

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

**RELAÇÕES ENTRE VARIÁVEIS LIMNOLÓGICAS E  
REFLECTÂNCIA DO RESERVATÓRIO PASSO REAL  
– RS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Makele Rosa de Paula**

**Santa Maria, RS, Brasil  
2015**

# **RELAÇÕES ENTRE VARIÁVEIS LIMNOLÓGICAS E REFLECTÂNCIA DO RESERVATÓRIO PASSO REAL – RS**

**Makele Rosa de Paula**

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**

**Orientador: Prof. Dr. Waterloo Pereira Filho**

**Santa Maria, RS, Brasil  
2015**

Paula, Makele Rosa de  
RELAÇÕES ENTRE VARIÁVEIS LIMNOLÓGICAS E REFLECTÂNCIA DO  
RESERVATÓRIO PASSO REAL – RS / Makele Rosa de Paula.-2015.  
83 p.; 30cm

Orientador: Waterloo Pereira Filho  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de  
Pós-Graduação em Geografia e Geociências, RS, 2015

1. TSS 2. Sensoriamento Remoto 3. RapidEye I.  
Pereira Filho, Waterloo II. Título.

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Ciências Naturais e Exatas  
Programa de Pós-Graduação em Geografia**

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

**RELAÇÕES ENTRE VARIÁVEIS LIMNOLÓGICAS E  
REFLECTÂNCIA DO RESERVATÓRIO PASSO REAL  
– RS**

elaborada por  
**Makele Rosa de Paula**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Geografia**

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

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

---

**Fabio Marcelo Breunig, Dr. (UFSM)**

---

**Laurindo Antonio Guasselli, Dr. (UFRGS)**

Santa Maria, 16 de julho de 2015

*D*edico a Deus, meu alicerce,  
aos meus pais,  
Luciene e Wagner.

Minha irmã Tátilla Michele e  
minha sobrinha Ana Clara.

## AGRADECIMENTOS

Durante esses dois anos e meio só tenho a agradecer a todos que passaram pelo meu caminho e que com certeza deixaram um pouco de si. Os momentos de alegria serviram para esquecer um pouco a saudade e os de sofrimento serviram para meu crescimento pessoal. É difícil expressar tamanho agradecimento, mas serei eternamente grata a vocês.

Primeiramente, agradeço a *Deus* por minha vida, por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

A *Universidade Federal de Santa Maria* pela possibilidade de cursar um ensino de Pós-graduação gratuito e de qualidade.

Ao *Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)* pela concessão da bolsa de mestrado.

A empresa *Santiago & Cintra* pela concessão da imagem de satélite RapidEye para fins de pesquisa científica.

Ao *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)* pela estrutura disponibilizada.

Ao meu orientador *Dr. Waterloo Pereira Filho* por me propiciar esta oportunidade de conhecer sobre Sensoriamento Remoto da água. Suas orientações contribuíram enormemente para minha formação acadêmica e os puxões de orelha colaboraram para meu amadurecimento. Sou imensamente grata pela sua amizade, paciência, confiança e dedicação. Sem as suas sugestões e críticas sempre construtivas, certamente não teria conseguido organizar as ideias que muitas vezes confundiam minha cabeça. A ele, devo essa dissertação.

Ao professor e amigo *Dr. Flávio Wachholz* pela coleta dos dados de campo.

Ao professor *Dr. Fábio Marcelo Breunig* pelo auxílio na correção atmosférica e conversão para reflectância da imagem RapidEye. Suas sugestões foram valiosas para o andamento da minha pesquisa.

Aos professores *Dr. Roberto Cassol*, *Dr. Romário Trentin* e *Dr. Fábio Marcelo Breunig*, que participaram de meu exame de qualificação e trouxeram muitas contribuições.

A banca examinadora, *Dr. Fábio Marcelo Breunig* e *Dr. Laurindo Antonio Guasselli* pela leitura e contribuições a este trabalho.

Ao técnico de laboratório *Rômulo Aragones Aita (UFMS)* pela determinação do carbono orgânico dissolvido das amostras.

Aos *professores do Programa de Pós-graduação em Geografia* pelo conhecimento compartilhado, especialmente, por meio das disciplinas ministradas.

Aos *meus pais*, por terem me apoiado em mais uma etapa da minha vida. Obrigada por depositarem em mim toda confiança. Meu infinito agradecimento pela compreensão da minha ausência dedicado a essa pesquisa, pelos conselhos nos momentos que mais precisei, pelos ensinamentos, pela paciência, pelo amor e carinho que nunca deixaram faltar. Vocês são meu porto-seguro. A *minha irmã e minha sobrinha*, pelo apoio, carinho e alegria que sempre me proporcionou e que nunca me deixaram desanimar diante dos momentos de dificuldade. Ao *meu namorado* pelo companheirismo nos momentos de desabafos ou pelos momentos de descontração. Obrigada pela compreensão, paciência, confiança, pelo carinho e amor, e por me fazer sentir que tenho alguém com quem contar.

A *minha segunda família*, Janete, Marco Antônio e Juninho, que me adotou nesses dois anos de mestrado. Obrigada pelo companheirismo, pelos momentos em que aguentaram meus desabafos.

Aos *colegas do Laboratório de Geotecnologias* por me receberem de portas abertas e sempre a disposição para ajudar: Felipe Corrêa, Edison Alberti, Francieli Sarmiento, Gloria Bolivar, Gustavo Toniolo, Eduardo Kaiser, Eliege Buffon, Janderlei e Diego Prado. Aos *colegas do Laboratório de Cartografia*: Joceli Gross pelas suas sugestões que trouxeram muitas contribuições, Viviane Pires, Nadinne Fernandes e Natalia Batista. Obrigada pela companhia, pelas conversas, pelas risadas e pela roda de chimarrão.

Ao colega pesquisador *Everson Mattos* por ajudar nas pesquisas bibliográficas, assim como na organização desses documentos.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigada!

“É melhor tentar e falhar, que  
preocupar-se e ver a vida passar.  
É melhor tentar, ainda que em vão  
que sentar-se, fazendo nada até o final.  
Eu prefiro na chuva caminhar, que em dias  
frios em casa me esconder. Prefiro ser feliz  
embora louco, que em conformidade viver.”

*Martin Luther King*



## RESUMO

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

# RELAÇÕES ENTRE VARIÁVEIS LIMNOLÓGICAS E REFLECTÂNCIA DO RESERVATÓRIO PASSO REAL – RS

AUTORA: MAKELE ROSA DE PAULA

ORIENTADOR: WATERLOO PEREIRA FILHO

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 16 de Julho de 2015.

Apesar da importância econômica e social dos reservatórios, a sua construção provoca alterações na qualidade da água. Nesse sentido, o sensoriamento remoto tem contribuído no monitoramento da qualidade da água com informações para análise espacial e temporal. O objetivo foi analisar as relações entre variáveis limnológicas e espectrais no reservatório Passo Real – RS, Brasil, utilizando dados coletados *in situ* e do satélite RapidEye. A coleta de dados limnológicos ocorreram nos dias 17 e 18 de abril de 2009 coincidindo com a passagem do satélite RapidEye (17 de abril de 2009). Os seguintes dados limnológicos foram determinados: transparência da água (disco de Secchi); temperatura; total de sólidos em suspensão (TSS); clorofila *a* (Chl *a*) e carbono orgânico dissolvido (COD). Após a correção dos efeitos atmosféricos, para cada ponto amostral de campo foi aplicada uma matriz 3x3 para extração dos dados de reflectância. Com o uso da estatística descritiva, análise de regressão e estimativas espaciais, a reflectância e as razões entre bandas do RapidEye foram relacionados aos elementos opticamente ativos da água. Com base na concentração de Chl *a* o reservatório apresentou os seguintes ambientes tróficos: ultraoligotrófico, oligotrófico e mesotrófico. A água do reservatório Passo Real no mês de abril de 2009 se enquadram na classe I de acordo com a resolução CONAMA nº 357/2005. Os modelos empíricos permitiram estimar a concentração de TSS e transparência da água ( $R^2 = 0,87$  e  $R^2 = 0,79$ ) usando as bandas do infravermelho próximo e vermelho, respectivamente. Devido aos baixos valores de correlação da Chl *a* com os dados espectrais, houve baixa consistência dos dados estimados pela imagem e dados coletados a campo (interpolados). Verificou-se que é possível desenvolver um modelo empírico para estimar a concentração de TSS e transparência da água a partir de imagem de satélite RapidEye. Os resultados das razões de bandas foram semelhantes aos obtidos a partir da correlação entre os valores espectrais e as variáveis limnológicas. Os melhores coeficientes de correlação para o TSS, foram encontrados para as razões de bandas B5/B1 e B5/B2,  $r = 0,94$  e  $r = 0,93$ , respectivamente. A razão B1/B3 resultou na melhor correlação com a transparência da água,  $r = 0,94$ . Os resultados obtidos com a imagem RapidEye, abrem a perspectiva para a utilização de imagens orbitais como ferramenta de análise e monitoramento da qualidade da água em reservatórios.

**Palavras-chave:** TSS. Sensoriamento Remoto. RapidEye.

## ABSTRACT

Master's Degree Dissertation  
Graduate Program in Geography and Geosciences  
Federal University of Santa Maria

### RELATIONSHIP BETWEEN LIMNOLOGICAL VARIABLES AND REFLECTANCE OF THE PASSO REAL – RS RESERVOIR

AUTHOR: MAKELE ROSA DE PAULA

ADVISOR: WATERLOO PEREIRA FILHO

Date and Place of Defense: Santa Maria, July 16, 2015.

Despite the economic and social relevance of the reservoirs, its construction changes the water quality. In this sense, remote sensing has contributed to monitor the water quality providing spatial and temporal analysis information. The objective was to analyze the relation between limnological variables and spectral data of the Passo Real reservoir – RS, Brazil, combining *in situ* and RapidEye data. The limnological data were collected at April 17 and 18, 2009, concomitant to RapidEye acquisition (April 17, 2009). The following limnological data were determined: water transparency (Secchi disk); temperature; total of suspended solids (TSS); chlorophyll *a* (Chl *a*) and dissolved organic carbon (DOC). After atmospheric correction, for each field sampling point was applied a 3x3 window to extract reflectance data. By using descriptive statistic, regression analysis and spatial estimative, the RapidEye reflectance and band ratio data were related to the optically active elements of water. Based on the Chl *a* concentration, the reservoir presented the following trophic environments: ultraoligotrophic, oligotrophic and mesotrophic. According to the CONAMA n° 357/2005 resolution, in April 2009, the Passo Real reservoir's water meet the type I. The empirical models allowed to estimate the TSS concentration e water transparency ( $R^2 = 0.87$  e  $R^2 = 0.79$ ) using the near infrared and red bands, respectively. Because of the low correlation between Chl *a* and the spectral data, there was a low consistency between the estimated data and field collected data (interpolated). It was found that is possible to develop empirical models to estimate the TSS concentration and water transparency using RapidEye satellite scene. The bands ratios presented similar results than the obtained from the correlation between the bands and limnological variables. The highest correlation coefficients for the TSS were obtained through the B5/B1 and B5/B2 ratios ( $r = 0.94$  e  $r = 0.93$ , respectively). The ratio B1/B3 presented the highest correlation with the water transparency ( $r = 0.94$ ). The results obtained with RapidEye image, highlight the perspective to use satellite data as analysis tool for water quality monitoring.

**Key words:** TSS. Remote sensing. RapidEye.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Largura das bandas espectrais das imagens multiespectral RapidEye (B1: 440 – 510 um; B2: 520 – 590 um; B3: 630 – 685 um; B4: 690 – 730 um; B5: 760 – 850 um), sobre uma curva de reflectância espectral de um corpo d’água com presença de ficocianina e clorofila <i>a</i> .....	20
Figura 2 -	Processos na trajetória da radiação solar, desde a sua entrada na atmosfera, passando pela interface ar/água, sua interação com a coluna d’água e seu caminho até chegar ao sensor.....	23
Figura 3 -	Coeficiente de espalhamento (A) e de absorção (B) da água pura.....	25
Figura 4 -	Medidas in situ de reflectância espectral da água clara e de água com vários níveis de concentração de sedimentos em suspensão de solo siltoso.....	28
Figura 5 -	Variação da reflectância em função de diferentes concentrações de Chl <i>a</i> .....	31
Figura 6 -	Fator de Reflectância Bidirecional (FRB) para diferentes concentrações de matéria orgânica dissolvida (mg/L) de um corpo d’água medidas em laboratório.....	33
Figura 7 -	Principais etapas para o desenvolvimento da pesquisa.....	38
Figura 8 -	Localização do reservatório Passo Real no centro norte do Rio Grande do Sul, no Sul do Brasil.....	39
Figura 9 -	Localização dos pontos amostrais no Reservatório Passo Real. A figura apresenta a distribuição de 30 pontos amostrais, porém está nomeado até o ponto 31, por ter retirado o ponto amostral 3 devido à inconsistência dos dados.....	42
Figura 10 -	Dados de precipitação pluviométrica diária em 30 dias anterior ao levantamento de campo.....	53
Figura 11 -	Dados de precipitação pluviométrica acumulada mensal para a estação de Cruz Alta no ano de 2009.....	53
Figura 12 -	(A) Espacialização da transparência da água e (B) dados de transparência da água, nos pontos amostrais do reservatório Passo Real em abril de 2009.....	55
Figura 13 -	(A) Espacialização da temperatura da água e (B) dados de temperatura da água, nos pontos amostrais do reservatório Passo Real em abril de 2009.....	56
Figura 14 -	(A) Espacialização da clorofila <i>a</i> e (B) dados de clorofila <i>a</i> , nos pontos amostrais do reservatório Passo Real em abril de 2009.....	57
Figura 15 -	(A) Espacialização do TSS e (B) dados de TSS, nos pontos amostrais do reservatório Passo Real em abril de 2009.....	59
Figura 16 -	(A) Espacialização do COD e (B) dados de COD nos pontos amostrais, do reservatório Passo Real em abril de 2009, exceto o ponto amostral 30 devido à inconsistência do dado.....	60
Figura 17 -	(A) Composição colorida das bandas 3R2G1B do satélite RapidEye e (B) após aplicação da máscara com ampliação de contraste, para reservatório Passo Real – RS no dia 17 de abril de 2009.....	63

Figura 18 -	Espectros representativos dos principais setores do reservatório Passo Real, extraídos da imagem RapidEye em uma janela de 3x3 pixels para cada ponto amostral em abril de 2009. Pontos P4 e P5 (rio Jacuí); ponto 12 (rio Jacuí-Mirim); MPC (média do conjunto de pontos localizados na região centro-montante do reservatório, representados pelos pontos amostrais 1, 2, 6 ao 11 e 13 ao 20) e MPD (média do conjunto de pontos amostrais localizados na região próxima ao vertedor do reservatório (dique), pontos amostrais 21 ao 28, 30 e 31).....	64
Figura 19 -	Correlograma entre a reflectância nas diferentes faixas espectrais e as variáveis medidas no reservatório Passo Real – RS: totais de sólidos em suspensão (TSS), transparência da água (DS), clorofila <i>a</i> (CHL) e carbono orgânico dissolvido (COD) (linha tracejada em vermelho – limite dos valores estatisticamente significativo, $\alpha = 0,05$ ).....	66
Figura 20 -	Diagramas de dispersão com ajuste de modelo linear entre as variáveis limnológicas TSS, transparência da água e Chl <i>a</i> e a reflectância das bandas 5, 3 e 2.....	68
Figura 21 -	(A) Mapa de distribuição da concentração de TSS no reservatório Passo Real, estimada a partir dos dados de reflectância da banda 5 do satélite RapidEye e (B) dados medidos <i>in situ</i> interpolados por média ponderada, para abril de 2009.....	69
Figura 22 -	(A) Mapa de distribuição da transparência da água no reservatório Passo Real, estimada a partir dos dados de reflectância da banda 3 do satélite RapidEye e (B) dados medidos <i>in situ</i> interpolados por média ponderada, para abril de 2009.....	70
Figura 23 -	(A) Mapa de distribuição da concentração de clorofila <i>a</i> no reservatório Passo Real, estimada a partir dos dados de reflectância da banda 2 do satélite RapidEye e (B) dados medidos <i>in situ</i> interpolados por média ponderada, para abril de 2009.....	71
Figura 24 -	Diagramas de correlação entre todas as possíveis razões de bandas do satélite RapidEye e as variáveis limnológicas: TSS, DS e Chl <i>a</i> .....	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características técnicas gerais dos satélites RapidEye.....	19
Tabela 2 - Informações sobre os parâmetros físicos, químicos, biológicos, ecológicos, dinâmicos e geométricos, monitorados por métodos convencionais e a capacidade de sensoriamento remoto.....	22
Tabela 3 - Classificação de estado trófico para a clorofila <i>a</i> em reservatórios.....	58
Tabela 4 - Estatística descritiva das variáveis limnológicas amostradas durante a campanha de campo do reservatório Passo Real.....	62

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	18
<b>2.1</b>	<b>Sensoriamento remoto</b> .....	18
2.1.1	Satélite RapidEye.....	18
2.1.2	Sensoriamento remoto da água.....	20
2.1.3	Interação da Radiação Eletromagnética (REM) com a água.....	23
2.1.4	Resposta espectral da água pura.....	24
2.1.5	Resposta espectral da água de acordo com seus constituintes opticamente ativos.....	26
2.1.5.1	Totais de sólidos em suspensão.....	26
2.1.5.2	Fitoplâncton: Clorofila <i>a</i> .....	29
2.1.5.3	Carbono orgânico dissolvido.....	31
<b>2.2</b>	<b>Correção atmosférica</b> .....	33
<b>2.3</b>	<b>Técnica de análise de espectros de reflectância</b> .....	35
<b>2.4</b>	<b>Análises estatísticas</b> .....	36
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	38
<b>3.1</b>	<b>Caracterização geral da área de estudos</b> .....	39
<b>3.2</b>	<b>Localização dos pontos amostrais</b> .....	41
<b>3.3</b>	<b>Trabalho de campo e aquisição de dados limnológicos</b> .....	42
3.3.1	Transparência da água.....	43
3.3.2	Temperatura da água.....	43
3.3.3	Total de sólidos em suspensão.....	44
3.3.4	Clorofila <i>a</i> .....	44
3.3.5	Carbono orgânico dissolvido.....	45
<b>3.4</b>	<b>Espacialização das variáveis limnológicas</b> .....	46
<b>3.5</b>	<b>Análise visual da imagem</b> .....	46
<b>3.6</b>	<b>Precipitação pluviométrica</b> .....	47
<b>3.7</b>	<b>Correção atmosférica e conversão para reflectância</b> .....	47
<b>3.8</b>	<b>Delimitação do reservatório</b> .....	48
<b>3.9</b>	<b>Extração de dados espectrais</b> .....	48
<b>3.10</b>	<b>Agrupamentos de espectros</b> .....	48
<b>3.11</b>	<b>Tratamento de dados espectrais</b> .....	49
3.11.1	Razão de bandas.....	49
<b>3.12</b>	<b>Análises estatísticas</b> .....	50
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	52
<b>4.1</b>	<b>Condições meteorológicas</b> .....	52
<b>4.2</b>	<b>Distribuição espacial das variáveis limnológicas</b> .....	54
4.2.1	Transparência da água.....	54
4.2.2	Temperatura da água.....	55
4.2.3	Clorofila <i>a</i> .....	56
4.2.4	Total de sólidos em suspensão.....	58
4.2.5	Carbono orgânico dissolvido.....	60
<b>4.3</b>	<b>Descrição dos dados limnológicos</b> .....	61
<b>4.4</b>	<b>Análise visual da imagem</b> .....	62

<b>4.5</b>	<b>Relação entre a reflectância da água e as variáveis limnológicas.....</b>	<b>63</b>
<b>4.6</b>	<b>Razão de bandas.....</b>	<b>71</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>74</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>76</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por água doce, a nível mundial, utilizada para o abastecimento doméstico, industrial, produção de alimentos por meio da agricultura irrigada, demonstra a dependência da disponibilidade deste recurso natural para as atividades humanas (ESTEVES, 2011).

A necessidade de atender a demanda de água nos mais diversos setores da sociedade vêm trazendo grandes alterações nos ambientes aquáticos, modificando suas condições físico-químicas e biológicas. Segundo Tundisi (2005), dentre os usos múltiplos da água, a construção de reservatórios em especial para produção de energia elétrica, é um dos principais usos no Brasil gerando cerca de 85% de energia elétrica no país. Apesar da importância econômica e social dos reservatórios, a sua construção provoca alterações na qualidade da água. Pereira Filho et al. (2009) ressalta que, as mudanças de velocidade, perfil de temperatura e perfil de oxigênio da água são apenas alguns efeitos imediatos em decorrência das alterações dos ambientes lóticos para lênticos.

Outro fator relevante é a crescente eutrofização, devido ao aumento do despejo de poluentes nos corpos d'água, em função da formação de aglomerados urbanos e da produção agrícola e industrial (TUNDISI e TUNDISI, 2008), provocando modificações significativas na fauna, flora e qualidade da água (TRENTIN, 2009), reduzindo as possibilidades de usos múltiplos dos reservatórios e tornando os custos de tratamento da água mais elevados. Isso gera grande preocupação, aumentando a necessidade de estudos de ambientes aquáticos, buscando compreender suas repostas provenientes das atividades humanas, a fim de monitorar e adotar medidas adequadas quanto à preservação ou recuperação.

Medidas *in situ* e coletas de amostras para análise em laboratório são usualmente realizadas para avaliar a qualidade da água. Entretanto, o custo financeiro e operacional é alto, além de locais de difícil acesso. O que não são capazes de fornecer uma representação espacial e temporal da qualidade da água, pois são métodos acurados para medidas pontuais no tempo e no espaço (JENSEN, 2009).

Cabe destacar o uso do sensoriamento que tem contribuído na realização de estudos de ambientes aquáticos. Segundo Hellweger et al. (2004), o sensoriamento remoto permite estimar parâmetros da qualidade da água e gerar estimativas em escala sinóptica da água (grandes áreas), devido à cobertura global que possibilita estudar áreas de difícil acesso e o



longo período de registro de imagens permitindo a análise temporal dos alvos, como os ecossistemas aquáticos.

Devido ao processo de interação da radiação eletromagnética (REM) com o corpo d'água, é possível extrair informações sobre a qualidade da água, a partir das diferentes assinaturas espectrais de seus componentes opticamente ativos (COAs). Segundo Rudorff (2006), os principais COAs presentes na água são os sedimentos em suspensão, pigmentos fotossintetizantes, matéria orgânica dissolvida e as moléculas de água em si.

De acordo com Rudorff (2006), um dos principais interesses no uso de imagens de satélite em ambientes aquáticos é verificar a variação espacial e temporal da composição da água, possibilitando investigar a origem e o deslocamento de substâncias específicas em suspensão ou dissolvidas na água.

A integração de dados limnológicos adquiridos *in situ* com imagens de sensoriamento remoto vem sendo adotada como opção para estimativas de parâmetros sobre a qualidade da água. Nesse sentido, escolheu-se como área de estudo, o reservatório da Usina Hidrelétrica de Passo Real, localizado na bacia hidrográfica do Alto Jacuí no Centro-Norte do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. O reservatório é considerado o maior lago artificial do Estado, tendo como as principais finalidades: geração de energia elétrica e a regularização de vazões para os reservatórios a sua jusante (CEEE-GT, 2009).

A bacia hidrográfica do Alto Jacuí enquadra-se nos sistemas ambientais naturais fortemente transformados pelas práticas econômicas, apresentando-se como áreas cujas coberturas vegetais naturais foram quase totalmente transformadas em campos de pastagens cultivadas, campos de agricultura e silvicultura (ROSS, 2006). E isso pode influenciar significativamente na qualidade da água do reservatório.

Nesse sentido, o trabalho tem como objetivo principal, analisar as relações entre variáveis limnológicas e espectrais no reservatório da UHE Passo Real – RS, utilizando dados coletados *in situ* e dados do satélite RapidEye.

Embora o satélite RapidEye não seja especificamente utilizado para aplicação em ambientes aquáticos, estudos tem comprovado o seu potencial, dos quais destacam-se: Cicerelli e Galo (2015), que avaliaram o potencial de dados espectrais multifonte na detecção remota do fitoplâncton numa área delimitada no reservatório de Nova Avanhandava – SP. Utilizaram-se dados hiperespectrais em campo e imagens multiespectrais Modis e RapidEye, os quais foram relacionados a variáveis limnológicas indicadoras do comportamento fitoplanctônico, clorofila *a* e ficocianina. As autoras concluíram que imagens multiespectrais permitem uma avaliação da biomassa fitoplanctônica pela clorofila *a*. Para as imagens

RapidEye, a banda 4 (690-730 nm) foi mais propícia para detecção de clorofila *a* e a banda 3 (630-685 nm) para ficocianina, enquanto para as cenas Modis todas as bandas apresentaram resultados significativos apenas para clorofila *a*. Ressaltam que, para ficocianina, pigmento fitoplanctônico diagnóstico da presença de cianobactérias, dados mais refinados são necessários, tais como os hiperspectrais.

Com intuito de avaliar a viabilidade do uso de dados de sensoriamento remoto de alta resolução espacial, para o monitoramento e modelagem de concentração de Chl *a* em água de rio, Choe, Lee e Cheon (2015), utilizaram imagens do satélite RapidEye e amostras coletadas em campo. Os autores concluíram que o modelo utilizando as bandas do vermelho, borda do vermelho e infravermelho próximo calculado por uma função cúbica, explicou 73% da variância dos dados estimados a partir da relação entre coeficiente de absorção e concentração de Chl *a*. Observaram a semelhança entre os dados estimados de Chl *a* a partir da imagem e os dados medidos em cada estação. Os resultados desta análise mostraram que técnicas de estimativa de Chl *a* utilizando imagens de sensoriamento remoto de alta resolução têm possibilidade de monitoramento rápido e modelagem de Chl *a*, mas ainda exige a melhoria da precisão da estimativa.

Presume-se que as imagens do satélite RapidEye proporcionem dados espectrais que permitam extrair informações sobre os constituintes opticamente ativos relevantes para análise da qualidade da água do reservatório Passo Real.

Para atingir o objetivo principal do presente estudo foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- ◆ Caracterizar a distribuição espacial das variáveis limnológicas: total de sólidos em suspensão, clorofila *a*, transparência da água, carbono orgânico dissolvido e temperatura;
- ◆ Analisar os espectros de reflectância gerados a partir da imagem multiespectral em cada ponto amostral, buscando identificar componentes opticamente ativos no corpo da água;
- ◆ Correlacionar a resposta espectral da água do reservatório Passo Real obtidas a partir da imagem do satélite RapidEye com as variáveis limnológicas coletadas *in situ*.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Sensoriamento remoto

#### 2.1.1 Satélite RapidEye

O uso de sensoriamento remoto tem contribuído nos estudos dos ecossistemas terrestre e aquáticos. Segundo Jensen (2009), o sensoriamento remoto orbital através de sistemas ópticos que operam na faixa do visível e infravermelho do espectro eletromagnético, tem demonstrado atualmente uma ferramenta importante para estudos de bacias hidrográficas. Atualmente, diversos satélites têm sido lançados com avanços consideráveis, em especial quando se trata das resoluções temporal, espacial e espectral. Diante dessa tendência, pode-se destacar a empresa alemã RapidEye que lançou seus cinco Satélites de Observação da Terra (lançados com sucesso no dia 29 de agosto de 2008) (FELIX, KAZMIERCZAK e ESPINDOLA, 2009). Cada um dos cinco satélites efetua 15 voltas por dia em torno da Terra, e juntos conseguem gerar aproximadamente 4,5 milhões de km<sup>2</sup> de imagens por dia (FELIX, KAZMIERCZAK e ESPINDOLA, 2009).

A configuração desse sistema RapidEye permite coletar imagens de qualquer ponto do globo, com faixa de imageamento de 77 km de largura por até 1.500 km de extensão (limite de armazenamento da memória). Os satélites são equipados por um sensor multiespectral que possui uma banda denominada vermelho limítrofe, concebida especificamente para o monitoramento da atividade fotossintética da vegetação e capacidade de medir a separação de espécies e monitoramento da saúde da vegetação (FELIX, KAZMIERCZAK e ESPINDOLA, 2009). A banda borda do vermelho situada entre o vermelho e o infravermelho próximo pode ser utilizada para discriminar a vegetação e corpos aquáticos (OLIVEIRA, 2013).

Devido à característica de a constelação ser composta por cinco satélites idênticos e em mesma órbita, permite disponibilizar um grande número de imagens de um mesmo local, além de coletar imagens sobre grandes áreas, com alta capacidade de revisita e boa acurácia geométrica e radiométrica das mesmas (RAPIDEYE, 2013; FELIX, KAZMIERCZAK e ESPINDOLA, 2009).

Devido aos cinco satélites RapidEye estarem calibrados igualmente uns com os outros, uma imagem obtida a partir de um desses satélites terá as mesmas características, os quais estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características técnicas gerais dos satélites RapidEye

<b>Características</b>	<b>Informações</b>	
Número de satélites	5	
Altitude da Órbita	630 km, órbita síncrona com o Sol	
Passagem pelo Equador	Aproximadamente 11:00 hs	
Tipo do Sensor	Imageador <i>pushbroom</i> (varredura eletrônica) multiespectral	
Bandas Espectrais	Bandas	Comprimento de onda (nm)
	Azul	440 – 510
	Verde	520 – 590
	Vermelho	630 – 685
	Vermelho Limítrofe (RedEdge)	690 – 730
	Infravermelho Próximo	760 – 850
Largura da faixa imageada	77 km	
Resolução Espacial (nadir)	6,5 m	
Tamanho do Pixel (ortorretificado)	5 m	
Resolução Radiométrica	12 bits (4.096 níveis de cinza)	
Resolução Temporal	Diariamente (off-nadir); 5,5 dias (nadir)	
Expectativa de tempo de vida do satélite	7 anos	

Fonte: adaptado de RapidEye (2013).

A faixa do espectro eletromagnético mais adequada para estudos de corpos d'água está compreendida entre 400 e 850 nm, dado que as bandas 1, 2, 3, 4 e 5 do RapidEye recobrem quase totalmente esta região do espectro. A Figura 1, apresenta as regiões espectrais de abrangência de cada banda para avaliação das imagens RapidEye.

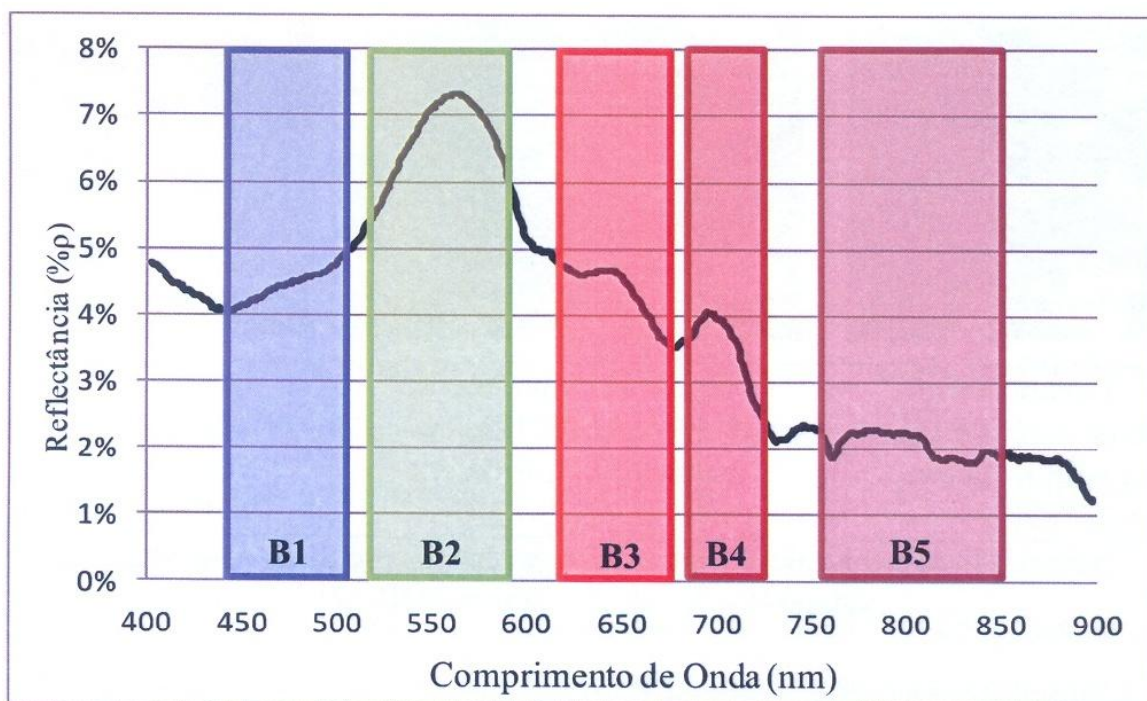


Figura 1 - Largura das bandas espectrais das imagens multiespectral RapidEye (B1: 440 – 510 nm; B2: 520 – 590 nm; B3: 630 – 685 nm; B4: 690 – 730 nm; B5: 760 – 850 nm), sobre uma curva de reflectância espectral de um corpo d'água com presença de ficocianina e clorofila *a*.

Fonte: Cicerelli, R. E. (2013).

As imagens RapidEye podem ser adquiridas em três níveis de processamento de acordo com RapidEye (2015): Nível 1B (Nível-Sensor) são os produtos menos processados e possuem apenas correção radiométrica e georeferenciamento das cinco bandas, não há correção geométrica (tamanho do pixel original 6,5 m); Nível 3A (produto ortorretificado) com correção radiométrica e geométrica a partir do *Shutter Radar Topography Mission* DEM SRTM. As imagens apresentam pixels de 5 m formando *tiles* de 25 x 25 km; Nível 3B são os produtos com correção radiométrica e geométrica.

### 2.1.2 Sensoriamento remoto da água

O uso de técnicas de sensoriamento remoto em ambientes aquáticos associados a dados de campo, auxilia na compreensão da dinâmica e monitoramento da qualidade das águas, uma vez que a energia refletida por ela é consideravelmente menor que de outros alvos. O sensoriamento remoto das águas é restrito a uma faixa relativamente estreita de

comprimento de onda ópticos em relação aos demais objetos, devido à baixa irradiância solar em comprimentos de onda menores que 400 nm e por uma combinação da baixa energia solar com o aumento acentuado de absorção da energia eletromagnética pela água em comprimentos de onda maiores que 850 nm. Portanto, a faixa entre 400 a 850 nm é normalmente escolhida por pesquisadores para determinar os métodos de estimativa de parâmetros de qualidade de água a partir de dados de sensoriamento remoto (DEKKER,1993).

Apesar dessas restrições, o sensoriamento remoto tem contribuído em estudos de ambientes aquáticos, como demonstra diversas pesquisas. Barbosa (2005); Rudorff (2006) ressaltam que, o sensoriamento remoto tem sido usado como ferramenta em pesquisas de estimativas de parâmetros sobre a qualidade da água, devido à grande abrangência espacial e temporal de imageamento da superfície terrestre, possibilitando investigar a origem e o deslocamento de substâncias específicas em suspensão ou dissolvidas na água.

O uso dessa tecnologia em ambientes aquáticos permite obter respostas espectrais de suas características, indicando alterações limnológicas, uma vez que, a presença de constituintes opticamente ativos imprimem comportamento espectral distinto. De acordo com Thiruneelakandan et al. (2014), o sensoriamento remoto é uma ferramenta poderosa e de baixo custo para monitorar mudanças sistemáticas no ambiente natural, associados a medições *in situ* de parâmetros de qualidade da água, isto é possível, pois o comportamento espectral do sinal refletido é em função das características ópticas combinados da coluna de água e de reflectância de fundo, devido às substâncias opticamente ativas dissolvidas e suspensas, ou seja, os sólidos em suspensão, pigmentos fotossintéticos, detritos e matéria orgânica dissolvida.

Segundo Wetzel (2000), a radiação eletromagnética incidente sobre a superfície da água não penetra completamente, pois uma parcela significativa é refletida e retroespalhada, uma vez que dentro do corpo d'água, a luz é atenuada rapidamente à medida que aumenta a profundidade de absorção e mecanismos de dispersão.

Torna-se importante compreender os processos de interação da radiação eletromagnética com a água e seus constituintes opticamente ativos e suas peculiaridades no que tange as características físico-químicas e biológicas (IOCCG, 2000).

Devido à propriedade de interagir com a radiação eletromagnética, provocando diferentes assinaturas espectrais de absorção e espalhamento, alguns parâmetros de qualidade de água são considerados componentes opticamente ativos (COAs), os quais são passíveis de monitoramento via sensoriamento remoto, apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Informações sobre os parâmetros físicos, químicos, biológicos, ecológicos, dinâmicos e geométricos, monitorados por métodos convencionais e a capacidade de sensoriamento remoto.

<b>Parâmetros físicos</b>	<b>Método convencional de medida</b>	<b>Capacidade de sensoriamento remoto</b>
Temperatura	Radiometria <i>in situ</i>	Sim
Turbidez	Disco de Secchi, Turbidímetro.	Sim
Cor	Filtração	Sim
Profundidade de zona eufótica	Perfis de irradiância em subsuperfície	Sim
<b>Parâmetros químicos</b>	<b>Método convencional de medida</b>	<b>Capacidade de sensoriamento remoto</b>
Carbono orgânico dissolvido	Oxidação catalítica Espectroscopia de infravermelho	Parcialmente matéria orgânica dissolvida
Oléos	-	Sim
<b>Parâmetros biológicos</b>	<b>Método convencional de medida</b>	<b>Capacidade de sensoriamento remoto</b>
Pigmentos clorofilados	HPLC, Extração e espectrofotometria	sim
Pigmentos acessórios	HPLC, Extração e espectrofotometria	Sim
Detritos concentração	Sem especificações	Sim
<b>Parâmetros ecológicos</b>	<b>Método convencional</b>	<b>Sensoriamento Remoto</b>
Produção primária	Garrafas de incubação	Sim
Litoral, bentos.		sim
<b>Parâmetros dinâmicos</b>	<b>Método convencional</b>	<b>Sensoriamento Remoto</b>
Sedimentos em suspensão	Gravimétrico	Sim
Nível da água	Régua, linígrafo	Sim
Correntes e ondas	Correntômetro	Sim
<b>Parâmetros geométricos</b>	<b>Método convencional</b>	<b>Sensoriamento Remoto</b>
Área do corpo d'água	Mapeamento	Sim
Morfometria	Topografia/geomorfologia	Sim

Fonte: Durand et al., 1999; adaptado de Novo (2007).

A investigação das características de um corpo d'água com o uso de sensoriamento remoto, implica primeiramente, compreender os processos de interação da energia eletromagnética com a água pura, e em seguida tem que se considerar como essa luz incidente é afetada quando a coluna d'água contém materiais orgânicos e inorgânicos (JENSEN, 2009).

Nesse sentido, faz-se a seguir uma revisão dos processos de interação da radiação eletromagnética com a água pura e com constituintes opticamente ativos (COAs).

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

A radiação que chega até o sensor transportado por um avião ou satélite, após entrar em contato com um corpo d'água pode ser proveniente de quatro componentes: radiância atmosférica, radiância de superfície, radiância volumétrica e radiância de fundo (Figura 2).

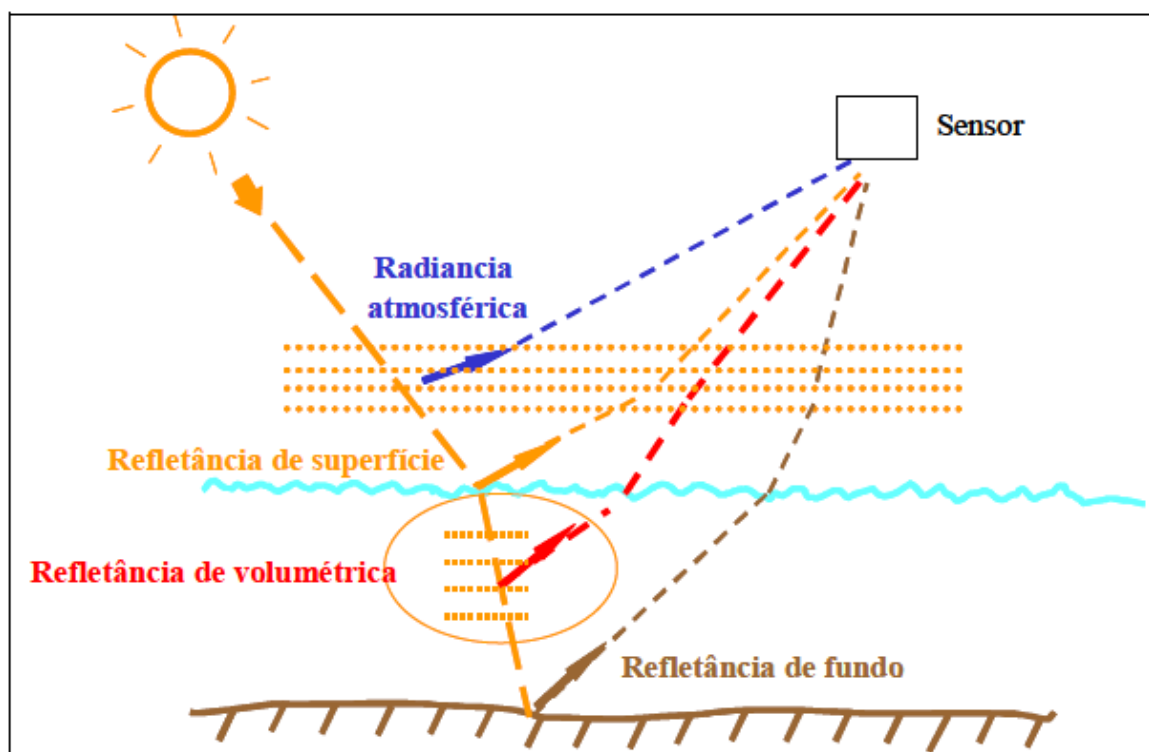


Figura 1 - Processos na trajetória da radiação solar, desde a sua entrada na atmosfera, passando pela interface ar/água, sua interação com a coluna d'água e seu caminho até chegar ao sensor.  
Fonte: Barbosa (2005).



Segundo Jensen (2009), a radiância atmosférica é resultante da radiância solar direta do Sol e espalhada pelas nuvens e gases da atmosfera, que não atinge a superfície; a radiância de superfície é a porção da radiância solar e atmosférica que alcança a interface ar-água, mas penetra apenas cerca de 1 mm na água; a radiância volumétrica é a parte da radiação solar e atmosférica que penetra a interface ar-água, interagindo com a água e seus constituintes orgânicos e inorgânicos sem interagir com o fundo; e a radiância de fundo é a porção da radiação proveniente do Sol e da atmosfera que penetra a interface ar-água, porém atingindo o fundo do corpo d'água.

Nesse sentido, entende-se que a radiação detectada por sensor traz informações sobre a coluna d'água, provenientes do espalhamento atmosférico, reflexão especular da radiação solar direta e difusa, e do fluxo de radiação emergente da água (RUDORFF, 2006). A radiância de interesse para identificar os constituintes orgânicos e inorgânicos na coluna d'água é a radiação volumétrica, assim é preciso que envolva a correção radiométrica dos dados do sensor para remover os efeitos atmosféricos, o efeito *sunlint* (reflexão solar ou gliter) e de outras reflexões de superfície, e a reflectância de fundo (JENSEN, 2009).

A radiação ao penetrar a coluna d'água sofre alterações qualitativas e quantitativas, uma vez que a alteração qualitativa é a refração que implica a redução da velocidade ao penetrar no meio líquido, mudando de direção; parte da radiação é absorvida e transformada em outras fontes de energia, por exemplo, a fotossíntese, o aumento da temperatura da água; e a dispersão que é o espalhamento que ocorre devido à interação da radiação eletromagnética com as partículas dissolvidas e/ou suspensas na água (ESTEVES, 2011).

Em função disto, conhecer o processo da interação da radiação eletromagnética em um corpo d'água, assim como as propriedades características (espalhamento e absorção) da água e de cada um de seus constituintes, é um dos subsídios para analisar as informações obtidas de dados de sensoriamento remoto de ambientes aquático (BARBOSA, 2005). Portanto, a seguir apresenta uma breve revisão da resposta espectral da água pura e com a presença dos constituintes opticamente ativos.

#### 2.1.4 Resposta espectral da água pura

Ao analisar o comportamento espectral em ambientes aquáticos é essencial entender a resposta espectral da água pura (sem matéria orgânica e inorgânica), que seletivamente

absorve e/ou reflete a radiação incidente, assim, é de suma importância considerar o comportamento espectral da água quando não é pura, ou seja, conteúdo matéria orgânica e inorgânica (JENSEN, 2009). A água pura, possui baixa reflectância mesmo na região do visível do espectro, devido ao pequeno coeficiente de espalhamento e a elevada transmitância (NOVO, 2010).

A variação espectral dos coeficientes de absorção e espalhamento é apresentado na Figura 3. Observa-se que o coeficiente de absorção da água pura é mínimo na região compreendida entre 400 e 600 nm, aumentando rapidamente na região do infravermelho. Enquanto que o coeficiente de espalhamento é o máximo na região do azul e decresce exponencialmente em direção ao infravermelho. Assim, pode-se concluir que a energia refletida pela água pura é máxima na região do azul e decresce em direção ao vermelho (RUDORFF, 2006; NOVO, 2001; BARBOSA,2005).

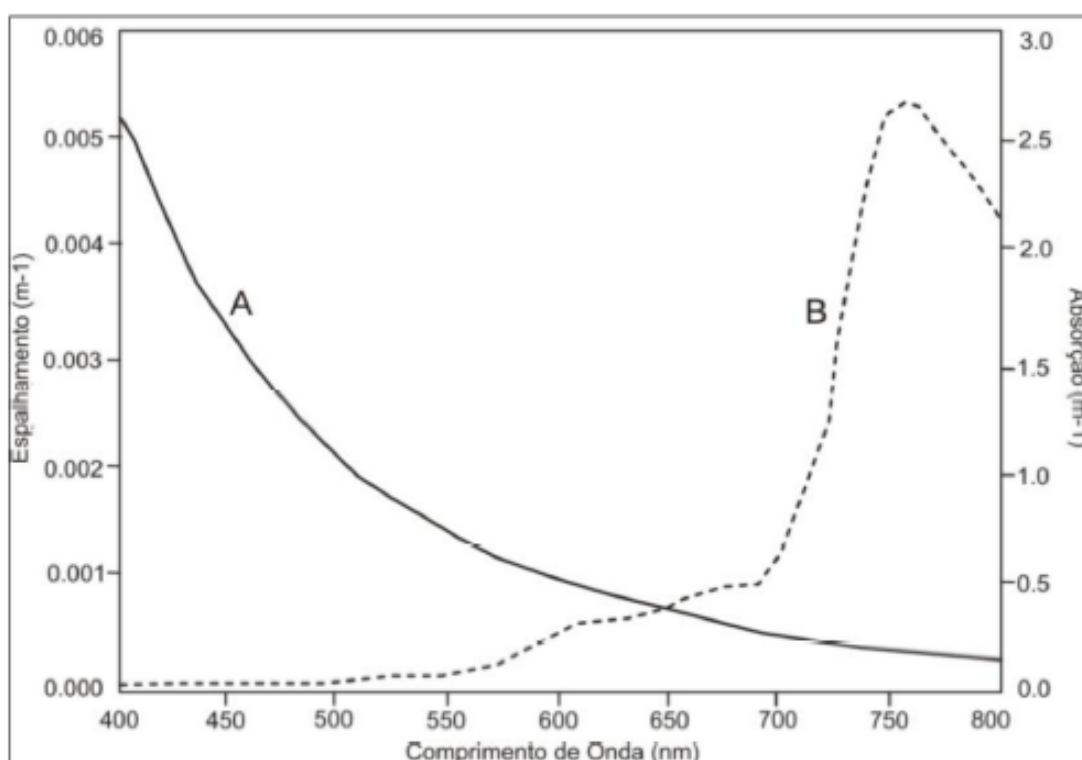


Figura 2 - Coeficiente de espalhamento (A) e de absorção (B) da água pura.  
Fonte: Dekker (1993).

É em função disso, que a água pura absorve a radiação eletromagnética, apresentando cor preta nas imagens obtidas nas regiões do visível e infravermelho, enquanto que corpos

d'águas com constituintes opticamente ativos, apresentam em tons de cinza no visível, ou em cores, dependendo da associação de cores das imagens originais (FLORENZANO, 2007).

#### 2.1.5 Resposta espectral da água de acordo com seus constituintes opticamente ativos

A água com suas propriedades de solvente, ao entrar em contato com as rochas, solos, atmosfera e a matéria orgânica, uma série de compostos orgânicos e inorgânicos são naturalmente dissolvidos no meio hídrico (PEDROSA, 2008), os quais definem a sua qualidade.

Essas misturas complexas de diversos materiais dissolvidos ou particulados possuem propriedades ópticas diversas, ou seja, interagem com a luz de maneira diferente, em função de sua concentração e natureza, e a presença desses componentes na coluna d'água é responsável por modificações em sua cor, pois eles absorvem ou espalham seletivamente a luz incidente (ALCANTARA, 2006).

Essencialmente todas as alterações que ocorrem nas propriedades ópticas inerentes de um ecossistema aquático podem ser atribuídas a três componentes do ecossistema, sendo eles: a própria água, as substâncias húmicas dissolvidas e o material particulado em suspensão, denominado de Total de Sólidos em Suspensão (TSS), que pode ser decomposto em duas frações; matéria orgânica viva e matéria inorgânica e detritos (BARBOSA, 2005).

Desse modo, a compreensão dos processos de interação da energia eletromagnética com a água e seus constituintes opticamente ativos é de fundamental importância para a extração de informações de ambientes aquáticos por Sensoriamento Remoto. Assim, fez-se uma revisão para compreensão desse processo.

##### 2.1.5.1 Totais de sólidos em suspensão

O total de sólidos em suspensão (TSS) é todo material particulado em suspensão na água e que não passa por um filtro de 0,45  $\mu\text{m}$ . Os sólidos presentes na água são compreendidos por sólidos orgânicos em suspensão (SOS) que são compostos pelo

fitoplâncton, zooplâncton e matéria orgânica particulada; e os sólidos inorgânicos em suspensão (SIS) que são por partículas minerais, principalmente silte e argila (ESTEVEZ, 2011; BARBOSA, 2005).

O volume de material em suspensão transportado pelos rios está associado aos usos das bacias hidrográficas, do grau de desmatamento ou da cobertura vegetal. As represas artificiais construídas para diversos fins alteram os fluxos e o transporte de sólidos dos rios. Os impactos podem ser naturais que são provenientes dos próprios mecanismos de funcionamento dos ecossistemas e das bacias hidrográficas, assim como os impactos pela ação humana, que gera grandes alterações na estrutura e na função dos ecossistemas aquáticos (TUNDISI, J. e TUNDISI, T., 2008).

Os corpos d'água interiores e costeiros podem transportar uma carga importante de sedimentos em suspensão que podem afetar drasticamente as características de sua reflectância espectral (JENSEN, 2009).

Assim, monitorar o tipo, a quantidade e a distribuição espacial de sedimentos em suspensão em corpos d'água interiores e costeiros é de suma importância, pois os sedimentos acarretam diversos problemas, como por exemplo, assoreamentos de rios, reservatórios, obras para controle de inundação e estuários, afetam a qualidade da água e a sua adequação para o consumo humano, recreação e uso industrial. Assume papel de agente transportador e armazenador de pesticidas, fósforo e nitrogênio absorvidos, e compostos orgânicos, podendo ser um indicador de poluição, além de impedir a transmissão de radiação solar, reduz a fotossíntese em vegetação aquática submersa e fitoplâncton próximo ao substrato, sendo que a vegetação aquática e o fitoplâncton têm um papel vital na cadeia alimentar do ecossistema aquático (JENSEN, 2009).

Cabe ressaltar que, os ambientes terrestre e aquático são integrados, uma vez que a alteração em um reflete no outro. Na Figura 4 mostra a variação da resposta espectral da água clara (pura) e da água com concentrações variáveis de sólidos em suspensão oriundos de solo silteoso. Observa-se as seguintes feições nesta resposta espectral, um crescimento da reflectância entre 400 e 500 nm, associadas ao espalhamento devido aos sólidos em suspensão e a baixa absorção pela água da REM nesta faixa do espectro; apresenta uma alta reflectância na faixa entre 550 e 650 nm; um decréscimo entre 650 e 700 nm, devido ao forte aumento de absorção da água nesta região, e um pequeno pico de reflectância entre 730 e 780 nm (BARBOSA, 2005; JENSEN, 2009).

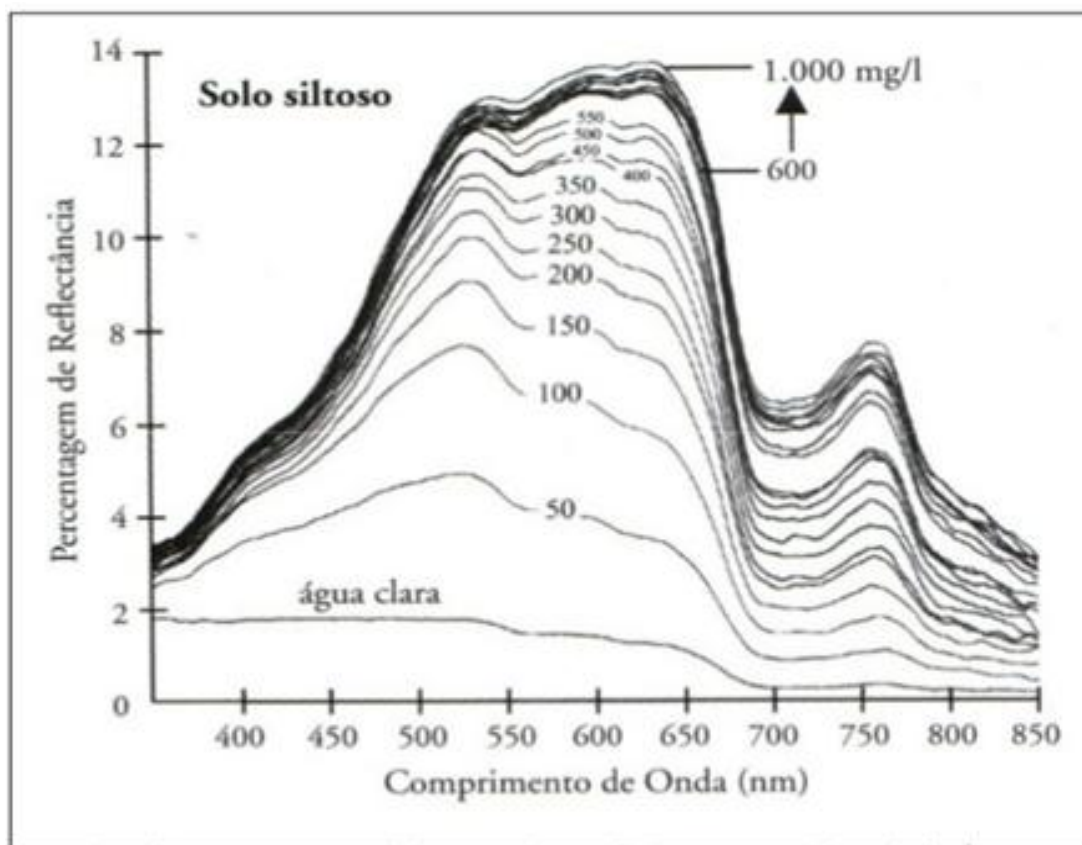


Figura 3 - Medidas in situ de reflectância espectral da água clara e de água com vários níveis de concentração de sedimentos em suspensão de solo siltoso.

Fonte: Lodhi et al., (1997).

A reflectância da água clara diminui continuamente após cerca de 580 nm devido a absorção na coluna d'água. A resposta espectral da água com o aumento da concentração de sólidos em suspensão resulta no aumento da reflectância do volume da água e o deslocamento da reflectância máxima em direção a comprimentos de ondas mais longos (WACHHOLZ, 2007).

Coefficientes de correlação ( $r$ ) foram calculados para descrever o relacionamento entre a concentração de sólidos em suspensão e a reflectância espectral. Os valores de correlação obtidos para este tipo de solo variaram de 0,78 a 0,98, com maiores correlações ( $r > 0,90$ ) na região do infravermelho próximo entre 714 e 880 nm (JENSEN, 2009).

O mesmo autor relata que os comprimentos de onda do visível entre 580-690 nm podem fornecer informações sobre o tipo de sólidos em suspensão no corpo d'água; enquanto que no infravermelho próximo de 714-880 nm pode ser útil para determinar a quantidade de sólidos em suspensão, sendo os constituintes predominantes no corpo d'água. No entanto, estas relações estatísticas podem não ser aplicadas universalmente, tendo em vista, que para

estimar concentrações de sólidos em suspensão com o uso de sensoriamento remoto devem ser investigadas as características de absorção e espalhamento da água e de solos da área geográfica de interesse.

De acordo com Mantovani (1993), as características do material particulado em suspensão ligadas à sua contribuição mineralógica, ao tamanho das partículas e concentrações são inter-relacionadas e desempenham papel importante na determinação da resposta espectral resultante.

#### 2.1.5.2 Fitoplâncton: Clorofila *a*

O plâncton é um termo genérico usado para descrever todos os organismos vivos (plantas e animais) presentes em um corpo d'água. O qual é subdividido em organismos vegetais (fitoplâncton), organismos animais (zooplâncton), bactérias (bacterioplâncton) e formas inferiores de plantas, como fungos algais (JENSEN, 2009). Os fitoplânctons são organismos vegetais algais que se distribuem por grande parte dos ambientes marinhos e aquáticos continentais do mundo (ARRAUT et al., 2005). A principal característica do fitoplâncton é a presença de três tipos de pigmentos fotossintetizantes: clorofilas, carotenoides e ficobiliproteínas (ou ficobilinas ou biliproteínas) (SENGPIEL, 2007). Todo o fitoplâncton em corpos d'água contém o pigmento fotossinteticamente ativo clorofila *a*, entretanto, as clorofilas *c*, *d* e mesmo *e* podem estar presentes em várias profundidades (ARRAUT et al., 2005; JENSEN, 2009).

Nestes ambientes, a clorofila *a* é o principal responsável pela captação de energia eletromagnética produzindo oxigênio para o sistema durante o processo fotossintético (ARRAUT et al., 2005; JENSEN, 2009; GALO, FERREIRA e UTSUMI, 2013). Por esse motivo, torna-se um parâmetro de suma importância para avaliar a qualidade da água. A clorofila *a* é utilizada para estimar a biomassa do fitoplâncton e inferir sobre a qualidade da água, e conseqüentemente, na carga de nutrientes e nas condições gerais do ecossistema aquático (PAN et al., 2013). Ou seja, um indicador do crescimento de algas e cianobactérias devido ao enriquecimento por nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo, fenômeno este denominado eutrofização (CETESB, 2014), e na identificação de florações, podendo ser detectados a partir de satélites (THIRUNEELAKANDAN et al., 2014). Isto devido à forte

absorção da energia em certas áreas do espectro eletromagnético e definem assinaturas espectrais próprias (ENNES, 2008).

O fitoplâncton pode ser utilizado como indicador de eutrofização, quando detectada florações de cianobactérias ou de poluição por pesticidas ou metais pesados, através da presença de espécies resistentes ao cobre. Determinados grupos de algas podem gerar odor e sabor indesejáveis, e algumas cianobactérias são produtoras de toxinas, na qual sua floração traz riscos à saúde humana (ENNES, 2008)

Em relação às cianobactérias (cianofíceas), Esteves (2011) ressalta que, a sua adaptação permite que a alga, em determinadas condições de radiação, realize o máximo de assimilação, que por consequência obtém-se o máximo de produtividade, sendo assim, é possível explicar a capacidade de adaptação das cianobactérias em todos os biótipos do ecossistema lacustre. As cianofíceas lacustres planctônicas são adaptadas as flutuações por meio de vacúolos gasosos. Muitas espécies, quando em condições favoráveis, crescem em altas densidades e se localizam principalmente nas camadas superficiais da água, assim, este fenômeno é denominado por florações das algas (em inglês denomina-se “bloom”), que ocorre em dias quentes e calmos principalmente em lagos eutrofizados.

A biomassa e a composição de espécies do fitoplâncton nos reservatórios dependem das inter-relações de fatores físicos, como temperatura e circulação; químicos, como concentração de nutrientes e distribuição relativa dos diferentes íons dissolvidos na água; e fatores biológicos, como interação das espécies, efeitos da predação e parasitismo (TUNDISI, J. e TUNDISI, T., 2008).

Desse modo, tem sido crescente a demanda de informações relativas às possíveis consequências de ações antrópicas sobre ecossistemas aquáticos, bem como informações sobre grupos de algas indicadoras da qualidade da água (LONDE et al., 2005). Segundo Rudorff (2006), o grande interesse de estudos de sensoriamento remoto é usar o conhecimento das bandas de absorção específicas dos pigmentos fotossintetizantes para poder ter acesso aos prováveis tipos de comunidades fitoplanctônicas.

A Figura 5 representa um experimento realizado por Rundquist et al. (1996), com diferentes concentrações de Chl *a*. As feições significativas nesse experimento foram, uma baixa reflectância entre 400 e 500 nm, devido a absorção da luz azul (com um mínimo em 438 nm, absorção pela Chl *a*; pico de reflectância entre 560 e 570 nm e ponto máximo de absorção clássico da Chl *a* em 675 nm; e um pico de reflectância no infravermelho próximo entre 700 e 720 nm, e um pico menor em aproximadamente 810 nm, provavelmente causado pelo

retroespalhamento de matéria orgânica (células algais), combinado com a absorção pela água no infravermelho.

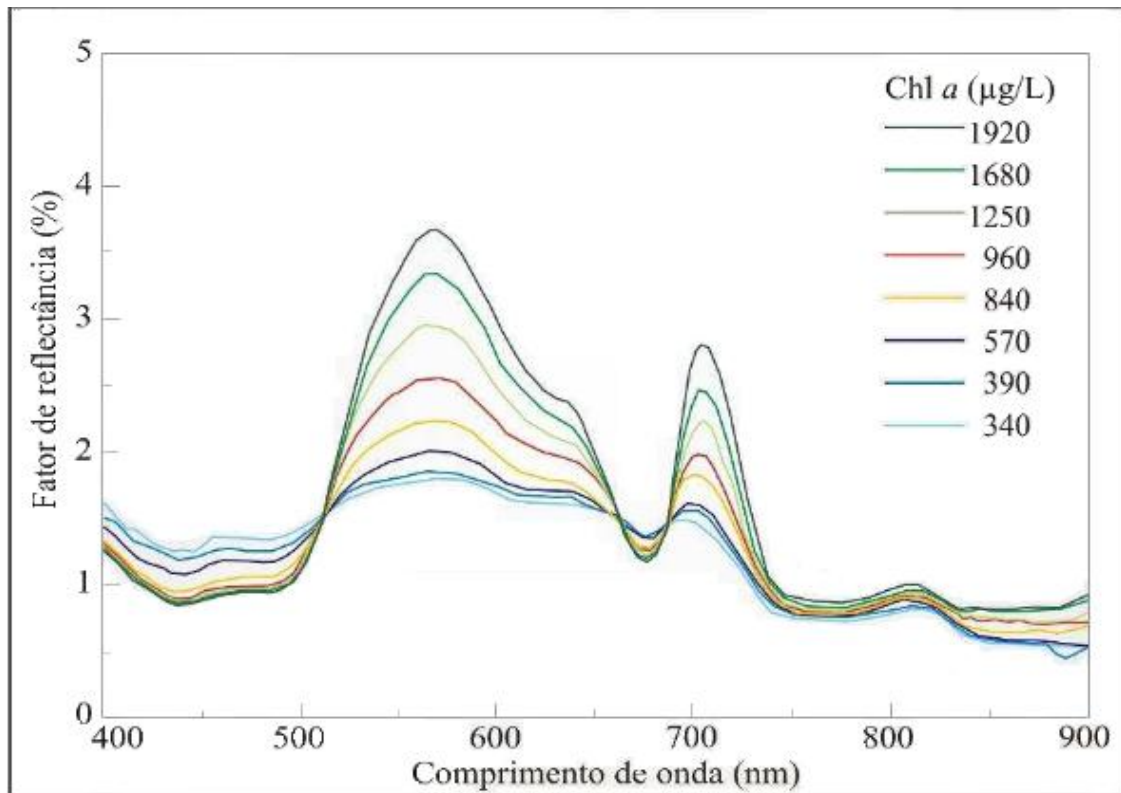


Figura 4 - Variação da reflectância em função de diferentes concentrações de Chl *a*.  
Fonte: Rundquist et al. (1996).

A clorofila *a* tem como função ser o centro de absorção fotossintética e possui dois picos de absorção, um no azul (433 nm, chamado “Soret”) e o outro no vermelho (em 686 nm, chamado pico “alpha”) (GALO, FERREIRA e UTSUMI, 2013).

#### 2.1.5.3 Carbono orgânico dissolvido

O carbono orgânico de um ecossistema aquático, de acordo com Esteves (2011), pode ser agrupado em duas categorias: em carbono orgânico detrital e carbono orgânico particulado da biota, e em conjunto forma-se o carbono orgânico total. O carbono detrital é composto por



carbono orgânico dissolvido e carbono orgânico particulado detrital. E o carbono orgânico particulado é o carbono presente em materiais retidos em filtros 0,45 µm de poro.

A partir da decomposição de plantas e animais e de produtos de excreção destes organismos origina-se o carbono orgânico dissolvido, formado por um grupo de compostos, biológico e quimicamente diferenciado, e seus principais componentes são as proteínas, carboidratos, lipídios e compostos húmicos (ESTEVES, 2011).

Tundisi, J. e Tundisi, T. (2008) ressaltam que as substâncias húmicas em muitas águas naturais de superfície, constituem 50% do carbono orgânico dissolvido. Ainda conforme o autor há uma grande variabilidade do carbono orgânico dissolvido nas águas naturais, porém depende de contribuições autóctones (advinda do próprio lago) e alóctones (advinda do meio ambiente), de períodos de seca e chuvosa, além dos processos de decomposição, ação de bactérias, temperatura da água, turbulência e estratificação, sendo estes processos internos em lagos e represas.

O COD na água é uma das formas de se estimar a presença e quantidade de matéria orgânica no ambiente aquático. Quanto mais produtivo for o fitoplâncton maior será a liberação da matéria orgânica dissolvida. Além disso, substâncias húmicas podem ser produzidas, representando um importante pigmento na coluna d'água a ser considerado, por frequentemente apresentar uma aparência amarelada. Essas substâncias húmicas dissolvidas são chamadas de “substâncias amarelas” ou *Gelbstoffe* podem afetar a absorção e espalhamento da luz na coluna d'água, além de alterar sua cor (JENSEN, 2009).

Mantovani (1993) avaliou através de simulações em laboratório a relação do efeito da matéria orgânica na reflectância da água (Figura 6) e observou a redução da reflectância da água na região do azul e do verde (400 e 570 nm), devido ao aumento da concentração da matéria orgânica dissolvida. Na região do vermelho (em torno de 650 nm), a reflectância praticamente não se modifica com a variação de matéria orgânica e na região do infravermelho ocorre um aumento proporcional de amplitude da reflectância em toda esta faixa. Com o aumento da concentração de matéria orgânica dissolvida na água, essa tende a uma cor primeiramente amarelada, depois mais vermelha escura devido aos baixos níveis de reflectância (MANTOVANI, 1993; NOVO, 2001).

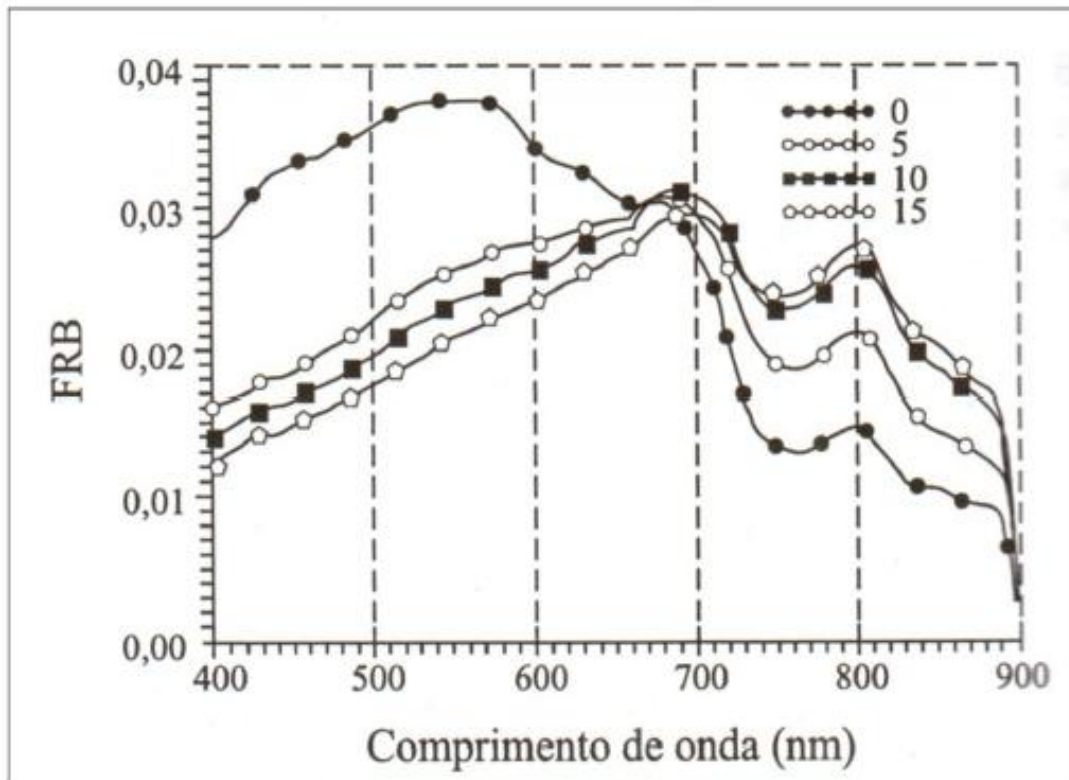


Figura 5 - Fator de Reflectância Bidirecional (FRB) para diferentes concentrações de matéria orgânica dissolvida (mg/L) de um corpo d'água medidas em laboratório.  
Fonte: Mantovani (1993), adaptado por Novo (2001).

## 2.2 Correção atmosférica

As informações geradas pelos sensores orbitais são influenciadas pelos constituintes presentes na atmosfera, como gases e aerossóis (pequenas partículas em suspensão) que ocasionam mudanças na propagação da radiação eletromagnética (ZULLO JR, 1994). A radiação eletromagnética precisa passar pela atmosfera antes de chegar ao sensor, em cujo processo, a atmosfera absorve e espalha, a luz solar e a radiação dos alvos, gerando imagem com informações tanto do objeto da superfície terrestre como também da atmosfera (GUO e ZENG, 2012).

Segundo Meneses (2012), a atmosfera afeta a radiância medida em qualquer ponto da imagem, de duas maneiras aparentemente contraditórias: 1º) atua como um refletor, adicionando uma porção da radiância ao sinal que é detectado pelo sensor; 2º) ela absorve, atenuando a intensidade de energia que ilumina o alvo na superfície. Afirma ainda que, as condições atmosféricas são um processo dinâmico de rápida modificação, e de acordo com

essas mudanças haverá variação na reflectância dos materiais da superfície terrestre, de imagem para imagem ou entre imagens de datas distintas, além do que, as acentuadas condições atmosféricas tornam a análise das informações contidas nas imagens imprecisas.

Os principais efeitos sobre as imagens de satélite, devido à presença da atmosfera entre o sensor orbital e a superfície terrestre, são a diminuição do contraste entre os objetos de uma dada cena e alteração do brilho da imagem (ZULLO JR, 1994; SONG et al., 2001). Reduz também a possibilidade de detecção de pequenos objetos dentro de uma cena, ou até mesmo a diferenciação entre os objetos que apresentem pequenas variações na intensidade de sinal (NOVO, 2010).

A interpretação da água em imagens de satélite, por exemplo, cerca de 90% da radiância registrada pelo sensor orbital, podem ser atribuídas aos efeitos atmosféricos, conhecido também como radiância de trajetória que é provocada principalmente pelo espalhamento que a luz solar sofre na presença das moléculas dos gases constituintes da atmosfera e de partículas nela presentes, tais como poeiras, sais, gotas de chuva, vapor d'água (NOVO, 2001).

Diante da importância da precisão no valor físico (reflectância e radiância) das superfícies imageadas pelo sensor, torna-se necessário eliminar ou minimizar os efeitos da atmosfera. Porém, para estimar o valor do fluxo emergente, é fundamental que a radiância de trajetória seja eliminada da radiância detectada pelo sensor, uma vez que existem diversos métodos para estimar e corrigir o sinal registrado e converter o dado para reflectância (VERMOTE et al., 1997).

Há métodos empíricos e físicos utilizados para corrigir os efeitos atmosféricos de imagens de satélite. Os métodos empíricos utilizam informações da própria imagem, ou seja, não dependem de parâmetros atmosféricos ou de dados da superfície, para determinar a contribuição da atmosfera em cada banda espectral (LATORRE, 2002). Embora o procedimento de correção atmosférica seja simples, esse método é menos acurado para a correção atmosférica de imagens (MORAN et al., 1992). Os métodos físicos que se baseiam nos modelos de transferência radiativa, consideram as características atmosféricas no momento em que a imagem foi obtida para o cálculo dos fluxos necessários para a obtenção da reflectância bidirecional da superfície, sendo considerada uma metodologia fisicamente consistente (ANTUNES et al., 2012).

Dentre os diversos métodos físicos para correção atmosférica, destacam-se: *Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum (5S)* (TANRÉ et al., 1990); *Second Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S)* (VERMOTE et al., 1997, ANTUNES et al., 2012);

*Low Resolution Atmospheric Radiance and Transmittance Model* (LOWTRAN) (LATORRE et al., 2002); *Moderate Resolution Atmospheric Radiance and Transmittance Model* (MODTRAN) (BERK et al., 2005).

### **2.3 Técnica de análise de espectros de reflectância**

Há diferentes técnicas utilizadas em sensoriamento remoto para identificar, extrair, condensar e realçar a informação de interesse para determinados fins, a partir de uma enorme quantidade de dados que usualmente compõem as imagens de satélite (CRÓSTA, 1992). Nesse sentido, busca-se por técnicas que favoreça a visualização de feições específicas contidas nos dados de reflectância do corpo d'água, com intuito de auxiliar na interpretação e comparação entre dados de sensoriamento remoto. Dentre estas técnicas utilizou-se a razão de bandas.

A técnica razão de bandas consiste em uma divisão realizada pixel a pixel entre duas bandas, e quando o número digital do denominador da divisão é maior do que o do numerador, o resultado é menor do que 1, dando um resultado que será representado por um pixel escuro, ao contrário quando o numerador for maior do que o denominador, a divisão será maior do que 1, dando um pixel claro no resultado. E quando os valores do denominador e do numerador forem os mesmos, não há diferença entre as duas bandas para aquele pixel (CRÓSTA, 1992).

Hoge et al. (1987), ressalta que esse método é usado em ambientes aquáticos para estimar a concentração de clorofila, sólidos em suspensão e matéria orgânica dissolvida, por análises estatísticas diretas com dados limnológicos coletados *in situ*, formando modelos que quantificam esses componentes.

A razão de bandas é uma operação matemática que permite discriminar sutis diferenças existentes na resposta espectral de diferentes alvos, pois em bandas originais apenas diferenças grosseiras são observadas. Assim, observando a resposta espectral dos alvos de interesse, as bandas são selecionadas visando seus valores máximos e mínimos de reflectância, afim de que expressem a curva espectral dos objetos de interesse, proporcionando o realce dos mesmos (SESTINI, 1999).

De acordo com Dekker (1993), o método de razão de bandas é frequentemente usado para discriminar variações espectrais súbitas na cena, que são mascaradas pelas variações de brilho em uma banda espectral individual, ou nas composições coloridas padrão.

Ennes (2008) concluiu que, a utilização da razão espectral nos intervalos específicos tem gerado resultados bastante robustos para a estimativa de concentrações de componentes opticamente ativos na água, porém é necessário ter uma concentração mínima do componente em estudo no ambiente aquático para que a estimativa seja acurada.

## 2.4 Análises estatísticas

A análise dos espectros de reflectância para extração de informações pode ser bastante complexa, uma vez que os padrões das curvas espectrais muitas vezes não se apresentam nitidamente, a ponto de facilitar a identificação pela análise visual do espectro do material que lhe corresponde (GALVÃO, 2001). Nesse sentido, faz-se necessário o uso de métodos estatísticos que possam auxiliar na análise e interpretação de dados das mais diversas ordens, para extração de informações de interesse. Dentre os métodos estatísticos, destacam-se correlações e regressões que são utilizadas nas análises de espectros.

De acordo com Andriotti (2003), correlação refere-se a uma associação entre duas variáveis quantitativas, ou seja, quando se constata que elas variam juntas, não implicando necessariamente uma relação de causa e efeito ou mesmo, a existência de uma estrutura com interesses práticos. A correlação entre duas variáveis pode ser linear ou não linear, sendo que, se a representação gráfica das mesmas em um sistema cartesiano resultar em pontos alinhados, ajustando-se a uma reta, tem-se uma relação linear. Assim como pode seguir outro modelo matemático que não seja o linear.

O coeficiente de correlação linear é representado por  $r$  que possuem valores que variam entre -1 e +1, sendo o valor zero representativo da ausência de correlação linear (ANDRIOTTI, 2003). Os valores negativos indicam uma correlação inversa, isto é, quando  $x$  aumenta  $y$  em média diminui (ou vice-versa) e os valores positivos ocorrem quando a correlação é direta, isto é,  $x$  e  $y$  variam no mesmo sentido (CALLEGARI-JACQUES, 2003).

Quando se calcula o coeficiente de correlação em uma amostra, é necessário ter em mente que se está estimando a associação verdadeira entre  $x$  e  $y$  existente na população (CALLEGARI-JACQUES, 2003). Assim, deve-se realizar um teste de hipóteses no que diz

respeito ao nível de significância do coeficiente de correlação, em que há tabelas com valores críticos para esse coeficiente, nas quais se utiliza como graus de liberdade o valor  $(n-2)$ , em que o  $n$  é o número de observações. Nesse sentido, se o valor de  $r$ , calculado por meio dos valores com que estamos trabalhando, for maior do que o tabelado correspondente para um nível de significância respectivo, diz-se que a associação entre as variáveis estudada é significativa (ANDRIOTTI, 2003).

Muitas das vezes, a visualização do diagrama dispersão sugere-se a existência de uma relação funcional entre as duas variáveis, ou seja, a existência de equações de regressão. Ressalta também que, só deve utilizar a regressão se a correlação entre as duas variáveis for significativa. Desse modo, entende-se que a correlação mede o grau de relacionamento entre duas variáveis e a regressão fornece uma equação que descreve o relacionamento entre elas através de termos matemáticos (ANDRIOTTI, 2003).

Os valores de coeficiente de determinação ( $r^2$ ) variam entre 0 e 1, e é representado pela parte da variância total de  $x$  e  $y$ , que pode ser explicada pela sua relação linear ( $r^2 = \text{variação explicada}/\text{variação total}$ ). Assim,  $r^2$  é a proporção da variação total de  $y$ , explicada pelo ajuste da regressão (ANDRIOTTI, 2003). Ainda segundo o autor, quando a variação não explicada for baixa,  $r^2$  será pequeno, e quando a dispersão em torno da reta de regressão for pequena em relação a variação total dos valores de  $y$  em torno de sua média, significa que a variação explicada é alta, apresentando valores próximos de 1.

### 3 METODOLOGIA

Na Figura 7, é apresentado o fluxograma com as principais etapas para o desenvolvimento da pesquisa, cujo detalhes serão mostrados nos tópicos a seguir.

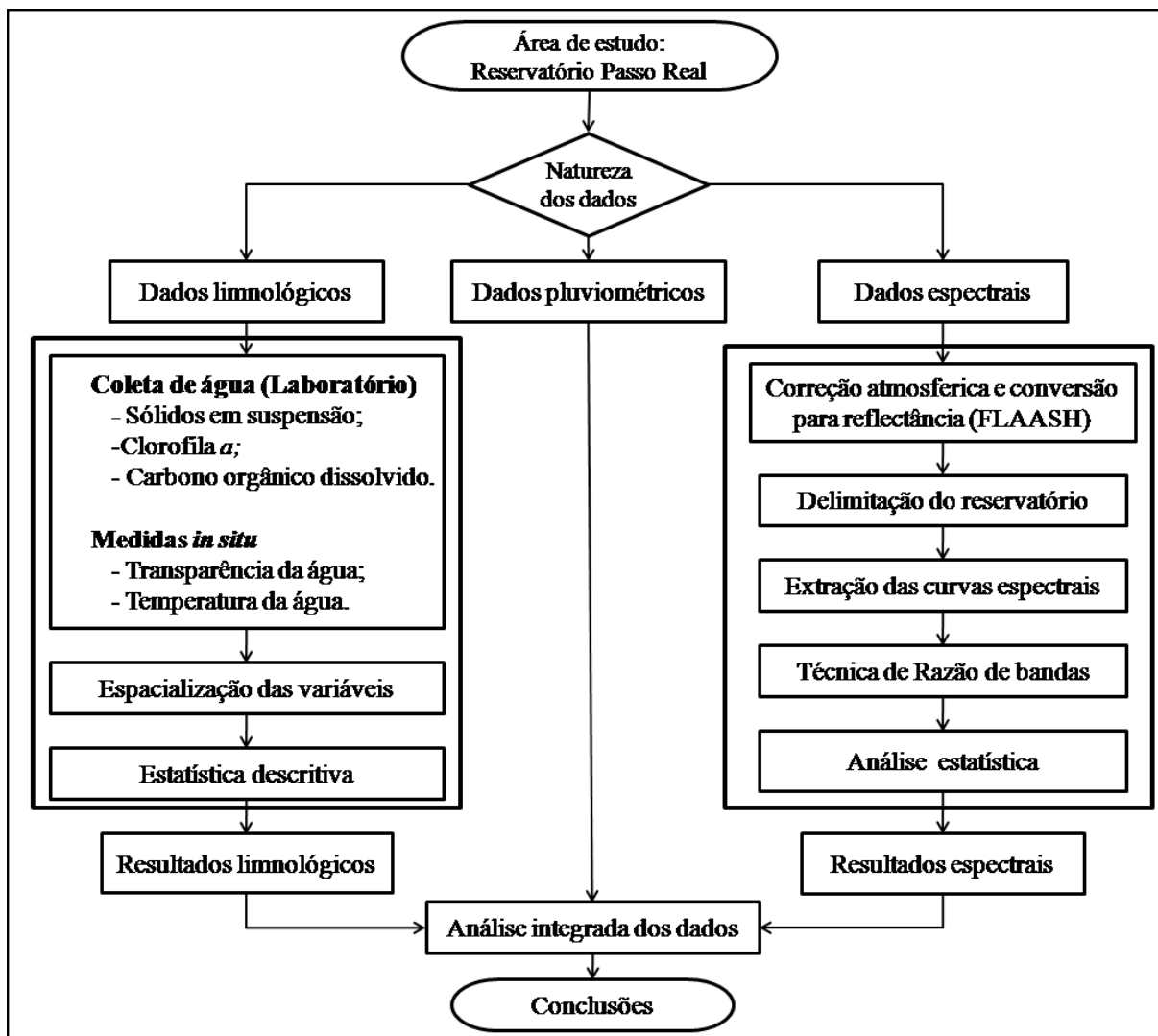


Figura 7 - Principais etapas para o desenvolvimento da pesquisa.

### 3.1 Caracterização geral da área de estudos

O Reservatório Passo Real localiza-se na bacia hidrográfica do Alto Jacuí, na porção Centro-Norte do Estado do Rio Grande do Sul, no Sul do Brasil (Figura 8). O reservatório atinge áreas de oito municípios: Alto Alegre, Campos Borges, Fortaleza dos Valos, Ibirubá, Jacuizinho, Quinze de Novembro, Salto do Jacuí e Salbach (COAJU, 2009).

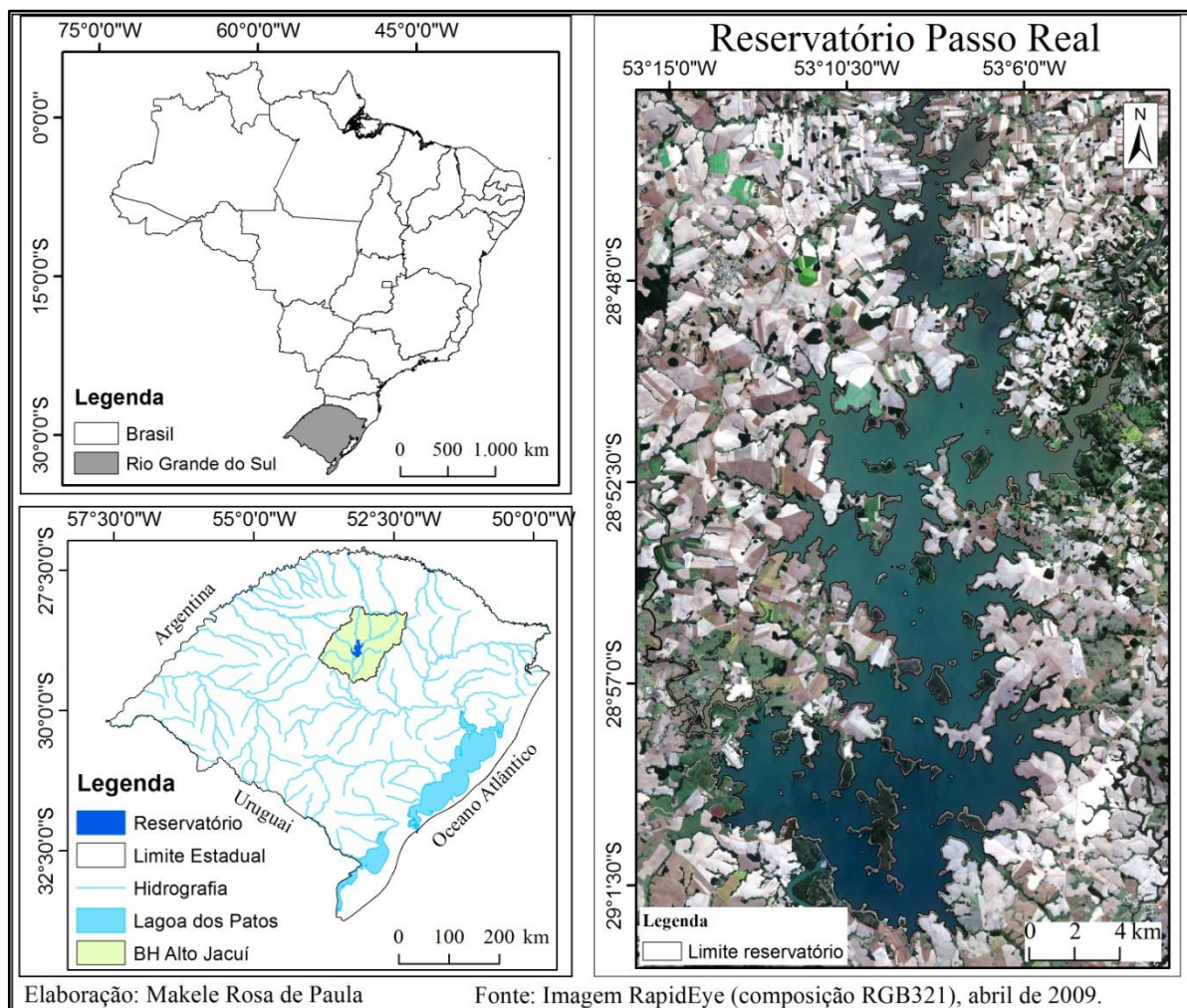


Figura 8 - Localização do reservatório Passo Real no centro norte do Rio Grande do Sul, no Sul do Brasil.

As condições favoráveis do relevo das bacias hidrográficas brasileiras permitiram o aproveitamento na construção de reservatórios em sequência, o que se configura como reservatórios em cascata (BARBOSA, 2005). Esse sistema foi adotado no alto curso do rio



Jacuí no Estado do Rio Grande do Sul para a exploração da geração de energia, os quais compreendem os reservatórios das Usinas Hidrelétricas (UHEs) Passo Real, Ernestina, Jacuí, Itaúba e Dona Francisca (COAJU, 2009).

O reservatório Passo Real foi construído em 1973, sendo considerado o maior lago artificial do Rio Grande do Sul, com uma área alagada de 233,39 km<sup>2</sup> e volume de 3.671 km<sup>3</sup>. Faz parte de um sistema de geração de eletricidade concedida pela Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE). As principais finalidades do reservatório são a geração de energia elétrica e a regularização de vazões para os reservatórios a sua jusante (Jacuí, Itaúba e Dona Francisca) (CEEE-GT, 2009).

O reservatório possui uma potência instalada de 158 MW, distribuídos em 2 geradores de 79 MW e recebe contribuição de três principais afluentes: o Rio Jacuí, o Rio Jacuí-Mirim e o Rio Ingá (COAJU, 2009).

A área da UHE Passo Real está inserida sobre o compartimento geomorfológico do Planalto Meridional (CEEE-GT, 2009), com formas de relevo caracterizado por colinas (ROSS, 2006). A geologia da área do reservatório consiste em sucessivos derrames de lavas vulcânicas intermitentes pertencentes à Formação Serra Geral, com intercalação de rochas sedimentares que pertencem a Formação Botucatu (CEEE-GT, 2009).

A vegetação natural local caracteriza-se pela presença de floresta ombrófila mista, floresta estacional decidual e gramíneo-Lenhosa (IBGE, 2004). Há dois tipos de solos na área do reservatório, sendo eles: Latossolo Vermelho e Nitossolo Háptico (IBGE, 2001).

De acordo com a classificação de Köppen, o clima é subtropical úmido (Cfa). Segundo Mendonça e Danni-Oliveira (2007), os climas do Sul do Brasil são controlados por massas de ar tropicais e polares, sendo predominante o clima subtropical úmido, com distribuição anual da pluviometria (entre 1.250 e 2.000 mm), associada às baixas temperaturas do inverno, devido a posição geográfica da área, relevo e atuação dos sistemas atmosféricos intertropicais e polares.

A economia na área de captação do reservatório baseia-se no setor primário, especificamente na produção de trigo, milho e soja. A área de preservação permanente correspondente à faixa de 100 m de seu entorno, apresenta-se ocupada de maneira intensiva por atividades agropecuárias. Ocorre também, a presença de ocupação residencial, predominantemente, com fins de lazer (COAJU, 2009).

O reservatório Passo Real possui um considerável uso ligado à navegabilidade, especialmente por quatro razões: turismo, extensão territorial, profundidade do reservatório e falta de acessos por estradas a vários pontos do reservatório. Nas áreas para práticas de

esportes, lazer e turismo, possui maior fluxo nos períodos de veraneio, atraindo milhares de pessoas anualmente, o que aponta demanda urgente por ordenamento destas atividades (COAJU, 2009).

O relatório realizado pelo Ministério Público do Rio Grande do Sul (MPRS, 2008), sobre “Análise das características da Bacia Hidrográfica do Alto Jacuí, utilizando imagens do satélite CBERS”, afirmou que nas margens do reservatório Passo Real apresentam poucos remanescentes de mata ciliar, constatando o uso intensivo de agricultura e pastagem nas áreas próximas aos corpos hídricos.

### **3.2 Localização dos pontos amostrais**

A localização geográfica dos pontos amostrais foi determinada segundo Wachholz et al. (2009) que utilizou recursos de imagens de satélite para identificar ambientes aquáticos com diferentes respostas espectrais. As amostragens do reservatório foram realizadas a partir de 30 pontos de coleta (Figura 9), levando em consideração também a acessibilidade dos pontos. Para a localização dos pontos medidos *in situ*, utilizou-se um aparelho *Global Positioning System* (GPS) Garmin Etrex de precisão de 5 metros.

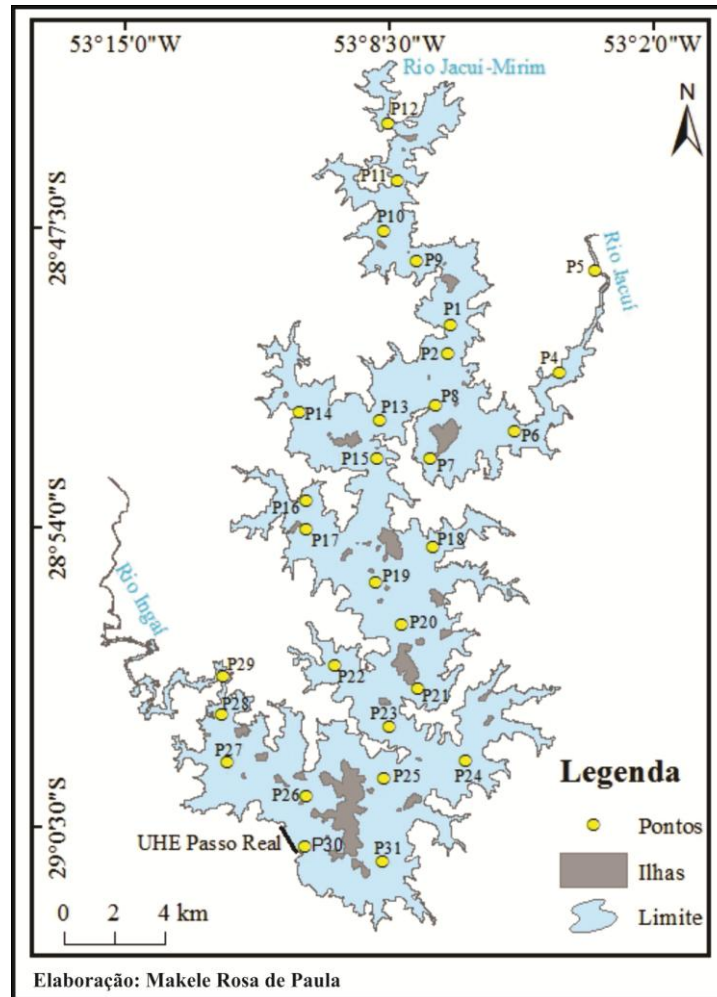


Figura 9 - Localização dos pontos amostrais no Reservatório Passo Real. A figura apresenta a distribuição de 30 pontos amostrais, porém está nomeado até o ponto 31, por ter retirado o ponto amostral 3 devido à inconsistência dos dados.

### 3.3 Trabalho de campo e aquisição de dados limnológicos

A atividade de campo foi realizada nos dias 17 e 18 de abril de 2009, coincidindo com a data de passagem do satélite RapidEye (17 de abril de 2009). A imagem foi fornecida pela empresa Santiago & Cintra para fins de pesquisa científica.

Com o uso de uma lancha a motor foram coletadas amostras de água (aproximadamente 30 cm de profundidade) nos 30 pontos amostrais, para determinação em laboratório das concentrações de sólidos em suspensão, clorofila *a* e carbono orgânico dissolvido. As medidas de temperatura e transparência da água foram realizadas *in situ* com a

utilização de um termômetro digital portátil modelo TE-400 e Disco de Secchi, respectivamente.

Selecionaram-se as variáveis limnológicas opticamente ativas: total de sólidos em suspensão (mg/L), clorofila *a* ( $\mu\text{g/L}$ ) e o carbono orgânico dissolvido (mg/L), sendo que essas variáveis podem ser monitoradas por sensores remotos.

Foram também consideradas fundamentais para caracterização das águas do reservatório, as medidas das variáveis temperatura e transparência da água (profundidade de Secchi). A medida da transparência da água (profundidade de Secchi) é um estimador da turbidez da água, que por estar relacionado à cor da mesma, apresenta, via de regra, uma boa correlação com dados de sensoriamento remoto (BRAGA, NOVO e KRUG, 1993).

### 3.3.1 Transparência da água

A transparência da água foi medida mergulhando um disco branco de 25 cm de diâmetro, denominado de disco de Secchi (DS), que possui uma corda graduada fixada no mesmo, em que é observada a profundidade de seu desaparecimento. Nesse sentido, quanto menor for o valor da transparência da água, menor será a profundidade do Disco de Secchi, devido a maior dispersão da luz. A profundidade do disco de Secchi é inversamente proporcional a quantidade de compostos no percurso da luz e ao coeficiente de atenuação da irradiância (CETESB, 2009).

Algumas condições foram observadas ao realizar as medidas *in situ*, tais como: céu claro, realização da medida na sombra, seleção de um local de mínima agitação e observação vertical do disco de acordo com a CETESB (2009).

### 3.3.2 Temperatura da água

Os dados da temperatura da água de sub-superfície foram obtidos utilizando um termômetro digital portátil modelo TE-400.

### 3.3.3 Total de sólidos em suspensão

As amostras de água foram coletadas em recipientes com capacidade de um litro e acondicionadas em caixa de isopor com gelo para o transporte até o laboratório de Sedimentologia da Universidade Federal de Santa Maria – RS para a realização das análises.

Os valores de TSS foram obtidos conforme apresentado em *American Public Health Association* (APHA) (2005). Os filtros de celulose (Marca Millipore – HAWG047S0) com poros de 0,45 µm permaneceram por 24 horas em estufa a uma temperatura de 50°C para a perda de umidade. Os filtros foram pesados em balança analítica da marca Mettler Toledo – modelo AG 245 com acurácia 0,0001g, para obtenção do peso inicial. Em seguida, filtrou-se 350 ml de cada amostra de água utilizando o equipamento Bomba a Vácuo. Os filtros foram novamente acondicionados na estufa à 50°C por 24 horas para sua secagem e obtenção do peso final em uma segunda pesagem. A partir da obtenção desses valores, determinou-se o TSS para cada amostra pela Equação 1.

$$TSS \left( \frac{mg}{L} \right) = \frac{Pf(mg) - Pi(mg)}{V(L)} * 1000 \quad \text{Eq (1)}$$

Onde:

TSS: Total de Sólidos em Suspensão (mg/L); Pf: peso final do filtro (g); Pi: peso inicial do filtro (g); V: volume de água para filtração (ml); 1000: fator de conversão para miligramas.

### 3.3.4 Clorofila *a*

Após a coleta da água no reservatório, as amostras foram mantidas resfriadas numa caixa de isopor até a chegada ao laboratório. Os procedimentos de filtração e extração de pigmentos fotossintéticos (clorofila *a*) foram realizados em ambiente com pouca iluminação. Para a filtração, foram utilizados filtros de fibra de vidro de 47 mm de diâmetro. Em seguida os filtros foram colocados sobre um papel absorvente para retirar a umidade, embalados em papel alumínio e congelados, para posterior extração dos pigmentos.

Para extração dos pigmentos, os filtros filtrados foram imersos no metanol 100% (10 ml), deixando em recipiente fechado sob refrigeração com temperatura de 4°C por 24 horas. Posteriormente foi realizada a medida de absorvância da Chl *a*, segundo o método proposto por Mackinney (1941) que ocorre em 663 nm e em 750 nm. Para a leitura no Espectrofotômetro (Bel 1105 modelo SF325NM com faixa de operação entre 325 a 1000 nm) foram retirados os frascos com os filtros da refrigeração, retirou-se o sobrenadante com uma pipeta e colocaram-se as amostras nas cubetas do espectrofotômetro.

Para o cálculo da concentração de clorofila em µg/L é levado em consideração as medições do espectrofotômetro, o volume de pigmentos extraídos e o volume filtrado, conforme apresentado na Equação 2.

$$\text{Chl } a \left( \frac{\mu\text{g}}{\text{L}} \right) = \frac{\text{Abs (663-750)} \times 12,63 \times V_{\text{met}} (\text{ml}) \times 1000}{V(\text{ml})} \quad \text{Eq (2)}$$

Onde:

Chl *a*: clorofila *a*; Abs: medida de absorvância; 12,63: constante;  $V_{\text{met}}$ : Volume de metanol (10 ml); 1000: constante; V: volume da amostra filtrada (300 ml).

### 3.3.5 Carbono orgânico dissolvido

Para a determinação do COD seguiu-se o método adaptado de Anne e Dabin (1971) e apresentado por Costa (s/d). De cada amostra foram filtrados 150 ml de água em filtro de celulose de 0,45 µm. Os filtros foram armazenados em estufa para a determinação do Total de Sólidos em Suspensão e a água filtrada (100 ml) foi colocada em *erlenmeyer* e armazenada em estufa a 80°C até sua total evaporação. Após a evaporação da água foi adicionado 10 ml de dicromato de potássio a 2% usando pipeta volumétrica de 10 ml e 5 ml de ácido sulfúrico concentrado. Os *erlenmeyers* cobertos com vidro foram colocados em estufa a uma temperatura de 105°C durante 1 hora. Depois de retirados da estufa adicionou-se 4 ml de ácido fosfórico e 5 gotas de difenilamina, e a titulação foi realizada com 25 ml de sulfato ferroso amoniacal.

Para a determinação do COD em mg/L utilizou-se a Equação 3, a qual levou-se em consideração as concentrações e os volumes gastos de cada material, além do volume de água filtrada.

$$COD \left( \frac{mg}{L} \right) = (V_1 - V_2) \cdot 0,615 \cdot \frac{10X0,5}{0,2Xx} \cdot \frac{1000}{V(ml)} \quad \text{Eq (3)}$$

Onde:

V1: Volume gasto no sulfato ferroso amoniacal na titulação do branco; V2: Volume do sulfato ferroso amoniacal gasto na titulação das amostras; 0,615: constante; 10: alíquota usado do dicromato de potássio para a titulação com sulfato ferroso amoniacal; 0,5: concentração do dicromato de potássio; 0,2: concentração do sulfato ferroso amoniacal; X: volume gasto do sulfato ferroso amoniacal na titulação do padrão de dicromato de potássio; V: Volume da amostra filtrada; 1000: constante.

### 3.4 Espacialização das variáveis limnológicas

Para a espacialização das variáveis limnológicas, os dados foram inseridos no banco de dados geográfico do *software* SPRING 4.3.3 (CÂMARA et al., 1996), na forma de modelo numérico do terreno (MNT). Para cada variável limnológica gerou-se uma grade retangular, para posterior interpolação por média ponderada e o fatiamento em 10 classes temáticas considerando os valores máximo e mínimo dos dados das variáveis.

A etapa de edição final dos mapas das variáveis limnológicas, como inclusão de título, fonte, margens entre outros procedimentos necessários para finalização dos layouts, foram desenvolvidas no ArcGis 10.1 (ESRI Inc., 2013).

### 3.5 Análise visual da imagem

A análise visual da imagem teve como base os critérios citados por Barbosa (2005), os quais se referem, a intensidade e tonalidade de cores de uma composição colorida. Utilizou-se uma composição verdadeira (RGB321), além da ampliação de contraste da mesma que

permitiu uma melhor visualização das diferentes massas de água. Ademais, realizou-se uma descrição geral associando os tons de cores aos constituintes opticamente ativos.

### **3.6 Precipitação pluviométrica**

Os dados de precipitação pluviométrica foram obtidos na Agência Nacional das Águas (HidroWeb) oriundos da estação climatológica de Cruz Alta – RS (S -28° 37' 28"/ O -53° 36' 42"), a cerca de 50 km do reservatório Passo Real. O responsável e operador é o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os dados coletados compreendem uma série de precipitação acumulada mensal para o ano de 2009, sendo esses adquiridos para demonstrar a variabilidade mensal da precipitação pluviométrica, na área de estudo, e também dados diários para os 30 dias anteriores as datas do levantamento de campo, para complementar as análises realizadas. Os dados de precipitação foram inseridos no Microsoft Office Excel onde gerou-se gráficos de barras para uma melhor representação.

### **3.7 Correção atmosférica e conversão para reflectância**

A imagem utilizada teve seus valores de radiância no topo da atmosfera convertidos para valores de reflectância de superfície utilizando o módulo *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes* (FLAASH), que utiliza como base o *MODerate resolution atmospheric TRANsmittance and radiance code* (MODTRAN-4) para a correção dos efeitos de espalhamento e absorção dos gases da atmosfera, implementado no software ENVI 5 (EXELIS, 2014).

O uso do FLAASH exigiu de alguns parâmetros de entrada como: coordenadas do centro da cena, altitude do sensor, altitude média do terreno, data de aquisição da imagem, hora, resolução espacial e ângulo zenital do sensor, azimute do sensor e visibilidade da atmosfera. O modelo atmosférico adotado foi o “tropical” e como modelo de aerossol “rural”. O valor de visibilidade foi de 40 km.



### **3.8 Delimitação do reservatório**

Para delimitar o reservatório Passo Real criou-se uma máscara para separar o corpo d'água dos outros alvos terrestres. Para esse processamento, utilizou-se a banda do infravermelho próximo (banda 5), sendo que nesta faixa do espectro a água absorve praticamente toda a radiação incidente, apresentando cor preta, enquanto que os outros alvos da superfície terrestre possuem maior reflectância.

Realizou-se o fatiamento, utilizando o intervalo de reflectância ( $<1$ ) na banda 5, para gerar a máscara e permitir uma rápida distinção dos corpos d'água. A máscara é uma imagem binária de valores 0 e 1, na qual os pixels sobre os corpos d'água apresentam valor 1 e os pixels sobre os demais alvos terrestres apresentam valor 0.

### **3.9 Extração de dados espectrais**

Para a extração dos espectros da imagem RapidEye considerou-se uma janela de 3x3 pixels, na qual o pixel central corresponde a coordenada do ponto amostral. Para isso gerou-se um arquivo ASCII com as coordenadas dos 30 pontos amostrais, o qual foi sobreposto a imagem para identificar os pixels referentes aos pontos de coleta de dados limnológicos, utilizando o software ENVI 5 (EXELIS, 2014). Dos pixels identificados, foram extraídos valores de reflectância de superfície em cada banda espectral do satélite RapidEye.

Em uma planilha do Microsoft Office Excel calculou-se a média dos espectros de reflectância dos 9 pixels (janela de 3x3 pixels) correspondente a cada ponto amostral.

### **3.10 Agrupamentos de espectros**

Os espectros de reflectância que apresentaram características similares, foram agrupados para melhor verificar detalhes de cada grupo. Considerou-se espectros representativos dos principais setores do reservatório Passo Real os quais são: entrada dos rios Jacuí (espectros dos pontos 4 e 5), Jacuí-Mirim (espectro do ponto 12) e Ingaí (espectro do

ponto 29), e espectros representando a média do conjunto de pontos na região central e próximo ao dique do reservatório.

### 3.11 Tratamento de dados espectrais

Com intuito de obter informações espectrais associadas às feições de absorção e reflexão ocasionadas por constituintes opticamente ativos da água, tem-se utilizado técnicas de sensoriamento remoto para análise das curvas espectrais, tais como, razão de bandas, a qual foi abordada nesta pesquisa.

#### 3.11.1 Razão de bandas

Foi aplicada a técnica razão de bandas nos dados da imagem RapidEye, correlacionando os seus resultados com as variáveis limnológicas: TSS, Chl *a* e DS. Esta técnica constitui de realces resultantes da divisão de valores de reflectância de uma banda espectral pelos valores correspondentes em outra banda, pixel a pixel (Equação 5) (SCHOWENGERDT, 2006).

$$Rmn(x, y) = \frac{\rho_m(x, y)}{\rho_n(x, y)} \quad \text{Eq (5)}$$

Onde:

Rmn: razão de bandas;  $\rho_m$ : valores de reflectância de uma banda espectral;  $\rho_n$ : valores correspondentes em outra banda.

Foram testadas diversas razões de bandas, selecionando feições que ocorrem devido à presença de constituintes na água para a definição de modelos de razão de bandas. Segundo Londe (2008), uma razão de bandas deveria conter um comprimento de onda correspondente

a valores altos de reflectância e outro correspondente a valores altos de absorção do componente de interesse.

Os modelos de razão de bandas foram definidos conforme descrito na literatura. Para a Chl *a*, há duas regiões principais de absorção da radiação eletromagnética pelos pigmentos, a região do azul (400-515 nm) e do vermelho (630-700 nm). E aumento da reflectância na região do verde (515-600 nm) devido ao espalhamento interno das células dos organismos fitoplanctônicos (KIRK, 1994; NOVO, 2001). Assim, a razão de bandas nas faixas do vermelho (RED) e infravermelho (NIR), são muito utilizadas para estimar a clorofila *a* (RUNDQUIST et al., 1996).

Gitelson (1992), concluíram que razão entre o pico de reflectância máxima do verde pelo pico de reflectância máxima na região do infravermelho é significativo para estimar a concentração de clorofila.

Doxoran et al. (2005), observaram altas correlações entre a razão do infravermelho próximo (850 nm) e faixa espectral do verde (550 nm) com total de sólidos suspensos e entre a razão de 400 nm e 600 nm com matéria orgânica dissolvida.

Com intuito de identificar outras razões de bandas sensíveis a variação dos constituintes opticamente ativos presentes no reservatório Passo Real, correlacionou-se valores resultantes das razões de bandas com os dados das variáveis DS, TSS e Chl *a*, e as correlações foram plotadas no software Surfer, gerando diagramas de correlação. Os eixos X e Y compreendem as bandas do satélite RapidEye, em que o eixo X representa o denominador e o eixo Y o numerador das razões de bandas.

### **3.12 Análises estatísticas**

Foram aplicados testes estatísticos com os dados limnológicos e espectrais utilizando o software Microsoft Office Excel 2007. Para analisar a variabilidade espacial dos dados limnológicos medidos *in situ* no reservatório Passo Real realizou-se a estatística descritiva, tais como: média, desvio padrão e coeficiente de variação.

Realizaram-se análises de correlação entre os valores de reflectância em cada banda espectral com as concentrações de cada uma das variáveis limnológicas (total de sólidos em suspensão, disco de secchi (transparência da água), clorofila *a* e carbono orgânico dissolvido) nos 30 pontos amostrais, gerando gráfico denominado correlograma, em que o eixo Y

expressa à correlação (variando de -1 a 1) e eixo X as cinco bandas do satélite RapidEye que abrangem faixas do espectro entre 400 a 900 nm.

Para a verificação da existência ou não de correlação significativa entre os dados espectrais e as variáveis limnológicas, foram calculados coeficientes de correlação linear e testados com o teste t de Student a um nível de significância de 95% conforme Equação 6.

$$t_{cal} = \frac{r}{\frac{\sqrt{1-r^2}}{\sqrt{n-2}}} \quad \text{Eq (6)}$$

Onde:

t: distribuição t de Student; n - 2 graus de liberdade; r: coeficiente de correlação e r<sup>2</sup>: coeficiente de determinação.

Após a identificação das bandas significativamente correlacionadas com as variáveis limnológicas foram gerados diagramas de dispersão. Sobre os diagramas de dispersão foram testadas equações lineares e não lineares, permitindo o cálculo do valor da regressão, que expressa à dependência entre os parâmetros espectrais e limnológicos.

As variáveis que apresentaram maior correlação foram submetidas a uma análise de regressão com intuito de gerar estimativas contínuas das variáveis limnológicas com base na resposta espectral da imagem RapidEye, em que os modelos de ajuste foram invertidos, ou seja, os dados espectrais referem-se a variável independente e os dados limnológicos a variável dependente. Essa análise possibilitou a obtenção de equações matemáticas e um valor (R<sup>2</sup>) que descrevem o grau de relacionamento entre as variáveis analisadas.

Para a validação dos modelos baseou-se no princípio “*leave-one-out*” que consiste em separar uma amostra do conjunto total observado, estimar os coeficientes do modelo com base no restante da amostra (n-1) e estimar a observação reservada utilizando a nova equação. O procedimento é repetido para toda a amostra (n vezes), em que todas as observações sejam estimadas por modelos cujos parâmetros foram estimados com base nas demais (PEREIRA, 2008). Os mapas temáticos foram obtidos pela aplicação dos modelos de regressão e posterior fatiamento.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os resultados da presente pesquisa encontram-se divididos em quatro partes principais: Condições meteorológicas; limnológicos; espectrais e integração entre resultados limnológicos e espectrais.

### **4.1 Condições meteorológicas**

Muitos fatores meteorológicos influenciam diretamente nos dados obtidos em campo e, portanto, na qualidade dos dados e informações, sendo necessário o conhecimento de suas condições durante os levantamentos de campo. Nas duas datas de coletas de dados, foram verificadas condições de céu claro, média da velocidade dos ventos de 5,4 km/h, considerada “leve” de acordo com a escala de Beaufort<sup>1</sup> e baixa rugosidade da água, com exceção do ponto amostral 13, onde se observou uma lâmina de água suave. Com relação às precipitações pluviométricas foram verificados dois eventos de 23,2 mm e 8,1 mm nos dias 27 e 28 de março de 2009, ou seja, 20 dias antes dos levantamentos de campo para coleta de dados limnológicos (Figura 10).

---

<sup>1</sup>Escala de Beaufort foi criada por Francis Beaufort para a classificação da velocidade dos ventos que varia de 0 (calmo, 0 - 0,2 m/s) a 12 (furacão ou ciclone, acima de 37,20 m/s) (MENDONÇA e DANNI-OLIVEIRA, 2007).

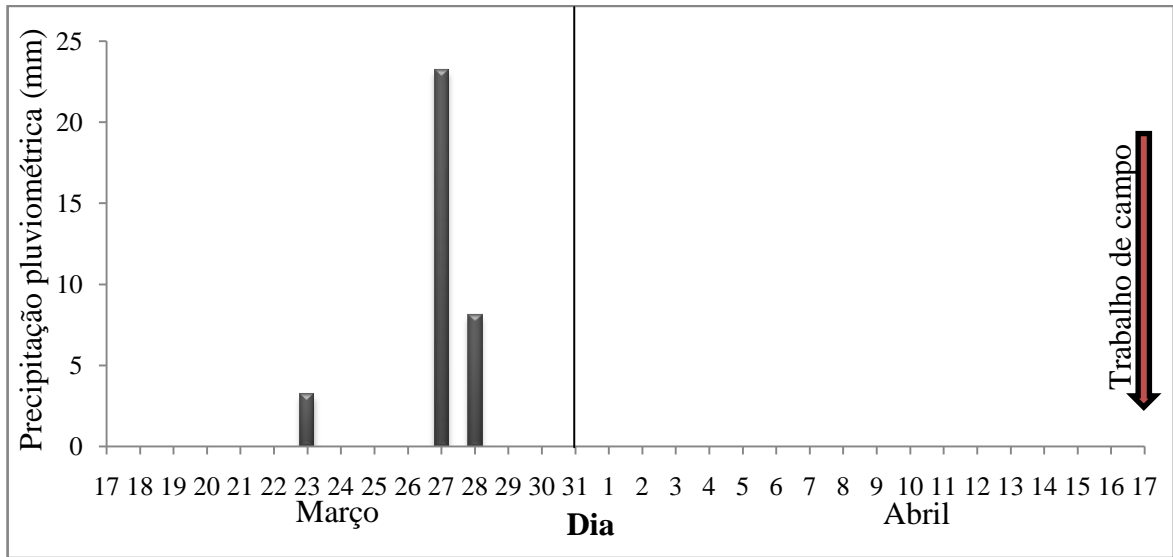


Figura 10 - Dados de precipitação pluviométrica diária em 30 dias anterior ao levantamento de campo.  
Fonte: INMET (2015).

Na Figura 11, estão expostos os dados referentes à precipitação pluviométrica acumulada mensal para o ano de 2009. Nota-se que no mês de abril (em destaque) ocorreu o menor volume pluviométrico em relação aos outros meses. Segundo Trentin (2009) e Wachholz (2011), consideraram o mês de abril como o mais seco em 2009, caracterizando-o mês de estiagem.

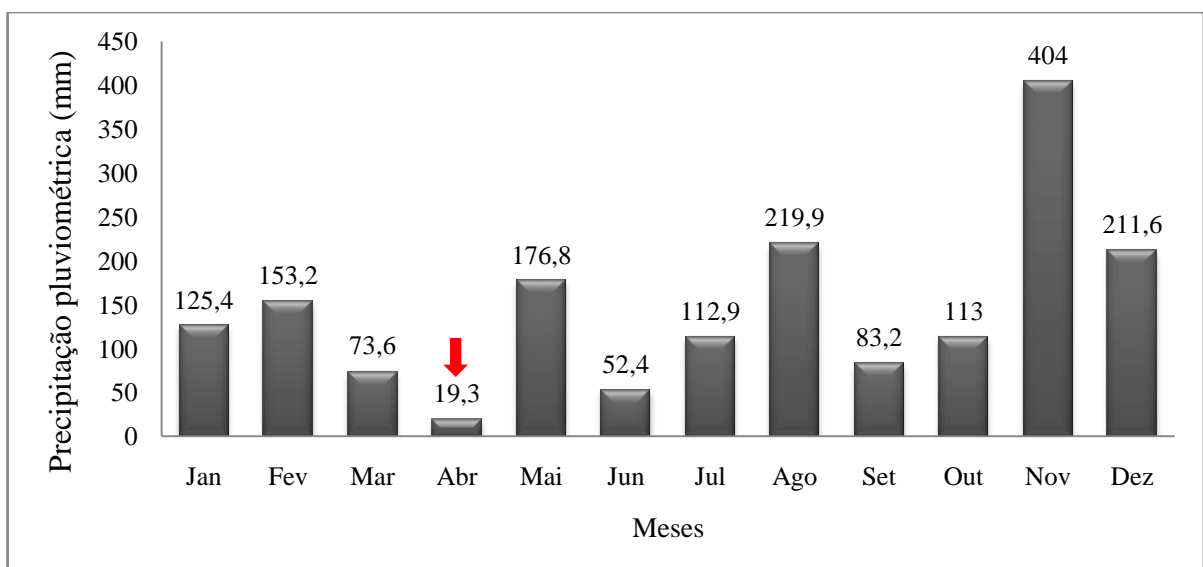


Figura 11 - Dados de precipitação pluviométrica acumulada mensal para a estação de Cruz Alta no ano de 2009.  
Fonte: INMET (2015).

## 4.2 Distribuição espacial das variáveis limnológicas

A distribuição das variáveis limnológicas: transparência da água, temperatura da água, clorofila *a*, total de sólidos em suspensão e carbono orgânico dissolvido, permite uma melhor visualização da sua distribuição espacial no corpo do reservatório Passo Real as quais são apresentadas a seguir.

### 4.2.1 Transparência da água

A transparência da água no reservatório variou de 0,45 m no ponto amostral 5 à 3,35 m nos pontos amostrais 30 e 31, conforme a Figura 12 B.

Na Figura 12 A e B, estão expostos os dados de transparência da água do reservatório Passo Real, onde verificou-se menores transparências nos setores dos rios Jacuí (pontos amostrais P4 e P05), Jacuí-Mirim (ponto amostral 12) e Ingaí (ponto amostral 29). Estes possuem maior capacidade de transportar sedimentos (sólidos em suspensão) em relação ao setor a partir do ponto amostral 19 em direção ao dique com características de ambiente lântico, o que favorece a deposição de materiais na superfície de fundo, e uma maior transparência da água, com exceção do ponto amostral 29 onde se observou baixo valor de transparência, sendo este localizado próximo a foz do rio Ingaí como já ressaltado anteriormente.

Resultado similar foi observado por Wachholz (2011) na análise espaço-temporal do reservatório Passo Real no período de fevereiro de 2009 a março de 2010, onde foi verificado que no período de fevereiro a abril de 2009, as águas são muito transparentes, no setor mencionado no presente trabalho. O autor também constatou com base nos dados históricos de vazão (1973-2006), que o tempo de residência médio do reservatório Passo Real foi de 187 dias. Sendo assim, ocorrem longos períodos de residência da água neste reservatório, o que condiciona baixas concentrações de TSS e Chl *a*, e maiores valores de transparência da água, a depender do período do ano analisado.

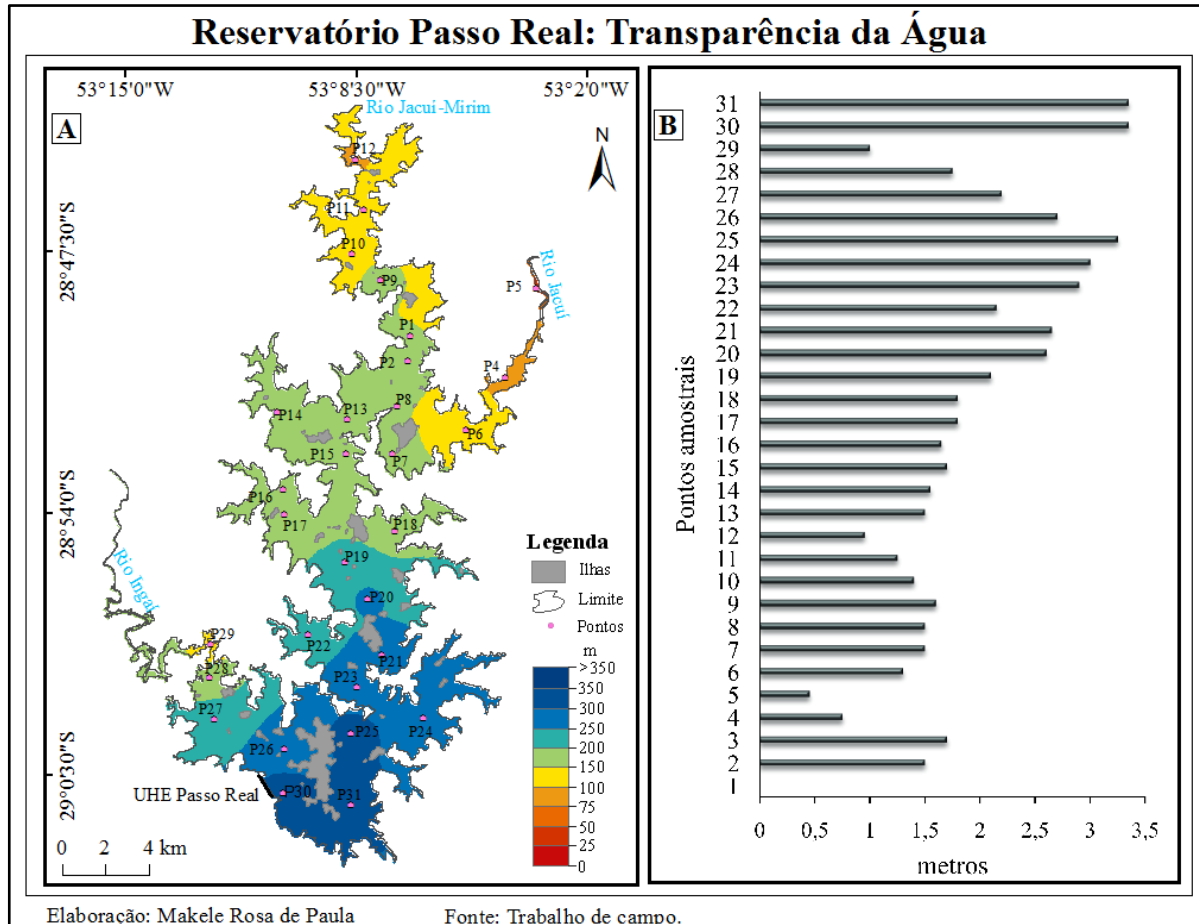


Figura 12 - (A) Espacialização da transparência da água e (B) dados de transparência da água, nos pontos amostrais do reservatório Passo Real em abril de 2009.

#### 4.2.2 Temperatura da água

A temperatura da água do reservatório variou de 21,6 °C no ponto amostral 5 à 26,1 °C no ponto amostral 20 conforme Figura 13 B. De maneira geral, as temperaturas mais elevadas ocorreram no setor de maior volume de água que se caracteriza como ambiente lântico, a partir do ponto amostral 17 até o 31 e as menores temperaturas ocorreram no fluxo de entrada do rio Jacuí (ponto amostral 5) que se caracteriza como ambiente lótico (Figuras 13A e 13B). No entanto, no setor de entrada das águas do rio Ingaí, que pode ser caracterizado como ambiente lótico verificou-se temperaturas altas com relação aquelas observadas.



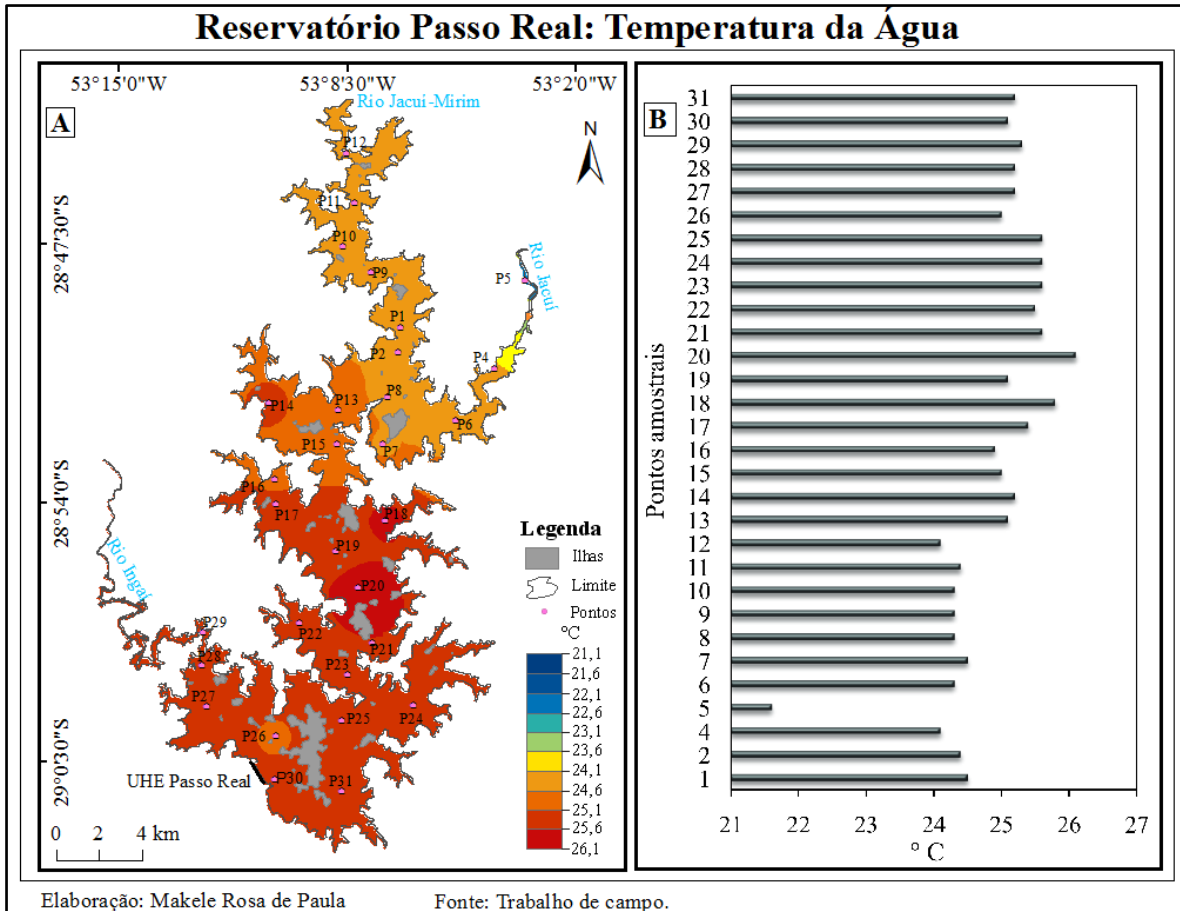


Figura 13 - (A) Espacialização da temperatura da água e (B) dados de temperatura da água, nos pontos amostrais do reservatório Passo Real em abril de 2009.

#### 4.2.3 Clorofila *a*

A concentração de clorofila *a* variou de 0,42 µg/L no ponto amostral 21 à 8,42 µg/L no ponto amostral 4, conforme Figura 14 B. As maiores concentrações de Chl *a* foram observadas no setor de transição dos rios Jacuí (ponto amostral 4) e Ingaí (ponto amostral 29) para o reservatório e também no ponto 13 (Figura 14 A), o que pode estar relacionado com a entrada de nutrientes no corpo de água provindos das áreas adjacentes ao reservatório.

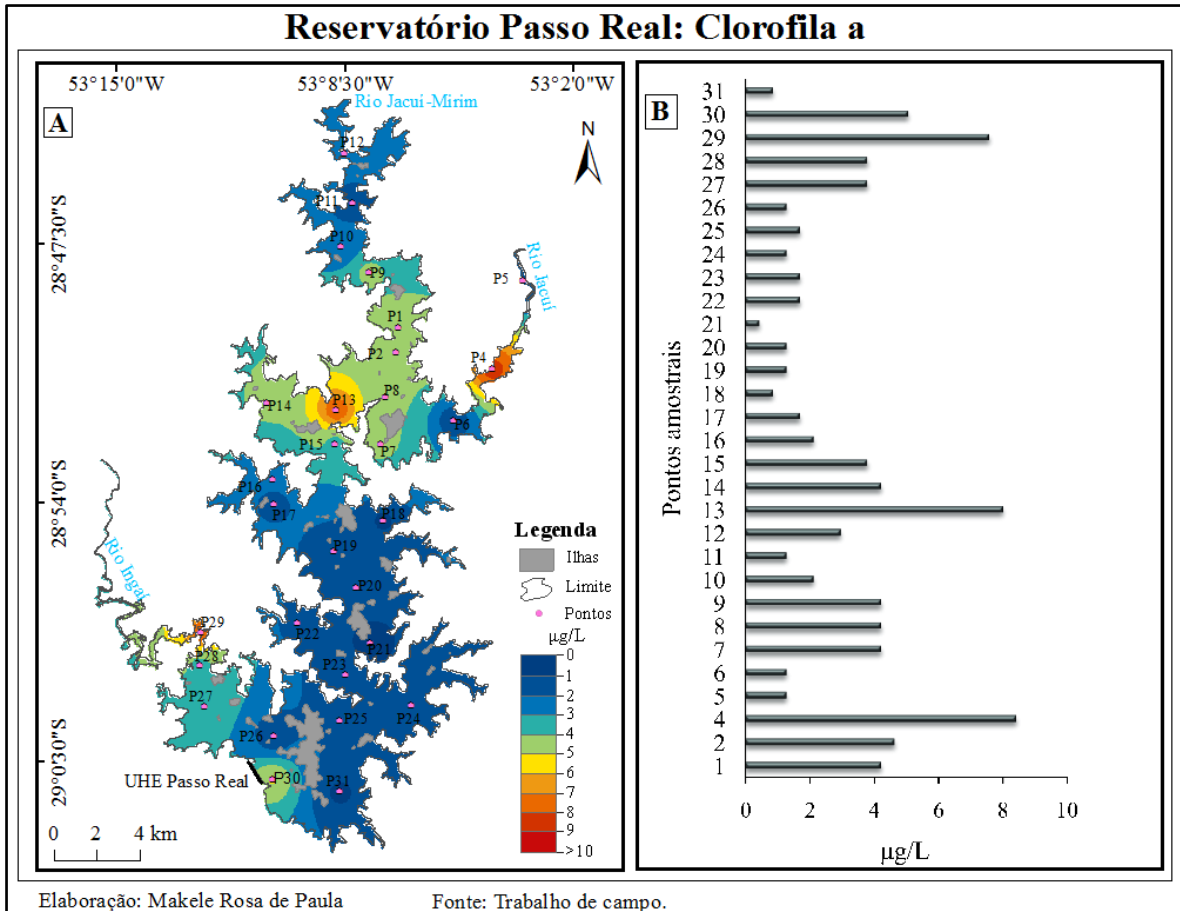


Figura 14 - (A) Espacialização da clorofila *a* e (B) dados de clorofila *a*, nos pontos amostrais do reservatório Passo Real em abril de 2009.

Estudos realizados por Wachholz (2011) durante uma série temporal do reservatório Passo Real em 2009, permitiram verificar que as médias de clorofila *a* para os meses de fevereiro a julho (meses menos chuvosos) foram baixas, caracterizando o ambiente do reservatório como mesotrófico e para os meses de agosto a março de 2010 (meses chuvosos) as concentrações de clorofila *a* foram altas, caracterizando o ambiente do reservatório de eutrófico a hipereutrófico.

A classificação de estado trófico<sup>2</sup> proposta por Carlson (1977) modificado por Lamparelli (2004), estão apresentados na Tabela 3.

<sup>2</sup> “O Índice do Estado Trófico tem por finalidade classificar corpos d’água em diferentes graus de trofia, ou seja, avalia a qualidade da água quanto ao enriquecimento por nutrientes.” (LAMPARELLI, 2004).

Tabela 3 Classificação de estado trófico para a clorofila *a* em reservatórios

<b>Estado trófico</b>	<b>Clorofila <i>a</i> (µg/L)</b>
Ultraoligotrófico	$CL \leq 1,17$
Oligotrófico	$1,17 < CL \leq 3,24$
Mesotrófico	$3,24 < CL \leq 11,03$
Eutrófico	$11,03 < CL \leq 30,55$
Supereutrófico	$30,55 < CL \leq 69,05$
Hipereutrófico	$69,05 < CL$

Desta maneira, os dados de concentração de clorofila *a* observados no presente estudo, permitiram classificar os pontos P18, P21 e P31 como ultraoligotrófico; a porção central do reservatório e o trecho do rio Jacuí-Mirim como oligotrófico; trecho dos rios Ingaí (ponto 29) e Jacuí (ponto 4), os pontos próximos ao dique e o setor do reservatório que pode ser representado pelo conjunto de pontos P9 a P15, foram classificados como mesotrófico (Figura 14 A).

#### 4.2.4 Total de sólidos em suspensão

As concentrações de Totais de Sólidos em Suspensão (TSS) variaram de 0,67 mg/L no ponto amostral 31 localizado próximo ao dique, a 22 mg/L no ponto amostral 5 (Figura 15 B). De maneira geral, as concentrações de TSS diminuíram no sentido montante/jusante do reservatório. Resultado similar foi observado por Reis et al. (2003) no reservatório de Itaparica, localizado em áreas pertencentes aos Estados do Pernambuco e da Bahia.

As menores concentrações de sólidos em suspensão na proximidade do dique podem estar relacionadas ao maior volume de água em um ambiente lântico, o que favorece a deposição dos materiais (sedimentos em suspensão). As maiores concentrações de TSS, observadas nos pontos 4 e 5, provavelmente se devem aos sedimentos transportados pelas águas do rio Jacuí (Figura 15 A), sendo que nestes mesmos pontos amostrais verificou-se as menores transparências da água (Figura 12). Segundo Braga (1998), isso pode ocorrer devido à ressuspensão dos sedimentos de fundo ocasionada pelo aumento da intensidade dos ventos em corpos de água rasos.

Cabe ressaltar que as diferentes concentrações de TSS observadas entre pontos amostrais, se devem as particularidades de cada porção da área do reservatório e principalmente de suas adjacências (entorno do reservatório), fortemente influenciadas pelo uso e ocupação da terra (WACCHOLZ, 2011).

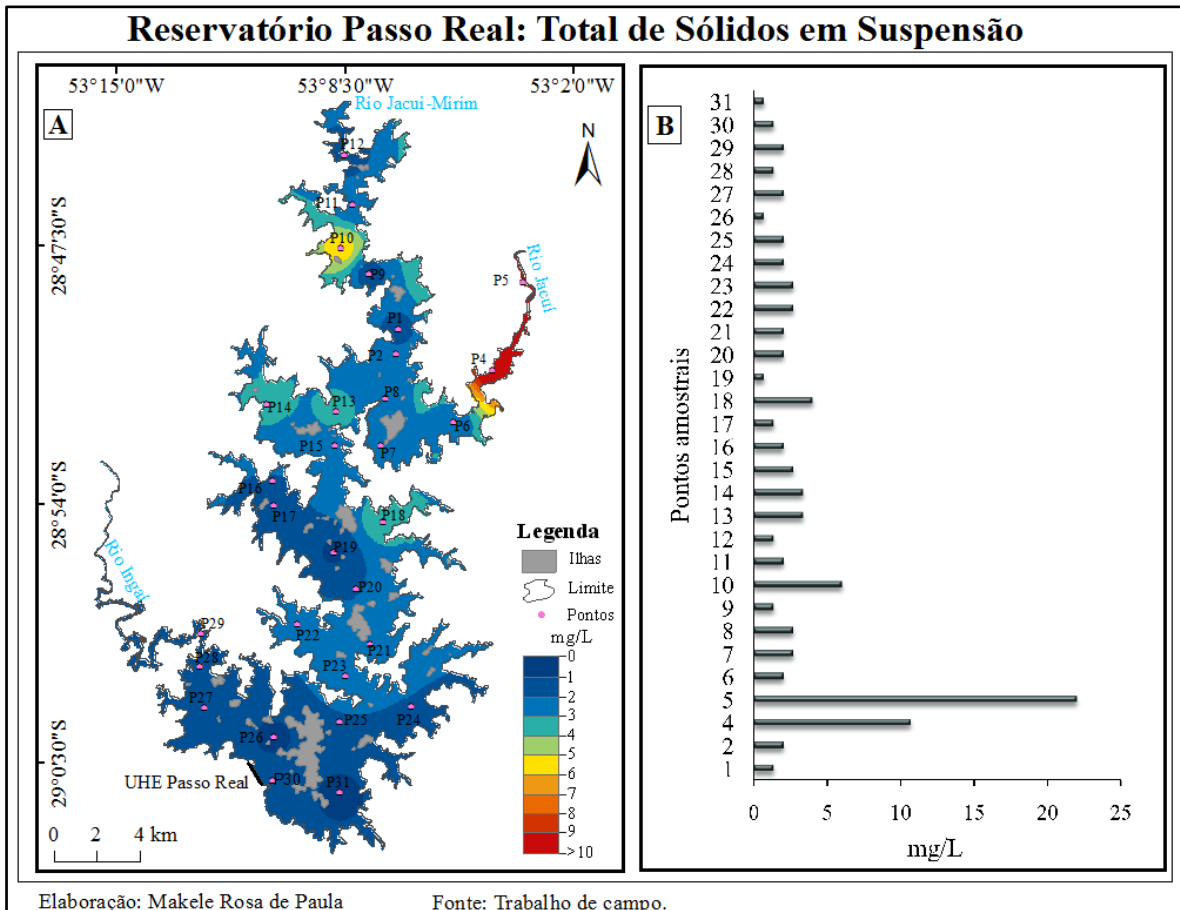


Figura 15 - (A) Espacialização do TSS e (B) dados de TSS, nos pontos amostrais do reservatório Passo Real em abril de 2009.

#### 4.2.5 Carbono orgânico dissolvido

As concentrações de Carbono Orgânico Dissolvido (COD) variaram de 0,92 mg/L no ponto amostral 24 à 8 mg/L no ponto amostral 2 conforme a Figura 16 B.

Na Figura 16 A estão espacializados os dados de COD, onde verificou-se maiores concentrações na porção central do reservatório, destacando-se os pontos amostrais 2, 17 e 23. As menores concentrações foram observadas próximo ao dique e no fluxo de entrada dos rios Ingaí, Jacuí-Mirim e Jacuí. Neste sentido, ressalta-se que a entrada das águas dos afluentes permite a formação de massas de águas heterogêneas, contribuindo para a mistura de todos os componentes nelas existentes.

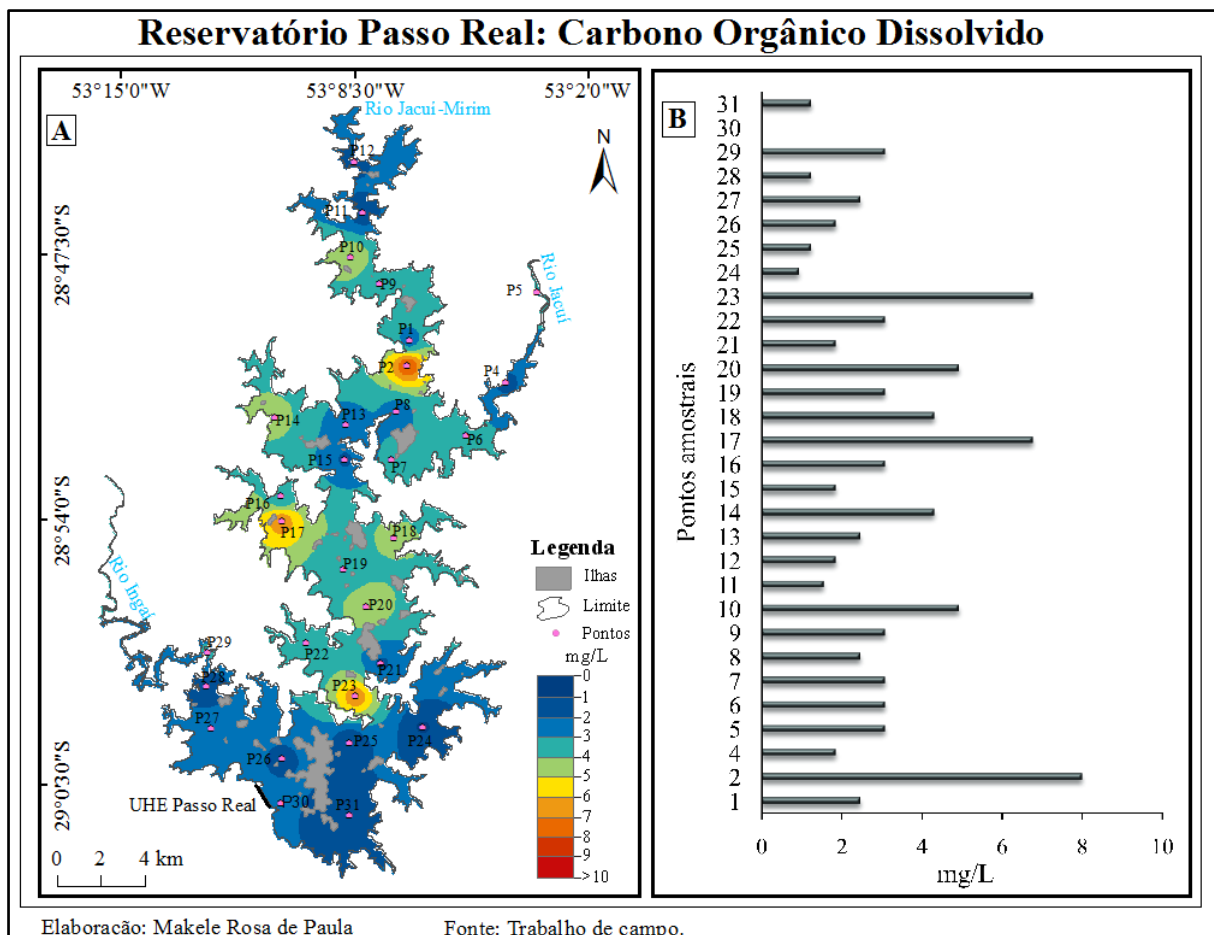


Figura 16 - (A) Espacialização do COD e (B) dados de COD nos pontos amostrais, do reservatório Passo Real em abril de 2009, exceto o ponto amostral 30 devido à inconsistência do dado.

### 4.3 Descrição dos dados limnológicos

As variações das concentrações dos constituintes opticamente ativos ao longo do corpo de água podem estar relacionadas ao tamanho e formato do reservatório; influência de resíduos e substâncias provenientes de cidades próximas; atividades agrícolas no entorno; influência dos tributários, entre outros (WACHHOLZ, 2011; FERREIRA, 2014).

Na Tabela 3, pode ser notada a variabilidade dos parâmetros da qualidade da água. Observou-se que a média das variáveis TSS, COD e Chl *a* foi aproximadamente 3, e o maior valor do desvio padrão (4,04) foi referente ao TSS, seguido da Chl *a* com 2,17 e 1,77 para o COD. Para a variável DS foi verificado o menor desvio padrão (0,77) o que indica maior homogeneidade dos valores de DS em relação às outras variáveis.

A profundidade do DS teve uma média de 1,90 m, e a temperatura média da água foi de 24,9°C, sendo esta a variável que apresentou a menor variabilidade espacial, com coeficiente de variação de 3,33%.

O TSS apresentou elevado coeficiente de variação (130,79%), devido ao ponto amostral 5 (entrada do Rio Jacuí) que possui o maior valor de concentração (22 mg/L), sendo que os valores mínimo e máximo para os demais pontos variaram de 0,67 à 10,67 mg/L, obtendo-se um coeficiente de variação de 78%.

A Chl *a* apresentou valores dentro do padrão estabelecido como referência para a classe I, obtendo-se valores de concentração abaixo de 10 µg/L. De acordo com a resolução CONAMA n° 357/2005 (BRASIL, 2012), as águas doces de classe I, podem ser destinadas: (a) ao abastecimento para consumo humano após tratamento simplificado; (b) à proteção das comunidades aquáticas; (c) recreação de contato primário (natação, esqui e mergulho); (d) irrigação de hortaliças consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película e (e) à proteção das comunidades aquáticas em Terras Indígenas.

Tabela 4 - Estatística descritiva das variáveis limnológicas amostradas durante a campanha de campo do reservatório Passo Real

Variáveis	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)	Mínimo	Máximo	n° de amostras
TSS (mg/L)	3,09	4,04	130,79	0,67	22,00	30
COD (mg/L)	3,10	1,77	57,11	0,92	8,00	29
Chl <i>a</i> (µg/L)	3,03	2,17	71,70	0,42	8,42	30
DS (m)	1,90	0,77	40,76	0,45	3,35	30
Temperatura (°C)	24,9	0,83	3,33	21,60	26,10	30

\*Valor de referência para a clorofila *a* é de 10 µg/L segundo a resolução CONAMA 357/2005 para a classe I da qualidade da água (BRASIL, 2012).

#### 4.4 Análise visual da imagem

Para a análise visual da imagem utilizou-se uma composição colorida das bandas 3R2G1B, uma vez que a cor da água fornece algumas informações dos constituintes opticamente ativos presentes na mesma (Figura 17 A e B).

Verificou-se uma gradual transição do setor montante para jusante, em geral, associado às diferentes concentrações de TSS (Figura 15) e Chl *a* (Figura 14). Observa-se na Figura 17 B, que os tons em amarelo e marrom correspondem às áreas com maior presença de partículas inorgânicas. A influência do sistema lótico pode ser verificada no setor montante do reservatório em função da elevação da concentração de TSS e redução da transparência da água. Esse fato é visível nos pontos de entrada do rio Jacuí (pontos amostrais P4, P5 e P6).

O tom esverdeado predominou na maioria dos pontos amostrais, localizados na porção central do reservatório e próximo a entrada do rio Ingaí, o que provavelmente corresponde às baixas concentrações de sólidos em suspensão.

A tonalidade de azul escuro próximo ao dique do reservatório, onde se encontra grande volume de água, correspondem às áreas de maior transparência da água. Segundo Novo (2010), lagos oligotróficos e profundos, geralmente são escuros, isso porque a luz se atenua em profundidade e não ocorre sinal de retorno para o observador.

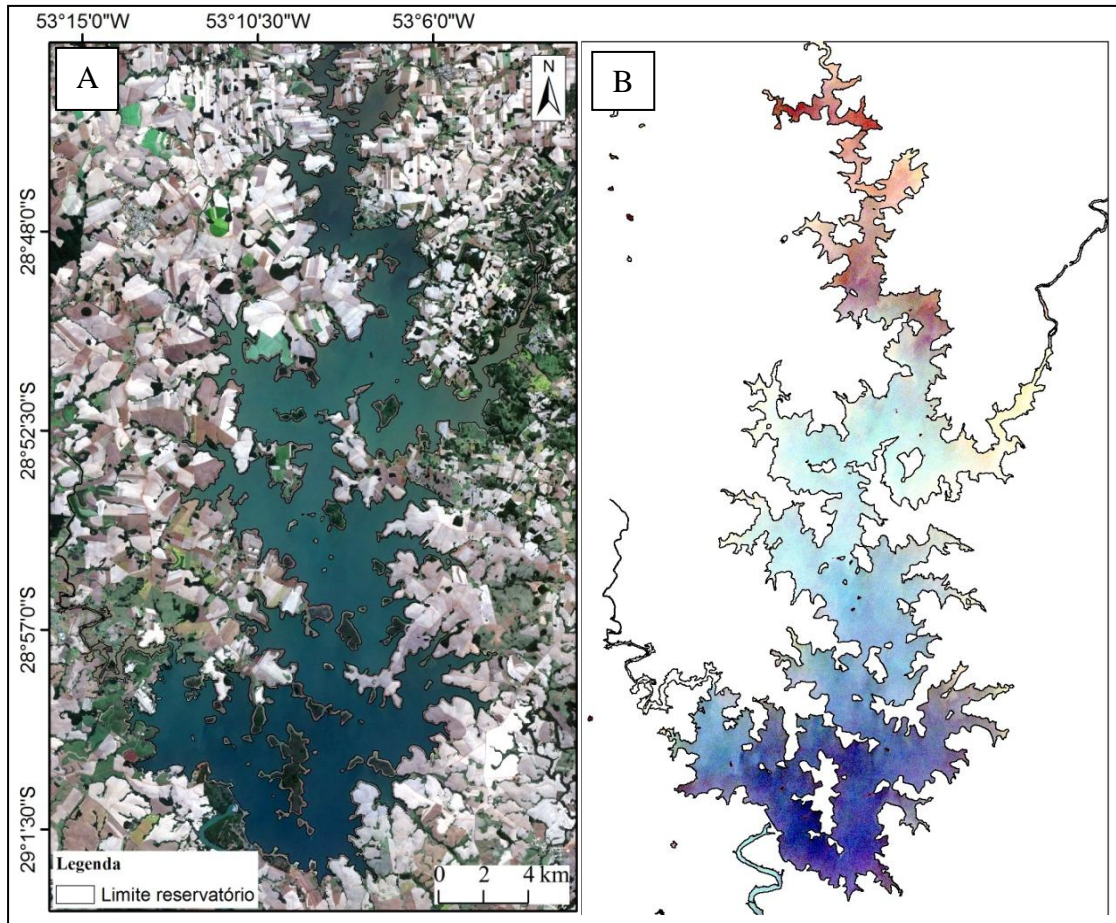


Figura 17 – (A) Composição colorida das bandas 3R2G1B do satélite RapidEye e (B) após aplicação da máscara com ampliação de contraste, para reservatório Passo Real – RS no dia 17 de abril de 2009.

#### 4.5 Relação entre a reflectância da água e as variáveis limnológicas

Tendo em vista o objetivo de identificar a relação entre os dados multiespectrais da imagem do satélite RapidEye e as variáveis limnológicas, realizou-se uma análise exploratória dos espectros de reflectância. Em seguida, são apresentados os resultados da correlação entre os dados espectrais extraídos da imagem e a ocorrência dos vários componentes obtidos no levantamento de campo e os resultados oriundos da aplicação da técnica de razão de bandas sobre os espectros para extração de informações.

Na Figura 18 são apresentados seis espectros representativos dos principais setores do reservatório Passo Real. Nota-se nos espectros de reflectância da água do reservatório um comportamento de espalhamento na faixa do verde, centrada em 555 nm, para a maioria das amostras, ocorrendo um declínio de reflectância em direção aos maiores comprimentos de



onda. O pico de maior reflectância nesta mesma faixa do espectro corresponde o ponto 29 (fluxo de entrada do rio Ingaí) com concentração de Chl *a* de 7,58 µg/L. Wachholz (2011) constatou que, no caso do reservatório Passo Real, o compartimento do rio Ingaí apresentou a maior concentração de clorofila *a*, conforme a média de uma série temporal de fevereiro de 2009 a março de 2010.

O ponto 4 teve a maior concentração de Chl *a* (8,42 µg/L) em relação aos outros pontos amostrais e o segundo maior valor de concentração de sólidos em suspensão com 10,67 mg/L, o qual observa-se pico de reflectância nas faixas do verde (B2) e do vermelho (B3).

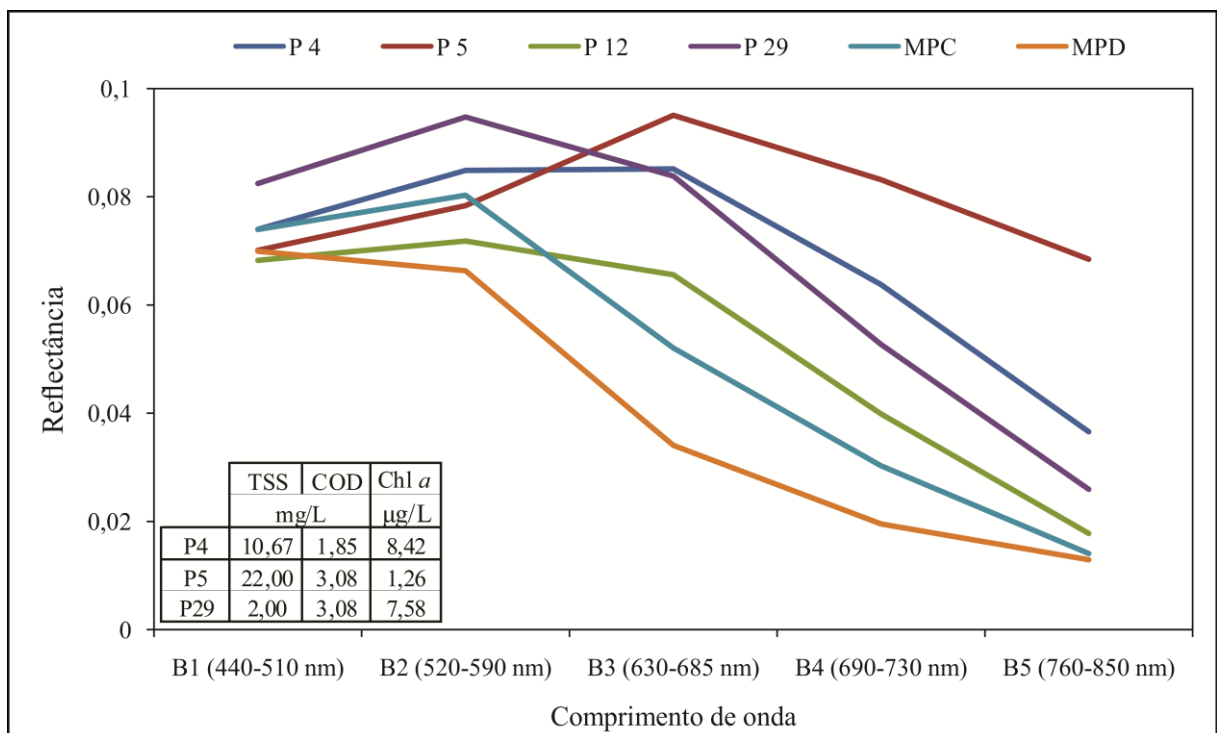


Figura 18 – Espectros representativos dos principais setores do reservatório Passo Real, extraídos da imagem RapidEye em uma janela de 3x3 pixels para cada ponto amostral em abril de 2009. Pontos P4 e P5 (rio Jacuí); ponto 12 (rio Jacuí-Mirim); MPC (média do conjunto de pontos localizados na região centro-montante do reservatório, representados pelos pontos amostrais 1, 2, 6 ao 11 e 13 ao 20) e MPD (média do conjunto de pontos amostrais localizados na região próxima ao vertedor do reservatório (dique), pontos amostrais 21 ao 28, 30 e 31).

Estudos realizados por Pereira Filho et al. (2011) no reservatório Passo Real em outubro de 2009, utilizando dados do sensor TM, concluíram que as diferenças nas concentrações de clorofila alteram os espectros de reflectância entre as bandas. Os autores verificaram em amostras com concentração de clorofila superior a 50 µg/L, maior reflectância

na banda 2 (faixa do verde) em relação à banda 3 (faixa do vermelho). Nesse sentido, a eficiência na discriminação de grupos de fitoplâncton na água depende também da concentração de seus pigmentos (LONDE, 2008). Visto que, dentre os pontos amostrais no reservatório Passo Real a maior concentração de clorofila *a* foi de 8,42 µg/L em abril de 2009.

De acordo com Metsamaa et al. (2006), as feições de espalhamento e absorção da clorofila se tornam detectáveis nos espectros de reflectância quando a concentração de clorofila *a* é em média, superior a 8 µg/L.

A maior ou menor biomassa do fitoplâncton na água pode ser indicada pela concentração de clorofila, sendo assim, com o aumento da biomassa do fitoplâncton aumenta também a reflectância em todos os comprimentos de onda, mas principalmente na região do infravermelho próximo, onde ocorre o espalhamento celular que supera o efeito de absorção pela água (NOVO, 2010).

Observa-se (Figura 18), o aumento da reflectância na banda do vermelho, centrada em 657,5 nm, para os pontos amostrais P4 e P5, que corresponde o fluxo de entrada do rio Jacuí com as maiores concentrações de TSS (10,67 mg/L e 22 mg/L, respectivamente). Esse aumento da reflectância na banda 3 devido à maior concentração de sólidos em suspensão, também foi verificado por Pereira Filho et al. (2011), centrada em 660 nm para dados do sensor TM/Landsat.

No espectro MPD, que representa a média dos valores de reflectância do conjunto de pontos localizados próximo ao dique, exceto os pontos 28 e 29 que correspondem o fluxo de entrada do rio Ingaí, foram observados os menores valores de reflectância. Isso ocorreu para a maioria das bandas espectrais quando comparados com os demais pontos amostrais, o que pode estar relacionado com a alta transparência da água (profundidade do disco de Secchi superior a 2,10 metros).

Para a verificação das melhores correlações entre dados de reflectância e as variáveis limnológicas: TSS (mg/L), DS (m), COD (mg/L) e CHL (µg/L), foi elaborado um correlograma conforme a Figura 19. A partir do correlograma foi possível avaliar a associação entre as variáveis que representam as concentrações dos COAs e a reflectância da imagem, sobre os comprimentos de onda centrais das 5 bandas do satélite RapidEye.

As correlações foram calculadas para um nível de significância de 95%. O limite estabelecido para valores de coeficiente de correlação estatisticamente significativos foi de  $r \geq 0,36$  para um  $n = 30$ .

Nota-se que para o TSS as correlações foram positivas e significativas a partir da faixa do vermelho em direção as bandas de comprimentos de onda maiores. Enquanto que para a

transparência da água (DS) as correlações foram negativas e significativas a partir da faixa do verde até o infravermelho próximo, com destaque para a faixa do vermelho (banda 3). Ennes e Galo (2010), também encontram correlações negativas significativas entre a banda 1 (620-670 nm) do sensor MODIS, bem como a banda 3 (630-690 nm) do CBERS/CCD com a variável transparência da água (DS). O qual se observou a semelhança do posicionamento e abrangência espectral para o satélite RapidEye, banda 3 (630-685nm).

Rudorff (2006) afirma que, os sedimentos em suspensão são os principais agentes que determinam a redução da profundidade Secchi (transparência). O que confirma a correlação negativa entre reflectância e DS.

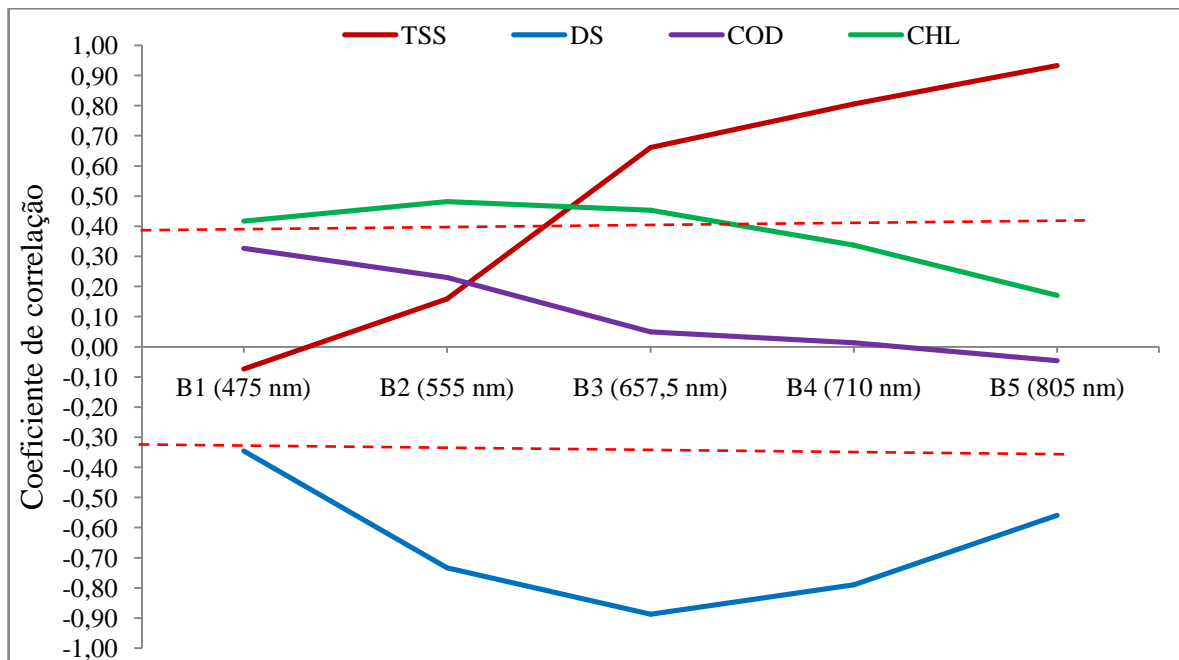


Figura 19 - Correlograma entre a reflectância nas diferentes faixas espectrais e as variáveis medidas no reservatório Passo Real – RS: totais de sólidos em suspensão (TSS), transparência da água (DS), clorofila *a* (CHL) e carbono orgânico dissolvido (COD) (linha tracejada em vermelho – limite dos valores estatisticamente significativo,  $\alpha = 0,05$ ).

Para a Chl *a* as correlações positivas significativas foram observadas nas bandas 1, 2 e 3, com destaque para a banda 2 (faixa do verde). Porém, apresentou correlações baixas, o que provavelmente se devem as baixas concentrações na água (com média de 3,03). Estudos realizados por Cicerelli e Galo (2015), no reservatório de Nova Avanhandava - SP, verificaram correlação significativa entre a banda RedEdge (690-730 nm) do RapidEye e a concentração de clorofila *a*.

A medida de COD é considerada em vários trabalhos científicos um bom indicador de matéria orgânica dissolvida colorida (RUDORFF, 2006). Porém, não foi verificada correlação significativa entre a concentração de COD e a reflectância ao longo da faixa do espectro analisada. Isso pode estar associado às baixas concentrações e variabilidade espacial deste componente no reservatório.

Para as bandas espectrais, cujos valores de reflectância apresentaram correlações significativas com variáveis limnológicas (Figura 19), foram testados os modelos de estimativa. Na Figura 20, são apresentados os diagramas de dispersão e melhores ajustes lineares para as variáveis: TSS, DS e Chl *a* com os valores de reflectância das bandas 5, 3 e 2, respectivamente.

O TSS, DS e a Chl *a* foram às variáveis que apresentaram relações significativas com dados espectrais. Para o intervalo de confiança de 95%, o modelo com ajuste linear para a variável TSS com a banda do infravermelho próximo (banda 5), obteve o maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,87, e com ajuste polinomial obteve  $R^2 = 0,89$ . Também se obteve resultados significativos com ajuste linear para as bandas do vermelho ( $R^2 = 0,44$ ) e borda do vermelho ( $R^2 = 0,65$ ). Observa-se que quanto maior o comprimento de onda, maior o  $R^2$ . Já para a banda do azul e do verde, obteve-se  $R^2$  não significativos.

Nos pontos amostrais 4 e 5 observou-se maior reflectância (Figura 20 A) e menor transparência (Figura 20 B), os quais representam o setor de entrada do rio Jacuí no reservatório. Para os pontos amostrais 30 e 31, localizados próximo ao dique do reservatório, obteve-se baixo valor de reflectância e maior transparência (3,35 metros) (Figura 20 B). Isso mostra que o maior volume de água e as características de ambiente lântico favorecem a deposição de materiais na superfície de fundo e valores de reflectância menores.

A variável transparência e os dados espectrais a partir da banda 2 obtiveram coeficientes de determinação significativos. Sendo que o modelo de regressão linear ajustado para a transparência da água do reservatório Passo Real apresentou o maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,79, para a banda 3, pico de absorção no vermelho. A transparência da água com ajuste polinomial e logarítmica para a mesma banda espectral obteve  $R^2 = 0,89$ .

Para a variável Chl *a*, o valor de  $R^2$  foi de 0,23 (ajuste linear) com a banda 2, pico de reflectância na faixa do verde do espectro. Em estudos realizados por Cicerelli e Galo (2015), encontrou-se  $R^2 = 0,745$  (ajuste exponencial) entre a banda 4 do RapidEye e a concentração de Chl *a*. Para os dados de COD não houve banda espectral que se correlacionou de forma significativa.

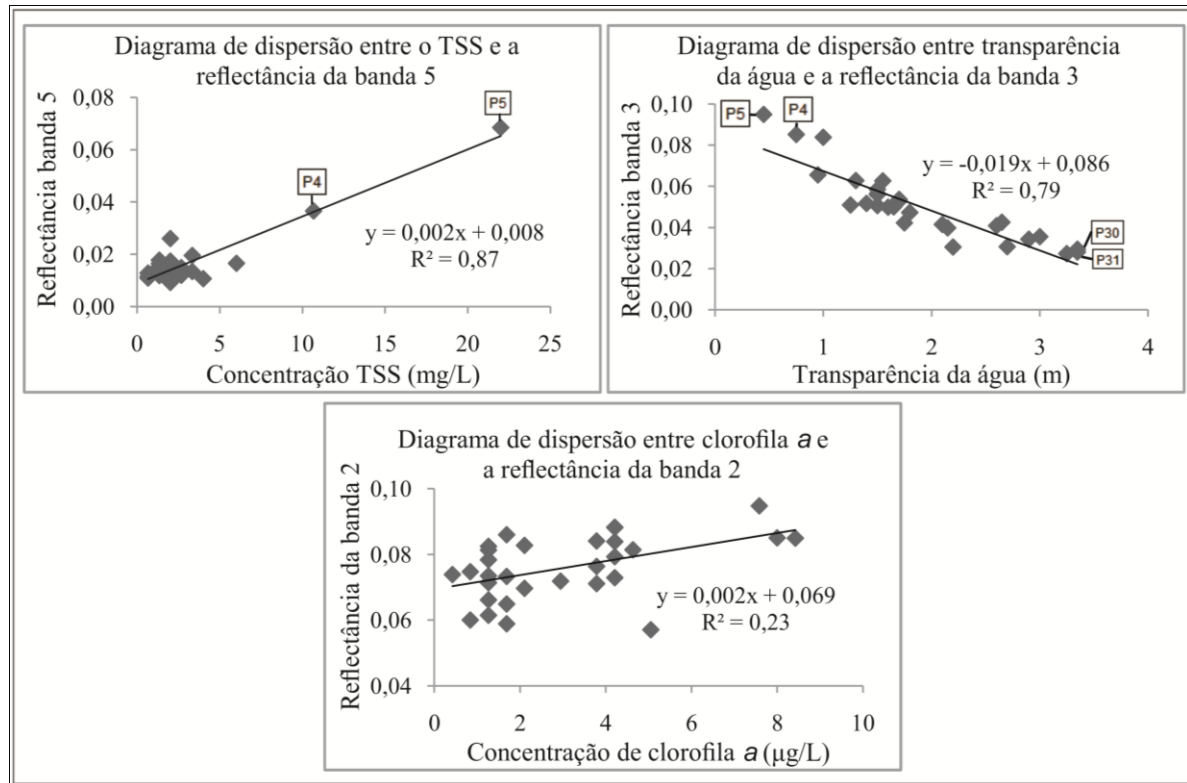


Figura 20 - Diagramas de dispersão com ajuste de modelo linear entre as variáveis limnológicas TSS, transparência da água e Chl *a* e a reflectância das bandas 5, 3 e 2.

A partir da avaliação do correlograma (Figura 19) os modelos lineares analisados acima (figura 20) foram invertidos com o intuito de gerar estimativas contínuas das variáveis limnológicas com base na resposta espectral da imagem RapidEye. A partir deste procedimento as equações utilizadas para a estimativa das variáveis assumem os seguintes modelos: para a variável total de sólidos em suspensão ( $y = 340,4x - 2,620$ ) e transparência da água ( $y = -40,88x + 3,945$ ). O uso das reflectâncias das bandas 5 e 3 produziram os valores de  $R^2$  de 0,87 e 0,79, respectivamente. Por outro lado, o coeficiente de determinação para a clorofila *a* ( $y = 109,2x - 5,262$ ) com a banda 2 (região do verde) foi de 0,23. As equações derivadas do ajuste linear das variáveis limnológicas TSS, DS e Chl *a* obtidas *in situ* com as bandas 5, 3 e 2 do satélite RapidEye, respectivamente, foram aplicadas na área do reservatório nas respectivas imagens gerando os mapas de distribuição espacial das variáveis limnológicas (Figuras 21, 22 e 23).

A Figura 21 ilustra a estimativa da variável total de sólidos em suspensão a partir da banda 5 e a espacialização dos dados de TSS obtido *in situ* (interpolados). Observa-se uma

consistência entre os dados estimados e medidos em campo. Próximo ao dique e em algumas partes da região central do reservatório os valores de TSS estão abaixo de 3 mg/L. Já na região central do rio Jacuí foram estimados valores acima de 10 mg/L. Em uma abordagem geral, o modelo linear capturou a transição de montante para jusante da concentração de TSS, em concordância com os dados medidos em campo. Em alguns setores, o modelo empírico reportou maiores concentrações em função do efeito do substrato, bordas ou mesmo presença de uma carga efetiva de TSS, mas observada em função das limitações do processo de medidas em campo. A diferença observada no compartimento aquático do rio Ingaí se dá pela ausência de amostragem naquele setor. O ponto amostral 29 encontra-se a jusante, logo após a zona de transição da área de alto TSS.

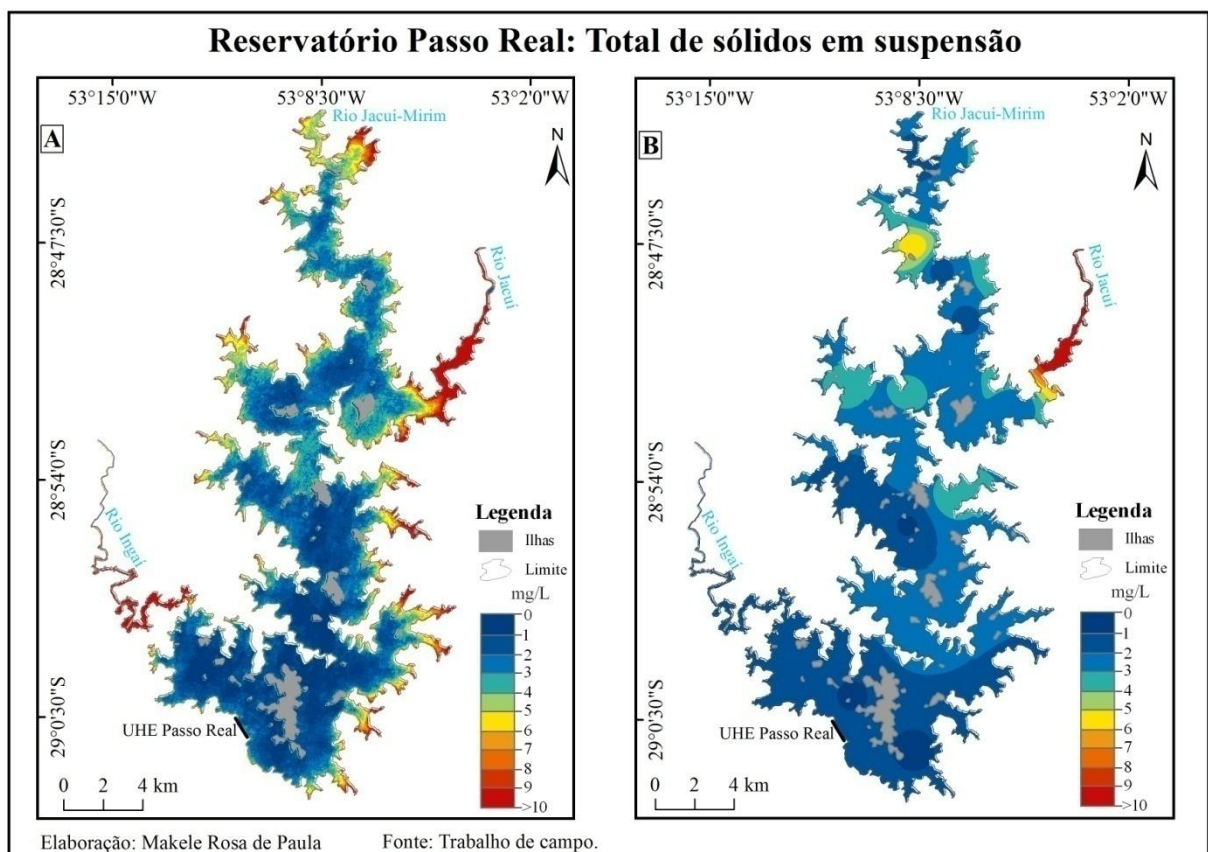


Figura 21 – (A) Mapa de distribuição da concentração de TSS no reservatório Passo Real, estimada a partir dos dados de reflectância da banda 5 do satélite RapidEye e (B) dados medidos *in situ* interpolados por média ponderada, para abril de 2009.

A transparência da água estimada (Figura 22A) a partir da imagem de satélite apresentou semelhança com a transparência da água medida *in situ* (Figura 22B). Em uma análise geral, nota-se a presença de áreas com valores de transparências abaixo de 100 cm representados pelos setores dos afluentes, ocorrendo um aumento de transparência acima de 200 cm em direção ao dique do reservatório caracterizado com maior volume de água.

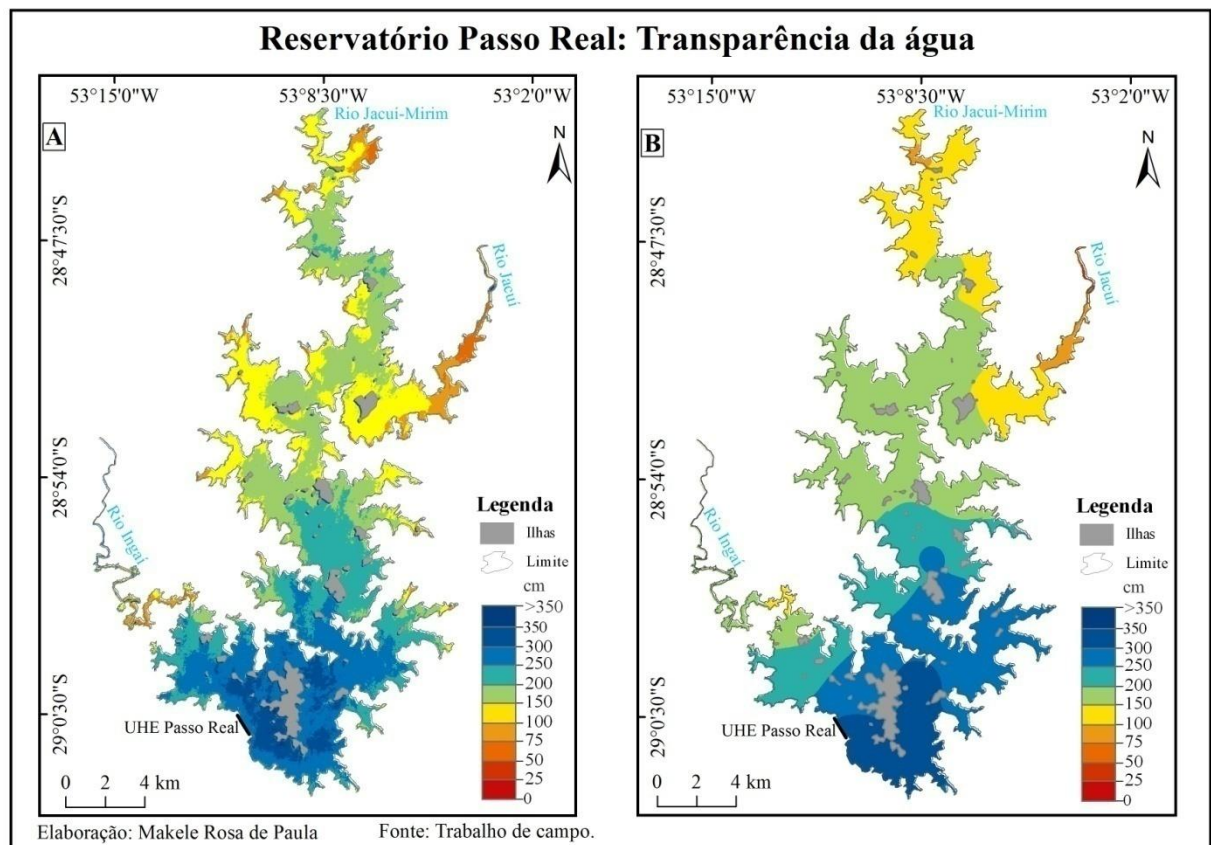


Figura 22 – (A) Mapa de distribuição da transparência da água no reservatório Passo Real, estimada a partir dos dados de reflectância da banda 3 do satélite RapidEye e (B) dados medidos *in situ* interpolados por média ponderada, para abril de 2009.

Analisando a distribuição espacial e a variabilidade da concentração da clorofila *a* no reservatório Passo Real a partir do modelo matemático usando a banda 2, região do verde, mostrou-se baixa as evidências com a clorofila *a* medida *in situ* (Figura 23). Isso provavelmente devido as baixas concentrações, o que conseqüentemente ocasionou baixa correlação.

Observa-se que a clorofila *a* estimada a partir da imagem de satélite para quase todo o reservatório, apresentou-se com valores abaixo de 6  $\mu\text{g/L}$ , enquanto que a clorofila *a* medida

*in situ*, em algumas áreas, obteve valores acima de 10  $\mu\text{g/L}$ . Apesar desta condição, de um modo geral, o modelo está relacionado com os dados de campo, uma vez que em um perfil longitudinal do eixo principal do reservatório houve diminuição desta variável nas duas situações (dados estimado e de campo), conforme Figura 23.

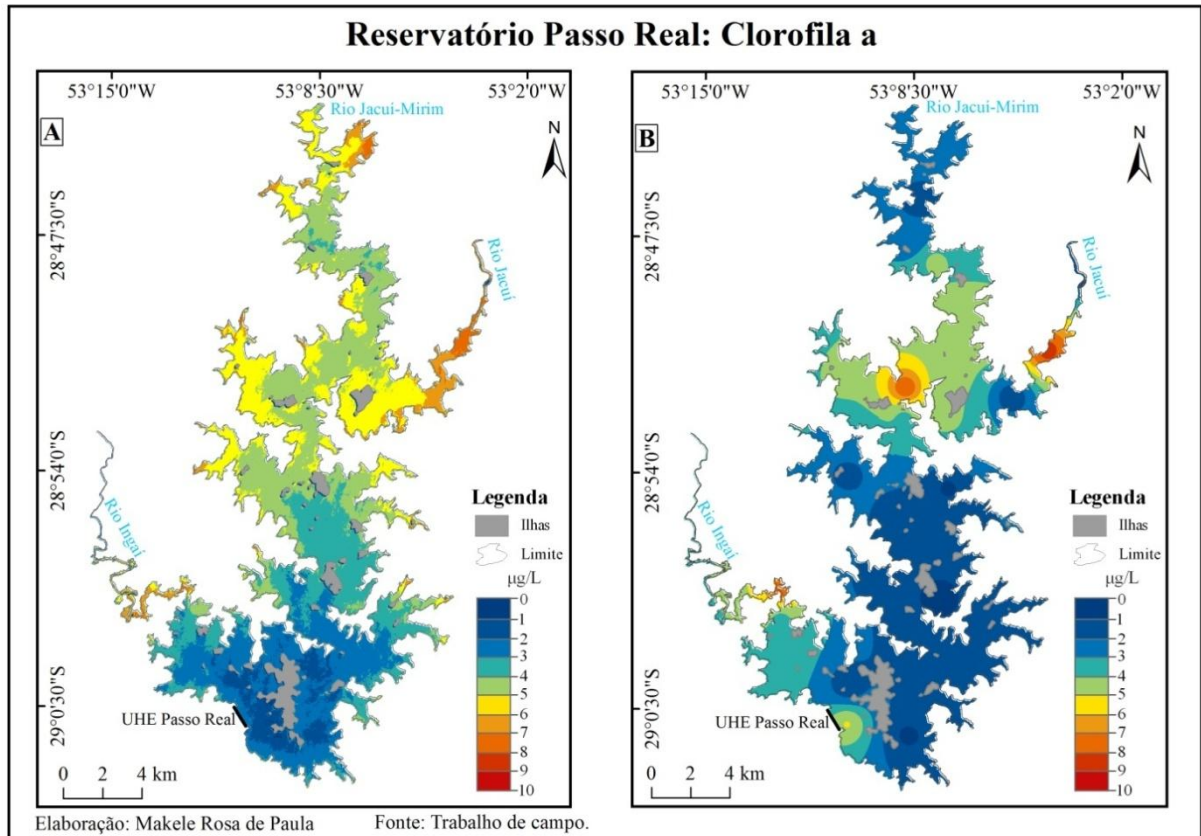


Figura 23 – (A) Mapa de distribuição da concentração de clorofila *a* no reservatório Passo Real, estimada a partir dos dados de reflectância da banda 2 do satélite RapidEye e (B) dados medidos *in situ* interpolados por média ponderada, para abril de 2009.

#### 4.6 Razão de bandas

Com intuito de explorar outras combinações possíveis de razões de bandas com as variáveis limnológicas: total de sólidos em suspensão, transparência da água e clorofila *a*, gerou-se diagramas de correlação (Figura 24). Os eixos X e Y compreendem as bandas do satélite RapidEye usadas no cálculo das razões como denominador e numerador,



respectivamente. Os intervalos de valores do coeficiente de correlação são representados em cores.

O aumento da concentração de sedimentos tende a formar um patamar de reflectância entre 600 e 700 nm, resultando no deslocamento do pico de máxima reflectância em direção aos maiores comprimentos de onda (NOVO, 2001; ARRAUT et al., 2005). Nesse sentido, os melhores coeficientes de correlação para o TSS foram com as razões de bandas entre o infravermelho próximo e o azul e entre o infravermelho próximo e o verde, com  $r = 0,94$  e  $r = 0,93$ , respectivamente. Estudo realizado por Doxaran et al. (2005), obteve alta correlação ( $R^2 = 0,96$ , regressão linear) entre a razão do infravermelho próximo (850 nm) e faixa do verde (550 nm) com a variável TSS.

O melhor coeficiente de correlação ( $r = 0,94$ ) para a transparência da água foi com a razão de bandas entre o azul e o vermelho.

Devido às baixas concentrações de clorofila *a* não foi possível obter uma correlação significativa com a razão de bandas NIR/RED que em vários estudos verificaram-se resultados satisfatórios. Todavia, percebe-se que a razão de bandas entre o verde e o azul obteve correlação significativa, com  $r = 0,42$ , enquanto as outras razões de bandas apresentaram valores inferiores. Esse resultado condiz com os estudos realizados por Londe et al. (2006), em que a razão de bandas 550 nm/435 nm aplicados a um determinado conjunto de dados do reservatório de Salto Grande – SP, foi a que melhor se ajustou a variação de concentração de clorofila *a* no reservatório, com  $r = 0,9360$ . Ennes (2008) obteve coeficiente de determinação de 0,268 para a razão espectral 457/579 nm com a Chl *a*, utilizando dados espectrais da imagem Hyperion. Já em estudo realizado por Cicerelli (2013), obteve correlação negativa alta (-0,74) para a razão espectral B3/B4 do RapidEye com a clorofila *a*.

Os resultados obtidos com o uso das razões de bandas foram semelhantes com os valores estatisticamente significativos obtidos a partir da correlação entre os valores espectrais e as variáveis limnológicas. Em uma análise geral, nota-se que a correlação entre a variável TSS e a banda 5 obteve-se o melhor coeficiente de correlação de 0,93 e a razão de bandas B5/B1 e a variável TSS obteve-se  $r = 0,94$ . A melhor correlação entre a variável transparência da água e a banda 3 (faixa do vermelho) apresentou-se  $r = -0,89$  e com a razão de bandas B1/B3 o coeficiente de correlação foi igual a 0,94. A razão de bandas B2/B1 que apresentou maior valor de coeficiente de correlação (0,42) com a clorofila *a* foi inferior ao valor obtido entre a correlação da variável clorofila *a* e a banda 2 que obteve  $r = 0,48$ .

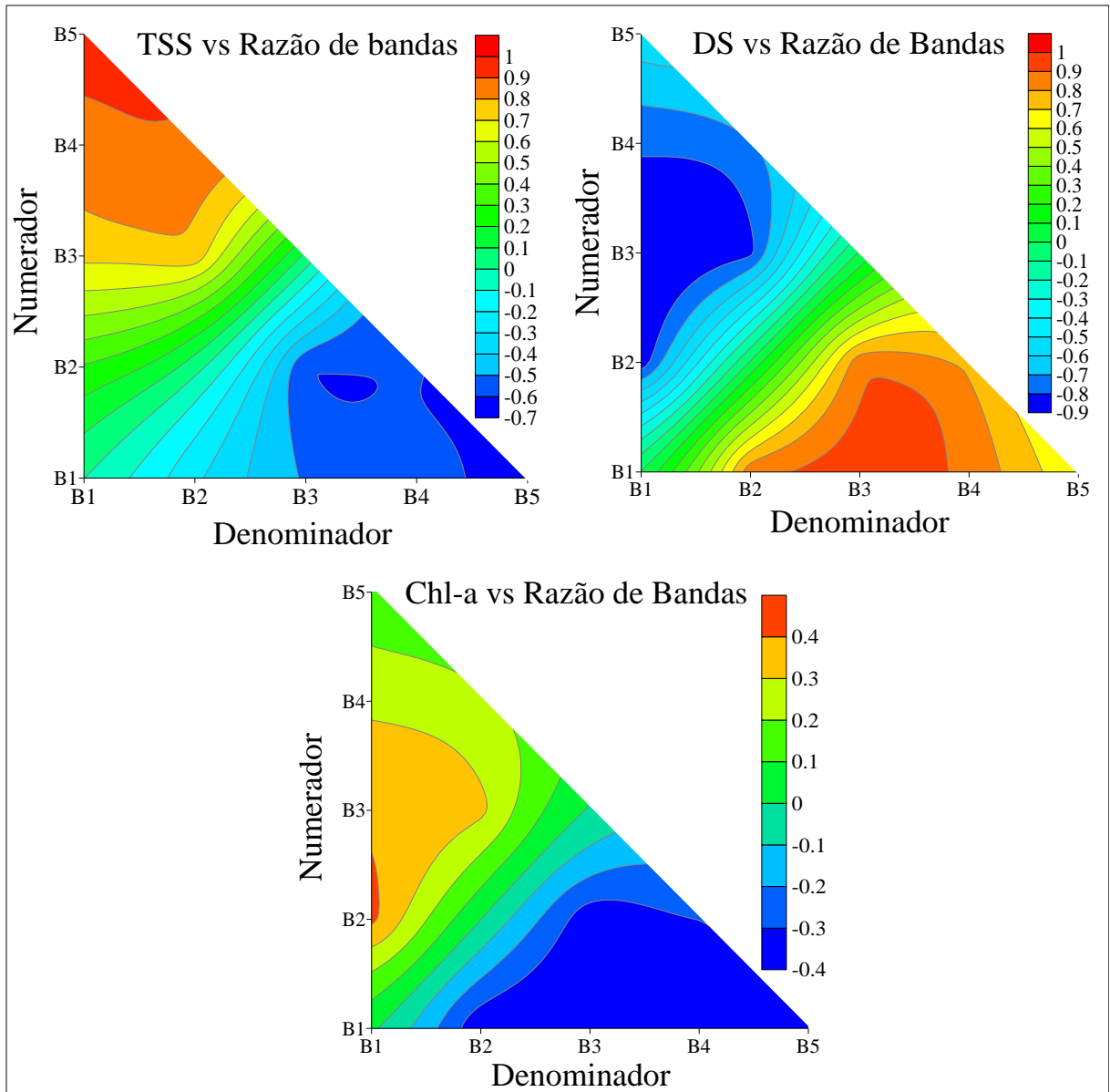


Figura 24 – Diagramas de correlação entre todas as possíveis razões de bandas do satélite RapidEye e as variáveis limnológicas: TSS, DS e Chl *a* ( $r \geq 0,36$ : limite para valores de coeficiente de correlação estatisticamente significativos).

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Embora o satélite RapidEye não seja especificamente utilizado para aplicação em ambientes aquáticos, o estudo indicou sua capacidade de analisar a relação entre os espectros extraídos da imagem e a variável total de sólidos em suspensão coletada *in situ*. O pico de reflectância na faixa do vermelho para os pontos 4 e 5 (rio Jacuí), mostraram concordância com os dados de concentração de sólidos em suspensão, visto que esses dois pontos obtiveram as maiores concentrações desta variável.

Devido à baixa concentração de clorofila *a* na água do reservatório, não houve feições nítidas de absorção e reflectância nas faixas espectrais específicas, apenas apresentou espalhamento na faixa do verde. A concentração de carbono orgânico dissolvido na água do reservatório não foi suficiente para apresentar, significativamente, suas características sobre os espectros.

Considerando que os 30 pontos amostrais no reservatório da UHE Passo Real foram representativos em sua variabilidade espacial, conclui-se que as águas do reservatório podem ser caracterizadas com baixas concentrações de componentes opticamente ativos, o que dificulta a definição de um constituinte predominante neste ambiente. Considera-se que as coletas de dados foram realizadas no mês de estiagem, e, portanto, tende a ser mais restrito o transporte de materiais provenientes de ambiente terrestre.

Os afluentes do reservatório da UHE Passo Real contribuem na formação de massas de água, o que representam a mistura de todos os componentes nelas presentes. Os setores de entrada dos rios Jacuí e Ingaí, foram caracterizados com as maiores concentrações de Chl *a*, além de alta concentração de TSS na entrada do rio Jacuí, e conseqüentemente ocorreram os menores valores de transparência da água, em relação aos demais pontos amostrais. Os quais interferem na absorção e espalhamento da energia, imprimindo as feições específicas de cada tipo de componente opticamente ativo presente.

Com base na concentração de Chl *a* o reservatório apresentou os seguintes ambientes tróficos: ultraoligotrófico, oligotrófico e mesotrófico.

De acordo com os padrões de corpos d'água estabelecidos pela resolução CONAMA nº 357/2005 (BRASIL, 2012), as águas do reservatório Passo Real para o mês de abril de 2009, definida pela variável limnológica clorofila *a*, se enquadra na classe I.

Correlações significativas foram encontradas a determinadas faixas do espectro para as variáveis TSS, Chl *a* e DS. Porém, as correlações mais significativas entre dados espectrais foram com as variáveis TSS com a banda 5 e DS com a banda 3. Devido à baixa concentração de clorofila *a* na água houve dificuldade na obtenção de fortes correlações com a resposta espectral da imagem.

Os modelos empíricos permitiram estimar a concentração de TSS e transparência da água ( $R^2 = 0,87$  e  $R^2 = 0,79$ ) usando as bandas do infravermelho próximo e vermelho, respectivamente. Devido aos baixos valores de correlação da Chl *a* com os dados espectrais, houve baixa consistência dos dados estimados pela imagem e dados coletados a campo (interpolados). Verificou-se que é possível desenvolver um modelo empírico para estimar a concentração de TSS e transparência da água a partir de imagem de satélite RapidEye.

Os resultados obtidos com o uso das razões de bandas foram semelhantes com os valores estatisticamente significativos obtidos a partir da correlação entre os valores espectrais e as variáveis limnológicas. Todavia, cabe destacar as razões de bandas que apresentaram os melhores coeficientes de correlação. Para o TSS foram com as razões de bandas B5/B1 e B5/B2, com  $r = 0,94$  e  $r = 0,93$ , respectivamente. A razão de bandas B1/B3 resultou na melhor correlação com a transparência da água,  $r = 0,94$ .

Os resultados obtidos com o uso de testes estatísticos e dados do satélite RapidEye, abrem perspectiva na utilização de imagens orbitais como ferramenta de análise e monitoramento da qualidade da água em reservatórios.

Recomenda-se o uso da imagem RapidEye em outras datas para que se possa ter um melhor entendimento do comportamento espectral de acordo com a concentração e variabilidade espaço-temporal dos constituintes opticamente ativos presentes na água do reservatório, além de outros testes com a imagem RapidEye.

Para melhor caracterizar espectralmente as águas do reservatório e refinar as informações extraídas da imagem de satélite, sugere-se também a realização de medidas radiométricas em campo que possuem alta resolução espectral.

## REFERÊNCIAS

- ALCÂNTARA, E. H. **Análise da turbidez na planície de inundação de Curuai (PA, Brasil) integrando dados telemétricos de imagens MODIS/TERRA**. 2006. 217 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006.
- ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de Estatística e Geoestatística**. São Leopoldo: Unisinos, 2003. 165p.
- ANTUNES, M. A. H. et al. Correção atmosférica de imagens ALOS/AVNIR-2 utilizando o modelo 6S. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, n. 64, p. 531-539, jul. 2012.
- APHA - American Public Health Association. **Standard Methods for the Examination of Water and Waster water**. 21 ed. Springfield: Byrd Prepress, 2005.
- 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 de seca, através de técnicas de espectroscopia de campo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., v.12, 2005, Goiânia. **Anais...** Goiânia: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2005, p. 2447-2456.
- BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto da dinâmica de circulação da água do sistema planície de Curuai/Rio Amazonas**. 2005. 281 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.
- BERK, A. et al. **MODTRAN5: a Reformulated Atmospheric Band Model with Auxiliary Species and Practical Multiple Scattering Options**. *Proc. Of SPIE*, v 5655, 2005.
- BRAGA, C. Z. F.; NOVO, E. M. L. M.; KRUG, T. Considerações sobre a modelagem empírica de variáveis Limnológicas no Reservatório de Barra Bonita utilizando dados Landsat-5 TM. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 1993, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1993, p. 085-095.
- BRAGA, C. Z. F. **Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da concentração de clorofila a, transparência e profundidade da água na Lagoa de Araruama, RJ**. 1998. 220 f. Tese (Doutorado em Geociências) Universidade Federal Fluminense, Niterói, 1998.
- BRASIL. Resolução CONAMA nº 357, de março de 2005. **Conselho nacional do meio ambiente - CONAMA. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências**. Mar. 2005. Disponível em:  
<<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>>. Acesso em: 08 Jan. 2014.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artmed, 2003. 250 p.

CAMARA, G.; Souza, R.C.M.; Freitas, U.M.; Garrido, J. **SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modeling**. Computers and Graphics, 1996. v.20 n.3, p.395-403, 1996.

CARLSON, R. E. A trophic state index for lakes. **Limnology Oceanography**, v . 22. p. 361-80, 1977.

CEEE–GT (Companhia Estadual de Geração de Energia Elétrica – Geração e Transmissão). **Plano de uso e ocupação do solo no entorno do Reservatório da UHE Passo Real**. Porto Alegre: PROFFIL, 2009.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo**: significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas e de amostragem. São Paulo: CETESB, 2009. 44 p. (série relatórios). Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/agua/aguas-superficiais/variaveis.pdf>>. Acesso em: 08 de janeiro. 2014.

CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental). **Determinação de Clorofila a e Feofitina a: método espectrofotométrico**. São Paulo: CETESB, p. 14, 2014.

CICERELLI, R. E.; GALO, M. L. B. T. Sensoriamento remoto multifonte aplicado na detecção do fitoplâncton em águas interiores. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.19, n.3, p.259-265, jan. 2015.

CICERELLI, R. E. **Estudo da ocorrência de cianobactérias no reservatório de Nova Avanhandava – SP por meio da inferência do pigmento ficocianina**. 2013, 174 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Presidente Prudente, 2013.

COAJU – Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Alto Jacuí. **Plano de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Alto Jacuí**: consolidação das informações existentes sobre os recursos hídricos da bacia. Relatório Temático – RT 2, 2009, Passo Fundo, 2009.

COSTA, J. L. R. **Dosagem de carbono nas matérias húmicas totais**: adaptação do método de Anne e Dabin - “Carbono orgânico dissolvido”. Salvador: Instituto de Biologia da Universidade Federal da Bahia, [s/d].

CRÓSTA, A. P. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Campinas, SP: IG/UNICAMP, 1992. 170 p.

DEKKER, A. G. **Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing**. 1993. 222 f. Tese (Hyperspectral remote sensing of water quality). VrijeUniversiteit, Amsterdam, 1993.

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

ENNES, R. **Potencial das imagens hiperespectrais orbitais na detecção de componentes opticamente ativos no reservatório de Itupararanga**. 2008. 125 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2008.

ENNES, R.; GALO, M. L. B. T. Simulação espectral de dados multiespectrais do comportamento espectral de um corpo d'água a partir de dados hiperespectrais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 2010, Recife. **Anais...** Recife: SIMGEO, 2010, p. 001-006.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (ESRI). ArcGIS for the desktop, versão 10.1, USA, 2013.

ESTEVES, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. 3 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011.

Exelis Visual Information Solutions – EXCELIS©. ENVI© - Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes (FLAASH). Boulder, USA. 2014.

FELIX, I. M.; KAZMIERCZAK, M. L.; ESPINDOLA, G. M. RapidEye: a nova geração de satélites de Observação da Terra. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2009, Natal. **Anais...** Natal: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2009. p.7619-7622.

FERREIRA, R. M. P. **Caracterização da ótica e do carbono orgânico dissolvido no reservatório de Três Marias/MG**. 2014. 128 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007, 101 p.

GALO, M. D. L. B. T.; FERREIRA, M. S.; UTSUMI, A. G. G. Utilização da Geoestatística e Redes Neurais Artificiais na inferência espacial de fitoplâncton em estágios iniciais de floração. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2013. p. 6799-6806.

GALVÃO, L. S. Métodos para análise de espectros de reflectância. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. da S. (Orgs.). **Sensoriamento Remoto: Reflectância dos Alvos Naturais**. Brasília: Embrapa Cerrados, 2001. p.225-245.

GITELSON, A. The Peak Near 700 nm on Radiance Spectra of Algae and Water: Relationships of its Magnitude and Position with Chlorophyll Concentration **International Journal of Remote Sensing**, v. 13, n. 17, p. 3367 – 3373, 1992.

GUO, Y.; ZENG, F. Atmospheric correction comparison of Spot-5 image based on model FLAASH and model QUAC. In: INTERNATIONAL SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, 2012, Melbourne. **Anais...** Melbourne: ISPRS, 2012, p. 7-11.

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

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

IBGE. **Mapa de Vegetação 2004**. IBGE: Rio de Janeiro, 2004. Disponível em <[ftp://geofp.ibge.gov.br/mapas\\_tematicos/mapas\\_murais/vegetacao.pdf](ftp://geofp.ibge.gov.br/mapas_tematicos/mapas_murais/vegetacao.pdf)>. Acesso em 12 ag. 2014.

IBGE. **Mapa de Solos do Brasil**. IBGE: Rio de Janeiro, 2001. Disponível em: <[ftp://geofp.ibge.gov.br/mapas\\_tematicos/mapas\\_murais/solos.pdf](ftp://geofp.ibge.gov.br/mapas_tematicos/mapas_murais/solos.pdf)>. Acesso em 12 ago. 2014.

INMET INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. 2015. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/>> Acesso em: 25 de Jan. 2015.

IOCCG. **Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal, and other Optically-Complex, waters**. Sathyendranath, S. (ed.), Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, n. 3, Dartmouth, Canada, 2000. 137 p.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos naturais**. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2009. 598 p.

KIRK, J. T. O. **Ligth and photosynthesis in aquatic ecosystems**. 2ed. Cambridge University Press: New York, 1994. 638 p.

LAMPARELLI, M. C. **Grau de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento**. São Paulo: USP/ Departamento de Ecologia. 2004. 237 f. Tese (Doutorado em Ecossistemas Terrestres e Aquáticos) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

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



LODHI, M. A. et al. The potential for remote sensing of loess soils suspended in surface waters. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 33, n.1, Feb. p.111-117, 1997.

LONDE, L. R. et al. Avanços no estudo do comportamento espectral do fitoplâncton e identificação remota de algas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** Goiânia: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2005. p. 389-396.

LONDE, L. R. et al. Análise quantitativa do comportamento espectral da clorofila-a no reservatório de Salto Grande (SP). In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO, 3., 2006, Aracaju. **Anais...** Aracaju: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2006.

LONDE, L. R. **Comportamento espectral do fitoplâncton de um reservatório brasileiro eutrofizado – Ibitinga (SP)**. 2008. 223 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008.

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

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

MENDONÇA, F., DANNI-OLIVEIRA, I. M. Climatologia: noções básicas e climas do Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 206 p.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. de (org.). **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília:UNB, 2012. 266 p.

METSAMAA, L.; KUTSER, T.; STROMBECK, N. Recognising cyanobacterial blooms based on their optical signature: a modeling study. **Boreal Environment Research**, v. 11, p. 493-506, Nov. 2006.

MORAN M.S.; JACKSON, R.D.; SLATER, P. N.; TEILLET, P. M. Evaluation of Simplified Procedures for Retrieval of Land Surface Reflectance Factors from Satellite Sensor Output. **Remote Sensing of Environment**, v. 41, p. 169-184, 1992.

MPRS - MINISTÉRIO PÚBLICO DO RIO GRANDE DO SUL. **Análise das características da Bacia Hidrográfica do Alto Jacuí, utilizando imagens do satélite CBERS**. (Parecer da Divisão de Assessoramento Técnico nº 2757/2008). Porto Alegre, 2008.

NOVO, E. M. L. de M. Monitoramento de quantidade de qualidade da água e sensoriamento remoto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17., 2007, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2007. p. 1-20.

NOVO, E. M. L. de M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2010. 387 p.

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

OLIVEIRA, D. A. **Áreas de preservação permanente em topo da Chapada e sua adequação à legislação federal**. 2013. 124 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

PEDROSA, P. A cor das águas naturais. In: Instituto do Milênio. **Ciência Hoje**, Rio de Janeiro, v. 43, n. 255, p. 1-6, 2008. Disponível em: <[http://www.institutomilenioestuarios.com.br/pdfs/Produtos/046/46\\_Pedrosa.pdf](http://www.institutomilenioestuarios.com.br/pdfs/Produtos/046/46_Pedrosa.pdf)>. Acesso em: 20 dez. 2013

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, 14., 2009, Natal. **Anais...** Natal: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2009. p.4813-4819.

PEREIRA FILHO, W. *et al.* Relação entre clorofila a com perfil espectral e imagem de satélite no reservatório Passo Real – RS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, 2011. Curitiba. **Anais...** Curitiba: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2011. p.5433-5440.

PEREIRA, A. C. de F. **Desenvolvimento de métodos para inferência de características físicas da água associadas às variações espectrais. Caso de estudo: reservatório de Itupararanga/SP**. 2008. 208 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) –Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, São Paulo, 2008.

RAPIDEYE, AG. **Mosaic™ Product Specifications**. 2013. Disponível em <[http://blackbridge.com/rapideye/upload/RapidEye\\_Mosaic\\_Product\\_Specifications.pdf](http://blackbridge.com/rapideye/upload/RapidEye_Mosaic_Product_Specifications.pdf)>. Acesso em 02 jan.2014.

RAPIDEYE, AG. Satellite Imagery Product Specifications. 2015. Disponível em: <[http://blackbridge.com/rapideye/upload/RE\\_Product\\_Specifications\\_ENG.pdf](http://blackbridge.com/rapideye/upload/RE_Product_Specifications_ENG.pdf)> Acesso em 15 jun. 2015.

REIS, R.S et al. Uso de imagens landsat e dados de campo para avaliar a distribuição espacial de material em suspensão em reservatórios do semi-árido brasileiro. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE

SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2003. p. 2569 – 2577.

ROSS, J. L. S. Ecogeografia do Brasil: subsídios para planejamento ambiental. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 208 p.

RUDORFF, C. de M. **Estudo da composição das águas da Planície Amazônica por meio de dados de refletância do sensor Hyperion/EO-1 e de espectrômetro de campo visando à compreensão da variação temporal dos seus constituintes opticamente ativos.** 2006. 143 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) –Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006.

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**, v. 62, n. 2, p. 195-200, 1996.

SCHOWENGERDT, R. A. **Remote Sensing: models and methods for image processing.** v3. London: Academic Press, 2006.

SENGPIEL, R. E. Using airborne hyperspectral imagery to estimate chlorophyll a and phycocyanin in three central Indiana mesotrophic to eutrophic reservoirs. 2007. 163 f. Thesis Indiana University Indianapolis, Indianapolis, 2007.

SESTINI, M. F. **Variáveis geomorfológicas no estudo de deslizamentos em Caraguatatuba – SP utilizando imagens TM-LANDSAT e SIG.** 1999. 140 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999.

SONG, C, et al. Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to Correct Atmospheric Effects?. **Remote Sensing Environmet.** V.75, p. 230-244, Feb 2001.

TANRÉ, D. et al. Description of a Computer Code to Simulated the Satellite Signal in the Solar Spectrum: The 5S Code. **International Journal of Remote Sensing.** v. 11, n. 4, p. 659-668, June 1990.

THIRUNEELAKANDAN, B. et al. Study on Spectral Reflectance with Surface Water Quality and Chlorophyll - A Concentrations in Muthupet Lagoon of Thiruvarur District, Tamilnadu International. **Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)**, v3, 2014.

TRENTIN, A. B. **Sensoriamento Remoto aplicado ao estudo do comportamento espectral da água no Reservatório Passo Real – RS.** 2009. 98 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

TUNDISI, J. G. **Água no século XXI: enfrentando a escassez.** 2.ed. São Carlos: Rima, 2005. 256 p.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. **Limnologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 631 p.

VERMOTE, E. F.; et al. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v 35, p. 675-686, 1997.

WACHHOLZ, F. et al. Compartimentação aquática espectral dos reservatórios em cascata no alto Jacuí – RS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14, 2009. **Anais...** Natal: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2009, p. 4929-4935.

WACHHOLZ, F. **Compartimentação aquática do reservatório Rodolfo Costa e Silva-RS, a partir de variáveis limnológicas e imagens orbitais**. 2007 . 98 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

WACHHOLZ, F. **Influência das bacias hidrográficas e características espaço-temporal de variáveis limnológicas em reservatórios no Rio Grande do Sul**. 2011. 197 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2011.

WETZEL, R. G. **Limnological analyses**. 3. ed. New York, NY: Springer, 2000.

ZULLO JUNIOR, J. **Correção Atmosférica de Imagens de Satélite e Aplicações**. 1994. 204 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 1994.