância da água em relação a concentração de sedimentos em suspensão. Neste experimento com a aplicação da primeira derivada, a reflectância da água aumentou na primeira feição de absorção (525nm) e diminuiu na segunda e terceira feição de absorção (725nm e 825nm, respectivamente) em função do aumento da concentração de sedimentos.

Goodin et. al. (1993) mostraram que a primeira derivada da reflectância da água apresenta valores mais altos ao longo do espectro para valores de turbidez mais altos e um ordenamento da reflectância em 720nm. Na correlação apresentada entre a primeira derivada

em 720nm e sólidos suspensos mostrou alta correlação ($r = 0,95$). Já a segunda derivada aplicada aos mesmos dados mostra valores muito baixos e remove os efeitos dos sólidos suspensos.

Han (2005) em estudo sobre a concentração de clorofila-*a* concluiu que os espectros de primeira derivada mostram as características de absorção mesmo em condições de vento e efeitos de onda na superfície da água. Rundquist et. al. (1996) correlacionou a primeira derivada da reflectância com diferentes concentrações de clorofila-*a*, encontrando a correlação mais significativa ($r = 0.9948$) em 690nm para as maiores concentrações e para menores concentrações em 483nm ($r = 0.98$).

2.5.2 Remoção do Contínuo

A remoção do contínuo compreende a normalização de uma ou mais feições de absorção do espectro a partir da ligação entre os picos de máxima reflectância do espectro original, ou seja, o contínuo aparente no espectro de reflectância é modelado como uma função matemática usada para isolar uma feição de absorção particular para fins de análise e é removido pela divisão deste pelo espectro de reflectância (CLARK E ROUSH, 1984; KOKALY E CLARK, 1999; CARVALHO JR et. al., 2003). Este procedimento resulta na comparação da absorção com valor de base comum considerando altura e largura da feição, a qual apresenta valores entre 0 e 1 (Figura 2.6).

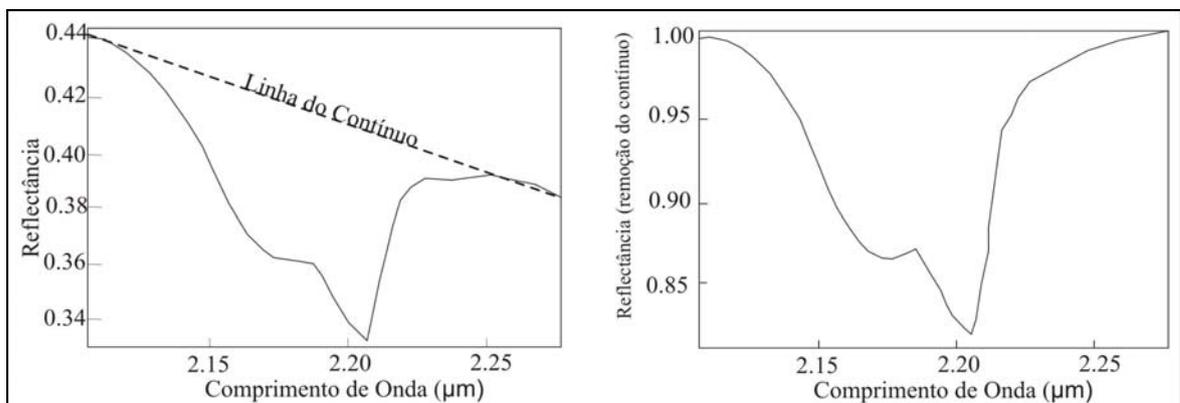


Figura 2.6 – Etapas da remoção do contínuo espectral.

Fonte: Adaptado de Carvalho Jr et. al., 2003.

Como no método de análise derivativa, a remoção do contínuo também está relacionada ao realce de determinadas feições espectrais, compreendendo o realce de bandas de absorção.

Porém comparavelmente a análise derivativa, ainda são poucos os trabalhos desenvolvidos utilizando a análise de remoção do contínuo e estão associados as correlações entre as profundidades de banda determinadas a partir das feições de absorção da reflectância e algum constituinte presente na água.

2.5.3 Razão e diferença de bandas

As operações entre bandas, especificamente nesse trabalho a divisão e a subtração, são utilizadas para realçar as diferenças espectrais caracterizando as feições de uma curva espectral (REIS et. al., 2005). Uma grande parte da bibliografia existente nessa temática está relacionada a imagens de satélite com objetivo de aumentar o contraste entre solo e vegetação, caracterizando os índices de vegetação (NANNI e DEMATTÊ, 2006).

A aplicação desta técnica em corpos hídricos segue o mesmo objetivo de realce espectral em determinadas feições. No entanto, busca-se correlacionar esse resultado com os constituintes presentes na água que podem estar interferindo e variando a resposta espectral que determina as feições da assinatura espectral (LONDE et. al, 2006).

2.6 Water Color Simulator (WASI)

O simulador de cor da água (WASI) é uma ferramenta desenvolvida para analisar e simular espectros comuns, sendo sensível aos diversos tipos de água (GEGE, 2001). Esta ferramenta utiliza modelos de princípios físicos da interação entre a água e o sensoriamento remoto, bem como parâmetros dos constituintes opticamente ativos da água. De acordo com Gege (2005) os principais modelos de espectros utilizados são: absorção, atenuação, reflectância especular, reflectância irradiante, reflectância de sensoriamento remoto, reflectância de fundo, irradiância descendente e radiância ascendente.

O modelo de espectro utilizado para esta pesquisa é a reflectância de sensoriamento remoto que é conceituada por Mobley (1994) como a razão entre a radiância ascendente pela irradiância descendente numa determinada direção (Equação 1), sendo esta uma propriedade óptica aparente que depende do campo de luz (GEGE, 2005).

$$R_{rs}(\theta, \Phi; \lambda) = \frac{L_u(\theta, \Phi; \lambda)}{E_d(\lambda)} \quad (1)$$

Sendo:

$R_{rs}(\theta, \Phi; \lambda)$ = reflectância de sensoriamento remoto medida em uma direção por comprimento de onda;

$L_u(\theta, \Phi; \lambda)$ = radiância da água em uma direção por comprimento de onda;

$E_d(\lambda)$ = energia incidente na água em um determinado comprimento de onda.

2.7 Análise estatística entre dados espectrais e limnológicos

Em estudos de sensoriamento remoto utilizam-se diferentes técnicas que visam complementar informações ou permitir análises mais confiáveis. Nesse sentido ocorre a busca por procedimentos e métodos estatísticos que possam auxiliar na interpretação e comparações entre dados de sensoriamento remoto e limnologia, principalmente por meio de análises estatísticas como correlações e regressões.

Há situações em que algumas variáveis podem apresentar-se altamente correlacionadas sem qualquer relação de causa e efeito, pois as causas são obtidas pelo conhecimento dos processos envolvidos. De acordo com Callegari-Jacques (2003) a correlação é uma medida da intensidade de associação entre duas variáveis quantitativas e é calculado por meio do coeficiente de correlação. A associação entre o conjunto de dados quantificado por meio do grau de correlação entre as amostras, retorna um valor r que varia entre -1 (correlação negativa perfeita) e $+1$ (correlação positiva perfeita).

Considerando a relação entre as variáveis, uma função pode explicar a variação de Y em X , dada por $y = A + Bx$. A regressão linear simples também conhecida como coeficiente de determinação, é o quadrado do coeficiente de correlação e fornece o valor médio de variabilidade de uma variável em função da outra (CALLEGARI-JACQUES, 2003). O diagrama de dispersão mostra a comparabilidade entre duas variáveis e a dispersão nos pares de amostras, onde uma variável X pode ou não ser explicada por uma variável Y .

3. METODOLOGIA

O desenvolvimento da pesquisa iniciou com a busca de referencial teórico sobre os aspectos relevantes ao trabalho. Em seguida definiu-se a área de estudo, o reservatório Passo Real, o qual está inserido no contexto de um projeto maior que contempla o estudo deste e outros reservatórios na bacia hidrográfica do Rio Jacuí. Posteriormente, seguiu-se a sequência metodológica representada na Figura 3.1. Os itens apresentados estão descritos no decorrer do texto.

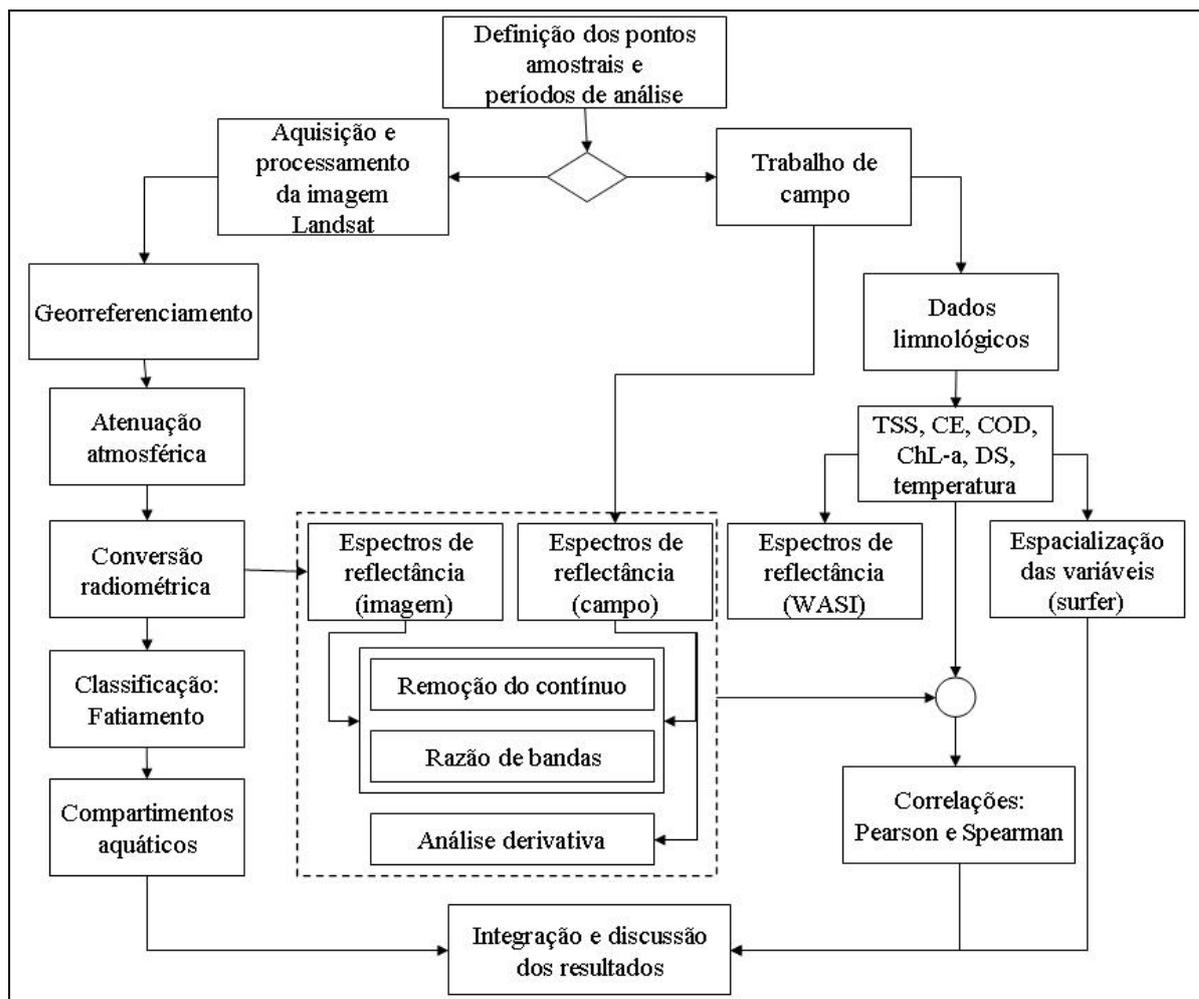


Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia do trabalho.

3.1 Definição dos pontos amostrais e dos períodos de análise

Em função da indisponibilidade de equipamento para coleta dos dados em um ano hidrológico e de acordo com a possibilidade de realizar trabalho de campo para coleta de dados necessários para o desenvolvimento deste estudo, definiram-se quatro períodos de coleta nos meses de setembro de 2008, fevereiro, abril e junho de 2009, contemplando períodos do ano específicos de acordo com o calendário agrícola. Na Tabela 3.1 estão distribuídos os tipos de dados utilizados na análise de acordo com os períodos escolhidos.

Com a definição dos períodos de análise realizou-se a classificação por fatiamento das bandas 2 e 3 do satélite Landsat 5 TM no *software* Spring 4.3 (Figura 3.2) na data de 16 de março de 2008, com a finalidade de determinar os pontos amostrais no reservatório. A partir do resultado escolheram-se aleatoriamente trinta e um pontos que contemplassem todas as diferenças espectrais encontradas no corpo d'água (Figura 3.3).

Tabela 3.1 – Tipos de dados utilizados de acordo com cada período de análise

Mês	Setembro/2008	Fevereiro/2009	Abril/2009	Junho/2009
Tipo de dado				
Dados limnológicos				
Espectros da imagem				
Espectros de campo				
Espectros simulados				

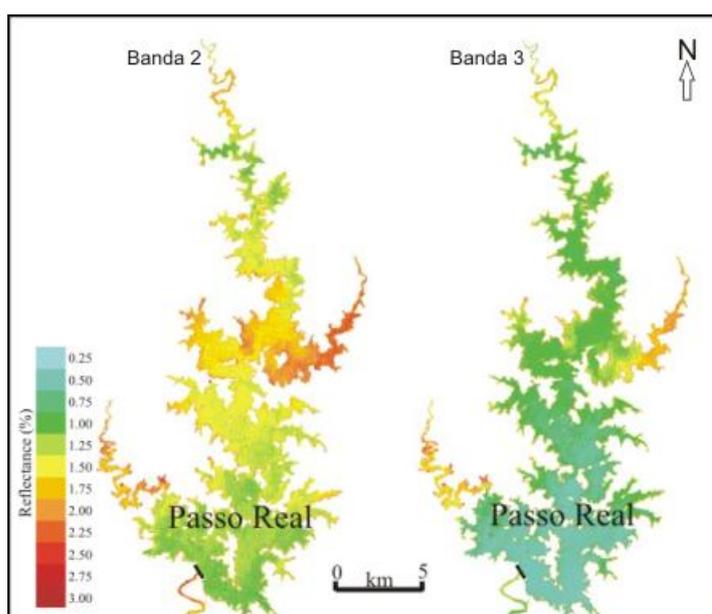


Figura 3.2 – Classificação por fatiamento das bandas 2 e 3 do satélite Landsat 5 TM – imagem do dia 16 de março de 2008 do reservatório Passo Real.

Fonte: Adaptado de Pereira Filho, et. al., 2008.

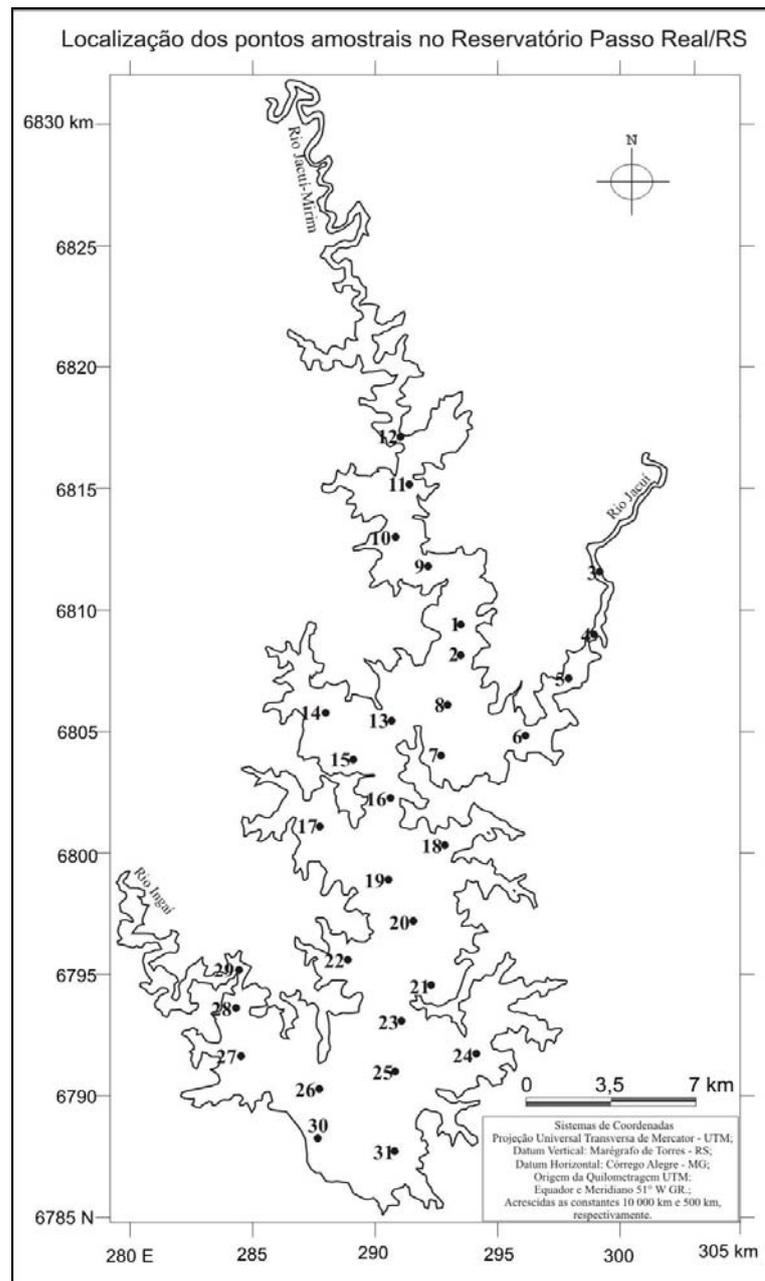


Figura 3.3 – Localização dos pontos amostrais no reservatório Passo Real.

3.2 Aquisição e processamento da imagem Landsat

Para os períodos de análise definidos selecionaram-se imagens do satélite Landsat TM5 mais próximas a data de trabalho de campo não ultrapassando o prazo de um mês considerando o mesmo período para análise de precipitação. Então, adquiriu-se a imagem do satélite Landsat 5 TM com resolução espacial de 30 metros no site da Divisão de Processamento de Imagem (DPI) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Escolheu-se as bandas 1, 2, 3 e 4 em função das suas características específicas para o estudo de corpos hídricos.

Ao buscar imagens de satélite nas datas em que ocorreram os trabalhos de campo encontraram-se problemas relacionados a cobertura de nuvens no mês de setembro e fevereiro dificultando a análise, sendo que por este motivo não se utilizaram estas imagens. Para o mês de junho a imagem disponível correspondia a data de 22 de maio, porém não utilizou-se esta devido a impossibilidade da realização da atenuação dos efeitos da atmosfera possivelmente em função do ângulo de elevação solar. Dessa forma analisou-se somente a imagem de satélite correspondente a data de 04 de abril de 2009, a qual possuía menor cobertura de nuvens e data próxima ao trabalho de campo realizado no mês de abril.

3.2.1 Correção geométrica

A correção geométrica compreende o ajustamento de uma cena por meio da aquisição de pontos de controle em uma imagem ou carta topográfica já georreferenciada, tendo por objetivo localizar a cena em determinado espaço ligada a uma projeção cartográfica.

Este procedimento se realizou no *software* Envi 4.5 selecionando-se as quatro bandas (1, 2, 3 e 4) da imagem do mês de abril. Em seguida selecionou-se o menu *map – registration – image to image*. A partir desta etapa se utilizou uma imagem georreferenciada da mesma área correspondente ao mês de julho de 2007 para a aquisição dos pontos de controle, localizando as coordenadas correspondentes na imagem a ser georreferenciada.

3.2.2 Atenuação atmosférica

Utilizou-se o método de atenuação atmosférica com o propósito de corrigir os efeitos da atmosfera que prejudicam o produto final de reflectância na imagem. No *software* Envi 4.5 selecionou-se as bandas do sensor TM do mês de abril em imagem radiância para corrigir a atenuação da atmosfera. No módulo Flaash utilizando o algoritmo de correção Modtran 4+ definiram-se alguns parâmetros para o modelo de atenuação, entre eles: coordenadas centrais da cena; tipo de sensor; altitude do sensor; tamanho do pixel; data e hora da imagem; altitude da área (reservatório); modelo atmosférico (tropical); modelo de aerossóis (rural) e visibilidade da atmosfera (70km).

Com a aplicação da técnica de atenuação atmosférica são corrigidos os efeitos sobre o alvo. Posteriormente os pixels da imagem são transformados para nível de reflectância e então coletados os espectros de reflectância da água nas quatro bandas selecionadas.

3.2.3 Classificação da imagem

A etapa de classificação é uma fase do processamento de imagem onde são agrupados padrões semelhantes. Nesta pesquisa optou-se por realizar a classificação do corpo hídrico pelo método de fatiamento com o auxílio do *software Envi 4.5*, resultando na compartimentação aquática do reservatório de acordo com o valor de reflectância da água. Este método corresponde a uma classificação de imagem simples, pois é aplicado apenas em uma banda espectral.

A imagem processada corresponde a data de 04 de abril de 2009, devido a proximidade da data de trabalho de campo e em função de não apresentar cobertura de nuvens na área de interesse da cena. Escolheu-se as bandas 2 e 3 da imagem para realizar o processamento, pois de acordo com Novo (2008) a banda 2 tem maior sensibilidade a reflectância no verde e a banda 3 possibilita distinguir solo exposto, características que podem influenciar na reflectância do corpo d'água.

Para a etapa de classificação da imagem, na ferramenta *Overlay – density slice* selecionou-se primeiramente a banda 2 e se definiram as classes dos valores de reflectância de acordo com o valor mínimo e máximo da matriz de reflectância (0 e 28%, respectivamente) encontrado no corpo de água da banda selecionada. Após a definição dos parâmetros aplicou-se a classificação, a qual permitiu definir os principais compartimentos aquáticos do reservatório nesta banda. O mesmo procedimento e a definição dos mesmos parâmetros se utilizou para a classificação da banda 3.

3.3 Trabalho de campo

Os trabalhos de campo se realizaram nos meses de setembro de 2008, fevereiro, abril e junho de 2009, nos quais se coletaram as medidas de reflectância da água *in situ* (setembro), as amostras de água para realizar as medidas de variáveis limnológicas em laboratório (setembro, fevereiro, abril e junho) e fotografias digitais para a comprovação das diferenças

na cor da água. A coleta dos dados no mês de setembro realizou-se em apenas uma porção do reservatório incluindo os afluentes Jacuí e Jacuí Mirim e a mistura desses ambientes totalizando oito pontos amostrais. Nos demais trabalhos de campo os dados adquiridos correspondem aos trinta e um pontos amostrais pré-definidos pela compartimentação aquática, com auxílio de GPS (*Global Position System*) para localização.

3.3.1 Coleta de dados de reflectância

A coleta dos dados espectrais coletados em campo no mês de setembro de 2008 se realizou a partir do espectroradiômetro FieldSpec® HandHeld, fornecido pelo INPE. A metodologia de coleta dos espectros de reflectância para a superfície da água é descrita por Steffen et. al. (1993). Em todos os pontos amostrais onde são coletados os espectros de reflectância exige-se a calibração e em seguida a otimização do espectroradiômetro apontando o detector para uma placa de referência com cobertura de sulfato de bário. Na coleta do fator de reflectância da água o espectroradiômetro é ajustado para realizar a tomada de pelo menos três espectros de reflectância a fim de minimizar os efeitos da movimentação da superfície.

Após a calibração e otimização anterior a coleta de cada ponto, apontando-se o aparelho com ângulo de visada de $\alpha = 45^\circ$ para a superfície da água o sensor reconhece os valores de reflectância emitido pelo alvo na faixa de comprimentos de onda de 325 a 1075nm no visível e infravermelho próximo. Após a coleta e o armazenamento desses dados, é realizado o processamento dos mesmos gerando as curvas de reflectância utilizando os dados entre 400-900nm em função da presença de ruídos em comprimentos de onda inferiores e superiores a este limite.

Os procedimentos para a coleta dos espectros de reflectância da água por meio da imagem de satélite se realizaram no *software* Envi 4.5, possibilitando a atenuação dos efeitos atmosféricos e a conversão da imagem de valor de radiância para reflectância. Em posse da matriz de reflectância coletaram-se os valores correspondentes a cada ponto amostral. Gerou-se o gráfico em quatro comprimentos de onda (485nm, 550nm, 660nm e 830nm) correspondentes ao centro das bandas 1, 2, 3 e 4, respectivamente, do sensor TM – Landsat 5.

Com a ausência de dados de campo hiperespectrais que englobassem toda a área do reservatório nos demais meses estudados e a disponibilidade de um aplicativo simulador da cor da água, se realizou a simulação de dados espectrais por meio do Water Color Simulator (WASI), para o qual os procedimentos são explicados separadamente.

3.3.2 Variáveis limnológicas

As variáveis limnológicas foram adquiridas em todos os meses estudados, com ressalva para o mês de setembro de 2008, no qual o trabalho de campo realizado não contemplou todos os pontos amostrais pré-selecionados e por isso não existem todos os dados limnológicos. As variáveis medidas em campo foram temperatura da água e transparência (disco de Secchi – DS), enquanto imediatamente após o trabalho de campo mediram-se a condutividade elétrica (CE) e potencial hidrogeniônico (pH). Em laboratório adotou-se os procedimentos para a determinação do total de sólidos suspensos (TSS), carbono orgânico dissolvido (COD) e clorofila-*a* (Chl-*a*).

3.3.2.1 Total de sólidos suspensos

Para os estudos da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo (CETESB) os sólidos que estão presentes nas águas correspondem a toda matéria que permanece como resíduo, após evaporação, secagem ou calcinação de uma amostra a uma temperatura pré-estabelecida durante um tempo fixado. A secagem, calcinação e filtração definem as diversas frações de sólidos presentes na água (sólidos totais, em suspensão, dissolvidos, fixos e voláteis).

Em trabalho de campo no reservatório Passo Real coletaram-se amostras de um litro (1L) de água em todos os pontos de estudo para a realização da filtração e determinação do total de sólidos em suspensão em nível de laboratório. Para a filtração em laboratório utilizou-se filtros de celulose de 0,45µm e filtros de microfibras de vidro com retenção de 0,8 a 8,0µm, os quais foram secados previamente por 24 horas em estufa a uma temperatura de 50°C, a fim de eliminar a umidade. Posteriormente a secagem pesaram-se os filtros para obtenção do peso inicial.

Após a realização da filtração, colocaram-se novamente os filtros na estufa na mesma temperatura e tempo de permanência utilizado para a obtenção do peso inicial. Completando 24 horas de secagem, esses filtros passaram ao processo de pesagem obtendo-se o peso final. A partir disso foi possível determinar o TSS para cada amostra com a equação (2) aplicada por Wachholz (2007):

$$TSS = [Pf - Pi / V] \times 1000 \quad (2)$$

Sendo:

TSS - Total de Sólidos em Suspensão

P_f - Peso Final (g)

P_i - Peso Inicial (g)

V - Volume (L)

Para a separação de sólidos orgânicos e inorgânicos em suspensão utilizou-se os filtros de microfibras de vidro. Após a determinação do TSS, os filtros passaram pelo processo de calcinação a uma temperatura de 480°C durante uma hora em mufla. Em seguida pesaram-se os filtros obtendo-se o peso de calcinação. Após essa etapa foi obtido o valor de SOS pela equação (3) utilizada por Wachholz (2007):

$$SOS = [(Pf - P_{cal}) \times 1000] / V \quad (3)$$

Sendo:

SOS – Sólidos orgânicos em suspensão

P_f – Peso final (g)

P_{cal} – Peso de calcinação (g)

V – Volume (L)

Por fim, obteve-se o SIS (Sólido Inorgânico em Suspensão) pela diferença entre o TSS e o SOS.

3.3.2.2 Carbono orgânico dissolvido

Para a determinação do COD foram filtrados 150 ml da água coletada em campo em filtro de celulose de 0,45 µm. Armazenou-se o filtro em estufa para a determinação do TSS, enquanto a água filtrada (150ml) colocou-se em *erlenmeyer* e armazenou-se em estufa a 80°C até sua total evaporação.

Após a evaporação da água deixando apenas o resíduo no fundo do frasco, adicionou-se: 10 ml de solução de dicromato de potássio a 2% usando pipeta volumétrica de 10 ml e 5 ml de ácido sulfúrico (H₂SO₄) concentrado. Em seguida, cobriram-se os *erlenmeyers* com vidro e colocou-se na estufa a ± 105°C durante 1 hora. Depois de retirados da estufa

adicionou-se 4 ml de ácido fosfórico (H_3PO_4 concentrado) e 5 gotas de difenilamina. A titulação se realizou com 25ml de sulfato ferroso amoniacal e o resultado final mostrou tonalidade azul para verde bandeira.

Concomitante aos procedimentos de laboratório para as amostras de campo foram realizados cálculos padrões utilizando os mesmos procedimentos e mesmas medidas, porém sem amostra de resíduo no *erlenmeyer*. O cálculo do COD realizou-se com a aplicação da equação (4), aplicada pelo Instituto de Biologia (UFBA).

$$COD (mg/L) = (V_1 - V_2) \times 0,615 \times \frac{10 \times 0,5}{0,2 \times X} \times \frac{1000}{Vol. Am.} \quad (4)$$

Sendo:

V_1 = Volume gasto no sulfato ferroso na titulação do padrão

V_2 = Volume do sulfato ferroso gasto na titulação das amostras

0,615 = constante

10 = alíquota usada do $K_2Cr_2O_7$ 0,5N para a titulação com sal de Mohr

0,5 = concentração do dicromato de potássio

0,2 = concentração do sal de Mohr

X = volume gasto do sal de Mohr na titulação do padrão de $K_2Cr_2O_7$ 0,5N

Vol. Am. = Volume da amostra utilizado na análise (ml)

1000 = constante

3.3.2.3 Transparência da água

Em trabalho de campo nos pontos amostrais previamente definidos pela compartimentação aquática do reservatório observou-se a transparência da água com a utilização do disco de Secchi (DS). Para a realização desta medida são observados principalmente dois fatores: pouca ou nenhuma ondulação na água e a não interferência de sombra, para que o dado não seja alterado.

Considerando esses fatores esta medida se realizou a partir da leitura da profundidade que o disco de cor branca, com diâmetro aproximado de 25cm (DS), atinge um determinado nível de água quando não é possível ser observado pela visão do pesquisador.

3.3.2.4 Condutividade elétrica

As amostras de água do reservatório foram transportadas para o laboratório logo após a finalização do trabalho de campo e em seguida realizou-se a medida de condutividade elétrica com o condutivímetro ORION 815, calibrado com solução padrão 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

3.3.2.5 Temperatura da água

Com a coleta das amostras de água no reservatório realizou-se a medida da temperatura da água no momento da coleta com o termômetro digital portátil modelo TE-400.

3.3.2.6 Clorofila-*a*

Nos trabalhos de campo dos meses de fevereiro, abril e junho utilizaram-se as amostras de água também para a determinação de clorofila-*a*. A primeira etapa correspondeu a filtragem de 300 ml de água em filtro de fibra de vidro. Logo após a filtragem, acondicionaram-se os filtros em papel alumínio e colocou-se em recipientes de vidro escuro (âmbar) mergulhando-os em 10 ml de metanol. Em seguida armazenou-se em geladeira por um período de 24 horas.

Após o período de 24 horas, calibrou-se o espectrofotômetro com a solução de metanol e realizou-se a leitura dos filtros em dois comprimentos de onda, 663 e 750nm. Após a leitura, aplicaram-se os valores encontrados na equação (5).

$$Chl-a = \frac{(abs\ 663nm - abs\ 750nm) \times 12,63 \times Vm \times 1000}{Vf} \quad (5)$$

Sendo:

Abs – absortância

12,63 - Constante

V_m – volume metanol (10ml)

1000 - Constante

V_f - volume filtrado (300ml)

3.3.3 Espacialização das variáveis limnológicas

A partir das coordenadas geográficas coletadas em trabalho de campo (latitude e longitude) e os valores obtidos em laboratório para cada variável limnológica em cada período, transferiu-se as tabelas para o aplicativo Surfer 8. Com os dados das tabelas correspondentes a latitude, longitude e o valor da variável em cada ponto (x, y e z, respectivamente) fez-se a interpolação desses valores por meio da krigagem gerando arquivos *grid* que possibilitaram a espacialização de cada variável.

Na espacialização definiu-se a escala de valores de acordo com o mínimo e máximo de cada variável para que todos os períodos tivessem a mesma escala de representação com a finalidade de facilitar a interpretação. Após a espacialização dos pontos em superfície aplicou-se a máscara correspondente ao limite do reservatório.

3.3.4 Dados de precipitação

Com o objetivo de complementar as análises dos dados relacionados com as datas que ocorreram os trabalhos de campo, considerou-se os dados de precipitação na área do reservatório com 30 dias de antecedência à data de trabalho de campo. Os dados foram buscados por meio do endereço da Defesa Civil do Estado do Rio Grande do Sul, no qual são realizadas leituras de precipitação diária na maioria dos municípios, utilizando pluviômetro com capacidade de armazenamento de 130 mm e área de captação de 15cm², o qual pode apresentar erro de até 10%.

Em função da grande área ocupada pelo reservatório abrangendo mais de um município, os dados de precipitação corresponderam a 4 municípios que estão localizados as margens do reservatório e contemplam maior parte da área do entorno, sendo Quinze de Novembro (nordeste), Fortaleza dos Valos (oeste), Campos Borges (Leste) e Salto do Jacuí (Sul). A partir dos dados coletados compreendendo 30 dias anteriores a data do trabalho de campo, calculou-se a média aritmética de precipitação dos municípios para cada dia.

3.4 Simulação Water Color Simulator (WASI)

O aplicativo WASI (Water Color Simulator) simulou os espectros de reflectância da água em cada ponto amostral no reservatório. Esse simulador oferece a resposta espectral da água de acordo com diferentes parâmetros que são atribuídos pelo usuário, considerando modelos de reflectância e variáveis opticamente ativas da água.

Ao instalar o aplicativo escolheram-se os algoritmos correspondentes ao modelo de espectro a ser utilizado, neste caso o modelo de reflectância de sensoriamento remoto. Após escolher o modelo, o aplicativo oferece uma tela de parâmetros a serem completados com os dados limnológicos, incluindo: total de fitoplâncton, partículas largas (sólidos inorgânicos em suspensão), partículas finas (sólidos orgânicos em suspensão), matéria orgânica (carbono orgânico dissolvido) e temperatura.

Os dados limnológicos que se utilizaram corresponderam a cada ponto amostral do reservatório e após a geração do espectro de reflectância, exportou-se o arquivo do WASI importando-o no Excel. Este procedimento se realizou para todos os pontos amostrais que continham informação dos parâmetros necessários nos meses de fevereiro, abril e junho de 2009.

3.5 Processamento dos dados de reflectância

A coleta dos dados de reflectância em campo no mês de setembro permitiu a manipulação e análise descritiva e qualitativa destes dados com a utilização de diferentes técnicas, como remoção do contínuo, análise derivativa e razão e diferença de bandas, correlacionando-as posteriormente com as variáveis limnológicas. Para os dados da matriz de reflectância da imagem de satélite do mês de abril aplicaram-se as técnicas de remoção do contínuo e razão de bandas, as quais também foram correlacionadas com os dados limnológicos. Para a reflectância simulada no WASI realizou-se somente as análises descritivas dos espectros dos pontos amostrais nos três meses simulados. As técnicas para dados espectrais não foram aplicadas em função desses dados simulados não terem sido testados.

Os dados de reflectância coletados em campo e simulados no WASI apresentaram ruídos e por este motivo aplicou-se o método de suavização hiperespectral chamado filtro de média móvel. Esse filtro consiste no cálculo do valor espectral de pontos considerando um

intervalo definido a partir de um ponto médio (Tsai & Philpot, 1998). Neste trabalho realizaram-se testes com a média de três pontos, porém os resultados não foram satisfatórios, sendo então utilizada a média de sete pontos.

3.5.1 Remoção do contínuo

A remoção do contínuo é a normalização de dados de reflectância fazendo com que se destaquem as bandas de absorção presentes nas curvas espectrais originais. Importando os dados de reflectância coletados em campo e na imagem para o *software* Envi e selecionando-se a ferramenta *continual removal*, o gráfico é gerado automaticamente. Para este procedimento utiliza-se a equação (6).

$$E_{cr} = E_o/E_c \quad (6)$$

Sendo:

E_{cr} – espectro do contínuo removido;

E_o – espectro original;

E_c – curva do espectro contínuo.

Após realizar a remoção do contínuo, os dados processados foram exportados do *software* Envi e importados no Excel onde se calculou a profundidade de banda a partir da equação (7) e a área da banda de absorção (A_p) considerando a equação (8).

$$P_b = 1 - E_{cr} \quad (7)$$

Sendo:

P_b – profundidade de banda;

E_{cr} – espectro do contínuo removido.

$$A_p = \sum \frac{(\rho_{i+j} + \rho_i)}{2} * (\lambda_{i+j} - \lambda_i) \quad (8)$$

Sendo:

A_p = área da feição de absorção;

ρ = valor espectral do contínuo removido;

λ = comprimento de onda correspondente ao valor do contínuo.

3.5.2 Análise derivativa

As feições de mudanças bruscas no espectro original de reflectância da água podem ser atribuídas a absorção ou espalhamento de determinados componentes opticamente ativos. Nesse sentido, a técnica de análise derivativa é um instrumento que visa derivar esta feição em função do comprimento de onda que ocorre.

Neste trabalho, utilizou-se a análise derivativa a fim de realçar essas feições encontradas no espectro de reflectância da água no mês de setembro de 2008 e correlacioná-la com as variáveis limnológicas coletadas na data do trabalho de campo no reservatório. Para isso se utiliza uma aproximação numérica entre duas bandas ou pontos sucessivos, representada na equação (9).

$$\left. \frac{ds}{d\lambda_i} \right| \sim \frac{s(\lambda_j) - s(\lambda_i)}{\Delta\lambda} \quad (9)$$

Sendo:

ds – derivada espectral

s – sinal verdadeiro da reflectância (λ_j – maior comprimento de onda e λ_i – menor comprimento de onda)

$\Delta\lambda$ – separação entre as bandas adjacentes ($\Delta\lambda = \lambda_j - \lambda_i$), constante.

3.5.3 Razão e diferença de bandas

Nos dados de reflectância do mês de setembro de 2008 e nos dados da imagem coletados para o mês de abril de 2009 aplicou-se a técnica de razão de bandas, correlacionando seus resultados com as variáveis limnológicas nessas duas datas. Esta técnica é determinada por meio da razão entre dois valores de reflectância correspondentes a um comprimento de onda, expressa na equação (10).

$$R = \frac{\rho\lambda>}{\rho\lambda<} \quad (10)$$

Sendo:

R – razão de bandas;

$\rho\lambda>$ - reflectância no comprimento de onda maior;

$\rho\lambda<$ - reflectância no comprimento de onda menor.

Da mesma forma, com a finalidade de testar as correlações com dados limnológicos, calculou-se a diferença de bandas para os dados de reflectância coletados em campo. Este procedimento é realizado calculando-se a diferença entre dois comprimentos de onda determinados.

3.6 Técnicas estatísticas

A técnica de correlação de *Pearson* foi utilizada a fim de estabelecer relação entre os dados das variáveis limnológicas com os resultados de reflectância obtidos a partir da imagem Landsat e pelas técnicas de processamento para estes dados espectrais. Este procedimento é realizado por meio do aplicativo Excel e mede o quanto duas variáveis tendem a variarem juntas. Além de gerar valores em tabela, elaborou-se o correlograma, que consiste em um diagrama cartesiano onde nas abscissas são locadas as ordens dos coeficientes de correlação das séries e nas ordenadas o valor desses coeficientes. O valor do resultado para as diferentes formas de demonstração dos dados estará sempre entre -1 (correlação negativa) e +1 (correlação positiva), sendo o valor 0 (zero) ausência de correlação.

Para avaliar a significância do nível de correlação encontrado nos dados formularam-se as hipóteses $h = 0$ onde não há correlação e $h \neq 0$ onde há correlação e considerou-se a distribuição t de Student, o qual retorna um valor t correspondente a um determinado nível de significância. Neste trabalho utilizou-se um erro médio de 5% correspondente a um nível de significância $\alpha = 95\%$. Neste teste, quando o valor do t calculado a partir do dado de correlação encontrado entre duas variáveis é maior que o valor encontrado na tabela t Student, pode-se afirmar que a correlação entre os dados é estatisticamente significativa (CALLEGARI-JACQUES, 2003).

Para correlacionar os dados de reflectância adquiridos em trabalho de campo e os dados limnológicos correspondentes a coleta do mês de setembro utilizou-se o método de correlação para postos de *Spearman*, o qual é um método não-paramétrico que não considera a distribuição em função de uma curva normal. É calculado pela diferença entre os postos, ordenando os valores das variáveis em ordem crescente e sua correlação aumenta quando postos baixos em x estão relacionados a postos baixos em y .

Escolheu-se esse teste de correlação para postos de *Spearman* devido ao tamanho da população amostrada (8 pontos) ser relativamente baixa e por não satisfazer as condições da aplicação da correlação de *Pearson*. A correlação de *Spearman* retorna um valor r_s entre -1 e +1, da mesma forma que a correlação de *Pearson*. Para testar se o resultado r_s reflete a tendência de correlação entre os dados foram considerados níveis de significância maiores ou igual a 90% e utilizando a tabela de valores críticos de r_s observaram-se os resultados.

Além das técnicas de correlação elaboraram-se gráficos de dispersão no aplicativo Excel, que retornam um r^2 sobre a tendência entre duas variáveis. Os dados utilizados para a elaboração dos diagramas compreendem os valores mais significativos entre os dados de reflectância, derivada e profundidade de banda de acordo com cada uma das variáveis limnológicas encontrados a partir das análises de correlação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O reservatório Passo Real apresenta uma das maiores áreas artificialmente alagada de uma das principais bacias hidrográficas do estado do Rio Grande do Sul e possui rios importantes que originam este corpo de água (Rio Jacuí, Jacuí Mirim e Ingaí), os quais apresentam entre eles diferenças visíveis na tonalidade da água. Esta observação pode ser comprovada pelas imagens registradas nos trabalhos de campo realizados nos meses de abril (17/04/2009) e junho (06/06/2009). As fotografias digitais dos pontos amostrais 11 e 31 foram adquiridas no mês de abril, enquanto as demais no mês de junho (Figura 4.1).

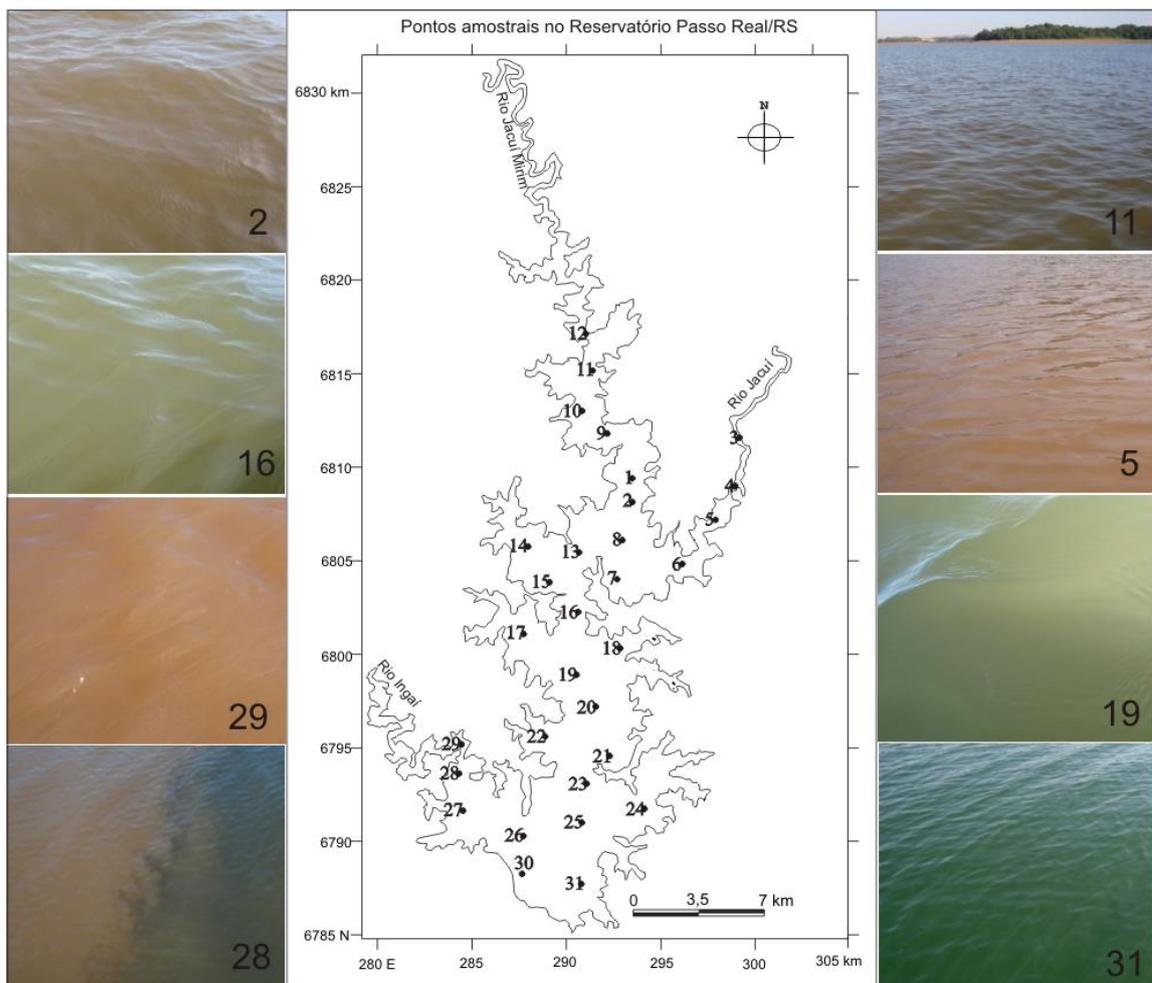


Figura 4.1 – Representação das diferentes tonalidades da cor da água no reservatório Passo Real – RS indicadas pelos números correspondentes aos pontos amostrais distribuídos no mapa.

Pode ser observado que nos pontos amostrais localizados nos afluentes que integram o reservatório (2 e 11 – Rio Jacuí Mirim, 5 – Rio Jacuí e 29 – Rio Ingaí), a cor da água apresenta características da presença de sedimentos com a tonalidade mais escura nesses pontos, sendo mais destacada no Rio Jacuí e Ingaí. Os pontos 16 e 19 possuem semelhanças entre si em relação a tonalidade mais clara e homogênea da água, correspondente a área intermediária do reservatório. No ponto 31, localizado próximo ao dique, a cor da água se configura mais clara e limpa. Por fim, no mês de junho observou-se a entrada da água de tonalidade mais escura provinda do Rio Ingaí (ponto 29) para a área de maior volume de água (ponto 28), resultando no encontro desses dois tipos de ambientes.

4.1 Dados limnológicos

No trabalho de campo realizado no reservatório Passo Real no mês de setembro de 2008 foram coletadas amostras de água para determinar em laboratório as variáveis limnológicas TSS, CE e pH, bem como as que foram observadas ainda em campo, como o DS e temperatura da água. Nos meses de fevereiro, abril e junho de 2009 determinaram-se as mesmas variáveis, além da Chl-*a* e COD.

A análise dos dados limnológicos está relacionada com diversos outros fatores entre eles a precipitação, fato que concorda com Ford (1990) e Thornton (1990) quando estes relacionam o aumento de sedimentos suspensos e outras matérias particuladas aos eventos de chuva e conseqüente elevação do fluxo de água no reservatório. A Figura 4.2 apresenta a precipitação diária em 30 dias anteriores à data de trabalho de campo. Esta avaliação corresponde aos quatro meses de coleta de dados e demonstra a diferença dos fenômenos de chuva ocorridos na área.

No mês de setembro o trabalho de campo de reconhecimento da área ocorreu no dia 04, portanto os dados observados na Figura 4.2 apresentam a precipitação diária ocorrida a partir do dia 04 de agosto até o dia 04 de setembro. A ocorrência de chuva mais próxima da data de trabalho de campo corresponde ao dia 28 de agosto, seis dias antes do trabalho de campo. A precipitação neste dia foi baixa (10mm) e possivelmente não apresentou diferença significativa para a resposta na água do reservatório.

No mês de fevereiro o trabalho de campo ocorreu no dia 06, então os dados apresentados no gráfico correspondem a precipitação diária desde o dia 06 de janeiro. No quarto dia do mês de fevereiro (dois dias antes do trabalho de campo) foi registrado 25

milímetros de chuva, o que pode ter determinado o resultado de algumas variáveis em função da proximidade da data de ocorrência de precipitação com a data do trabalho de campo.

O período de precipitação analisado para a data do trabalho de campo realizado no mês de abril (17/04/2009) pode ser avaliado como período de estiagem, pois a ocorrência de chuva mais significativa nos 30 dias considerados para análise aconteceu 20 dias antes do trabalho de campo e precipitação de 20mm. Este fator pode gerar respostas em relação à presença de sólidos suspensos no reservatório por um pequeno intervalo de tempo após o fenômeno da chuva, não sendo observado nos dados coletados no trabalho de campo do mês de abril. A ocorrência de estiagem anterior a data de trabalho de campo no mês de abril pode ter influenciando o aumento da medida de transparência da água, processo inverso ao encontrado em períodos com precipitação.

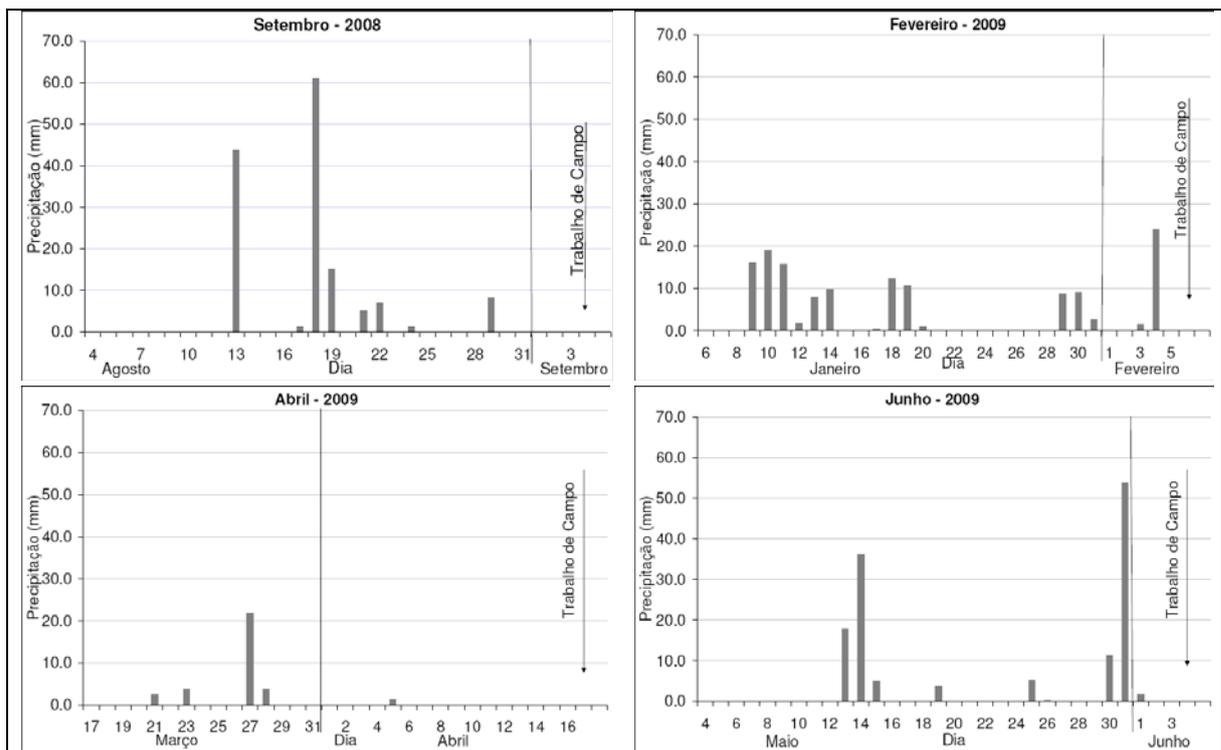


Figura 4.2 – Precipitação diária em 30 dias anteriores aos trabalhos de campo nos meses de setembro de 2008 e fevereiro, abril e junho de 2009.

Em junho o trabalho de campo foi realizado no dia 04, sendo que a precipitação anterior ocorreu no dia 31 de maio, quatro dias antes do trabalho de campo com precipitação mais significativa (55mm) em relação aos demais períodos. Este fenômeno de chuva pode ter alterado as medidas limnológicas da água, principalmente o TSS devido ao transporte de solo

e outros materiais do entorno para o interior do reservatório (FORD, 1990; THORNTON, 1990), consequentemente influenciando na diminuição da transparência da água.

4.1.1 Condutividade elétrica

A partir dos dados adquiridos das amostras de água, observa-se na Figura 4.3 a variação da condutividade elétrica (CE) em cada ponto amostral de acordo com os meses estudados e na Figura 4.4 a espacialização desses dados no interior do reservatório.

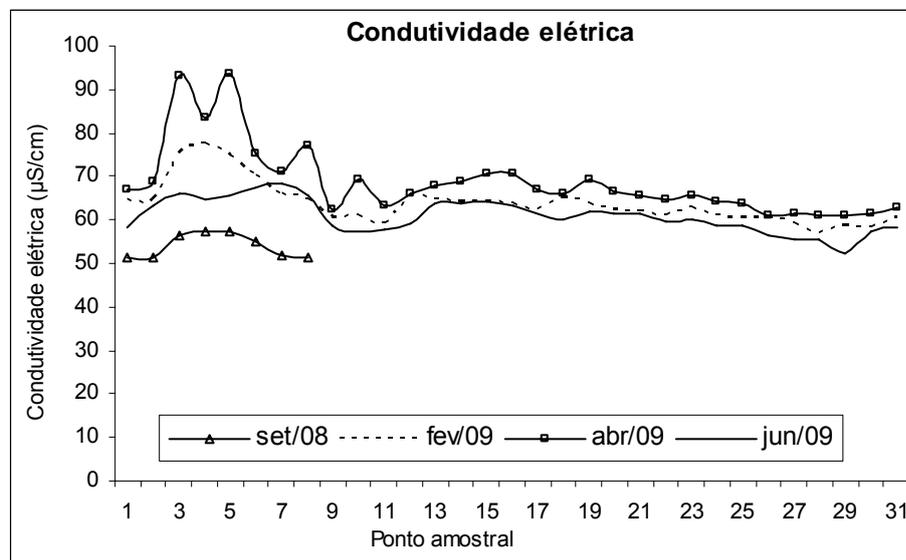


Figura 4.3 – Distribuição da CE no reservatório nos meses de setembro de 2008 e fevereiro, abril e junho de 2009.

Os dados demonstram que nos meses de fevereiro e abril as maiores taxas de condutividade elétrica estão localizadas no Rio Jacuí (pontos amostrais 3, 4 e 5) misturando-se aos valores médios encontrados na mistura dos Rios Jacuí e Jacuí Mirim (pontos 6, 7 e 8). Em todas as datas, as menores taxas são observadas onde se encontra o maior volume de água e também no afluente mais próximo ao dique, Rio Ingaí. A presença dos maiores valores de CE no Rio Jacuí pode estar relacionada à maior área da bacia de captação, favorecendo a entrada em maior quantidade de íons na água.

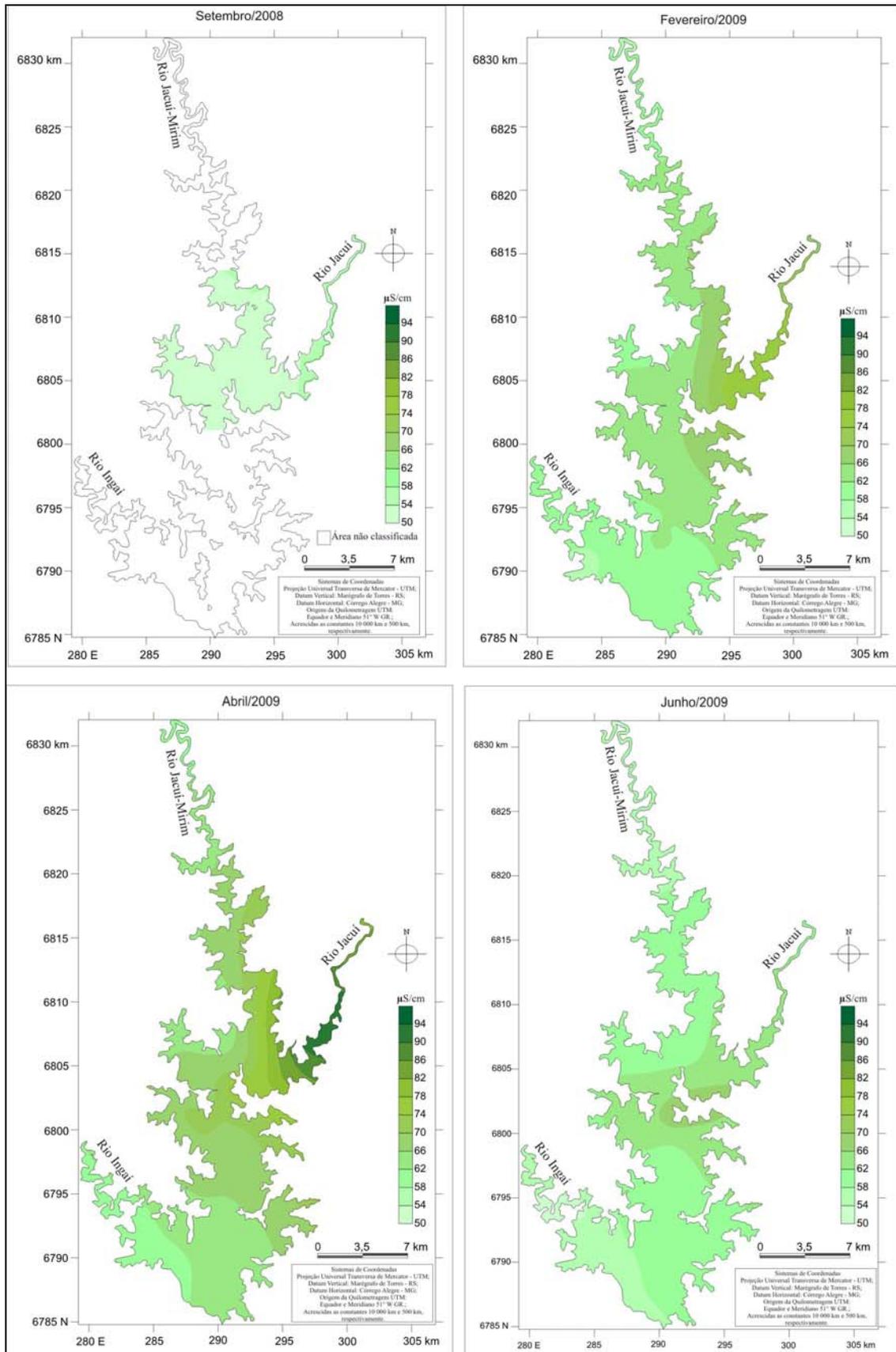


Figura 4.4 – Espacialização da CE no reservatório nos meses de Setembro de 2008 e Fevereiro, Abril e Junho de 2009.

No mês de abril as taxas de condutividade elétrica no reservatório aumentaram em todos os pontos (máximo de $78\mu\text{S}/\text{cm}$ em fevereiro e $94\mu\text{S}/\text{cm}$ em abril) seguindo a mesma distribuição encontrada no mês de fevereiro. Um dos fatores que pode ter influenciado o aumento da média desta variável foi a elevação do pH no mesmo período. Em junho as taxas diminuíram em todo o reservatório mantendo as maiores médias na porção da foz do Rio Jacuí e na parte central do reservatório.

Considerando a alta taxa de CE no reservatório no mês de abril observaram-se os valores do pH, por ser este um dos parâmetros que pode estar associado a CE. A Figura 4.5 mostra a variação nos meses que foram realizados os trabalhos de campo, destacando em todos os pontos amostrais o pH mais elevado e maior que 7 (básico) no mês de abril, enquanto no mês de fevereiro os valores variaram muito entre ácido e básico. Nos pontos amostrados em setembro o pH manteve-se abaixo de 7 e em junho apresentou-se acima de 7 na maior parte do reservatório.

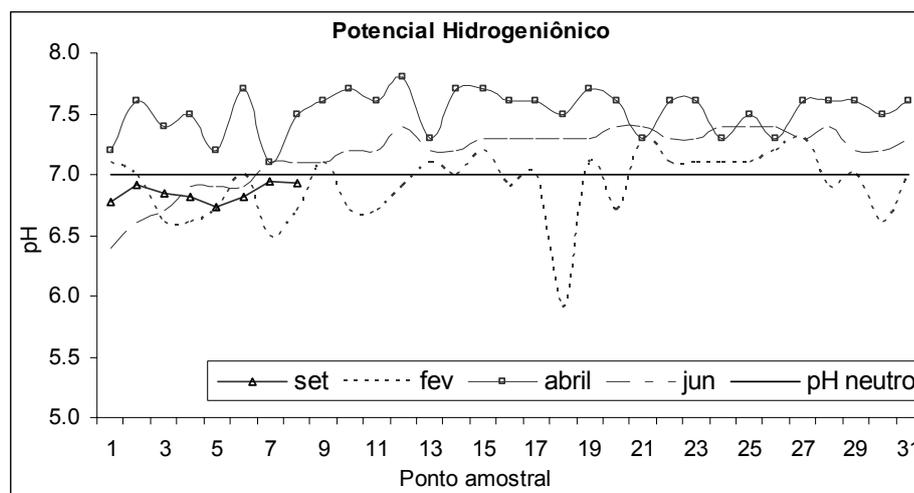


Figura 4.5 – Distribuição do pH no reservatório nos meses de setembro de 2008 e fevereiro, abril e junho de 2009.

4.1.2 Carbono orgânico dissolvido

O carbono orgânico dissolvido (COD) relaciona-se com a quantidade de matéria orgânica encontrada no corpo hídrico provinda da decomposição de materiais vegetais e animais submersos (ESTEVES, 1998). Uma das principais formas do COD encontrado em reservatórios são as substâncias húmicas originadas principalmente pela comunidade planctônica.

A distribuição da variável COD no reservatório Passo Real (Figuras 4.6 e 4.7) nos meses de fevereiro e junho apresentou menor variação em comparação ao mês de abril, encontrando-se as médias mais altas em fevereiro e junho na porção intermediária do Rio Jacuí Mirim e na porção central do reservatório. No mês de abril ocorreram as mesmas variações dentro do reservatório, porém com médias de COD mais altas (8mg/L) em comparação com as outras datas.

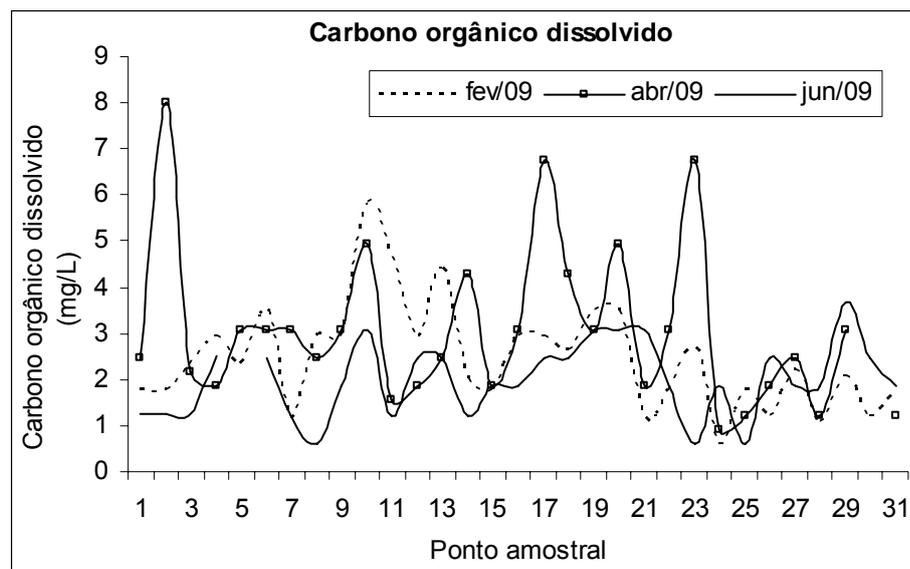


Figura 4.6 – Distribuição do COD no reservatório nos meses de fevereiro, abril e junho de 2009.

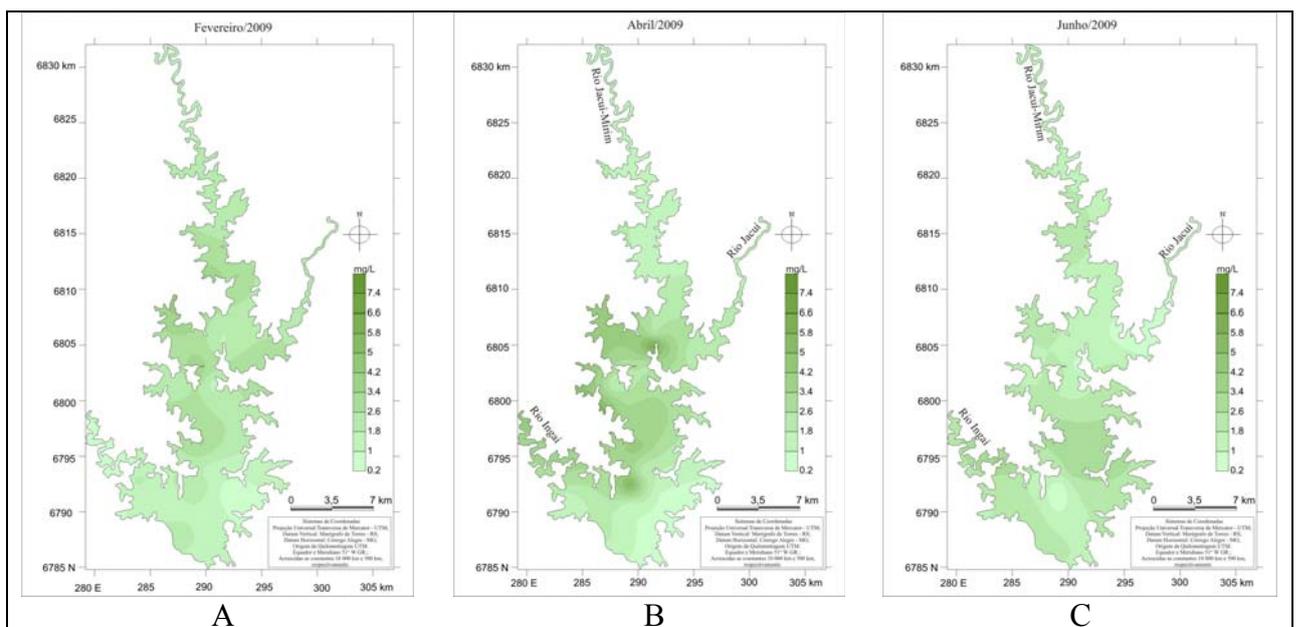


Figura 4.7 – Espacialização do COD no reservatório nos meses de Fevereiro (A), Abril (B) e Junho (C) de 2009.

4.1.3 Transparência da água

A transparência da água do reservatório é maior próximo ao dique onde se encontra grande volume de água. Nos afluentes Jacuí e Jacuí Mirim encontram-se os menores valores de transparência, chegando ao mínimo de 11cm no mês de junho (Figura 4.8). A distribuição das medidas em função da localização no reservatório pode ser explicada devido a medida de menor transparência ocorrer onde a água ainda tem maior movimento (deságue dos afluentes no reservatório) possuindo maior capacidade de transportar sólidos em suspensão e apresentar menor transparência. Ao contrário, no interior do reservatório o maior volume de água e as características de ambiente lântico favorecem a deposição de materiais no fundo e conseqüentemente a água se torna mais transparente.

Nos meses estudados a variável transparência tem distribuição semelhante nos Rios Jacuí e Jacuí Mirim variando o valor médio para cada mês, sendo que o mês de junho apresentou as menores transparências. Nos pontos localizados na porção central do reservatório, a média da transparência da água não apresentou grande variação e encontrou-se maior transparência, enquanto no Rio Jacuí e Ingaí a transparência encontrada caracteriza-se por valores menores. Em junho a transparência apresentou-se menor em toda a área do reservatório (Figura 4.9).

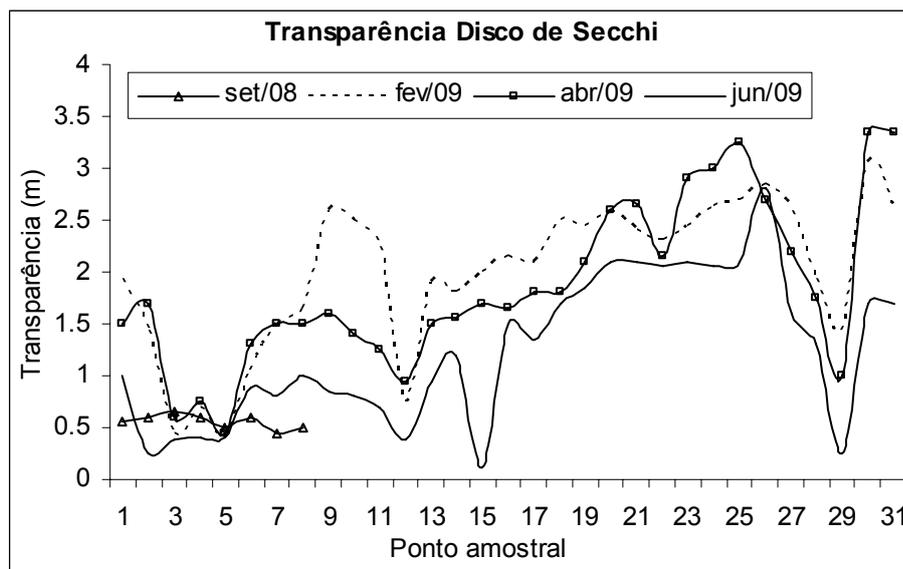


Figura 4.8 – Distribuição da Transparência no reservatório nos meses de setembro de 2008, fevereiro, abril e junho de 2009.

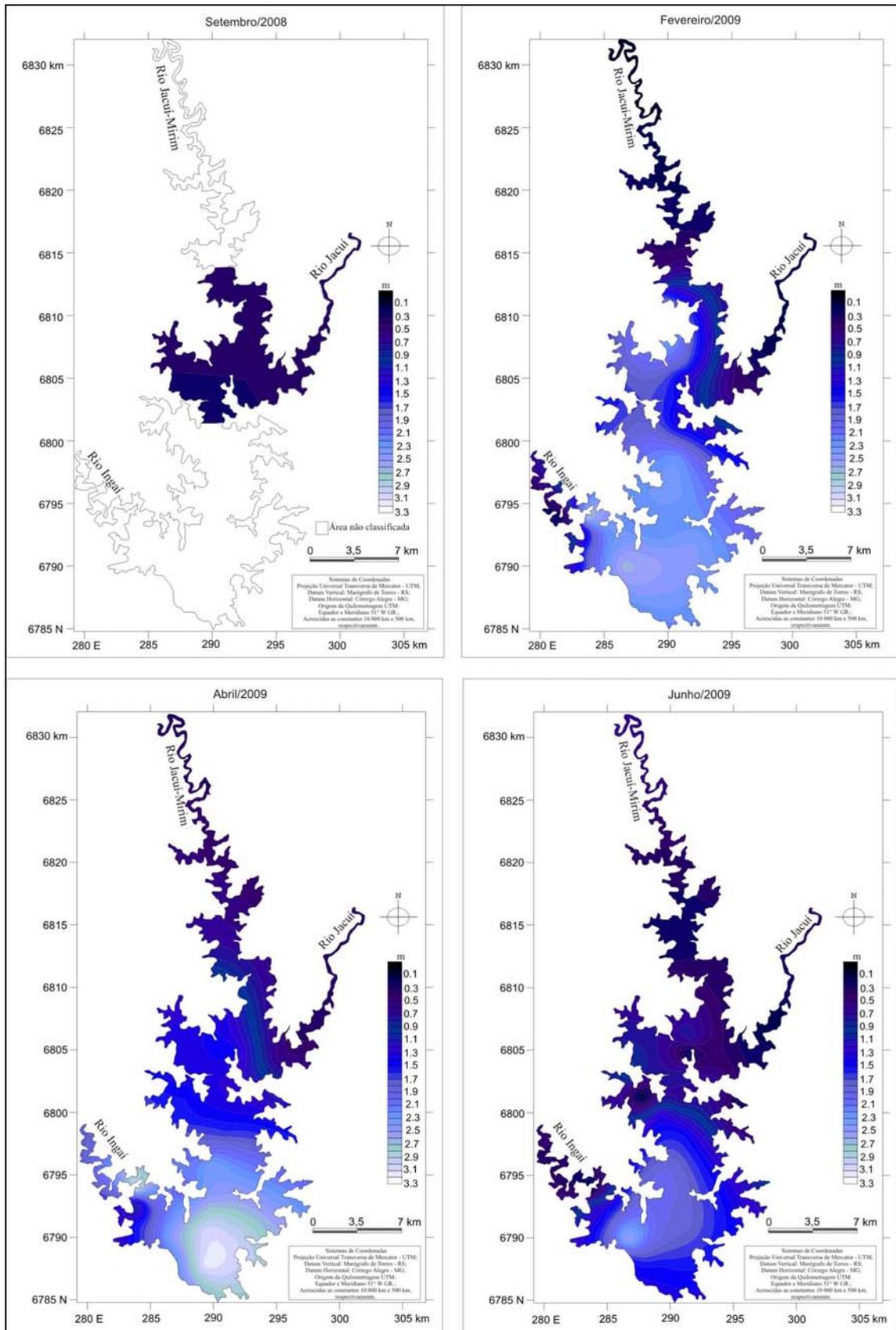


Figura 4.9 – Espacialização da transparência da água no reservatório nos meses de Setembro de 2008 e Fevereiro, Abril e Junho de 2009.

No ponto amostral localizado no Rio Ingaí observa-se a diminuição da transparência da água em relação ao ponto amostral mais próximo que se localiza no deságue deste afluente. Essa característica de aumento e diminuição da transparência da água nos afluentes do reservatório pode estar relacionada as datas de coleta de dados em que houve ou não a ocorrência de precipitação no local e o conseqüente aumento de material suspenso e particulado na água.

4.1.4 Temperatura da água

A temperatura da água varia essencialmente em função do período do ano, como pode ser verificado na Figura 4.10, quando as maiores temperaturas ocorrem no período de verão (fevereiro) e as menores em período de inverno (junho). Ao realizar a espacialização desta variável (Figura 4.11) foram observadas algumas diferenças dentro do reservatório possivelmente relacionadas ao volume de água e a sua movimentação em ambiente de deságue dos afluentes. Como exemplo disso encontrou-se as maiores médias de temperatura no mês de fevereiro (período de verão) e em ambiente lântico.

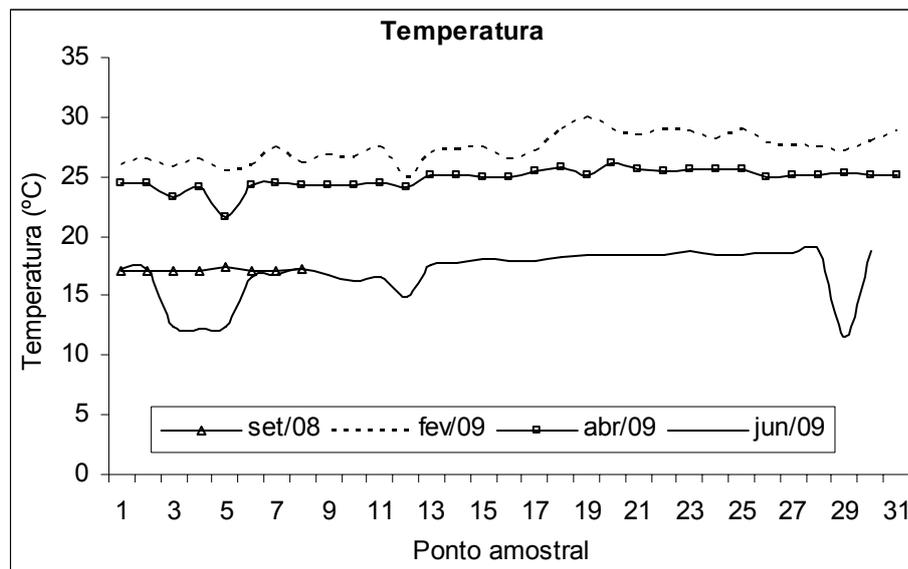


Figura 4.10 – Distribuição da temperatura no reservatório nos meses de setembro de 2008, fevereiro, abril e junho de 2009.

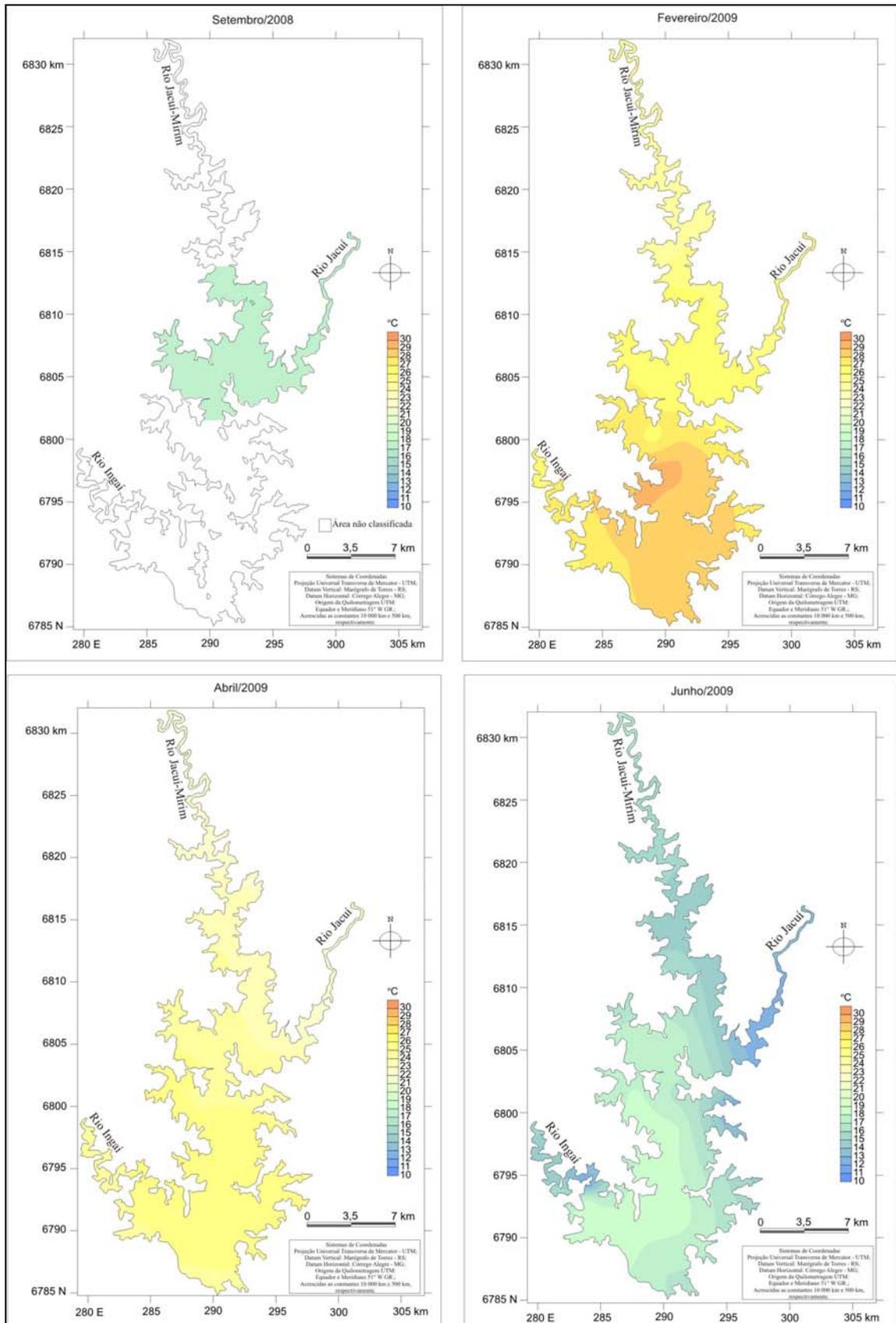


Figura 4.11 – Espacialização da temperatura da água no reservatório nos meses de Setembro de 2008 e Fevereiro, Abril e Junho de 2009.

A diferença de temperatura entre os afluentes mostrou que o Rio Ingaí e Rio Jacuí no mês de fevereiro apresentam médias mais altas de temperatura, enquanto o Rio Jacuí-Mirim apresentou as mais baixas (23,8°C). No mês de abril, em geral as médias de temperatura foram mais baixas e o Rio Jacuí apresentou um cenário diferenciado em relação ao mês de fevereiro, obtendo médias menores. No mês de junho devido ao período de inverno, as temperaturas diminuem em aproximadamente 10°C, porém mantém distribuição semelhante conforme os outros meses em relação aos afluentes e maiores médias encontradas na porção central do reservatório.

4.1.5 Total de sólidos em suspensão

A presença de sólidos suspensos foi observada em todo reservatório, ocorrendo apenas variações de acordo com as particularidades de cada porção da área e o período do ano. Na Figura 4.12 pode ser observado que nos pontos amostrais que compreendem o Rio Jacuí (em todos os meses) e o Rio Ingaí (em junho) foram encontradas as maiores médias de TSS, indicando relação inversamente proporcional com a transparência da água.

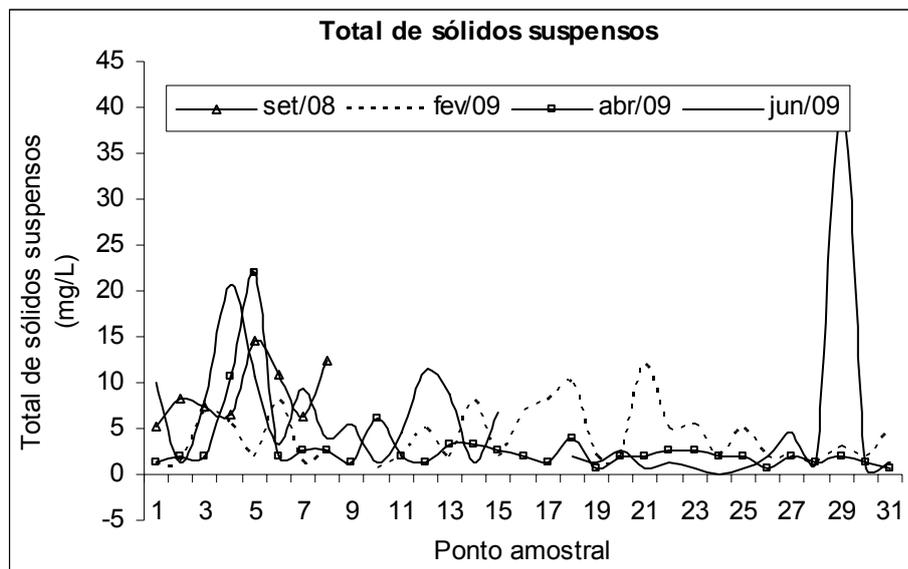


Figura 4.12 – Distribuição do TSS no reservatório nos meses de setembro de 2008, fevereiro, abril e junho de 2009.

No mês de setembro quando foi realizado o primeiro trabalho de campo abrangendo somente uma parte do reservatório, compreendendo três ambientes diferentes (Rio Jacuí, Jacuí

Mirim e a mistura de ambos), identificaram-se as maiores concentrações de sólidos em suspensão nesta área se comparado aos demais períodos e pontos amostrais, como mostra a espacialização da variável TSS na Figura 4.13.

No mês de fevereiro podem ser observadas concentrações mais altas do TSS na porção central do reservatório e no Rio Ingaí, enquanto no Rio Jacuí e Jacuí Mirim a média de TSS é menor. Na proximidade do dique a presença de sólidos em suspensão é pequena, provavelmente por se encontrar maior volume de água e ambiente lântico favorecendo a deposição dos materiais que são transportados pelos afluentes.

No mês de abril as maiores taxas de sólidos em suspensão foram encontradas no Rio Jacuí e médias intermediárias de TSS na porção central do reservatório. No Rio Jacuí-Mirim ocorreu um pequeno decréscimo, enquanto no Rio Ingaí e na porção central do reservatório a diminuição das médias do TSS foi significativa em comparação ao mês de fevereiro.

No mês de junho ocorreram em média as maiores taxas de sólidos em suspensão na água do reservatório em relação aos meses de fevereiro e abril. Nos três afluentes a presença dessa variável foi significativa, enquanto na porção central do reservatório e próximo ao dique houve diminuição da média. Ainda sobre os dados do mês de junho, observou-se no ponto 29 uma grande concentração de sólidos suspensos, provavelmente associada a precipitação ocorrida quatro dias anteriores ao trabalho de campo.

Essas diferenças entre os meses estudados podem estar vinculadas a forma de utilização do espaço no entorno do reservatório diferenciado em cada período do ano, principalmente relacionado a agricultura e a área das bacias de captação que deságuam no reservatório. No caso dos meses de fevereiro e junho pode haver relação com a precipitação ocorrida no local anterior a data de trabalho de campo, fato que auxilia no transporte de material (sedimento) para o interior do corpo de água (FORD, 1990; THORNTON, 1990).

4.1.6 Clorofila-*a*

A presença de clorofila-*a* na análise das amostras de água representa a existência de fitoplâncton no corpo hídrico. A espacialização dos dados de clorofila-*a* no reservatório Passo Real demonstra a distribuição variável desta componente em função do período do ano nos meses de fevereiro, abril e junho. No mês de setembro, não espacializou-se essa variável em função de ter sido obtida em apenas três pontos do total de oito pontos amostrados no reservatório, sendo pouco significativa.

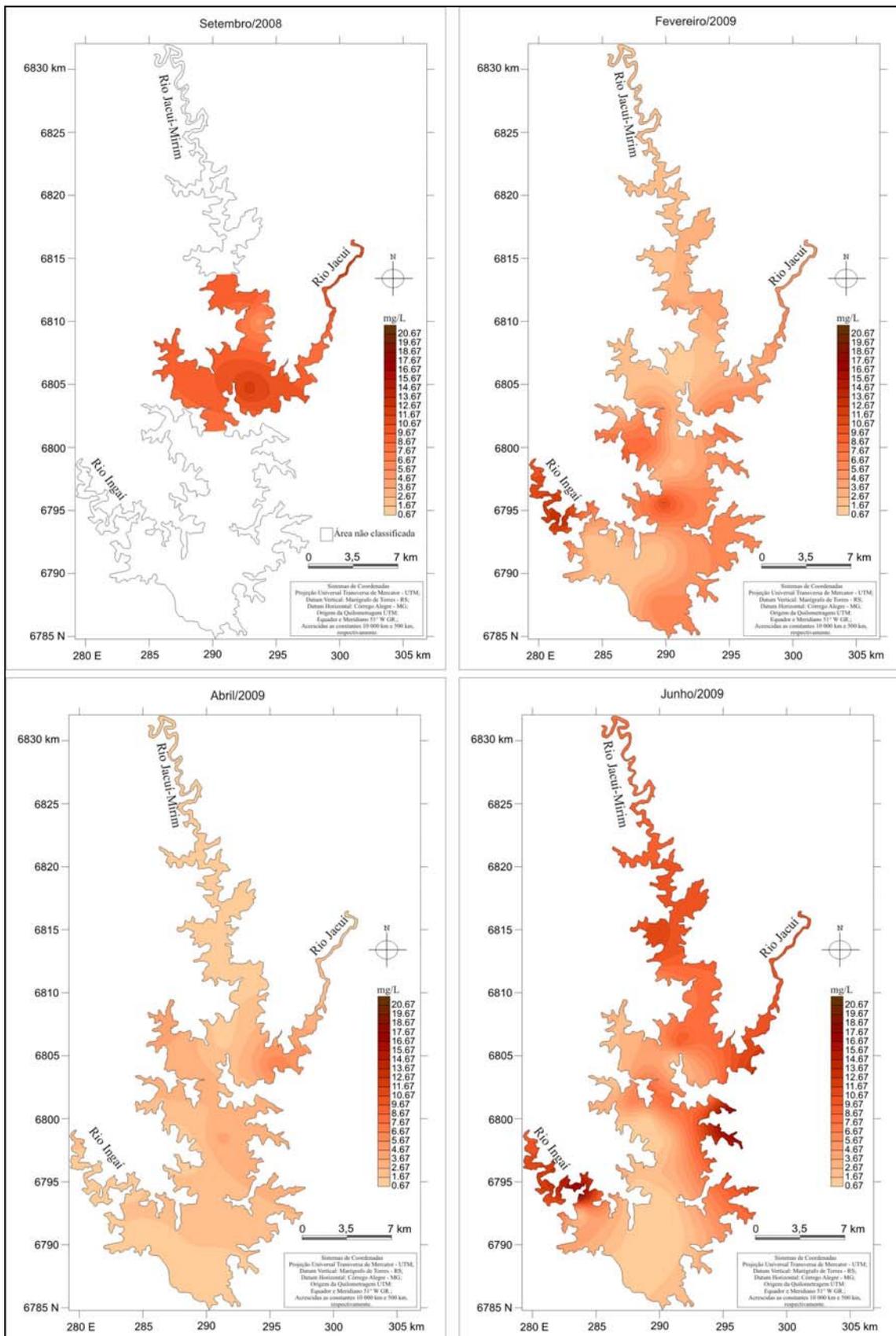


Figura 4.13 – Espacialização do TSS no reservatório nos meses de Setembro de 2008 e Fevereiro, Abril e Junho de 2009.

Pode ser observada que a distribuição de clorofila-*a* no mês de fevereiro e abril apresenta maiores concentrações nos afluentes Jacuí e Jacuí Mirim, com picos bem diferenciados dos demais pontos amostrais no reservatório (Figura 4.14). Em geral, de acordo com a Figura 4.15, a presença mais significativa foi registrada no encontro das águas do Rio Jacuí e Jacuí Mirim e em parte do afluente próximo ao dique (Rio Ingaí).

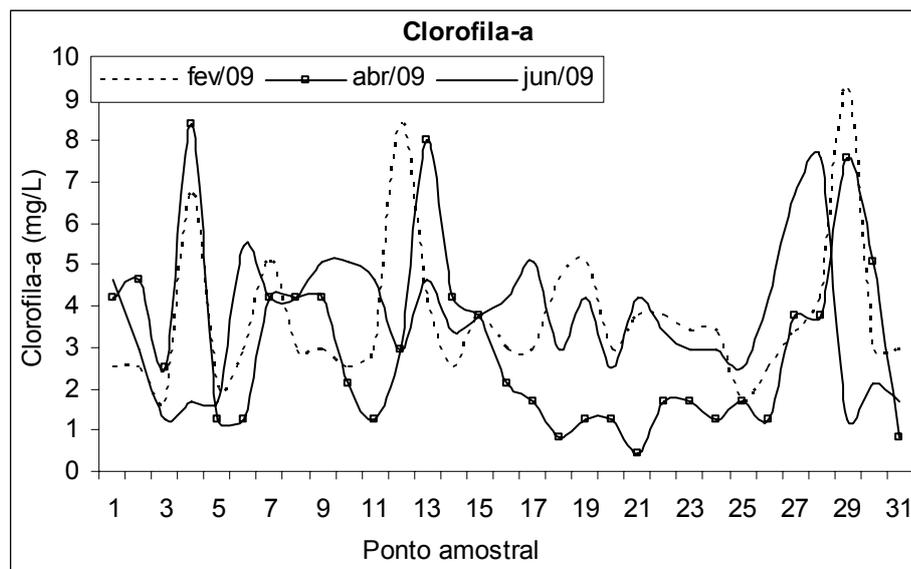


Figura 4.14 – Distribuição da Chl-a no reservatório nos meses de fevereiro, abril e junho de 2009.

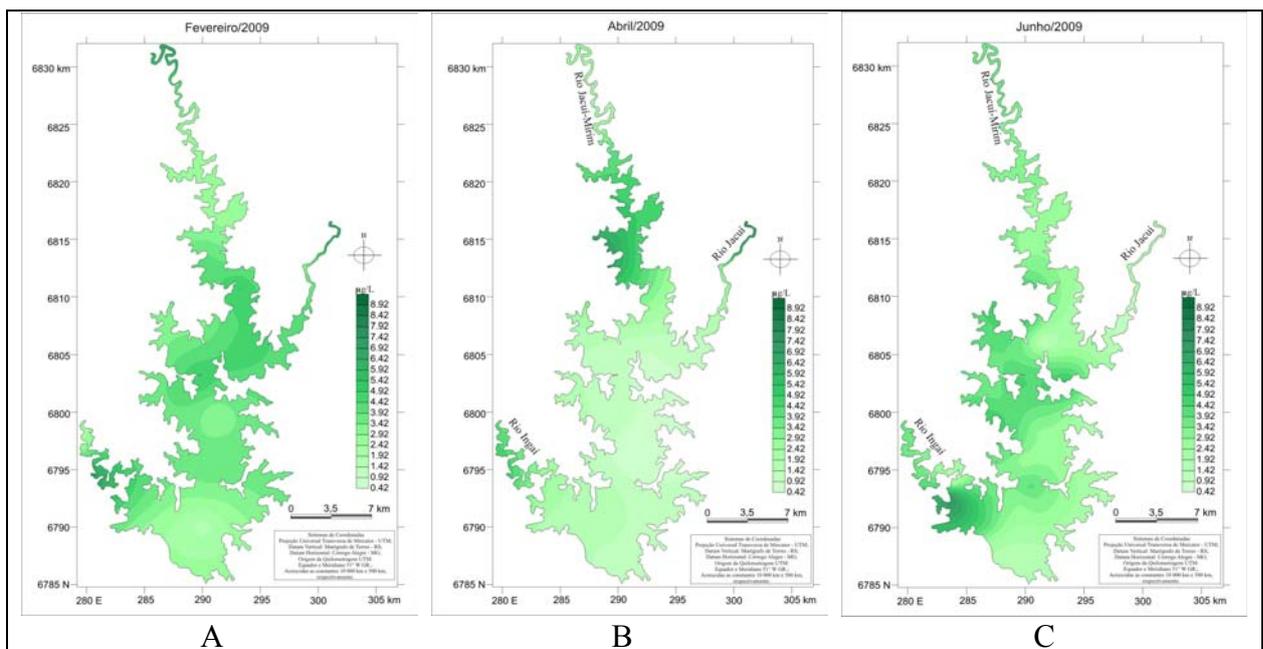


Figura 4.15 – Espacialização da Chl-a no reservatório nos meses de Fevereiro (A), Abril (B) e Junho (C) de 2009.

O mês de abril diferenciou-se por apresentar na maior parte do reservatório os valores mais baixos de clorofila-*a* encontrados nos períodos estudados. No entanto, os maiores valores foram localizados no Rio Jacuí Mirim e com as médias mais altas nesta porção em comparação aos outros meses. No mês de junho as maiores médias foram encontradas na desembocadura do Rio Ingaí, enquanto a porção central apresentou valores semelhantes aos encontrados no mês de fevereiro.

Um fato observado nos dados presentes na Figura 4.14 em comparação a Figura 4.12 está relacionado aos valores das variáveis Chl-*a* e TSS, respectivamente, no ponto 29 que faz parte do afluyente Ingaí. Os valores de Chl-*a* e TSS se apresentaram contrários, sendo que nos meses de fevereiro e abril de 2009 se observaram valores altos de Chl-*a* (maiores que 7mg/L) e baixos de TSS, enquanto no mês de junho de 2009 encontrou-se valor abaixo de 2mg/L para Chl-*a* e o valor máximo de TSS (40mg/L). Este fato assemelha-se com trabalho desenvolvido por Ritchie et. al. (1992), quando os valores de Chl-*a* apresentam diminuição conforme ocorre o aumento da concentração de sedimentos.

4.2 Discussão dos dados limnológicos

Para fins de comparação entre as variáveis limnológicas do reservatório calcularam-se os valores médios, mínimos e máximos, utilizando os dados dos meses de fevereiro, abril e junho de 2009. Os dados do mês de setembro não foram incluídos, pois não contemplam o mesmo número de pontos e conseqüente abrangência no reservatório, bem como a indisponibilidade de todas as variáveis em comparação com as demais datas.

Os dados de fevereiro relacionados à concentração de sedimentos em suspensão apresentaram uma diferença significativa entre os valores máximos de sólidos orgânicos e inorgânicos, prevalecendo maiores índices de sólidos orgânicos (Tabela 4.1). Destaca-se também o valor máximo de clorofila-*a* se comparado aos demais meses. No mês de abril a variável condutividade elétrica apresentou um valor máximo muito distante dos demais, porém não interferiu significativamente no aumento do valor médio. Para o mês de fevereiro o valor máximo do TSS e de COD aumentou significativamente. No entanto, a média do reservatório se manteve menor para a variável sólidos em suspensão e maior para o carbono orgânico.

Em relação ao mês de junho, o TSS apresentou a maior média em comparação aos outros meses e um valor máximo bastante distante desta média. O COD e a Chl-*a*

apresentaram valores máximos mais altos em junho, enquanto que a média do COD foi a menor e da Chl-*a* a maior comparando as três datas. O disco de Secchi manteve valores semelhantes nos meses de fevereiro e abril, observando-se no mês de junho as menores taxas (menor transparência da água).

Tabela 4.1 – Valores médios, mínimos e máximos das variáveis limnológicas no reservatório Passo Real.

Fevereiro	<i>CE</i>	<i>TSS</i>	<i>SOS</i>	<i>SIS</i>	<i>COD</i>	<i>Chl-a</i>	<i>DS</i>
<i>Média</i>	63.6	4.2	1.9	1.2	2.4	3.6	1.9
<i>Mínimo</i>	56.9	0.7	0.3	0.3	0.6	1.3	0.4
<i>Máximo</i>	77.7	12.0	8.7	4.0	5.9	9.3	3.1
Abril	<i>CE</i>	<i>TSS</i>	<i>SOS</i>	<i>SIS</i>	<i>COD</i>	<i>Chl-a</i>	<i>DS</i>
<i>Média</i>	68.7	3.1	1.9	1.6	3.1	3.0	1.9
<i>Mínimo</i>	60.8	0.7	0.0	0.0	0.9	0.4	0.5
<i>Máximo</i>	93.8	22.0	10.5	10.7	8.0	8.4	3.4
Junho	<i>CE</i>	<i>TSS</i>	<i>SOS</i>	<i>SIS</i>	<i>COD</i>	<i>Chl-a</i>	<i>DS</i>
<i>Média</i>	60.8	5.7	4.1	2.9	2.0	3.7	1.2
<i>Mínimo</i>	52.5	0.0	0.0	0.0	0.6	1.3	0.1
<i>Máximo</i>	68.3	40.7	18.5	12.5	3.7	7.6	2.8

Na espacialização dos dados limnológicos discutiu-se sobre a distribuição e concentração das variáveis separadamente no reservatório considerando as quatro etapas de coleta de dados. Analisando comparativamente a distribuição das variáveis transparência e sólidos em suspensão é possível afirmar que existe uma relação inversa entre ambas, sendo que a maior concentração de sólidos em suspensão contribui para menor transparência da água e vice-versa. Esta relação é notadamente mais observada na área do reservatório próximo ao dique e nos afluentes, principalmente o Rio Jacuí e Ingaí.

No mês de abril observaram-se valores de sólidos em suspensão baixos em toda a área do reservatório se comparado aos demais meses estudados, porém entre estes valores baixos, o Rio Jacuí apresentou as médias mais altas. Dessa forma, a presença de partículas em suspensão explica a baixa transparência da água no Rio Jacuí, enquanto que os valores baixos de transparência no Rio Jacuí Mirim podem estar relacionados com a presença de clorofila-*a*, uma vez que neste período as médias mais altas dessa variável foram encontradas neste afluente.

4.3 Dados espectrais de campo

4.3.1 Espectros de reflectância de campo

Esteves (1998) considera que a energia refletida depende principalmente do ângulo de incidência da radiação na superfície da água. Para um ângulo de incidência de até 45° o nível de reflexão é menor que 2,8%, sendo que a partir de 50° aumenta gradativamente com o máximo de reflexão (58,3%) em 85° (KIRK, 1994). No mês de setembro de 2008 quando se realizou o primeiro trabalho de campo fez-se a medida da resposta espectral da água em oito pontos amostrais. Esses pontos compreendem o Rio Jacuí, Rio Jacuí Mirim e a mistura desses dois ambientes e mostraram reflectância entre 8 e 20% (Figura 4.16).

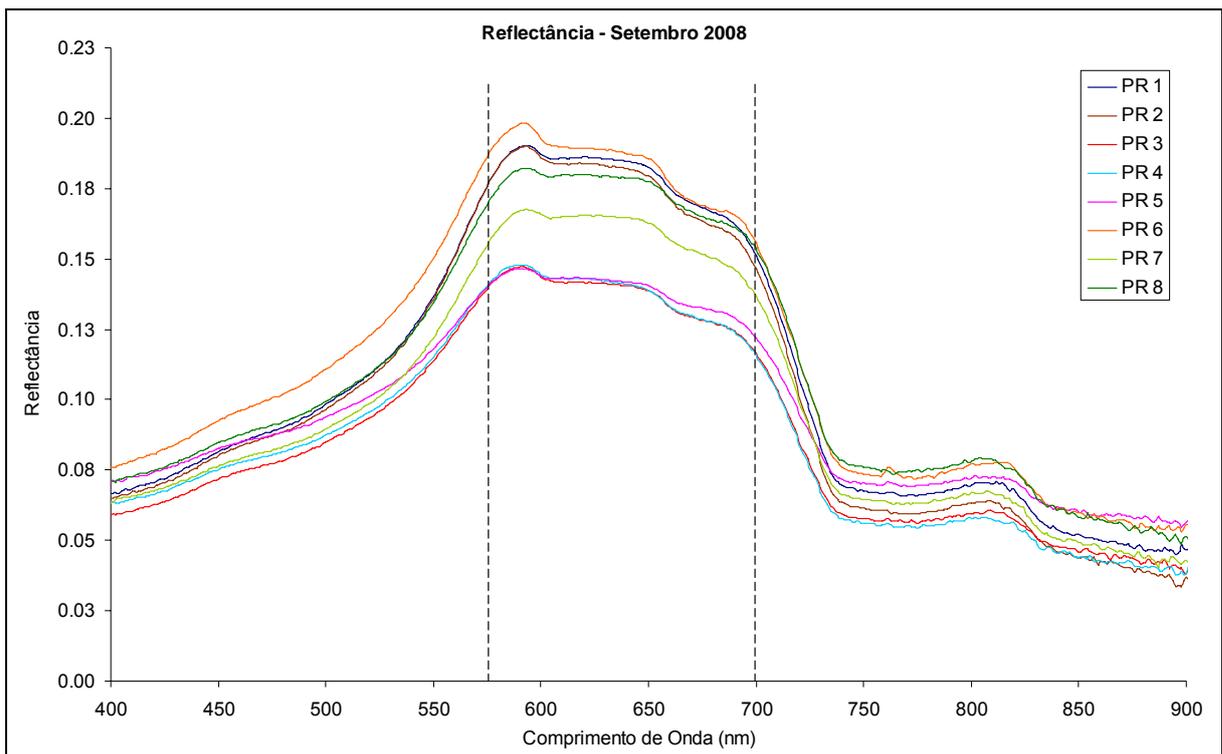


Figura 4.16 – Reflectância da água no reservatório Passo Real no mês de setembro de 2008 – as linhas verticais no gráfico indicam o patamar de reflectância.

Os espectros de reflectância nos oito pontos amostrais demonstraram um aumento gradativo da reflectância da água a partir de 400nm (8% de reflectância) até aproximadamente 595nm (15% de reflectância). Neste pico de máxima reflectância (595nm) os pontos observados são diferenciados pela porcentagem da reflectância que varia de 15 a 20%. Em

600nm a reflectância (15 - 20%) diminui e se mantém em patamar (14 - 18% de reflectância) até em torno de 650nm e novamente diminui conservando a diferença entre os pontos. Na faixa entre 700 e 720nm ocorre uma diminuição brusca da reflectância de 13 - 16% para 8%.

De acordo com Novo (2001) a curva espectral da água pura apresenta o coeficiente de espalhamento máximo na região do azul decrescendo em direção ao infravermelho próximo. Em águas naturais a presença de determinadas substâncias interfere na absorção e espalhamento da energia (ESTEVES, 1998) modificando o comportamento espectral da curva de reflectância, resultando em feições específicas relacionadas ao tipo de componente presente na água.

Devido à diferença nas respostas espectrais dos rios que fazem parte do reservatório é possível inferir a presença de três ambientes aquáticos. A reflectância da água nos pontos amostrais localizados no Rio Jacuí apresentam-se menor se comparado a resposta espectral no Rio Jacuí Mirim e da mistura desses dois ambientes. Os espectros que correspondem a mistura desses dois sistemas de drenagem apresentaram valores de reflectância intermediários aos encontrados nos dois afluentes (Rio Jacuí Mirim e Rio Jacuí), como representado pela curva espectral coletada no ponto 7.

Além da diferença encontrada em relação aos valores de reflectância, a resposta espectral da água do reservatório Passo Real mostrou grupos distintos de acordo com a inclinação no patamar entre 590 e 680nm. Essa observação mostra que o ponto 5, localizado no compartimento aquático de deságue do Rio Jacuí no reservatório e o 7 que corresponde ao setor de mistura dos afluentes, tem semelhanças entre si em relação a forma da curva, as quais apresentam menor inclinação neste intervalo espectral se comparado aos demais.

Considerando o intervalo entre 590-680nm e as curvas espectrais 5 e 7, pode-se observar que a menor inclinação da curva deve-se a razão entre estes dois comprimentos de onda apresentarem valores próximos a 1 (um), o que sugere uma elevação da reflectância na faixa do vermelho nestas amostras. Esse patamar de reflectância encontrado nos dados do reservatório Passo Real indica a presença de sólidos em suspensão presentes no corpo de água, uma vez que a caracterização desta variável no espectro está associada à formação de um patamar no intervalo entre 600 e 700nm, fato observado por Souza, et. al. (1991); Novo (1998); Arraut et. al. (2005); Rudorff et. al. (2005).

A partir disso, comparando os dados de TSS observados na Tabela 4.2 e a espacialização dessa variável no reservatório no mês de setembro (Figura 4.13), as maiores concentrações de sólidos em suspensão estão localizadas no setor montante do Rio Jacuí e na mistura dos dois afluentes, onde se encontram os pontos 5, 7 e 8, respectivamente. Estes

resultados podem estar relacionados à razão encontrada nas curvas espectrais dos pontos 5 (0,89), 7 (0,90) e 8 (0,90), resultando em menor inclinação da resposta espectral no patamar entre 590 e 680nm se comparado aos demais.

Tabela 4.2 – Variáveis TSS e DS nos pontos amostrais no reservatório no mês de setembro/2008.

	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8
DS (m)	0.55	0.60	0.65	0.60	0.50	0.60	0.45	0.50
TSS (mg/L)	5.20	8.20	7.40	6.60	14.60	10.80	6.40	12.40

Em geral, as curvas espectrais no mês de setembro têm características relacionadas com a presença de sólidos em suspensão, condição que reflete em resposta espectral para uma faixa ampla do espectro, onde ocorre o pico de máxima reflectância e o patamar bem definido da reflectância da água entre as faixas do verde e vermelho (575 a 700nm). Nesse intervalo e em função da presença de sólidos em suspensão, o pico de máxima reflectância tende a deslocar-se para os maiores comprimentos de onda, principalmente em direção a região do vermelho, como destacado por Dekker (1993); Kirk (1994); Novo (1998).

Além das características limnológicas que influenciam a resposta espectral da água, a variação da reflectância encontrada nos pontos amostrais visitados pode apresentar influência das condições do tempo no momento da coleta (Pereira Filho et. al., 2005). Em função disso, não é gerada somente a resposta dos constituintes presentes na água que determinam algumas feições nos espectros, mas sim, respostas espectrais que transferem a análise dos dados de acordo com a forma da curva espectral.

A determinação do TSS e a medida do DS possibilitaram estabelecer a correlação entre estas variáveis e a reflectância da água em comprimentos de onda na faixa de 400 a 900nm, considerando intervalos de 50nm. A correlação para postos de *Spearman* (Figura 4.17) entre a reflectância e o TSS demonstra que nos menores (faixa do azul) e maiores (infravermelho próximo) comprimentos de onda resultaram valores em torno de 0,5 e 0,6 com a variável TSS. A correlação dos dados de reflectância e DS mostrou situações com valores negativos (-0,45) nos maiores comprimentos de onda. Porém, estas correlações não são estatisticamente significantes considerando $\alpha \geq 90\%$.

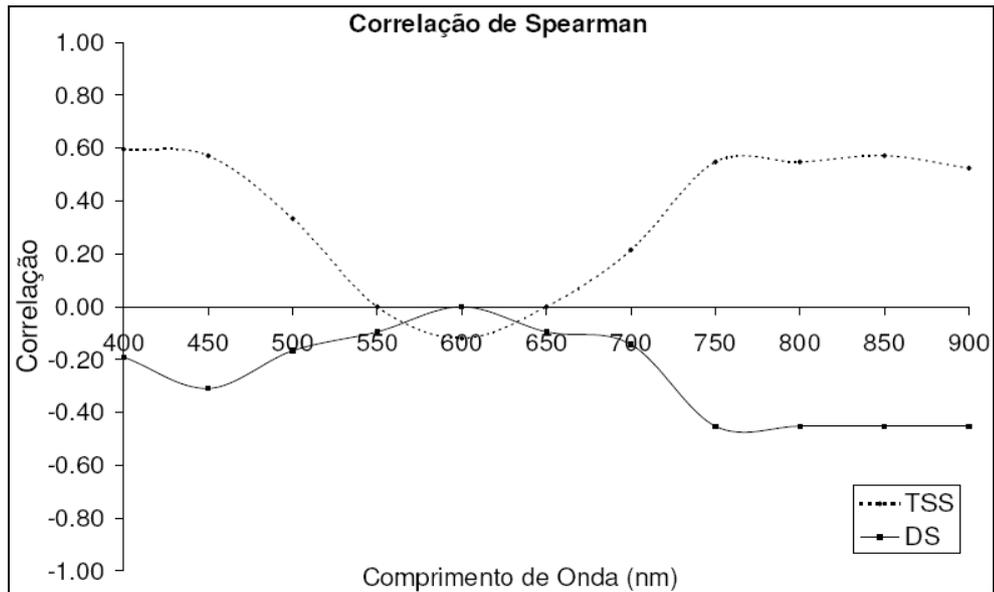


Figura 4.17 – Correlograma das variáveis DS e TSS com a reflectância em setembro de 2008

4.3.2 Razão e diferença de bandas

Com os dados do patamar de reflectância onde ocorre a diferença de inclinação entre os grupos de curvas espectrais (590 e 680nm) e as variáveis limnológicas TSS e DS foram elaborados diagramas de dispersão. Na Figura 4.18 está representada a dispersão entre os valores da razão de bandas nos comprimentos de onda 680/590nm com DS (a) e TSS (b), onde se observa que o valor r^2 mais representativo ($r^2 = -0,76$) se refere a dispersão entre a razão (680/590nm) e o DS.

Além da técnica de razão de bandas, calculou-se a diferença de banda utilizando os mesmos comprimentos de onda e variáveis limnológicas calculadas para a razão de bandas, com a finalidade de comparar o resultado destas técnicas. Na Figura 4.19 podem ser observados os diagramas de dispersão que demonstram valores r^2 baixos (metade dos valores encontrados com a técnica de razão de banda), mostrando que a razão de bandas apresenta melhores resultados se comparada a diferença de bandas.

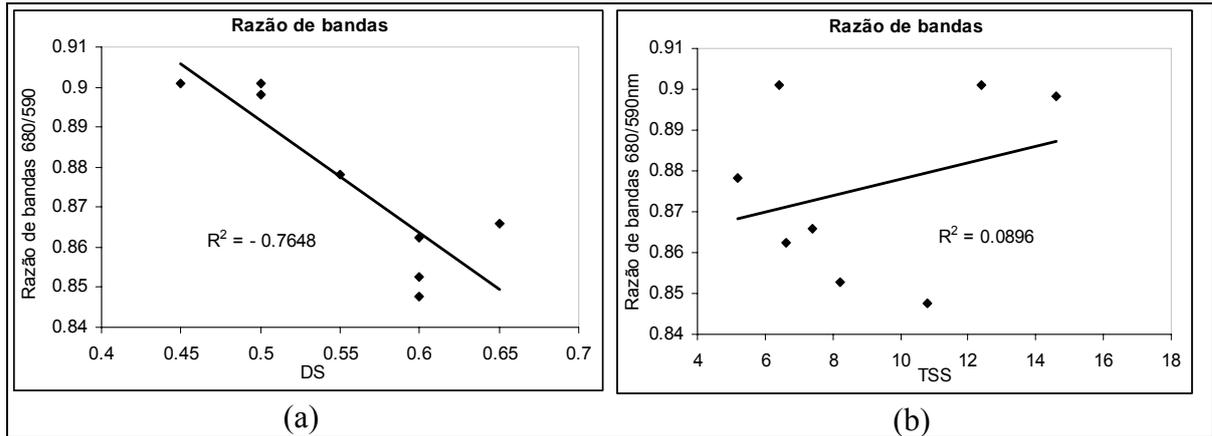


Figura 4.18 – Diagrama de dispersão entre razão de bandas (680/590nm) e DS (a) e razão de bandas (680/590nm) e TSS (b).

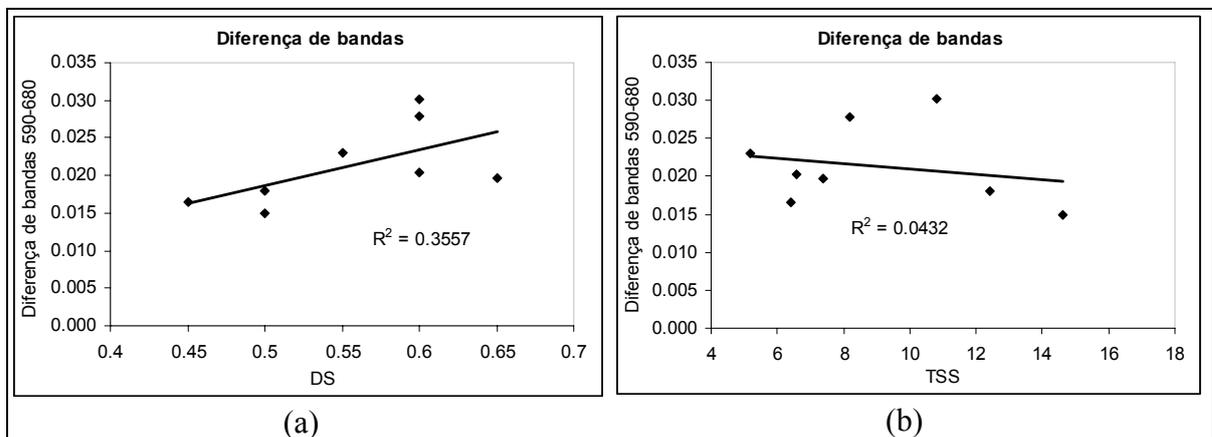


Figura 4.19 – Diagrama de dispersão entre diferença de bandas (590-680nm) e DS (a) e diferença de bandas (590-680nm) e TSS (b).

Os valores de correlação para postos de *Spearman* considerando a variável TSS e a razão e diferença de bandas, demonstram uma tendência para a existência de correlação entre esses dados. Ao consultar os valores de significância para estes valores r_s entre a razão de bandas e as variáveis TSS e DS e entre a diferença de bandas e TSS e DS (Tabela 4.3), observou-se que as correlações encontradas para o DS em ambas as técnicas se mostraram significativas para a população de 8 amostras e $\alpha = 90\%$, pois os valores encontrados são superiores ao valor crítico de r_s para esta significância (0,643), enquanto para o TSS os valores encontrados são muito inferiores.

Tabela 4.3 – Dados de correlação de *Spearman* entre variáveis limnológicas e razão e diferença de bandas no mês de setembro de 2008.

Variáveis limnológicas	DS	TSS
Razão e diferença de bandas		
Razão 680/590nm	-0.71	0.04
Diferença 680-590nm	0.66	-0.21

4.3.3 Análise derivativa

Em etapa anterior a aplicação do cálculo da derivada, as curvas espectrais de reflectância foram suavizadas com um filtro de média de 7 pontos a fim de atenuar o efeito de ruído nas amostras. Em seguida a primeira derivada dos dados de reflectância do mês de setembro foi aplicada para todos os comprimentos de onda na faixa entre 400 e 900nm.

Na Figura 4.20 pode ser observado o resultado da aplicação da primeira derivada, onde as feições de curvatura que ocorrem na resposta de reflectância se apresentam como picos mínimos e máximos dos valores derivados. Além disso, as inflexões onde o valor da derivada se acentua positivamente correspondem ao comprimento de onda em que o aumento da reflectância também é positivo. Ao contrário, nos comprimentos de onda que o valor de reflectância decai, a derivada se inclina para picos de valores negativos. Essas duas últimas características estão destacadas com as linhas perpendiculares as curvas de reflectância e da derivada.

A maior curvatura positiva no gráfico da derivada corresponde ao comprimento de onda em torno de 565nm, onde a curva de reflectância tem um aumento positivo acentuado. A partir das pequenas feições de absorção que são mostradas na reflectância da água em torno de 600 e 660nm, o gráfico da derivada passa a ter comportamento em valores negativos. A maior inflexão negativa que ocorre no espectro da derivada se refere ao comprimento de onda em 720nm, o qual corresponde ao decréscimo acentuado da reflectância em direção a faixa do infravermelho, após a região do patamar entre 590 e 680nm. Em 825nm ocorre novamente uma pequena feição negativa da derivada.

O resultado da aplicação da técnica de análise derivativa nos dados de reflectância da água no reservatório Passo Real concorda com experimento realizado por Chen et. al. (1992) quando destaca que a primeira derivada é viável para estimar a presença de sólidos suspensos em função de algumas feições, como o aumento da derivada na primeira pequena feição de absorção em 525nm e a diminuição em 725 e 825nm.

A aplicação da segunda derivada atenuou as feições de absorção, demonstrando que o principal constituinte na água do reservatório Passo Real está associado aos sólidos suspensos. Este resultado concorda com Goodin et. al. (1993) quando mostraram que os valores da segunda derivada apresentam valores muito baixos e anulam os efeitos dos sólidos suspensos nas feições de absorção.

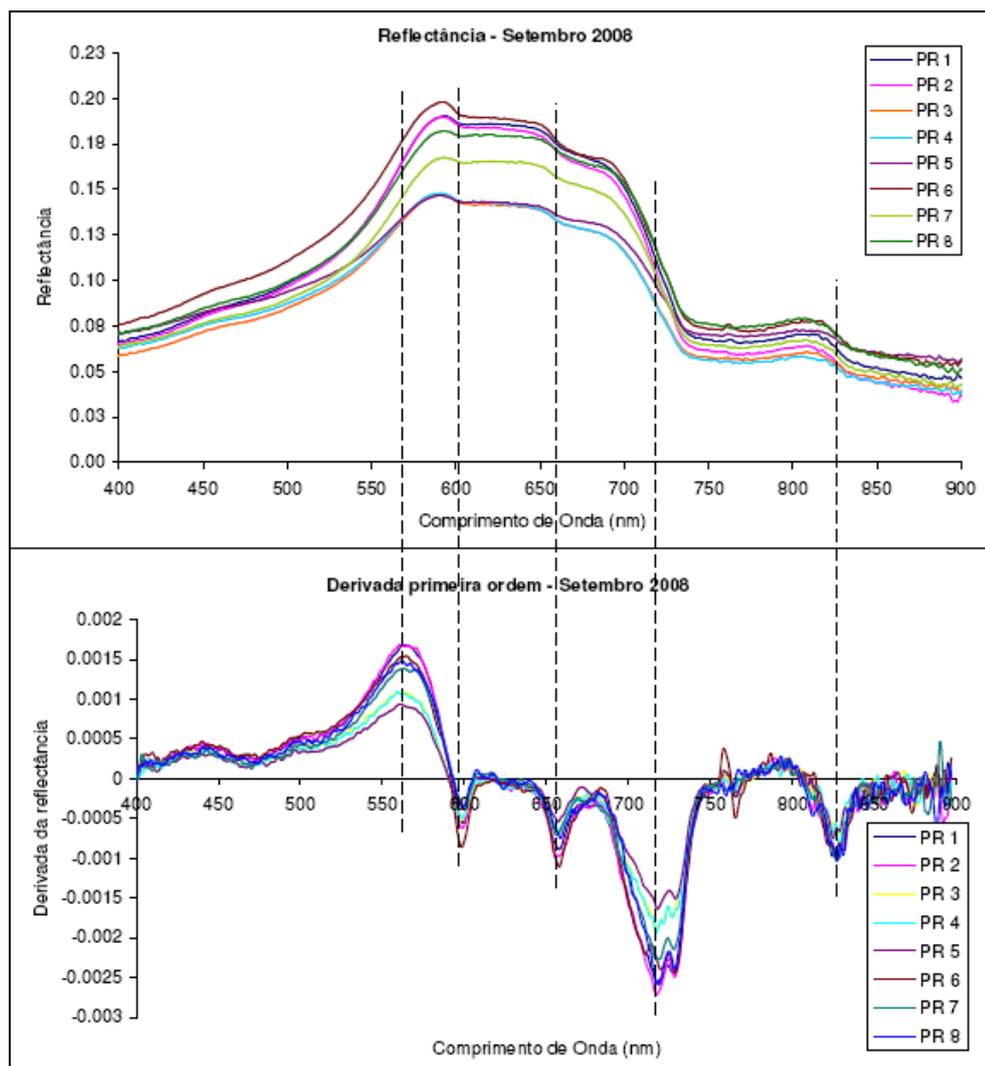


Figura 4.20 – Primeira derivada da reflectância para setembro de 2008.

A correlação para postos de *Spearman* da primeira derivada de reflectância dos dados do mês de setembro foi calculada em comprimentos de onda com intervalo de 50nm com as variáveis TSS e DS. O resultado apresentou correlações entre -0,6 e 0,6 (Figura 4.21), sendo que o valor máximo positivo foi encontrado nos primeiros comprimentos de onda para as duas variáveis e o valor máximo negativo em 600nm para o DS, sendo que somente a correlação para o DS em 600nm (-0.667) é significativo para $\alpha = 90\%$.

Ao observar a feição de absorção em 720nm nos dados derivados de setembro de 2008 no reservatório Passo Real, realizou-se correlação para postos de *Spearman* com a variável TSS, porém o valor encontrado não apresentou significância. No entanto, pode ser destacada a tendência de que esta feição de absorção está relacionada com a presença de sólidos em suspensão, pois em trabalho realizado por Goodin et. al. (1993) a relação entre sólidos suspensos e a primeira derivada em 720nm apresentou alta correlação linear (-0.95).

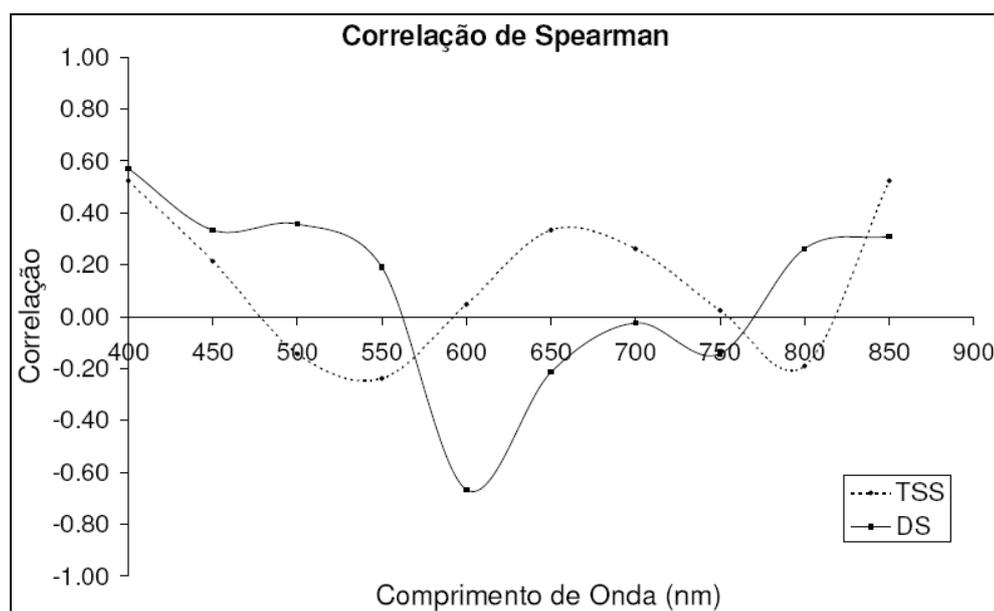


Figura 4.21 – Correlograma das variáveis DS e TSS com base na primeira derivada da reflectância em setembro de 2008

4.3.4 Remoção do contínuo

Com a aplicação da técnica de remoção de contínuo ocorreu o realce de feições de bandas de absorção. Para os dados de reflectância do mês de setembro de 2008 (Figura 4.22) se destacaram as profundidades de banda em 495nm e 740nm. Em comparação a este resultado, Nóbrega (2002) encontrou feições de absorção em 480 e 747nm em espectros de águas brancas, as quais são caracterizadas pelas maiores concentrações de sedimentos em suspensão.

O ponto amostral correspondente a menor profundidade de banda nos dois comprimentos de onda se refere ao ponto 5, o qual relacionado as variáveis limnológicas apresenta a maior concentração de sólidos em suspensão. A maior profundidade de banda ocorre para o ponto 2, porém este ponto apresenta uma concentração de sólidos suspensos intermediária em comparação aos demais, sendo que o ponto 1, que possui a menor

concentração de TSS, está representado pela segunda maior profundidade de banda e semelhante ao ponto 2.

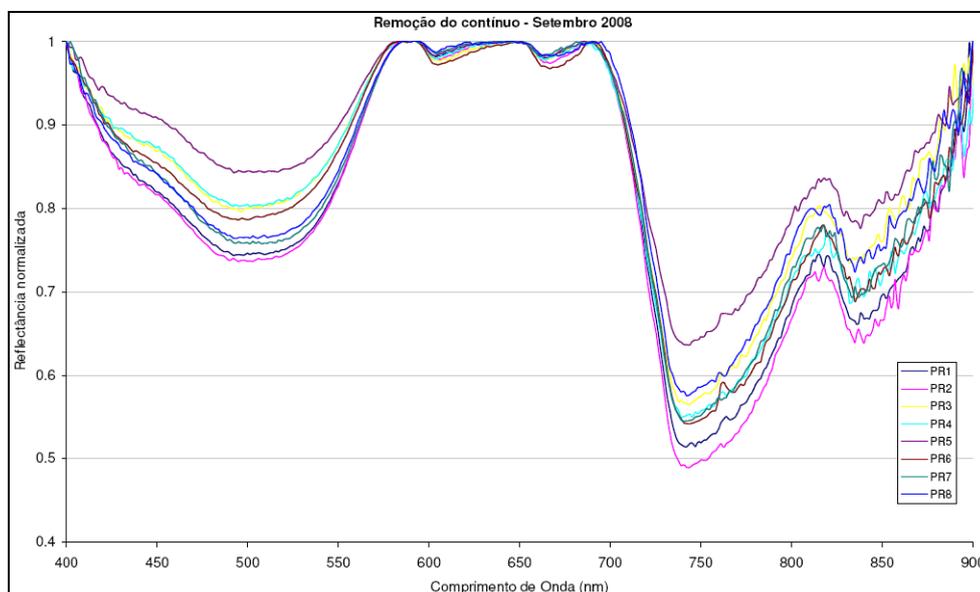


Figura 4.22 – Remoção do contínuo para os dados de reflectância de setembro de 2008.

Os dados de profundidade de banda nos comprimentos de onda destacados (495 e 740nm) foram correlacionados a partir da correlação para postos de *Spearman* (r_s) com o DS e TSS. No entanto, os valores críticos de r_s com $\alpha \geq 90\%$ demonstraram que não existe correlação estatisticamente significativa para ambos os conjuntos de dados.

Ainda que as variáveis não tenham apresentado correlação significativa nas duas profundidades de banda destacadas, elaborou-se o diagrama de dispersão e a reta de regressão para as duas variáveis (DS e TSS) na profundidade de banda de 740nm, onde os valores relativos à correlação foram maiores. Na Figura 4.23 está representada a dispersão dos dados e o respectivo r^2 para cada conjunto.

Pode ser observada a tendência já exposta pelos dados de correlação e na análise visual do gráfico de remoção do contínuo, que a maior influência na profundidade de banda em 740nm é exercida pela variável TSS ($r^2 \sim 0,55$), sendo de modo geral, quanto menor a concentração de sólidos em suspensão, maior a profundidade de banda. Os dados da dispersão correspondentes ao DS não apresentaram uma tendência linear, demonstrando a pequena influência dessa variável.

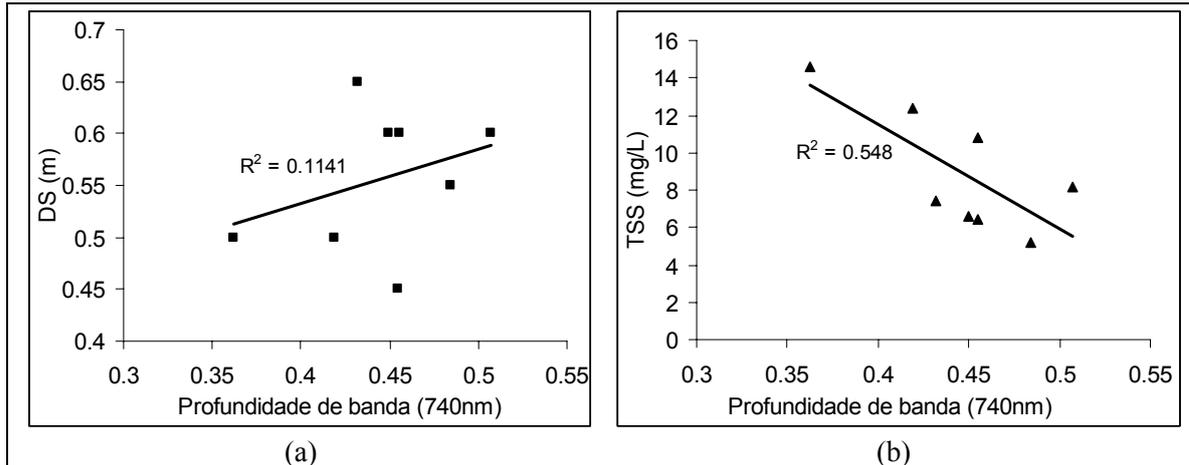


Figura 4.23 – Diagrama de dispersão entre profundidade de banda (740nm) e DS (a) e profundidade de banda (740nm) e TSS (b).

A partir das feições de absorção geradas por meio da técnica da remoção do contínuo, calculou-se a área de cada uma das feições a fim de avaliar a correlação com os dados limnológicos disponíveis. Com o resultado das correlações para postos de *Spearman* observou-se a significância dos dados a um nível de confiança $\alpha \geq 90\%$, o qual demonstrou que as correlações existentes entre a variável TSS e a área de ambas as feições de absorção não são estatisticamente significativas.

4.4 Dados espectrais da imagem

4.4.1 Espectros de reflectância da imagem

A partir da aquisição e atenuação dos efeitos da atmosfera para a imagem do dia 04 de abril de 2009 do satélite Landsat TM 5, as bandas 1, 2, 3 e 4 foram corrigidas para valores de reflectância a fim de coletar os espectros correspondentes aos pontos amostrais dentro da área do reservatório. A Figura 4.24 mostra o reservatório Passo Real em cada banda em valor de reflectância. Na banda 1 há maior absorção da energia no Rio Jacuí Mirim e na proximidade do dique (tonalidade mais escura na imagem), onde a água é mais clara em função de não apresentar quantidade significativa de sedimentos, favorecendo a absorção da energia, conforme destaca Kirk (1994).

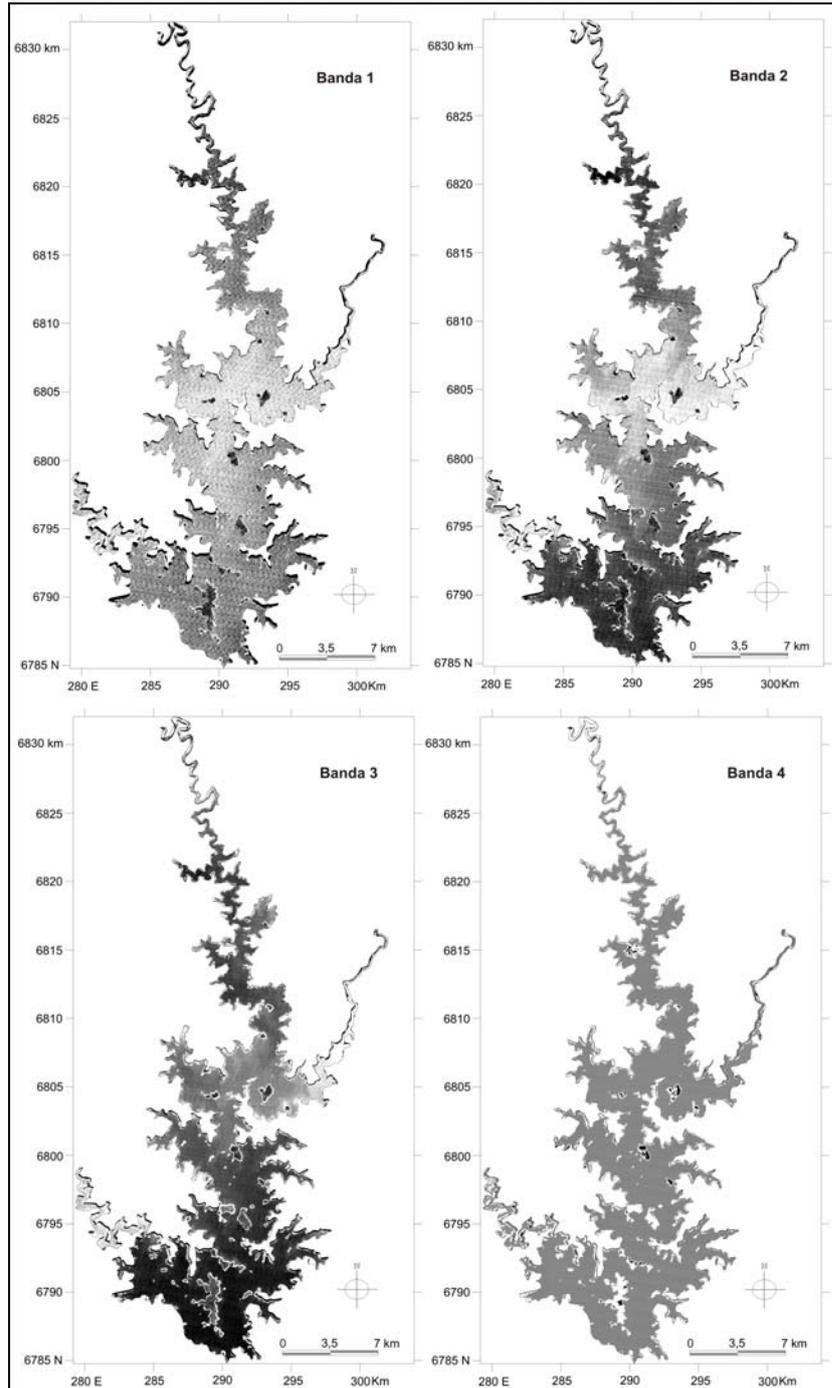


Figura 4.24 – Reflectância em nível de cinza das bandas 1, 2, 3 e 4 do Landsat TM5 em 04/04/2009.

A banda 2 e 3 demonstra as diferenças mais visíveis e com maior contraste em toda a área do reservatório. Pode-se observar com mais nitidez, se comparada a banda 1, a absorção da luz na área próxima ao dique e no Rio Jacuí Mirim (cor mais escura), enquanto no Rio Jacuí e Rio Ingaí, a tonalidade na imagem apresenta-se mais clara, indicando a presença de constituintes capazes de espalhar a radiação incidente, apresentando maior reflectância (DEKKER, 1993; KIRK, 1994). Com relação a banda 4, que está localizada em

comprimentos de onda do infravermelho próximo, a energia que incide sobre o corpo d'água é praticamente toda absorvida pela água, não ocorrendo o espalhamento que resultaria em reflectância (BARBOSA, et. al., 2003).

Nas bandas 1, 2 e 3 onde foi possível visualizar as diferenças de reflectância a partir da imagem e em comparação aos dados de TSS, observa-se que os afluentes Ingaí e principalmente o Jacuí, contribuem significativamente com a presença de sedimentos para o interior do reservatório, resultando em maior reflectância e pequena absorção da energia pela água. Dessa forma, as bandas 2 e 3 favorecem a identificação de componentes opticamente ativos presentes na água, enquanto a banda 4 proporciona o isolamento do corpo de água em relação a outros alvos da superfície, fato observado por Novo (2008).

De acordo com a observação dos espectros de reflectância (Figura 4.25) é possível separá-los em três grupos: (1) as amostras do Rio Jacuí (pontos 3, 4 e 5), se considerado os canais 2, 3 e 4 esses espectros apresentam forma convexa na faixa do vermelho (forma destacada pelo círculo pontilhado); (2) as amostras coletadas próximo ao Rio Ingaí, as quais apresentam aumento da reflectância a partir da faixa do vermelho em direção ao infravermelho e as curvas espectrais com forma côncava; e (3) as amostras do Rio Jacuí Mirim e do interior do reservatório que mantiveram a maior reflectância na região do verde e tem forma côncava mais suave na banda 3.

A análise dos espectros coletados na imagem do mês de abril observadas as quatro bandas espectrais (1, 2, 3 e 4) do sensor TM 5, mostram uma concordância com os dados de reflectância adquiridos em campo no mês de setembro de 2008 em relação a elevação da reflectância na banda 3, nos pontos 3, 4 e 5 indicando a formação de um patamar com menor inclinação comparada a outros pontos amostrais. Da mesma forma em que são destacados nos espectros de campo as diferenças em relação a reflectância em alguns pontos amostrais, a reflectância coletada por meio da imagem de satélite também torna viável a mesma observação, porém em menor detalhe devido ao reduzido número de bandas espectrais.

A curva espectral correspondente ao ponto 29, localizado no deságue do Rio Ingaí, observado na Figura 4.25 e não coletado em trabalho de campo no mês de setembro de 2008, apresenta uma tendência para a mesma característica dos pontos amostrais localizados no Rio Jacuí (3, 4 e 5) em relação a formação de uma curva espectral de forma convexa, pressupondo a diminuição da razão entre os canais 2 e 4 com a elevação da reflectância no vermelho e infravermelho.

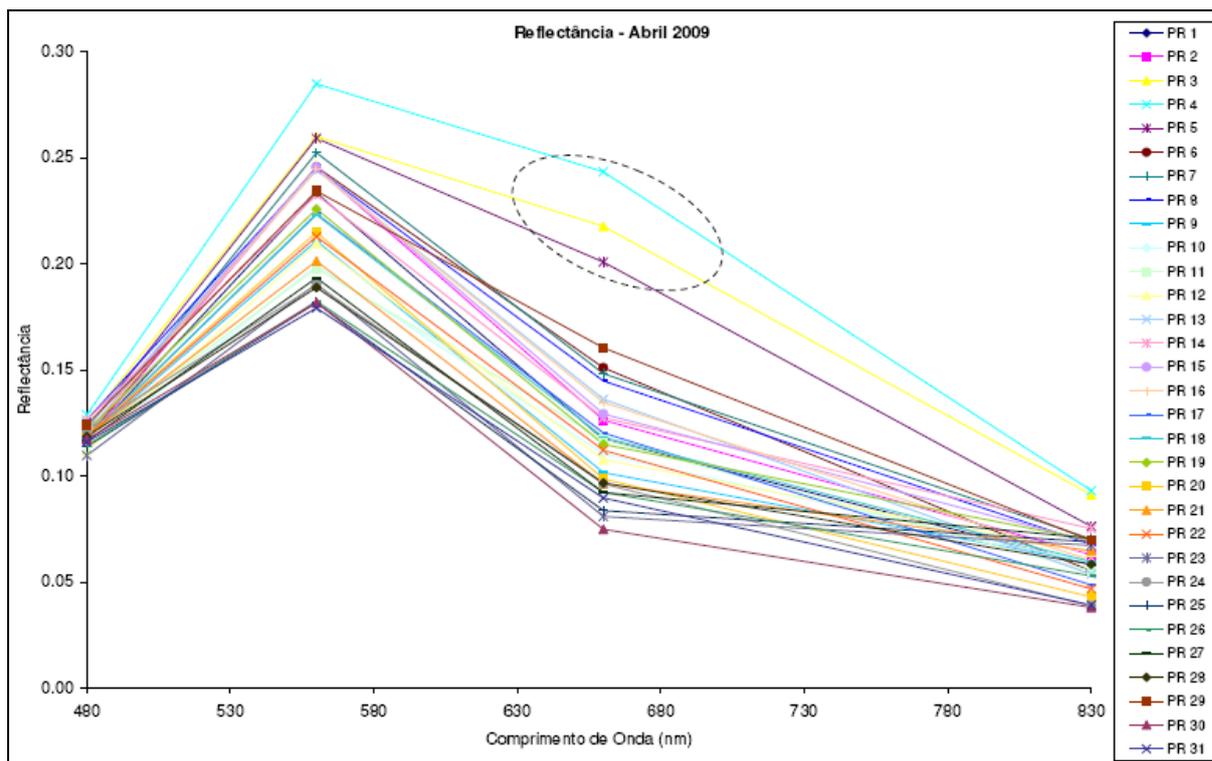


Figura 4.25 – Curvas espectrais da água do reservatório Passo Real adquiridas na imagem Landsat 04/04/2009.

Pode-se destacar também a reflectância do ponto 30, localizado no setor de maior volume de água próximo ao dique, que apresenta a menor reflectância em todos os canais espectrais comparado aos demais pontos amostrais. De acordo com Novo (2001), a resposta espectral é diretamente influenciada pelos componentes presentes no corpo de água. Nesse sentido, a reflectância no ponto 30 pode estar relacionada com a maior transparência da água e a baixa concentração de sólidos em suspensão nessa área, como se observou na espacialização dessas variáveis nas Figuras 4.9 e 4.13, respectivamente.

Com os dados da reflectância da água coletada na imagem para todos os pontos amostrais no reservatório e a disponibilidade de dados limnológicos mais completos a partir do trabalho de campo no dia 17 de abril de 2009 foi possível gerar a correlação de *Pearson* entre alguns destes dados e a reflectância. A Figura 4.26 apresenta a disposição das curvas de correlação de cada variável limnológica em relação aos comprimentos de onda centrais das bandas 1, 2, 3 e 4 – Landsat TM5.

Pode ser observado que as variáveis TSS, SIS e DS têm maior influência na reflectância da água se comparadas as demais, principalmente COD que apresentou correlação muito baixa em todas as regiões do espectro, sendo correlações negativas na faixa do azul, vermelho e infravermelho próximo, enquanto na faixa do verde a correlação foi positiva.

As variáveis TSS (composta por SIS e SOS) e Chl-*a* variaram inversamente entre si em relação aos comprimentos de onda. O TSS e sua parte inorgânica obtiveram menor correlação comparada a Chl-*a* na faixa do azul, aumentando na faixa do verde, sendo que a melhor correlação (em torno de 0,6) foi encontrada em comprimentos de onda da banda 3, decrescendo em direção ao infravermelho próximo. A melhor correlação para a Chl-*a* foi observada na faixa do azul, onde a influência dos sólidos em suspensão é menor, enquanto o aumento do comprimento de onda resulta na diminuição gradual da correlação com a Chl-*a*.

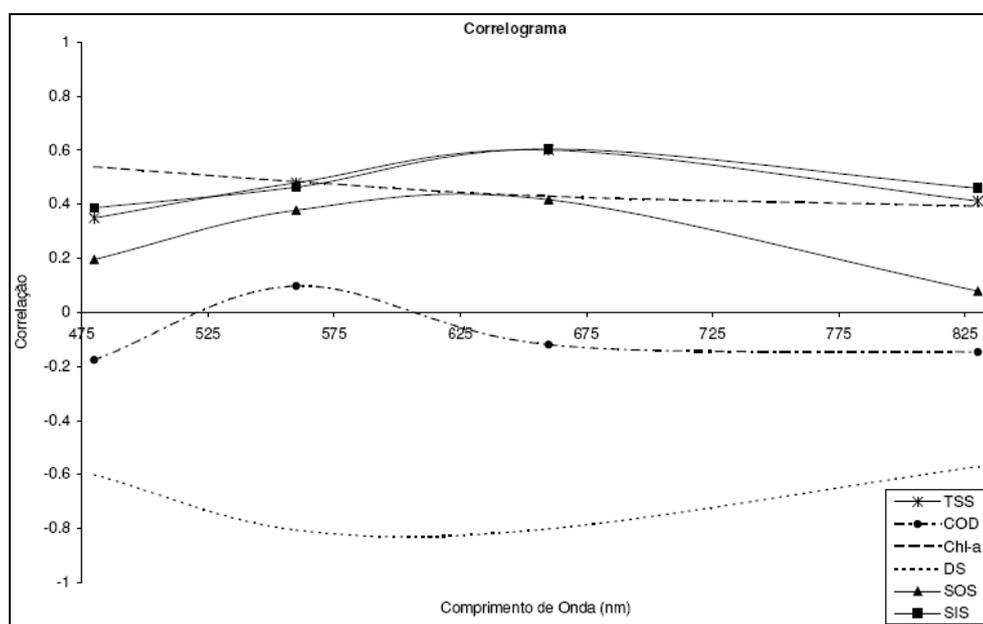


Figura 4.26 – Correlograma das variáveis TSS, COD, Chl-*a*, DS, SOS e SIS com base na reflectância da água adquirida nas bandas 1, 2, 3 e 4 da imagem Landsat TM5 de 04/04/2009

A presença de sólidos orgânicos apresentou correlação menor em relação a porção inorgânica e o total de sólidos suspensos, demonstrando que a predominância na resposta espectral da água em relação a sólidos suspensos se dá pela porção inorgânica. A variável DS apresentou correlação negativa significativa em partes da região do verde e vermelho, apresentando valores semelhantes ao TSS em todas as faixas do espectro.

Os valores do *t* calculado para os dados de correlação comparados aos valores críticos da tabela *t* com 95% de significância utilizando uma população de 23 elementos amostrais, para as quais estavam disponíveis todos os dados, mostraram que as variáveis têm correlação estatisticamente significativa nos comprimentos de onda centrais das bandas utilizadas, exceto SOS em 830nm. Considerando significância de 99% somente deixam de ser significativas as correlações correspondentes ao COD em 560 e 660nm.

4.4.2 Razão de bandas

O coeficiente de correlação também foi calculado entre as variáveis limnológicas do mês de abril e a razão das bandas 4/3 da imagem Landsat TM5 (Tabela 4.4), a fim de relacionar as mudanças que ocorreram na reflectância da água em alguns pontos amostrais entre essas duas bandas. As melhores correlações foram encontradas para as variáveis DS (0,44) e SOS (-0,41), demonstrando que neste caso, no intervalo entre a faixa do vermelho e infravermelho a reflectância é influenciada principalmente por estas variáveis (DS e SOS). Analisando os dados do t calculado para a correlação entre a razão das bandas 4/3 e as variáveis limnológicas, observou-se que apenas a variável COD não se apresentou estatisticamente significativa com $\alpha = 99\%$.

Tabela 4.4 – Dados da correlação entre variáveis limnológicas e razão de bandas (b4/b3) para o mês de abril 2009.

Razão de banda	Variáveis limnológicas					
	DS	TSS	SOS	SIS	COD	Chl-a
b4/b3	0.44	-0.27	-0.41	-0.23	0.03	-0.18

4.4.3 Remoção do contínuo

A partir dos dados de reflectância da imagem aplicou-se a técnica de remoção do contínuo nas 4 bandas, sendo que as bandas 1, 2 e 4 produziram valor igual a 1. As diferentes profundidades de banda podem ser observadas na banda 3 (Figura 4.27). Considerando que os pontos amostrais 3, 4 e 5 não apresentaram comportamento côncavo no gráfico de reflectância, na remoção do contínuo estes pontos permaneceram como uma linha reta de valor 1 também na banda 3, onde os demais apresentaram diferenças de profundidade.

Com relação aos pontos 3, 4 e 5 que não apresentaram profundidade de banda, estão localizados em ambiente de deságue do Rio Jacuí onde há maior movimentação da água e onde foram observadas as maiores concentrações de sólidos em suspensão, fato que pode ter ocasionado o aumento da reflectância na faixa do vermelho, observada no gráfico de reflectância. Isto confirma e complementa a análise dos dados espectrais de campo do mês de setembro onde foi encontrada menor profundidade de banda no ponto 5, o qual apresentava a maior concentração de TSS.

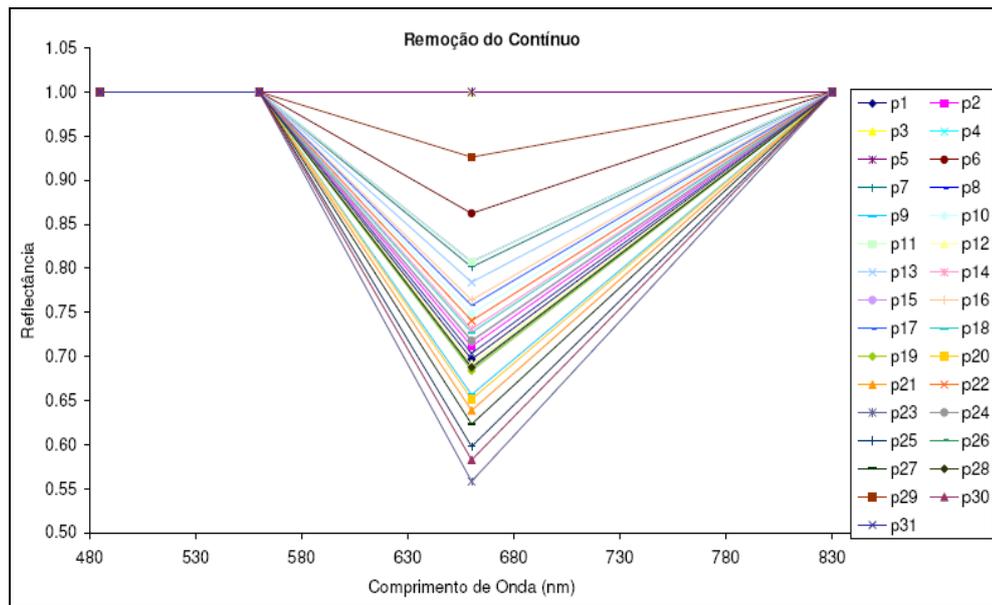


Figura 4.27 – Remoção do contínuo para os dados de reflectância de abril de 2009.

Os dados de profundidade de banda de cada ponto amostral foram correlacionados no comprimento de onda central da banda 3 (660nm) com as variáveis limnológicas coletadas no reservatório em trabalho de campo realizado no mês de abril. Na Tabela 4.5 as melhores correlações podem ser observadas entre a profundidade de banda em 660nm e as variáveis DS (0,78) e TSS (-0,56). Além disso, a variável SIS apresentou maior correlação com a profundidade de banda se comparada ao SOS. Ao observar o valor t calculado a partir dos valores de correlações e compará-lo com a tabela t em nível de significância 99%, os dados mostraram-se todos estatisticamente significativos.

Tabela 4.5 – Dados da correlação entre variáveis limnológicas e profundidade de banda (660nm) para o mês de abril 2009.

Profundidade banda	Variáveis limnológicas					
	DS	TSS	SOS	SIS	COD	Chl-a
660nm	0.78	-0.56	-0.47	-0.51	0.14	-0.29

4.4.4 Classificação da imagem

A classificação das bandas 2 e 3 da imagem Landsat TM5 do dia 04/04/2009 pelo método de fatiamento (Figura 4.28) considerou o valor de reflectância da água do reservatório entre 0 e 28%. Na banda 2 a reflectância apresentou taxas de reflectância mais altas em toda a

porção do reservatório se comparada a classificação da banda 3. No entanto, os valores de reflectância seguiram a mesma distribuição entre os compartimentos do reservatório para as duas bandas, sendo que as maiores taxas de reflectância são encontradas no Rio Ingaí e principalmente no Rio Jacuí, por este último ser o principal afluente que deságua no reservatório.

A classificação resultante da banda 3 apresentou valores menores de reflectância quando comparados com a banda 2. Isso se deve ao fato de a banda 3 se localizar em comprimentos de onda do vermelho, apresentando valores baixos de reflectância e comprovando as características da faixa onde ocorre grande absorção de energia pela água.

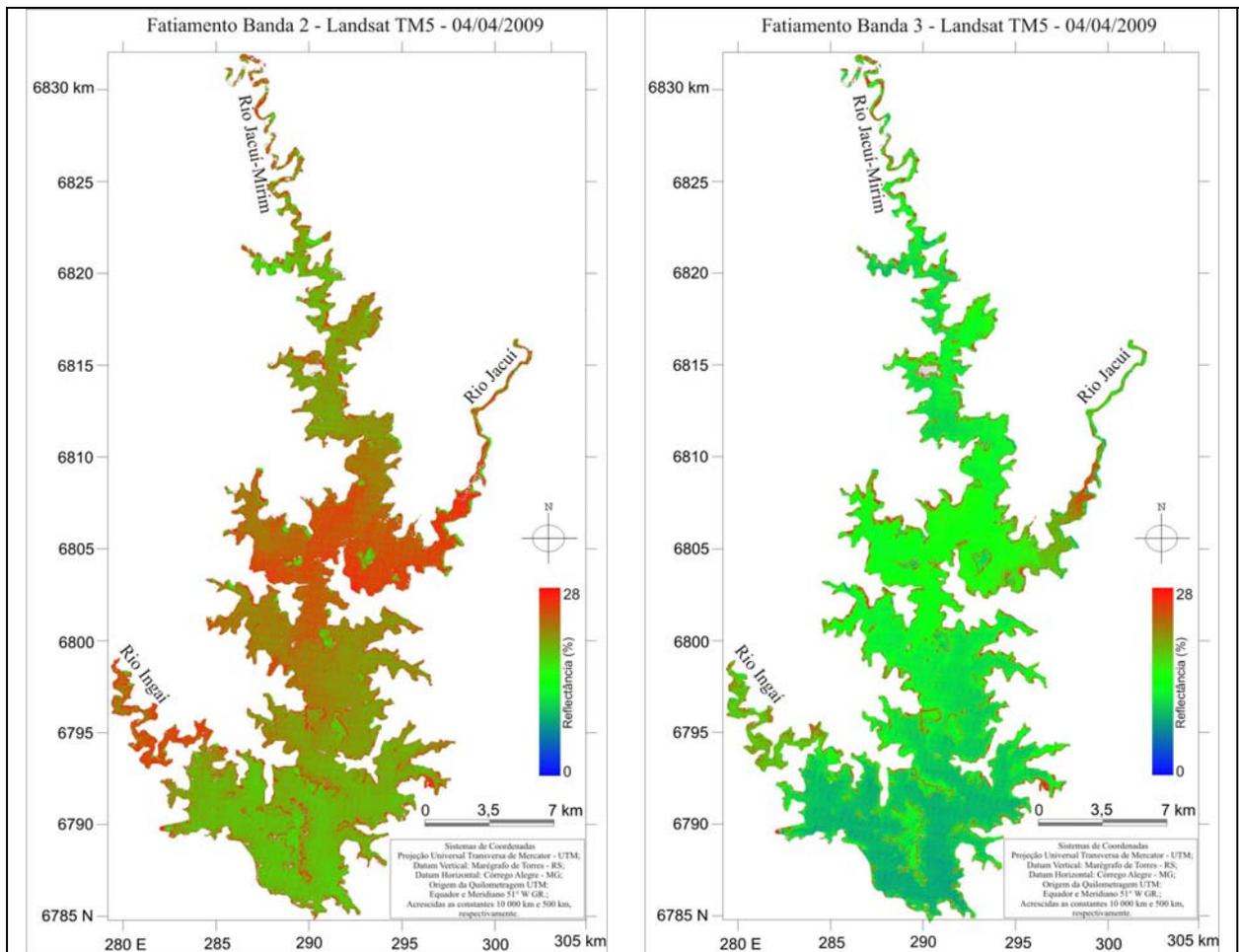


Figura 4.28 – Fatiamento das bandas 2 e 3 do satélite Landsat TM5 de 04/04/2009.

A variação dos valores de reflectância e a identificação de maior número de compartimentos aquáticos na banda 3, quando associados a faixa onde a água absorve grande parte da energia permite evidenciar a ocorrência de partículas suspensas presentes na coluna de água. Neste sentido, Kirk (1994) e Binding et. al. (2007) destacam que são os constituintes

opticamente ativos presentes no ambiente aquático os responsáveis pelo espalhamento e retroespalhamento da energia dentro do corpo hídrico, resultando na reflectância do alvo. A banda 3 do satélite Landsat TM 5 apresenta características que possibilitam distinguir mais facilmente o solo exposto (NOVO, 2008), favorecendo a diferenciação do ambiente aquático quanto a presença de sedimentos na água.

4.5 Water Color Simulator (WASI)

A partir dos dados limnológicos (SOS, SIS, Chl-a, COD e temperatura da água) tornou-se possível estimar a reflectância da água em cada ponto amostral do reservatório com a utilização do WASI (Water Color Simulator). Para alguns pontos amostrais não existiam medidas de todas as variáveis e neste caso a curva de reflectância não foi gerada, pois o dado ficaria comprometido. A partir do dado de reflectância simulado, aplicou-se filtro de sete pontos para todos os meses devido a presença de ruídos em todos os comprimentos de onda.

A simulação dos espectros para o mês de fevereiro (Figura 4.29) demonstrou que a maioria dos pontos amostrais apresentou reflectância menor que 9%. De acordo com o gráfico da Figura 4.29, os pontos com menor reflectância apresentaram menor inclinação em relação aos demais, com alta absorção na região do azul, um pico de máxima na região do verde, mantendo média alta de reflectância na região do vermelho. A maior parte dos pontos que apresentam estas características se localiza próximo ao dique do reservatório, indicando que os parâmetros considerados pelo simulador e a maior transparência da água no interior do reservatório podem ser fatores responsáveis pela resposta espectral da água.

Os demais pontos apresentaram maior reflectância, menor absorção na faixa espectral do azul, possuem um pico de reflectância bem definido na região do verde (próximo a 580nm) e um declínio mais acentuado em direção ao infravermelho próximo. Nesses pontos amostrais são mais realçadas as feições de absorção em torno de 608 e 676nm. O conjunto de todos os pontos simulados tem característica típica da presença de material fotossintético disponível no reservatório, definida pela ampla faixa entre o verde e o vermelho e com um pico de máxima reflectância em torno de 580nm (Kirk, 1994) e absorção pela Chl-a em 676nm (Dekker, 1993).

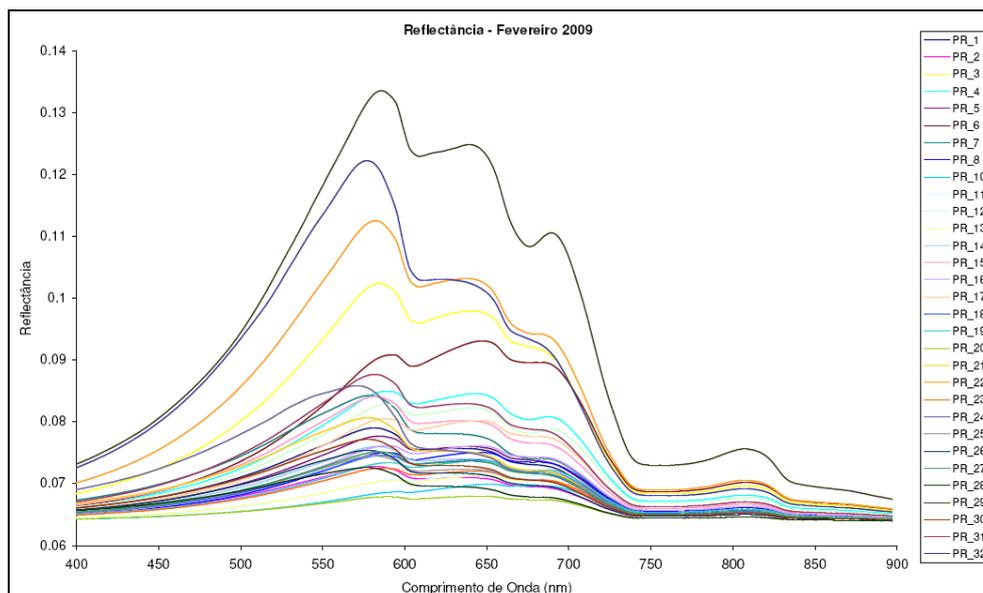


Figura 4.29 – Curvas espectrais da água do reservatório Passo Real simuladas no WASI para fevereiro de 2009.

Nos espectros simulados com as variáveis limnológicas correspondentes ao mês de abril (Figura 4.30) observa-se *a priori* a distinção entre dois grupos de respostas espectrais divididos em relação a taxa de reflectância e pelas suas feições facilmente distinguíveis:

- o primeiro grupo se assemelha as características encontradas no mês de fevereiro que possuem baixa taxa de reflectância (<9%);

- o segundo grupo é formado pelos outros três pontos amostrais exibidos no gráfico da Figura 4.30 que apresentam maior reflectância em todas as faixas do espectro em comparação com os pontos amostrais do primeiro grupo. Este grupo possui características de predomínio de sólidos em suspensão em função da diminuição da inclinação entre as faixas do verde e vermelho e do patamar bem definido entre os comprimentos de onda de aproximadamente 570 e 720nm (SOUZA, et. al., 1991; NOVO, 1998; ARRAUT et. al., 2005; RUDORFF et. al., 2005).

As respostas espectrais encontradas com a simulação dos dados limnológicos do mês de junho apresentam dois dados bastante diferenciados dos demais. No ponto 3 foi encontrada a segunda maior taxa de sedimentos em suspensão, sendo o SOS mais elevado em relação ao SIS e com baixa concentração de COD e Chl-*a*, fatores que podem ter resultado na curva espectral com um pico bem acentuado na região do verde e maior reflectância até o início da faixa do vermelho se comparada aos demais espectros (Figura 4.31).

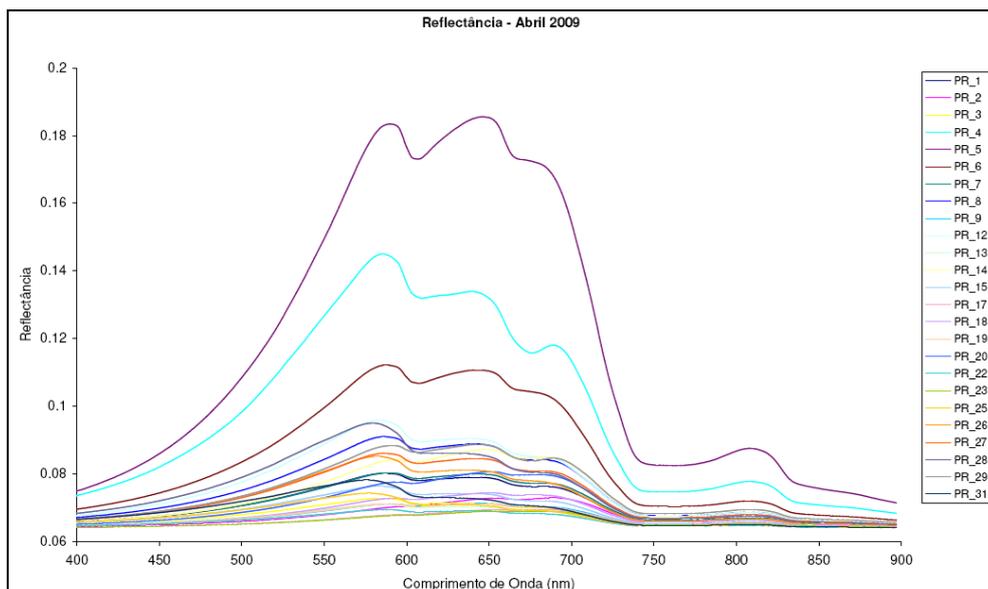


Figura 4.30 – Curvas espectrais da água do reservatório Passo Real simuladas no WASI para abril de 2009.

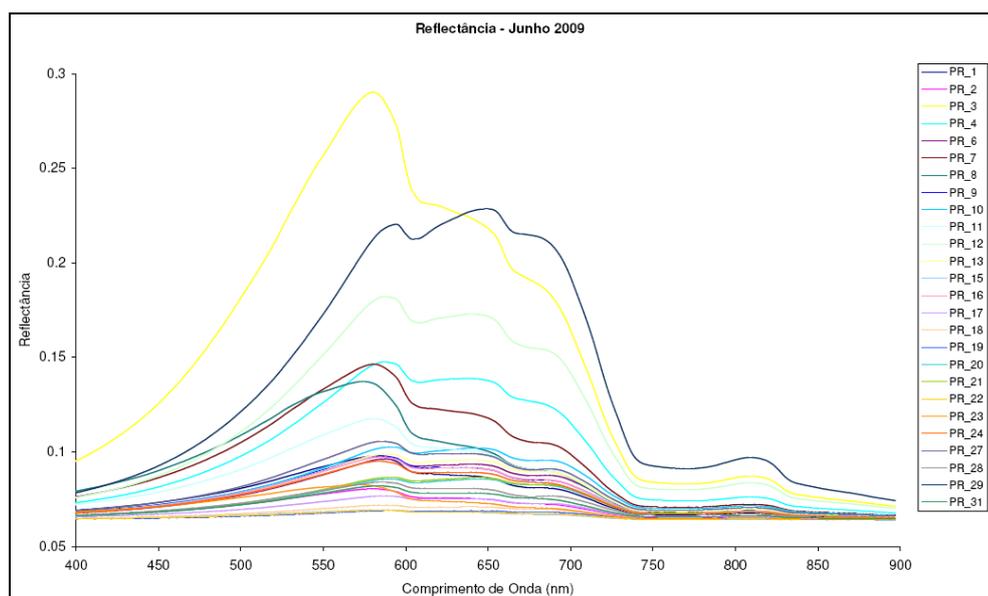


Figura 4.31 – Curvas espectrais da água do reservatório Passo Real simuladas no WASI para junho de 2009.

Outro dado que se destaca é a curva espectral resultante dos dados limnológicos encontrados no ponto 29. Neste ponto estão as maiores concentrações de SIS e SOS, baixa concentração de Chl-*a* e maior concentração de COD se comparado ao ponto 3. Dessa forma, a curva resultante apresenta menor reflectância e uma forma mais achatada em relação a curva do ponto 3 possivelmente devido a maior presença de COD e SOS, porém se estende com alta reflectância para maiores comprimentos de onda em direção ao infravermelho próximo, característica da presença de SIS. Estas duas características das curvas de reflectância

espectral em relação a presença de constituintes opticamente ativos também são destacadas por Dekker (1993) e Kirk (1994).

Alguns pontos seguem a mesma tendência do ponto 29, apresentando menor reflectância, provavelmente em função de não apresentarem taxas muito altas de sólidos em suspensão. A maioria restante apresenta concentrações semelhantes de TSS, COD e Chl-*a* resultando em curvas com as menores taxas de reflectância e formato mais achatado.

5. CONCLUSÕES

Com o propósito de analisar a composição espectral da água no reservatório Passo Real, os dados de reflectância do mês de setembro de 2008, bem como os dados de reflectância adquiridos por meio da imagem Landsat TM 5 possibilitaram caracterizar as diferenças entre esses ambientes. Nos espectros de reflectância observaram-se características da presença de sólidos em suspensão, principalmente nas curvas espectrais que correspondem aos pontos amostrais dos rios Jacuí e Ingaí, devido a elevação da reflectância na faixa do vermelho do espectro se comparada aos demais pontos amostrais, resultando em menor inclinação entre o pico de máxima reflectância e os comprimentos de onda mais longos.

As variáveis limnológicas espacializadas no interior do reservatório apresentaram variações de acordo com os períodos estudados, sendo que a menor diferenciação ocorreu em dados de COD. A CE apresentou maior variação no mês de abril e taxas mais altas no Rio Jacuí. A transparência da água foi menor no mês de setembro de 2008 e no mês junho de 2009, porém todos os meses analisados apresentaram diferenças entre os afluentes e a área com maior volume de água, destacando-se o Rio Jacuí com menor transparência, enquanto a área próxima ao dique apresentou maior transparência.

As medidas de TSS foram maiores nos meses de setembro de 2008 e fevereiro e junho de 2009, observando-se maior contribuição de materiais em suspensão provindos principalmente dos rios Jacuí e Ingaí. Estes resultados demonstraram a associação entre a transparência da água e a presença de sólidos em suspensão no reservatório, possibilitando a diferenciação de compartimentos aquáticos. Além disso, as características espectrais da água estão diretamente relacionadas com a transparência da água e a presença de sólidos em suspensão, uma vez que principalmente estas variáveis interferem e definem as características de maior ou menor penetração da luz no corpo d'água, resultando na absorção ou espalhamento da energia, originando a resposta espectral da água.

A aplicação das técnicas de remoção do contínuo, análise derivativa e razão e diferença de bandas possibilitou comparar estes métodos a fim de contribuir para a identificação dos componentes opticamente ativos presentes no reservatório. Dessa forma, as correlações entre os dados limnológicos e espectrais mais significativas para a coleta em

campo no mês de setembro de 2008 são as técnicas de razão de bandas (680/590nm), diferença de bandas (680-590nm) e a primeira derivada (600nm) com a variável transparência. Para o mês de abril de 2009, a reflectância da imagem Landsat, a razão de bandas (b4/b3) e a profundidade de banda (660nm) mostraram correlação significativa com as variáveis DS, TSS, SIS e Chl-a.

Na simulação das curvas de reflectância por meio do WASI observaram-se diferenças nos espectros entre os meses e alguns pontos amostrais. A principal e mais visível diferença é o aumento da reflectância na região do vermelho no mês de abril e a similaridade entre algumas curvas espectrais nos meses de fevereiro e junho. A menor inclinação entre o pico de máxima reflectância e comprimentos de onda da região do vermelho demonstra concordância com os dados encontrados nos espectros de campo e na imagem, porém os dados simulados não foram testados para que fossem considerados válidos.

Considerando os resultados obtidos e a associação entre a transparência da água e sólidos suspensos com o comportamento das curvas espectrais obtidas em campo do mês de setembro de 2008 e na imagem do mês de abril de 2009, pode-se atribuir diretamente a influência das características limnológicas sobre as respostas espectrais.

No entanto, a indisponibilidade de dados com maior periodicidade dificultou um diagnóstico mais completo sobre as condições do reservatório. A partir disso, a coleta de dados em períodos definidos como de acordo com as estações do ano, que satisfaçam as diferenças nas características da água do reservatório, possibilitariam maior confiabilidade dos resultados.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARRAUT, E. M. et al. Estudo do comportamento espectral da clorofila e dos sólidos em suspensão nas águas do Lago Grande de Curuai (Pará), na época da seca, através de técnicas de espectroscopia de campo. **Anais...** XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia/GO, 2005, INPE, p. 2447-2456.

BARBOSA, C. C. F., et. al.. Caracterização espectral das massas d'água amazônicas. **Anais...** XI SBSR, Belo Horizonte, Brasil, 2003, INPE, p. 2419 - 2425.

BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto da dinâmica da circulação da água do sistema planície de Curuai/Rio Amazonas**. Tese de Doutorado, São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2005. 282 p.

BARTOLUCCI, L. A., et al. Field measurements of the spectral response of natural waters. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.43, n5, 1977. p.595-598.

BINDING, C. E., et. al., Spectral absorption properties of dissolved and particulate matter in Lake Erie, **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 4, 2008. p. 1702-1711.

BRASIL. Ministério dos Transportes. **Resumo informativo da barragem da UHE de Passo Real – RS**. [s.l.], 2003.

BRICAUD, A.; MOREL, A.; PRIEUR, L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains. **Limnology Oceanography**, v. 26, n. 1, 1981. p. 43-53.

BUKATA, R. P. et. al. Estimation of organic and inorganic matter in inland waters: optical cross sections of lakes Ontario and Ladoga. **Journal Great Lakes Research**, v. 17, n. 4, 1991. p. 461-469.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artmed, 2003.

CARVALHO JUNIOR, O. A. de, et al. Análise comparativa do processo de identificação automatizada de membros finais a partir de imagens com diferentes resoluções espectrais para a região de Niquelândia (AVIRIS, ETM+ e ASTER). **Revista Brasileira de Geofísica**. [online]. 2005, v. 23, n. 1, pp. 39-50.

CARVALHO JUNIOR, O. A. de, et. al. Mistura Espectral: Classificadores espectrais para identificação. **Espaço & Geografia**, v.6, n.1, 2003. p. 177-197.

CHEN, Z.; CURRAN, P. J.; HANSON, J. D. Derivative reflectance spectroscopy to estimate suspended sediment concentration. **Remote Sensing of Environment**. v. 40, 1992. p. 67-77.

CLARK, R. N.; ROUSH, T. L. Reflectance Spectroscopy: Quantitative Analysis Techniques for Remote Sensing Applications. **Journal of Geophysical Research**, 1984, v. 89, n.B7, 6329–6340.

DEKKER, A. G. **Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing**, PhD Thesis. Amsterdam, Netherlands: Vrije Universiteit, 1993. 240 p.

DIAS, N. W. et. al. Sensoriamento Remoto para a caracterização do aporte de sedimentos e compostos orgânicos da Represa de Paraibuna, São Paulo. **Ciências Agrárias**. 2005. p. 1-18. Disponível em <<http://www.agro.unitau.br/dspace>>. Acesso em 11/08.

ECHER, E.; SOUZA, M. P.; SCHUCH, N. J. A Lei de Beer Aplicada na Atmosfera Terrestre. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. [online]. v. 23, n. 3, 2001. p. 276-283.

ESTEVES, F. DE A. **Fundamentos de Limnologia**. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.

FLORENZANO, T.G. **Imagens de satélite para estudos ambientais**. São Paulo, Oficina de Textos, 2002.

FORD, D. E. Reservoir transport processes. In: THORNTON, K. W.; KIMMEL, B. L.; PAYNE, F. E.. **Reservoir Limnology: Ecological perspectives**. JohnWiley & Sons: New York, 1990.

GEGE, P. **A software tool for simulation and analysis of optical in-situ spectra**. 4th Berlin Workshop on Ocean remote sensing, Berlin, Germany, 2001.

GEGE, P. **The Water Colour Simulator WASI: User manual for version 3**. Wessling, Germany, 2005, 83 p.

GIARDINO, C. et. al. Assessment of water quality in Lake Garda (Italy) using Hyperion. **Remote Sensing of Environment**. vol.109, n2, 2007. p.183-195.

GITELSON, A., et. al. The use of high-spectral-resolution radiometer data for detection of chlorophyll concentrations in Lake Kinneret. **Journal of Plankton Research**. Vol.16, no.8, p.993-1002, 1994.

GOODIN, D. G., et. al. Analysis of Suspended Solids in Water Using Remotely Sensed High Resolution Derivative Spectra. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Vol. 59, No. 4, April 1993, pp. 505-510.

HAN, L. Estimating chlorophyll-a concentration using first-derivative spectra in coastal water. **International Journal of Remote Sensing**, vol. 26, No. 23, 2005, p. 5235–5244.

HELLWEGER, F. L. et al. Use of satellite imagery for water quality studies in New York Harbor. **Estuarine, Coastal and shelf Science**, v.61, 2004. p.437-448.

KALLIO, K. et al. Retrieval of water quality from airborne imaging spectrometry of various lake types in different seasons. **The Science of the Total Environment**, v. 268, 2001, 59-77.

KIRK, J. T. O. **Light e photosynthesis in aquatic ecosystems**. 2ed. Cambridge University Press: New York, 1994.

KOKALY, R. F.; CLARK, R. N. Spectroscopic Determination of Leaf Biochemistry Using Band-Depth Analysis of Absorption Features and Stepwise Multiple Linear Regression. **Remote Sensing of Environment**, v. 67, 1999. p. 267–287.

LATORRE, M. et al. Correção Atmosférica: conceitos e fundamentos. **Espaço & Geografia**, Vol.5, n1, 2002. p.153-178.

LATORRE, M. L.; SHIMABUKURO, Y. E.; DIAS, L. A. V. Método de Correção Atmosférica Aplicado aos Dados do Sensor AVIRIS em Regiões Tropicais. **Anais... IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Santos/SP, 1998, INPE, p. 1385-1394.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote Sensing and image interpretation**. 3ed. New York: John Wiley & Sons, 1994.

LODHI, M. A., et. al. Estimation of suspended sediments concentration in water using integrated surface reflectance. **Geocarto International**, v13, n2. Hong Kong, 1998. p.11-15.

LONDE, L. R. et. al. Comparação entre técnicas para análise do comportamento espectral da clorofila-*a* no reservatório de Salto Grande (SP). **Anais... III Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto**: Aracaju/SE, 2006.

MANTOVANI, J. E. Comportamento Espectral do Fitoplâncton. **Anais... VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Curitiba, 1993. p.060-069.

MANTOVANI, J. E. **Comportamento espectral da água: faixas espectrais de maior sensibilidade ao fitoplâncton na presença de matéria orgânica dissolvida e matéria inorgânica particulada**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais: São José dos Campos, 1993. 119p.

MANTOVANI, J. E.; NOVO, E. M. L. M. Comportamento espectral da matéria orgânica dissolvida. **Anais...** VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Salvador – Brasil, 1996, INPE, p. 917-923.

MENESES, P. R. Fundamentos de radiometria óptica spectral. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. da S. (orgs). **Sensoriamento Remoto: Reflectância dos Alvos Naturais**. Brasília: UnB; Embrapa Cerrados, 2001. p. 15-39.

MILTON, E. J. Principles of field spectroscopy. **International Journal of Remote Sensing**, v.8, n12, 1987. p.1807-1827.

MOBLEY, C. D. **Light and water: radiative transfer in natural waters**. San Diego: Academic Press, 2004. CD-ROM.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e metodologias de aplicação**. 3 ed. Viçosa: UFV, 2005.

MUKAI, S. Atmospheric Correction of Remote Sensing Images the Ocean based Multiple Scattering Calculations. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Vol 28, n 4, 1990. p.696-702.

NAGHETTINI, M.; ANDRADE PINTO, E. J. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552p.

NANNI, M. R; DEMATTÊ, J. A. M. Comportamento da linha do solo obtida por espectrorradiometria laboratorial para diferentes classes de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n.30, 2006. p.1031-1038.

NÓBREGA, I. W. **Análise espectral de sistemas aquáticos da Amazônia para a identificação de componentes opticamente ativos**. São José dos Campos: INPE, 2002. 84p.

NOERNBERG, M. A. et. al.. Relação entre profundidade Secchi e fator de reflectância da água de ambientes aquáticos lênticos em Cachoeira Paulista, SP. **Anais...** VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Salvador: INPE, 1996. p. 933-940.

NOVO, E. M. L. M.; HANSON, J. D.; CURRAN, P. J. The effect of viewing geometry and wavelenght on the relationship between reflectance and suspend sediment concentration. **International Journal Remote Sensing**, v10, n8, 1989. p.1357-1372.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. 2 ed. Edgard Blücher, 1998.

NOVO, E. M. L. M. Comportamento Espectral da Água. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. da S. (orgs). **Sensoriamento Remoto: Reflectância dos Alvos Naturais**. Brasília: UnB; Embrapa Cerrados, 2001. p.203-222.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. 3 ed. Edgard Blücher, 2008.

NUSH, E. Comparison of different methods for chlorophylla and phaeopigments determination. **Arch. Hydrobiol.**, v. 4, p. 14-36, 1980.

PEREIRA FILHO, W.; GALVÃO, L. S. Relações entre reflectância espectral e concentração de sedimentos em suspensão no reservatório Passo Real, Região Sul do Brasil. In: Simposio Latinoamericano de Percepcion Remota, 8., 1997, Merida, VE. **Memorias...** 1997. CD-ROM.

PEREIRA FILHO, W.; BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. M. Influência das condições de tempo em espectros de reflectância da água. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 12, 2005. Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 415-422.

PEREIRA FILHO, W. et. al. **Reservoir cascades in sequence and their effect in water reflectance**. 4th WSEAS International Conference on Remote Sensing: Veneza/ Itália, 2008.

PEREIRA FILHO, W. et. al. Influência de reservatórios em cascata nos dados de reflectância e de limnologia - Reservatórios de Passo Real e Dona Francisca, Rio Jacuí – RS. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), **Anais...** INPE: Natal, 2009.

PREISENDORFER, R. W. Secchi disk science: Visual optics of natural waters. **Limnology Oceanography**, v. 31, n 5, 1986. p. 909-926.

REIS, T. E. da S. et al. Determinação do uso do solo do município de Bandeirantes, Estado do Paraná, através de imagem do Landsat 7 Etm+ e técnicas de geoprocessamento. **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 26, n. 1, 2005. p. 41-48.

RITCHIE, J. C.; SCHIEBE, F. R.; MCHENRY, J. R. Remote Sensing os suspended sediments in surface waters. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 42, 1976. p. 1539-1545.

RITCHIE, J. C., et. al.. **Landsat MSS studies of chlorophyll in sediment dominated lakes**. Geoscience and Remote Sensing Symposium, v.2, 1992, p. 1514-1517. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org>>.

RUDORFF, C. de M. et. al.. Avaliação de algoritmos bio-óticos em massas d'água amazônicas. **Anais...** XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, abril 2005, INPE, p. 431-438.

RUDORFF, C. de M. **Estudo da composição das águas da Planície Amazônica por meio de dados de reflectância do sensor Hyperion/EO-1 e de espectrômetro de campo visando à compreensão da variação temporal dos seus constituintes opticamente ativos.** Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto), São José dos Campos: INPE, 2006. 140p.

RUDORFF, C. de M. et. al.. Análise derivativa de dados hiperespectrais medidos em nível de campo e orbital para caracterizar a composição de águas opticamente complexas na Amazônia. **Acta Amazônica**. v 37, n 2, 2007. p. 269 – 280.

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 & Remote Sensing**, vol. 62, no. 2, 1996, p. 195-200.

SÃO PAULO. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Variáveis de qualidade das águas.** São Paulo, 2001. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/Agua/rios/variaveis.asp>>. Acesso em 10/01/09.

SLATER, P.N. **Remote sensing: optics and optical systems.** Reading, MA, Addison-Wesley, 1980. 575p.

SOUZA, R. B. de, et. al.. Efeito da concentração de dois tipos de sedimento em suspensão sobre a colorimetria e reflectância da água. **Anais...** Latin American Simposium on Remote Sensing, Cuzco, 1991.

STEFFEN, C.A.; Oliveira, J.L.; Gama, F.L. O Programa Espectro. **Anais...** VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba, Brasil, Vol.3, 1993. p. 138-144.

STEFFEN, C. A. Radiometria Óptica Espectral. **Anais...** VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Salvador, Brasil, 1996, INPE.

STURM, B. Optical properties of water applications of remote sensing to water quality determination. In: G. Frayse (Ed.), **Remote Sensing Application in Agriculture and Hydrology.** Rotterdam, Balkema, 1980, p.471-495.

SYDOR, M. Remote Sensing of particulate concentrations in waters. **Applied Optics**, v.19, n16, 1980. p.2794-2800.

THORNTON, K. W. Perspectives on reservoir limnology. In: THORNTON, K. W.; KIMMEL, B. L.; PAYNE, F. E.. **Reservoir Limnology: Ecological perspectives.** JohnWiley & Sons: New York, 1990.

TSAI, F.; PHILPOT, W. Derivative analyses of hyperspectral data. **Remote Sensing of Environment**, v.66, 1998. p. 41-51

WACHHOLZ, F. **Compartimentação aquática do reservatório Rodolfo Costa e Silva-RS, a partir de variáveis limnológicas e imagens orbitais.** Dissertação (mestrado) – Pós-Graduação em Geografia. Santa Maria, 2007.

ZULLO JUNIOR, J. **Correção Atmosférica de Imagens de Satélite e Aplicações.** Tese de Doutorado apresentada na Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas. 1994. 204p.