

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

Eliege Cassiele Buffon

**CARACTERIZAÇÃO LIMNOLÓGICA E ESPECTRAL DE DOIS
COMPARTIMENTOS AQUÁTICOS DO RESERVATÓRIO ITAIPU**

**Santa Maria, RS
2016**

Eliege Cassiele Buffon

**CARACTERIZAÇÃO LIMNOLÓGICA E ESPECTRAL DE DOIS
COMPARTIMENTOS AQUÁTICOS DO RESERVATÓRIO ITAIPU**

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

Orientador: Prof. Dr. Waterloo Pereira Filho

Santa Maria, RS

2016

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Buffon, Eliege Cassiele
Caracterização limnológica e espectral de dois
compartimentos aquáticos do reservatório Itaipu / Eliege
Cassiele Buffon.- 2016.
99 f.; 30 cm

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, 2016

1. Sensoriamento remoto 2. Limnologia 3.
Compartimento aquático 4. Reservatório Itaipu I. Pereira
Filho, Waterloo II. Título.

Eliege Cassiele Buffon

**CARACTERIZAÇÃO LIMNOLÓGICA E ESPECTRAL DE DOIS
COMPARTIMENTOS AQUÁTICOS DO RESERVATÓRIO ITAIPU**

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

Aprovado em 24 de agosto de 2016:

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

Fábio Marcelo Breunig, Dr. (CESNORS-UFSM)

Tatiana Mora Kuplich, Dr^a. (INPE)

Santa Maria, RS
2016

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Elci e Carmen Maria, aos meus irmãos Cassiano e Elciana, aos meus avós Pedro (*in memorian*) e Amabile, Olívio (*in memorian*) e Pierina, os meus maiores incentivadores.

AGRADECIMENTOS

Há inúmeras instituições e pessoas a agradecer, no entanto, quero particularizar o meu agradecimento:

A Universidade Federal de Santa Maria que oportunizou ambiente de aprendizagem e ofereceu suporte na aquisição de conhecimento além deste espaço.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul - FAPERGS, pela concessão da bolsa de estudo vinculada à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais do Centro Regional Sul – INPE/CRS pela disponibilização do espaço de estudo e pesquisa.

A equipe de profissionais da Unidade de Geoprocessamento da Divisão de Apoio Operacional da Itaipu Binacional pelo auxílio na coleta dos dados, geógrafo Haroldo Virgilio, o Lucas Henrique Garcia e a Raffaella I. A. Pego de Avila. A bióloga Simone Frederigi Benassi da Divisão de Reservatório – Programa de Monitoramento e Avaliação Ambiental da mesma instituição pela análise de laboratório das variáveis limnológicas.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Santa Maria - PPGGEO/UFSM, em particular, aos professores Dr^a. Tatiana Mora Kuplich e Dr. Fábio Marcelo Breunig pela leitura do trabalho. Ao professor Dr. Waterloo Pereira Filho pela orientação e amizade.

Aos colegas e ex-colegas de graduação e pós-graduação dos Laboratórios de Cartografia e Geotecnologias da Universidade Federal Santa Maria (UFSM), em especial, a Makele Rosa de Paula, Edison Antonio Alberti, Felipe Correa dos Santos, Douglas Stefanello Facco e ao Joceli Augusto Gross, este último a minha eterna gratidão, pelo profissional admirável que és. E aquele, que mesmo distante, se fez presente, ao mestrando Gustavo Rodrigues Toniolo.

A minha família pelo apoio, pelos momentos de angústia e alegria compartilhados comigo.

A direção, professores e alunos da Escola Municipal de Ensino Fundamental Professora Maria Margarida Zambon Benini pela compreensão dos momentos em que não me fiz presente.

Aos meus amigos do curso de Geografia e aos amigos da vida, pelo apoio, carinho e estímulo. Não mencionarei nomes, sintam-se todos lembrados.

A vocês sou grata.

“Pouco conhecimento faz com que as
criaturas se sintam orgulhosas.
Muito conhecimento, que se sintam
humildes. É assim que as espigas sem
grãos erguem desdenhosamente a
cabeça para o céu, enquanto que as
cheias a baixam para a terra, sua mãe.”

Leonardo da Vinci

RESUMO

CARACTERIZAÇÃO LIMNOLÓGICA E ESPECTRAL DE DOIS COMPARTIMENTOS AQUÁTICOS DO RESERVATÓRIO ITAIPU

AUTORA: Eliege Cassiele Buffon
ORIENTADOR: Waterloo Pereira Filho

A partir do conhecimento que as variáveis limnológicas dos corpos d'água represados são um reflexo das características físicas e do uso e ocupação da terra do entorno do sistema hídrico, e que imprimem na resposta espectral da água feições típicas da presença dos constituintes opticamente ativos. O estudo possui como objetivo compreender o comportamento das variáveis limnológicas com o uso do sensoriamento remoto nos compartimentos aquáticos Passo Cuê e São Francisco Verdadeiro, localizados no reservatório Itaipu. E como objetivos específicos, (i) analisar comparativamente a distribuição espacial das variáveis limnológicas clorofila *a*, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido, potencial hidrogeniônico (pH), sólidos em suspensão e transparência da água dos compartimentos aquáticos analisados; (ii) verificar a influência dos constituintes opticamente ativos na resposta espectral da água dos dois compartimentos aquáticos; (iii) averiguar se a resposta espectral das bandas 3 e 4 do sensor *Operational Land Imager (OLI)* do satélite *Landsat 8* e a razão das bandas 3/4 possuem relação com a concentração dos constituintes opticamente ativos do compartimento aquático Passo Cuê. As variáveis limnológicas foram espacializadas com o uso do interpolador média ponderada, e o fatiamento das classes, em formato temático. A análise do comportamento das variáveis limnológicas no canal principal se fez por meio da identificação e medição das distâncias dos pontos amostrais localizados na área do canal principal dos dois compartimentos aquáticos. Para os dados espectrais, obtidos *in situ*, aplicou-se as técnicas de análise dos espectros de reflectância suavização da curva espectral e derivada. A cena do satélite *Landsat 8*, da data de 22 de agosto de 2014, que abrange o compartimento aquático Passo Cuê foi obtida por demanda no site da USGS em reflectância com correção geométrica e atmosférica. As variáveis limnológicas apresentaram comportamento mais homogêneo no compartimento aquático Passo Cuê, fato que não ocorre no compartimento aquático São Francisco Verdadeiro, além disto, o comportamento das variáveis limnológicas permite caracterizar as zonas dos compartimentos aquáticos. As variáveis limnológicas com exceção do oxigênio dissolvido possuem a tendência em apresentar na zona lacustre dos compartimentos aquáticos valores de concentração próximos, o que demonstra a uniformização da água dos compartimentos aquáticos com a do restante do reservatório. A utilização da técnica da derivada destacou a presença do pigmento de clorofila *a* na zona fluvial do compartimento aquático São Francisco Verdadeiro. No compartimento aquático Passo Cuê, constatou-se ao utilizar a imagem de satélite *Landsat 8*, que o comportamento homogêneo e as baixas concentrações dos constituintes opticamente ativos pouco influenciam na resposta espectral da água, e que pode ser constatado pelos baixos valores de associações obtidos entre as variáveis limnológicas e espectrais coletas *in situ* no compartimento aquático.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto. Limnologia. Compartimento aquático. Reservatório Itaipu.

ABSTRACT

LIMNOLOGICAL AND SPECTRAL CHARACTERIZATION OF TWO AQUATIC COMPARTMENTS IN THE RESERVOIR OF ITAIPU

AUTHOR: Eliege Cassiele Buffon
ADVISOR: Waterloo Pereira Filho

Inspired by the knowledge that limnological variables in dammed bodies of water are a reflection of physical characteristics and from usage and occupation of the land surrounding the water system, and so establishing on the spectral response of the water typical features of optically active components. This study has as a goal to comprehend the behavior from limnological variables making use of remote sensing in the aquatic compartments at *Passo Cuê* and *São Francisco Verdadeiro*, located both in the Itaipu reservoir. And as specific goals (i) to comparatively analyze the chlorophyll *a* spatial limnological distribution, electrical conductivity, dissolved oxygen, hydrogenionic potential (pH), suspended solids and water transparency in the observed aquatic compartments; (ii) to verify the influence of optically active components in the spectral response of the water in both aquatic compartments; (iii) to examine whether the spectral response of the bands 3 and 4 of the *Operational Land Imager (OLI)* sensor from the *Landsat 8* satellite and the ratio of bands have 3/4 sustains any relation to the optically active components of the aquatic compartment at *Passo Cuê*. The limnological variables are spatialized use of the weighted average interpolation, and afterwards categories are sliced, in thematic format. The analysis of the behavior of the limnological variables on the main channel was done through the identification and measurement of the distance between sample points placed at the area of the main channel in the two aquatic compartments. In order to study the spectral data, collected *in situ*, the techniques of analysis of spectral reflectance, smoothing of the spectral and derived curve were used. The image from the *Landsat 8* satellite, dated to August 22nd, 2014, which covers *Passo Cuê* aquatic compartment is obtained as requested on the USGS site in reflectance with geometric and atmospheric accuracy. The limnological variables present a uniform behavior at *Passo Cuê* aquatic compartment, fact that does not occur at *São Francisco Verdadeiro* aquatic compartment. In addition to that, the behavior of limnological variables allows the characterization of aquatic compartment zones. The limnological variables with exception of the dissolved oxygen, have the tendency to present in the lake zone of the aquatic compartments quite similar concentration values, which shows the standardization of the water from the aquatic compartment to the rest of the reservoir. The usage of the derived technique highlights the presence of the chlorophyll pigment *a* in the fluvial zone of *São Francisco Verdadeiro* aquatic compartment. At *Passo Cuê* aquatic compartment, it was noticed, after using the images from *Landsat 8* satellite that the uniform behavior and the low concentration of optically active components have a small influence on the spectral response of the water, fact that can be understood by the low values of associations obtained between the limnological and spectral variables gathered *in situ* in the aquatic compartment.

Keywords: Remote Sensing. Limnology. Aquatic Compartment. Itaipu Reservoir.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Zonas do compartimento aquático.	18
Figura 2 - Interação da energia eletromagnética com a interface ar-água.	21
Figura 3 - Coeficientes de espalhamento e absorção da água límpida.	22
Figura 4 - Comportamento espectral da água com diferentes concentrações de sólidos em suspensão.	23
Figura 5 – Comportamento espectral da água clara e da água com algas.	25
Figura 6 - Comportamento espectral da água com algas e diferentes concentrações de sólidos em suspensão.	26
Figura 7 – Simulações em laboratório de um corpo d’água com diferentes concentrações de matéria orgânica dissolvida.	28
Figura 8 - Período de atividade dos satélites da série <i>Landsat</i>	31
Figura 9 – Curva de reflectância e primeira derivada.	34
Figura 10 - Localização do reservatório Itaipu.	37
Figura 11 – Área de floresta próxima a uma das margens do compartimento aquático Passo Cuê, reservatório Itaipu.	39
Figura 12 – Fluxograma da dissertação.	40
Figura 13 - Espacialização dos pontos amostrais dos compartimentos aquáticos, reservatório Itaipu.	41
Figura 14 - Aquisição de dados espectrais em nível de campo com o uso do espectrorradiômetro.	48
Figura 15 – Espacialização das concentrações de clorofila <i>a</i> dos compartimentos aquáticos.	53
Figura 16 – Concentração de clorofila <i>a</i> no canal principal dos compartimentos aquáticos Passo Cuê e São Francisco Verdadeiro.	54
Figura 17 – Espacialização da condutividade elétrica dos compartimentos aquáticos.	56
Figura 18- Condutividade elétrica no canal principal dos compartimentos aquáticos Passo Cuê e São Francisco Verdadeiro.	57
Figura 19 – Espacialização da concentração de oxigênio dissolvido dos compartimentos aquáticos.	58
Figura 20- Concentração de oxigênio dissolvido no canal principal dos compartimentos aquáticos Passo Cuê e São Francisco Verdadeiro.	59
Figura 21 – Espacialização do potencial hidrogeniônico (pH) dos compartimentos aquáticos.	61
Figura 22 - Potencial hidrogeniônico (pH) no canal principal dos compartimentos aquáticos Passo Cuê e São Francisco Verdadeiro.	62
Figura 23 – Espacialização das concentrações de sólidos em suspensão dos compartimentos aquáticos.	63
Figura 24 – Concentração de sólidos em suspensão no canal principal dos compartimentos aquáticos Passo Cuê e São Francisco Verdadeiro.	64
Figura 25 – Espacialização da variação da transparência da água dos compartimentos aquáticos.	66
Figura 26 – Variação da transparência da água no canal principal dos compartimentos aquáticos Passo Cuê e São Francisco Verdadeiro.	67
Figura 27 - Espectros de reflectância bidirecional obtidos <i>in situ</i> (A) compartimento aquático Passo Cuê e (B) compartimento aquático São Francisco Verdadeiro, reservatório Itaipu.	68
Figura 28 – (A) Espectros de reflectância bidirecional obtidos <i>in situ</i> , (B) Primeira derivada e (C) Segunda derivada do compartimento aquático Passo Cuê, reservatório Itaipu.	72

Figura 29 – (A) Espectros de reflectância bidirecional obtidos <i>in situ</i> , (B) Primeira derivada e (C) Segunda derivada do compartimento aquático São Francisco Verdadeiro, reservatório Itaipu.	73
Figura 30 – Correlação entre os valores de reflectância e variáveis limnológicas em função do comprimento de onda no compartimento aquático Passo Cuê, reservatório Itaipu.	75
Figura 31 - Correlograma dos valores de reflectância resultantes da primeira derivada e variáveis limnológicas em função do comprimento de onda no compartimento aquático Passo Cuê, reservatório Itaipu.	76
Figura 32 – Compartimentação espectral (A) banda 3, (B) banda 4 e (C) razão da banda 3/4 do compartimento aquático Passo Cuê.	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Bandas de absorção dos pigmentos fotossintetizadores.	25
Tabela 2 - Características do sensor <i>OLI</i> do satélite <i>Landsat 8</i>	31
Tabela 3 - Características do satélite <i>Landsat 8</i>	47
Tabela 4 - Estatística descritiva das variáveis limnológicas.....	51

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice A - Valores de R^2 obtidos por correlação entre as variáveis limnológicas do compartimento aquático Passo Cuê.....	90
Apêndice B - Valores de R^2 obtidos por correlação entre as variáveis limnológicas do compartimento aquático São Francisco Verdadeiro.....	91
Apêndice C - Registros fotográficos dos pontos amostrais do compartimento aquático Passo Cuê, reservatório Itaipu	92
Apêndice D - Registros fotográficos dos pontos amostrais do compartimento aquático São Francisco Verdadeiro, reservatório Itaipu	95

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 ASPECTOS LIMNOLÓGICOS	17
3 PROPRIEDADES ÓPTICAS DA ÁGUA	19
3.1 Comportamento espectral da água	19
3.2 Comportamento espectral dos constituintes opticamente ativos da água	23
3.2.1 Sólidos em suspensão	23
3.2.2 Fitoplâncton	24
3.2.3 Matéria orgânica dissolvida.....	27
4 SENSORIAMENTO REMOTO	29
4.1 Princípios físicos	29
4.2 Sistemas imageadores.....	30
4.2.1 Satélite <i>Landsat 8</i>	30
4.2.2 Correção dos efeitos atmosféricos	32
4.3 Sistemas não-imageadores	32
4.4 Técnicas de análise dos espectros de reflectância	33
4.4.1 Suavização da curva espectral	33
4.4.2 Análise derivativa	33
5 METODOLOGIA.....	36
5.1 Caracterização da área de estudo	36
5.2 Procedimentos metodológicos.....	39
5.3 Variáveis limnológicas.....	42
5.3.1 Clorofila <i>a</i>	42
5.3.2 Condutividade elétrica.....	43
5.3.3 Oxigênio dissolvido.....	43
5.3.4 Potencial hidrogeniônico (pH).....	44
5.3.5 Sólidos em suspensão	44
5.3.6 Transparência da água	45
5.4 Espacialização e análise do comportamento das variáveis limnológicas no canal principal.....	45
5.5 Dados espectrais.....	46
5.5.1 Sistema imageador.....	46
5.5.2 Sistema não-imageador	47
5.6 Análise estatística dos dados espectrais e limnológicos	49
6 RESULTADOS	51
6.1 Espacialização e análise do comportamento das variáveis limnológicas no canal principal.....	51
6.1.1 Clorofila <i>a</i>	52
6.1.2 Condutividade elétrica.....	55
6.1.3 Oxigênio dissolvido.....	57
6.1.4 Potencial hidrogeniônico (pH).....	60
6.1.5 Sólidos em suspensão	62
6.1.6 Transparência da água	64
6.2 Análise dos espectros de reflectância bidirecional dos compartimentos aquáticos....	67
6.2.1 Primeira e segunda derivadas	71
6.3 Compartimentação espectral do compartimento aquático Passo Cuê	77
7 CONSIDERAÇÕES	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
APÊNDICES	89

Apêndice A - Valores de R^2 obtidos por correlação entre as variáveis limnológicas do compartimento aquático Passo Cuê	90
Apêndice B - Valores de R^2 obtidos por correlação entre as variáveis limnológicas do compartimento aquático São Francisco Verdadeiro	91
Apêndice C - Registros fotográficos dos pontos amostrais do compartimento aquático Passo Cuê, reservatório Itaipu	92
Apêndice D - Registros fotográficos dos pontos amostrais do compartimento aquático São Francisco Verdadeiro, reservatório Itaipu	95

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos tem se verificado a falta de consciência da sociedade perante a importância que os recursos hídricos possuem na sustentação da vida, e que pode ser constatado, pelos inúmeros rios, lagos, lagoas e reservatórios que se encontram em grave estágio de poluição no território nacional. A introdução de dejetos, fertilizantes químicos, agrotóxicos entre outros agravantes tem modificado drasticamente as características dos ecossistemas aquáticos. Conforme Esteves (1998) a contaminação da água traz sérios prejuízos às populações, a introdução de substâncias tóxicas nas águas subterrâneas e o fenômeno de eutrofização artificial, reduz sensivelmente a qualidade da água e produz alterações no metabolismo do ecossistema.

Para Tundisi (1996) o uso e ocupação da terra do entorno da bacia hidrográfica abrangida por um reservatório, além dos impactos gerados pelas atividades antropogênicas são possíveis de serem detectadas nos corpos d'água. Neste mesmo sentido, Pereira Filho, Strassburger e Barbosa (2003) ao estudar o comportamento espectral de algumas variáveis limnológicas por sensoriamento remoto no reservatório de Itá, RS, afirmam que as condições físicas, o uso da terra existentes na bacia hidrográfica, além da idade de construção do reservatório imprimem características físicas e limnológicas ao corpo d'água, como também, a existência de compartimentos aquáticos com comportamento limnológico e espectral distintos.

Conforme Esteves (1998), a importância que os estudos de monitoramento limnológico possuem no país deve-se ao crescente represamento de rios e da criação de lagos artificiais para a produção de energia, o que tem transformado ecossistemas aquáticos lóticos¹ em ecossistemas aquáticos lênticos². De acordo com Pereira Filho *et al.* (2011, p. 5433) “a alteração de um rio para um lago, devido à construção de um reservatório, modifica as condições hidrodinâmicas da água”.

Em função da importância dos ecossistemas aquáticos continentais, no que diz respeito à sua ecologia, seus usos econômicos e no que se refere à sociedade, o monitoramento da qualidade da água é crucial (NISHIMURA, MOSCHINI-CARLOS e POMPÊO, 2015). Um dos aspectos mais relevantes do monitoramento das variáveis limnológicas é a possibilidade de prognosticar tendências dos ambientes aquáticos para o futuro (TUNDISI e TUNDISI, 2008). Conforme Nishimura, Moschini-Carlos e Pompêo (2015) estudos ligados aos ecossistemas

¹ O ambiente lótico conforme a Resolução 357/2005 do CONAMA (BRASIL, 2015) refere-se, como sendo o ambiente relativo a águas continentais moventes.

² O ambiente lêntico conforme a Resolução 357/2005 do CONAMA (BRASIL, 2005) refere-se à água parada, com movimento lento ou estagnado.

aquáticos são de extrema importância tanto no que diz respeito a pesquisa básica quanto aplicado ao monitoramento dos corpos d'água.

De acordo com Benassi, Maciel e Benassi (2010) a usina hidrelétrica Itaipu Binacional possui um departamento responsável pelo Programa de Monitoramento e Avaliação Ambiental, que desde o ano de 1977 monitora o comportamento de variáveis limnológicas das estações amostrais distribuídas pelo reservatório. O acompanhamento das variáveis iniciou cinco anos antes do preenchimento do reservatório, e as estações amostrais de monitoramento são distribuídas de forma a contemplar a região lótica, lêntica e a região de transição entre os dois ambientes. Com a formação do reservatório, a responsabilidade pelo monitoramento passou para a Superintendência dos Recursos Hídricos e Meio Ambiente do Estado do Paraná (SUREHMA), atualmente o Instituto Ambiental do Paraná (IAP), o que demonstra a preocupação dos órgãos públicos locais no monitoramento das variáveis limnológicas do reservatório Itaipu.

Entre os fatores que interferem na qualidade da água da bacia hidrográfica do Paraná e, por conseguinte, na qualidade da água do reservatório Itaipu que recebe as águas da bacia hidrográfica, pode-se citar, o crescimento dos grandes centros urbanos, visto que 65% dos dejetos domésticos captados pela rede coletora brasileira não são tratados (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2014). A poluição orgânica e inorgânica é decorrente também do despejo de efluentes industriais, resíduos provenientes da criação de animais, a utilização de insumos agrícolas como agrotóxicos e/ou fertilizantes químicos e a eliminação da mata ciliar.

A capacidade de geração de energia instalada no Brasil em agosto de 2015 é de 138.668 Megawatt (Mw), sendo 90.353 Mw provenientes de usinas hidrelétricas, o que representa 65,2% da matriz energética (BRASIL, 2015). Neste sentido, a matriz energética brasileira é dependente de inúmeras usinas hidrelétricas instaladas no território nacional, o que acaba por alterar o ambiente natural dos rios, como também, as áreas alagadas pelos reservatórios. Para compreender a importância que a usina hidrelétrica Itaipu possui no cenário nacional, esta é responsável por 17% da energia consumida no território brasileiro, além de fornecer 75% da energia consumida no Paraguai (ITAIPU BINACIONAL, 2014).

O sensoriamento remoto aplicado ao estudo dos recursos naturais torna-se um importante instrumento de monitoramento, pois permite a aquisição de dados sem o contato físico com o objeto. No contexto do monitoramento dos corpos d'água, possibilita a identificação dos constituintes opticamente ativos presentes nos ambientes aquáticos. A identificação dos constituintes opticamente ativos, porém, exige do usuário de sensoriamento

remoto o conhecimento do comportamento espectral da água, uma vez que, os sistemas aquáticos continentais possuem características óticas complexas e normalmente apresentam combinações de diversos componentes opticamente ativos.

Vários estudos se dedicaram à análise de variáveis limnológicas em reservatórios de água com o uso do sensoriamento remoto como os de Pereira Filho, Strassburger e Barbosa (2003); Wachholz (2007); Ennes (2008); Ennes, Galo e Tachibana (2009); Trentin (2009); Corazza (2010); Santos (2012) entre outros autores. Como já mencionado, o monitoramento das variáveis limnológicas no reservatório Itaipu iniciou anteriormente ao preenchimento do reservatório, o que gerou uma base de dados limnológicos bastante completa. No entanto, no que se refere ao uso do sensoriamento remoto na análise das variáveis limnológicas no reservatório Itaipu este é bastante recente. Neste sentido, este estudo tem como propósito contribuir com as discussões referentes ao uso do sensoriamento remoto no reservatório Itaipu.

Um projeto interinstitucional da Itaipu Binacional em parceria com o Laboratório de Geotecnologias da Universidade Federal de Santa Maria começou a vigorar no final de 2015, com o objetivo de compreender o comportamento das variáveis limnológicas com o uso do sensoriamento remoto no compartimento aquático São Francisco Verdadeiro, em virtude de interesse da Itaipu. Anterior a definição da área piloto do projeto foi realizado um trabalho de campo para coleta de dados limnológicos e espectrais no compartimento aquático Passo Cuê, e que possibilitou o desenvolvimento da pesquisa.

O estudo possui como objetivo compreender o comportamento das variáveis limnológicas com o uso do sensoriamento remoto nos compartimentos aquáticos Passo Cuê e São Francisco Verdadeiro, localizados no reservatório Itaipu, verificando a relação entre os dados limnológicos e os espectrais. O estudo possui como objetivos específicos, (i) analisar comparativamente a distribuição espacial das variáveis limnológicas clorofila *a*, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido, potencial hidrogeniônico (pH), sólidos em suspensão e transparência da água dos compartimentos aquáticos analisados em períodos distintos; (ii) verificar a influência dos constituintes opticamente ativos na resposta espectral da água dos dois compartimentos aquáticos; (iii) averiguar se a resposta espectral das bandas 3 e 4 do sensor *Operational Land Imager (OLI)* do satélite *Landsat 8*, além da razão das bandas 3/4 possuem relação com a concentração dos constituintes opticamente ativos do compartimento aquático Passo Cuê.

2 ASPECTOS LIMNOLÓGICOS

A palavra limnologia (*Limné* significa lago em grego) compreende o estudo das massas de água continentais, independente de suas origens, dimensões e concentrações salinas (ESTEVES, 1998). Para este autor, os primeiros estudos limnológicos, na fase de consolidação desta ciência, eram predominantemente descritivos e tinham como objetivo compreender a relação de causa e efeito dos fenômenos observados. Conforme Thornton (1990); Tundisi e Tundisi (2008) a limnologia que a princípio vinculava-se unicamente ao estudo dos lagos, abrange atualmente o estudo dos rios, estuários, represas, áreas alagadas, pântanos, lagos de água doce e lagos salino no interior dos continentes, além das interações físicas, químicas e biológicas existentes nos ambientes.

A limnologia desde o surgimento como ciência, vem distanciando-se cada vez mais da abordagem meramente descritiva e aproximando-se da interpretação dos processos ecológicos, modelagem matemática, predição e quantificação (TUNDISI e TUNDISI, 2008). Tundisi e Tundisi (2008) destacam a importância de compreender os sistemas aquáticos não de forma isolada, e sim como parte de um sistema mais complexo, na qual a interação dos processos e mecanismos químicos que ocorrem nas águas interiores revelam características geoquímicas dos solos do entorno da bacia hidrográfica. Neste sentido, os avanços científicos ligados a limnologia possibilitam compreender o importante papel que as atividades humanas do entorno do corpo d'água, ou seja, as áreas abrangidas pela bacia hidrográfica possuem para os sistemas aquáticos continentais.

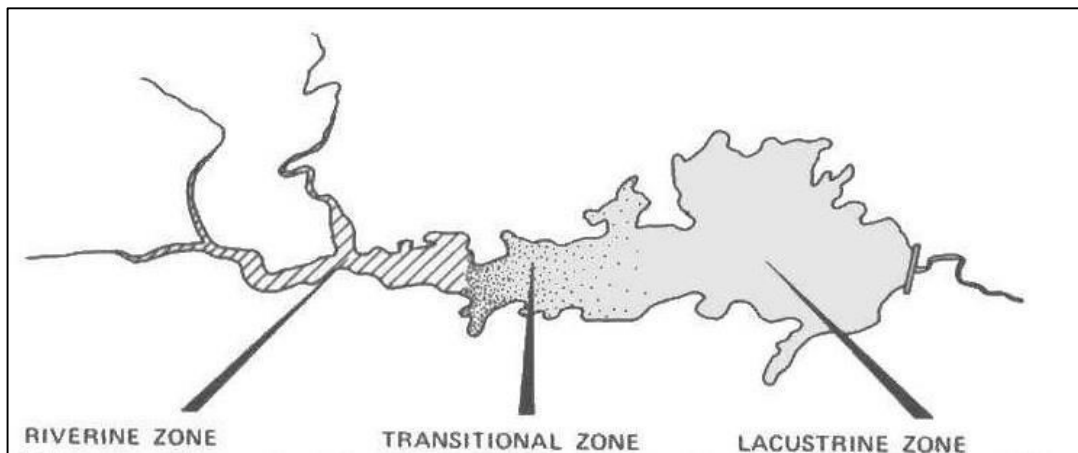
Conforme Pires, Santos e Del Prette (2008) há muito tempo os hidrólogos têm utilizado a bacia hidrográfica como unidade de planejamento e gerenciamento ambiental, e reconhecido relações entre as características físicas de uma bacia hidrográfica e a quantidade de água que chega aos corpos hídricos. Neste sentido, os autores acima citados apontam que as implicações sobre o uso dos recursos hídricos são reflexo dos fatores naturais, econômicos, sociais e políticos, sendo o recurso hídrico a convergência deste complexo sistema ambiental.

A compreensão da dinâmica dos corpos d'água represados artificialmente difere da dinâmica dos demais corpos d'água naturais, como é o caso dos lagos, em decorrência dos primeiros serem de formação mais recente e possuírem um fluxo contínuo de entrada de material o que influencia na variação da distribuição espacial das variáveis limnológicas (TUNDISI e TUNDISI, 2008). O fluxo contínuo de água em direção a barragem dos reservatórios influencia na formação de gradientes de variação horizontal e vertical, o primeiro

deve-se as variações que ocorrem na superfície dos corpos d'água, enquanto o último, refere-se as variações da concentração das variáveis limnológicas em profundidade, ou seja, na coluna d'água (POMPÊO, 2004).

Em relação ao fluxo de gradientes em direção a barragem Thorton (1990) define três zonas com características físicas, químicas e biológicas distintas (Figura 1). A zona fluvial, também denominada de rio, é geralmente estreita, as partículas encontram-se misturadas e a penetração da luz é reduzida o que dificulta o crescimento dos produtores primários; a zona de transição, como o nome se refere, localiza-se entre as zonas fluvial e lacustre, apresenta em relação a zona fluvial aumento da sedimentação e a maior penetração da luz; e por fim, a zona lacustre que possui características semelhantes ao funcionamento dos lagos, ou seja, baixa sedimentação das partículas inorgânicas e penetração da luz o que favorece a produção primária (POMPÊO, 2004).

Figura 1 – Zonas do compartimento aquático.



Fonte: Pompêo (2004) adaptado de Thorton (1990).

O compartimento aquático é definido como uma área específica que envolve condições ambientais semelhantes (PEREIRA FILHO e NOVO, 2002). Neste sentido, o termo compartimento aquático é definido para referir-se a área de abrangência aquática do braço Passo Cuê no reservatório Itaipu, sendo chamado de compartimento aquático Passo Cuê, e o braço São Francisco Verdadeiro no reservatório Itaipu, denominado de compartimento aquático São Francisco Verdadeiro. Além do uso da terminologia compartimento aquático, os termos que fazem referência as zonas fluvial, transição e lacustre, também são adotados, e referem-se às áreas com características específicas.

3 PROPRIEDADES ÓPTICAS DA ÁGUA

3.1 Comportamento espectral da água

A radiação eletromagnética que possui contato com a superfície da água é resultante da incidência direta da radiação eletromagnética na água e da radiação difusa da atmosfera, sendo esta última, proveniente da energia que fora absorvida ou refletida pelas partículas de poeira, gases e vapor de água existentes na atmosfera (ESTEVEZ, 1998). No sentido de compreender o quão complexo é a interação da energia eletromagnética e o corpo hídrico em relação aos demais alvos, Ferreira e Pereira Filho (2009) afirmam que a reflectância da energia eletromagnética de alvos terrestres é modelada como um evento bidimensional de espalhamento simples, enquanto, a modelagem da interação da energia eletromagnética em ambiente aquático é muito mais complexa. Esta complexidade deve-se ao fato da água ser um solvente universal, o que possibilita que uma grande variedade de materiais podem se encontrar associados (CORAZZA, 2009).

Conforme Novo (2010) a assinatura espectral da água no estado líquido obtida por sensorimento remoto quando comparada com os demais alvos apresenta comportamento espectral caracterizado pela baixa reflectância nos comprimentos de onda entre 380 e 700 nanômetros (nm). Desta forma, é neste intervalo do espectro eletromagnético que os componentes opticamente ativos presentes nos corpos d'água imprimem na assinatura espectral da água os efeitos de espalhamento e absorção decorrentes da interação com a radiação eletromagnética que atravessa o corpo hídrico. Variações na concentração dos constituintes opticamente ativos na água resultam em variações nas propriedades óticas inerentes de absorção e espalhamento (TRENTIN, 2009).

Conforme Fonseca e Fernandes (2004) a água apresenta uma curva de reflectância espectral característica, devido ao fato de absorver totalmente a radiação eletromagnética nos comprimentos de onda acima do visível e refletir praticamente nenhuma radiação nos comprimentos de onda do infravermelho. Parte da radiação eletromagnética que penetra o corpo d'água é absorvida, e transformada em outras formas de energia o que permite a realização da fotossíntese e o aquecimento da água. Por outro lado, a presença de partículas dissolvidas ou suspensas na água influencia para que parte da radiação eletromagnética ao penetrar o corpo d'água sofra o fenômeno de espalhamento, também conhecido como dispersão.

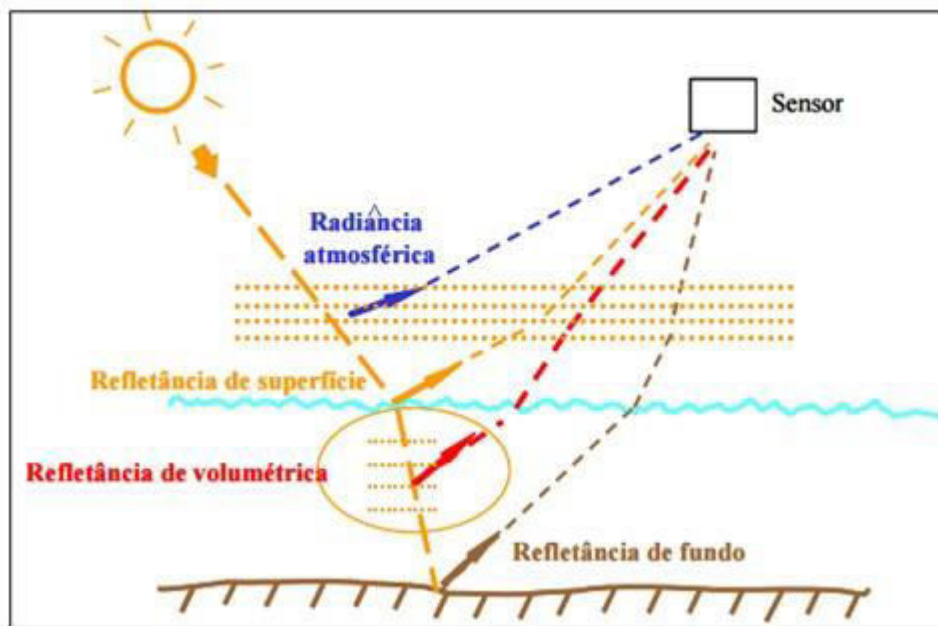
A radiação eletromagnética ao ter contato com o corpo hídrico sofre o efeito chamado de refração (ESTEVEZ, 1998; JENSEN, 2009). A mudança na direção da radiação eletromagnética ocorre devido ao meio aquático possuir diferente densidade em relação a atmosfera, e a velocidade da radiação eletromagnética ser diferente (JENSEN, 2009). O desvio da radiação eletromagnética no meio líquido pode ser calculada a partir da lei de Snell, o que torna previsível o percurso da radiação eletromagnética ao entrar em contato com outro meio de diferente densidade, como é o caso da interação ar-água.

Um aspecto importante do sensoriamento remoto da água é compreender a radiação eletromagnética desde a sua entrada na atmosfera, a interface ar-água, a interação com a coluna d'água e o retorno ao sensor. Conforme Jensen (2009) a radiação proveniente de um corpo d'água registrada por um sensor a bordo de um satélite é procedente de quatro fontes (i) radiação atmosférica - L_p , (ii) reflectância de superfície - L_s , (iii) reflectância volumétrica - L_v e (iv) reflectância de fundo - L_b , sendo, a soma das quatro fontes denominada de radiância total - L_t , (Equação 1).

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

Jensen (2009) descreve as quatro tipos de interações da seguinte forma, a L_p é a porção da radiância registrada por um sensor remoto resultante da radiação solar direta e indireta que não atinge a superfície da água e consistiu-se no ruído atmosférico adicionado ao valor de reflectância dos pixels das imagens quando estas não são corrigidas. A L_s consiste na radiância da radiação solar e atmosférica que penetra cerca de 1 milímetro da superfície da água, sendo essencialmente refletida pela superfície da água. A L_v é a radiância da radiação solar e atmosférica que interage com a água e os constituintes opticamente ativos sem ter contato com o fundo do corpo d'água, das quatro interações é sem dúvida a de maior interesse dos pesquisadores devido as feições de absorção e espalhamento que os constituintes opticamente ativos imprimem na assinatura espectral da água. A L_b é a porção da radiância que penetra a interface ar-água em direção ao fundo do corpo d'água, quando a radiância atinge o fundo volta ao sensor (Figura 2).

Figura 2 - Interação da energia eletromagnética com a interface ar-água.



Fonte: Barbosa (2005).

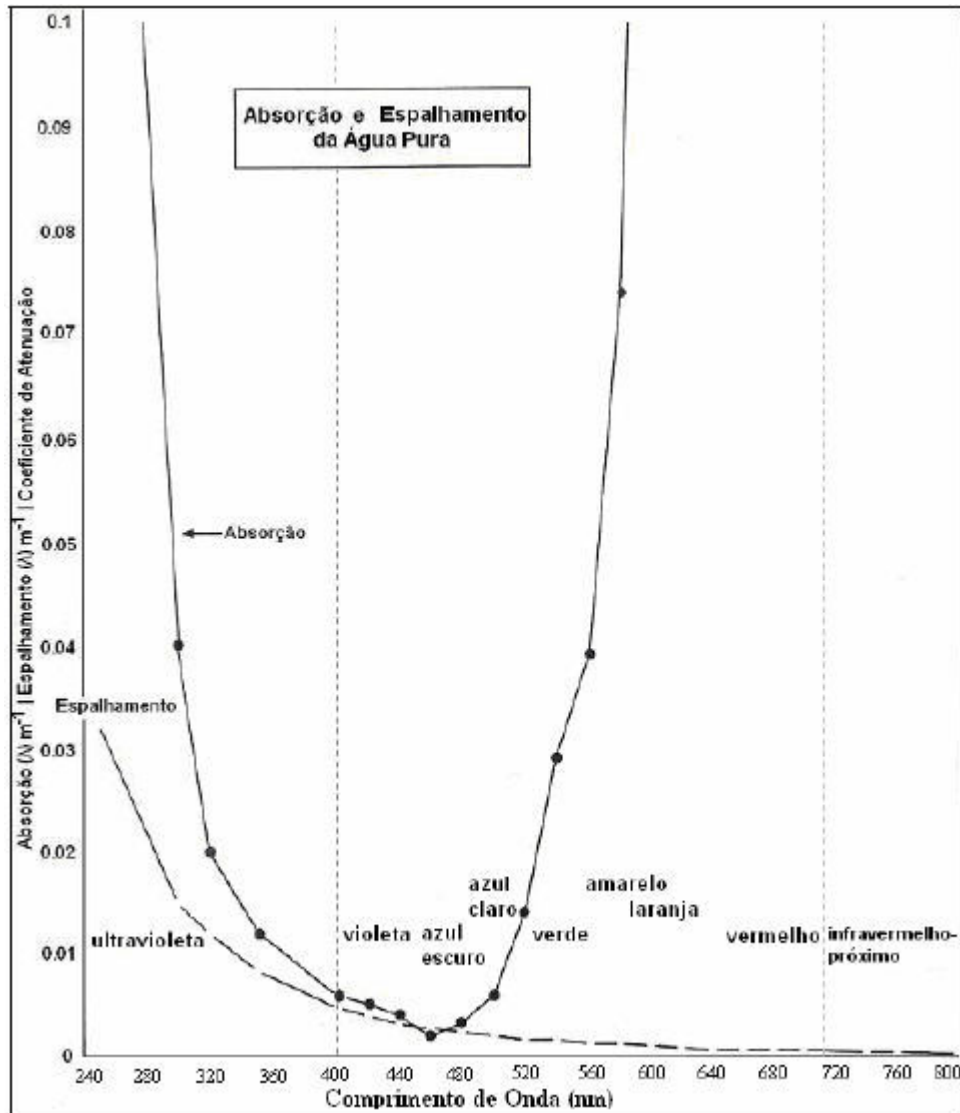
No ambiente aquático a presença de substâncias dissolvidas influenciam na resposta espectral da água. Neste sentido, o comportamento espectral da água límpida diferencia-se da água turbida, grande quantidade do fluxo de energia incidente sobre a água límpida não é refletido como ocorre com o solo e a vegetação, e sim, absorvido ou transmitido (PEREIRA FILHO, 2009). Ao isolar os materiais orgânicos e inorgânicos existentes na água turva, e ao analisar o comportamento espectral da água límpida, é possível compreender as feições de absorção e espalhamento da água sem a presença dos materiais orgânicos e inorgânicos nos comprimentos de onda do espectro eletromagnético (Figura 3).

Ao analisar a figura 3 é possível observar que o coeficiente de absorção da água límpida é elevado para a região do ultravioleta, seguido pelo decréscimo nos valores de absorção, o valor de absorção mínimo ocorre no intervalo espectral de 400 a 500 nm na região do azul. A medida que a curva de absorção afasta-se da região do azul e aproxima-se dos comprimentos de onda do infravermelho é notável o acréscimo nos valores de absorção da água pura. Com isso, é possível afirmar que a região do azul corresponde a região de maior reflectância da água pura, uma vez que os demais comprimentos de onda do espectro eletromagnético possuem elevados valores de absorção da radiação eletromagnética.

Em relação ao coeficiente de espalhamento da água pura, o mesmo é elevado na região do ultravioleta, a medida que afasta-se dos menores comprimentos de onda e aproxima-se de

comprimentos de onda maiores ocorre o decréscimo gradual do coeficiente de espalhamento. Em virtude, do espalhamento da água ser maior na região do azul comparado com as regiões do verde e vermelho, a cor da água é azulada quando em estado puro.

Figura 3 - Coeficientes de espalhamento e absorção da água límpida.



Fonte: Adaptado de Dekker (1993).

Conforme Novo (2010) os corpos d'água com baixa concentração de substâncias e profundos são geralmente escuros, em virtude da luz se atenuar em profundidade e não ocorrer retorno de sinal ao observador. Neste sentido, a mesma autora afirma que as substâncias que interferem no comportamento espectral da água são denominados de constituintes opticamente ativos, na qual fazem parte, os organismos vivos (clorofila *a*), as partículas orgânicas e

inorgânicas em suspensão (sólidos em suspensão) e as substâncias orgânicas dissolvidas (matéria orgânica dissolvida).

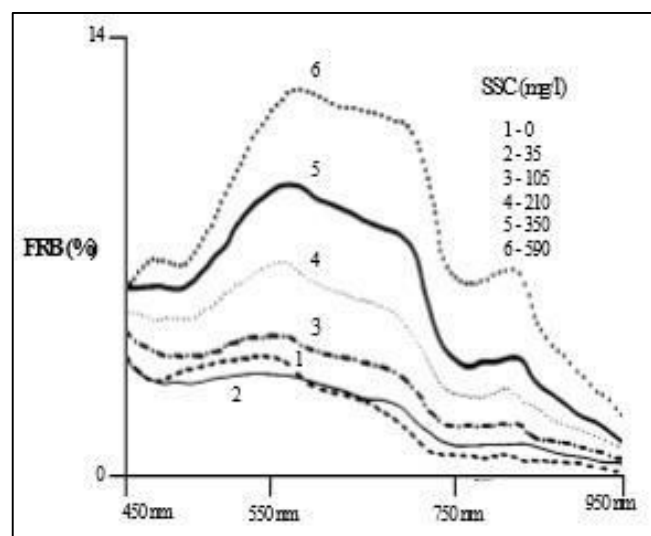
3.2 Comportamento espectral dos constituintes opticamente ativos da água

3.2.1 Sólidos em suspensão

As partículas de sólidos em suspensão presentes nos corpos d'água interiores tem origem dos processos erosivos em áreas agrícolas, intemperismo em áreas com relevo acentuado, além da influência de outros processos naturais ou decorrentes da ação antrópica. Jensen (2009) afirma que o comportamento espectral da água com partículas de sólidos em suspensão é fortemente influenciado pelas características dos materiais suspensos, além da quantidade de material. A maior concentração de sólidos em suspensão na água influencia para um maior coeficiente de espalhamento da água, e como consequência no aumento da reflectância da água (NOVO, 2010).

A Figura 4 demonstra o comportamento espectral da água com diferentes concentrações de sólidos em suspensão, é possível verificar o deslocamento do máximo valor de reflectância da água para comprimentos de onda maiores a medida que ocorre o aumento da concentração de sólidos em suspensão na água.

Figura 4 - Comportamento espectral da água com diferentes concentrações de sólidos em suspensão.



Fonte: Novo (2001) adaptado de Chen *et al.* (1991).

A presença de sólidos em suspensão na água reflete na ampliação da região espectral de máxima reflectância da água, ou seja, nos comprimentos de onda de 500 a 700 nm e no aumento expressivo da reflectância na região do infravermelho (NOVO, 2001). Kirk (2000) ao estudar um reservatório na região do Mississippi identificou o maior valor de correlação da reflectância e dos sólidos em suspensão no intervalo espectral de 700 a 800 nm.

O comportamento espectral do sólido em suspensão varia de acordo com as propriedades de absorção determinada pela natureza química do material (KIRK, 2000; JENSEN, 2009). Neste sentido, o tipo do material sólido em suspensão é um fator que deve ser considerado, uma vez que os materiais em suspensão possuem comportamento espectral bastante característico.

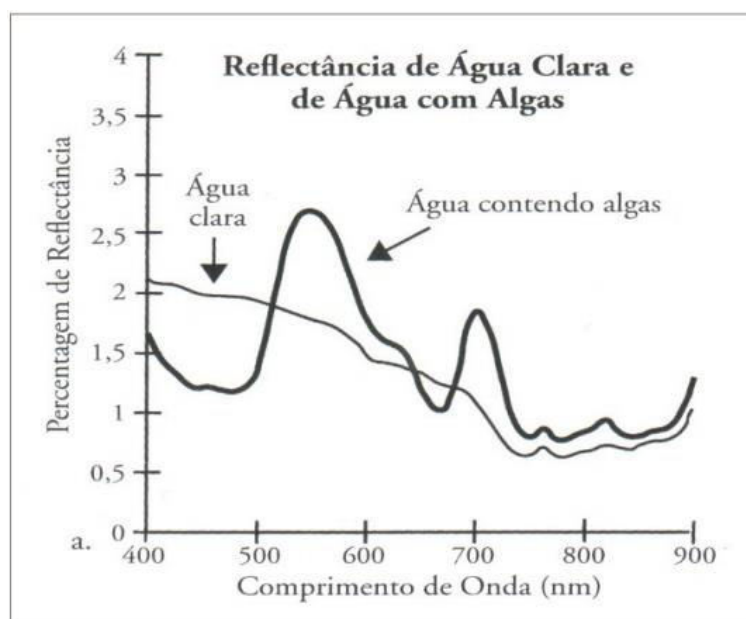
3.2.2 Fitoplâncton

Outro fator que contribui na resposta espectral da água é a presença de clorofila *a*. A concentração de clorofila *a* na água é um indicativo da maior ou menor presença de biomassa fitoplanctônica (NOVO, 2010). Para esta autora, altas concentrações de fitoplâncton juntamente com a presença de florações de algas em superfície influencia para que o comportamento espectral da água assemelhe-se ao da vegetação terrestre.

A assinatura espectral da água com algas apresenta feições espectrais típicas (Figura 5). A baixa reflectância da água nos comprimentos de onda entre 400 e 500 nm, é devido a maior absorção na banda do azul, com pico de absorção em 438 nm, feição espectral característica da presença de clorofila *a*. A máxima reflectância na região do verde deve-se a menor absorção dos pigmentos de clorofila neste intervalo espectral, o que significa que corpos d'água com altas concentrações de pigmentos fotossintéticos possuem coloração esverdeada (GITELSON, 1992; NOVO, 2001).

A discreta feição de absorção observada em torno do comprimento de onda de 650 nm deve-se a presença de outros pigmentos fotossintéticos (GITELSON, 1992). O pigmento de clorofila *a* possui uma segunda feição típica de absorção no comprimento de onda de 675 nm seguido por um pico de reflectância entorno de 700 nm, e que se deve a concentração de clorofila no ambiente aquático (GITELSON, 1992; JENSEN, 2000).

Figura 5 – Comportamento espectral da água clara e da água com algas.



Fonte: Jensen (2009).

A Tabela 1 indica as principais bandas de absorção dos pigmentos fotossintetizadores. Ao analisar os comprimentos de onda de absorção dos pigmentos observa-se que as bandas de absorção abrangem as regiões do azul e do vermelho, exceto, para alguns comprimentos de onda de absorção do pigmento biliprotéinas (NOVO, 2001).

Tabela 1 - Bandas de absorção dos pigmentos fotossintetizadores.

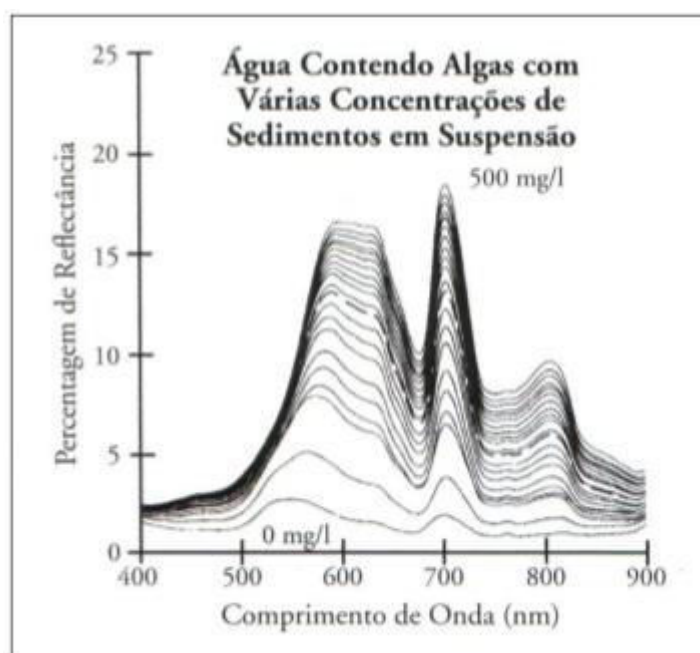
Pigmentos	Bandas de absorção (nm)
Clorofila a	435/675
Clorofila b	480/650
Clorofila c	440/645
Carotenóide	425/450/500
Biliproteínas	498/553/555/562/568/620/650/670

Fonte: Novo (2001).

O comportamento espectral de corpos d'água com pigmentos de clorofila resulta na maior absorção da energia eletromagnética nos comprimentos de onda do azul e vermelho, e na maior reflectância na região do verde. A presença de outros constituintes opticamente ativos

juntamente com a clorofila, como é o caso dos sólidos em suspensão, altera o comportamento espectral da água. No intuito de compreender o comportamento espectral da água na presença de ambos constituintes opticamente ativos foi realizado um experimento descrito por Jensen (2009) onde diferentes concentrações de sólidos em suspensão são adicionados em um ambiente com quantidade de clorofila fixa (Figura 6).

Figura 6 - Comportamento espectral da água com algas e diferentes concentrações de sólidos em suspensão.



Fonte: Jensen (2009).

O gradual aumento da concentração de sólidos em suspensão influencia no deslocamento do pico de reflectância próximo a 550 nm para comprimentos de onda maiores, e o desaparecimento da discreta feição de absorção entorno de 650 nm, em virtude da ampliação da região de reflectância entre 500 a 700 nm (JENSEN, 2009). O aumento da reflectância da água com o incremento dos sólidos em suspensão é notório em todos os comprimentos de onda do espectro eletromagnético. Contudo, a feição típica de absorção da clorofila *a* entorno de 675 nm é mantida, como também o pico de reflectância em 700 nm.

Lobo *et al.* (2009) afirmam que a resposta espectral da água advinda dos dados de fitoplâncton sofre interferência de outros componentes opticamente ativos existentes nos corpos da água, como o carbono orgânico dissolvido e os sólidos em suspensão, o que dificulta a discriminação e o mapeamento isolado do componente opticamente ativo.

Atualmente, muitos estudos referentes a comunidade fitoplanctônica estão voltados a utilização destes como discriminadores da qualidade ambiental (NISHIMURA, MOSCHINI-CARLOS e POMPEO, 2015). Bellinger e Sigee (2015) afirmam que as características da comunidade fitoplanctônica em virtude da presença de determinadas espécies ou comunidades, além do tamanho dos indivíduos podem ser utilizados como bioindicador, ou seja, marcadores de alerta precoce de mudança do estado trófico da água e que reflete a “saúde” do ambiente aquático. Além disto, aspectos como concentração, tamanho, forma, estágio de desenvolvimento e a espécie da alga influenciam na resposta espectral dos corpos d’água com algas (ESTEVES, 1998).

Em reservatórios, os fatores envolvidos na estruturação da comunidade fitoplanctônica resultam da relação entre as condições químicas (nutrientes, principalmente fósforo, que regulam a produção primária fitoplanctônica), físicas (temperatura e luminosidade) e biológicas (composição e abundância do zooplâncton) que são reguladas pelas alterações hidráulicas e resultam em flutuações do nível da água (NISHIMURA, MOSCHINI-CARLOS e POMPEO, 2015, p. 3).

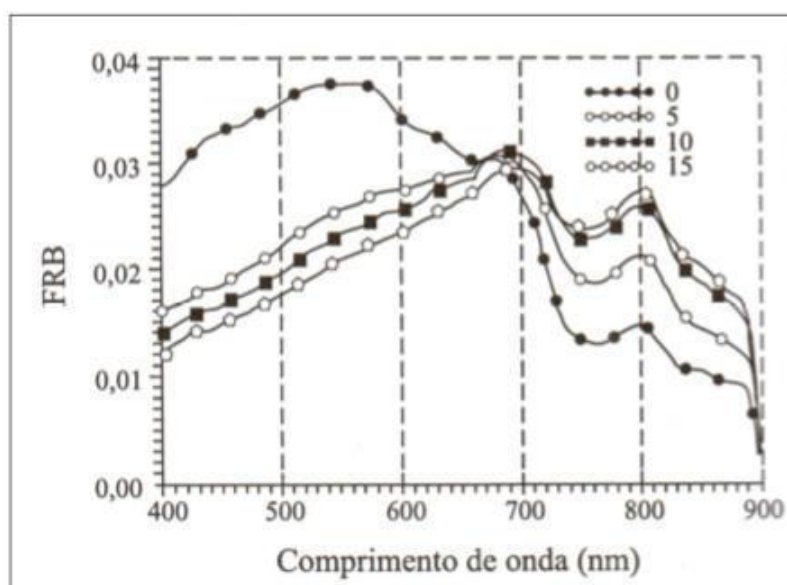
As características físicas e químicas da água revelam condições de determinado ponto no tempo, enquanto, as biológicas refletem um período de tempo mais prolongado por resultarem de estágios não mais existentes no momento da amostragem, o que torna o conhecimento desta característica imprescindível ao monitoramento dos corpos d’água (LOBO, CALLEGARO e BENDER, 2002). Além disto, algumas espécies de fitoplâncton como é o caso das diatomáceas são utilizadas na avaliação da qualidade da água do passado (BELLINGER e SIGEE, 2015). Esse grupo de algas em específico possui parte do seu corpo constituído por sílica o que permite que o mesmo não se decomponha com o tempo, e seja utilizado na reconstrução qualitativa dos corpos d’água.

3.2.3 Matéria orgânica dissolvida

A introdução de matéria orgânica dissolvida na água deve-se primeiramente a luz solar penetrar a coluna d’ água, região conhecida como eufótica. O fitoplâncton responsável pela produção primária consome os nutrientes e converte por meio da fotossíntese em matéria orgânica, por sua vez, o zooplâncton consome o fitoplâncton e produz uma quantidade maior de matéria orgânica que é decomposta pelo bacterioplâncton e convertida em matéria orgânica dissolvida. Desta forma, quanto mais produtivo for o fitoplâncton maior será a concentração de matéria orgânica dissolvida na água (JENSEN, 2009).

A matéria orgânica dissolvida na água produz um comportamento espectral diferenciado nos primeiros comprimentos de onda do visível. Novo (2010) ao mencionar sobre a presença de matéria orgânica em corpos d'água revela que o aumento da concentração do componente opticamente ativo influencia na redução da reflectância no comprimento de onda do azul, e no deslocamento dos valores máximos de reflectância para a região do verde e vermelho (Figura 7).

Figura 7 – Simulações em laboratório de um corpo d'água com diferentes concentrações de matéria orgânica dissolvida.



Fonte: Mantovani e Novo (1996).

Conforme Rudorff *et al.* (2007) a matéria orgânica dissolvida absorve a radiação eletromagnética no comprimento de onda do azul e gera espalhamento por fluorescência na região do infravermelho próximo, o que significa, que o aumento da concentração de matéria orgânica dissolvida na água resulta no aumento da reflectância na região do infravermelho próximo. No entanto, feições espectrais não pronunciadas tornam difícil a identificação das variações de concentração de matéria orgânica dissolvida devido a resposta espectral dos demais componentes opticamente ativos existentes nos corpos d'água (RUDORFF *et al.*, 2007). Além disto, a matéria orgânica dissolvida influencia na cor da água, a medida que aumenta a concentração do componente opticamente ativo a cor da água passa de um aspecto amarelo para tons mais escuros, o que justifica o fato da água do rio Negro, localizado no norte do país, por exemplo, possuir tom escuro (NOVO, 2001).

4 SENSORIAMENTO REMOTO

4.1 Princípios físicos

O sensoriamento remoto é definido como o conjunto de sensores, equipamentos para processamento de dados e de transmissão de dados utilizados para compreender os fenômenos e processos que ocorrem na superfície da Terra por meio do registro e análise da interação entre a radiação eletromagnética e os alvos (NOVO, 2010). Sendo assim, o conceito de sensoriamento remoto envolve a compreensão de três elementos, o objeto alvo, o sensor e a energia eletromagnética (TRENTIN, 2009). A energia eletromagnética é o meio pelo qual a informação é transferida do objeto ao sensor e pode ser definida como uma forma dinâmica de energia que se manifesta a partir de sua interação com a matéria (NOVO, 2010).

A principal fonte de radiação eletromagnética é proveniente do sol. A intensidade e a distribuição espectral da radiação eletromagnética depende do ângulo zenital do Sol e da composição da atmosfera (LORENZZETTI, 2015). Em virtude da presença das partículas da atmosfera, parte da energia eletromagnética que chega do topo da atmosfera é absorvida e espalhada, o que permite que apenas uma parcela da energia eletromagnética que chega do topo da atmosfera possa interagir com o alvo.

Os componentes da atmosfera, vapor d'água (H_2O), oxigênio (O_2), ozônio (O_3), gás carbônico (CO_2), além dos aerossóis são os responsáveis por interferir na quantidade de energia eletromagnética que chega à superfície da Terra. Por isto, aos componentes da atmosfera se deve o processo de atenuação da energia eletromagnética antes que esta possa interagir com os alvos. Porém, algumas regiões do espectro eletromagnético sofre o efeito nulo de absorção, o que torna possível o sensoriamento remoto da superfície terrestre, e são denominadas de janelas atmosféricas (JENSEN, 2009; NOVO, 2010).

De acordo com Jensen (2009) a partir do fluxo radiante que chega, e de como este interage no terreno em determinados comprimentos de onda do espectro eletromagnético, é possível obter informações importantes para os estudos de sensoriamento remoto. Em decorrência da interação da energia eletromagnética incidente e o objeto alvo de estudo, mais especificamente, com as propriedades físicas, químicas e biológicas, parte da energia incidente será refletida em direção ao sensor, uma outra quantidade de energia será absorvida pelo alvo e outra fração transmitida. O comportamento espectral dos alvos da superfície terrestre em

função da interação com a radiação incidente varia nos comprimentos do espectro eletromagnético, o que permite diferenciá-los.

Conforme Novo (2010) a reflectância consiste na razão entre o fluxo refletido e o fluxo incidente sobre o alvo. A reflectância obtida da razão entre a radiância do alvo e a radiância da placa de referência recobertura com sulfato de bário (BaSO_4), é denominada de reflectância bidirecional, sendo esta terminologia utilizada no estudo. A reflectância pode ser obtida a partir da equação 2 (MENESES, 2001):

$$p = 100 \times L/E \quad (2)$$

Onde, p é a reflectância em porcentagem, L é o fluxo de energia refletido e, E o fluxo de energia incidente. De acordo com Meneses (2001), em virtude da energia incidente e da refletida possuírem a mesma unidade ($\text{watts/cm}^2 \cdot \lambda$), a reflectância bidirecional é adimensional, e pode ser representada em porcentagem. Em relação aos níveis de coleta dos dados de sensoriamento remoto estes podem ser obtidos em aeronave, orbital, laboratório e campo, o que permite a obtenção de dados espectrais desde poucos centímetros de distância até milhares de quilômetros de distância dos alvos (NOVO, 2010).

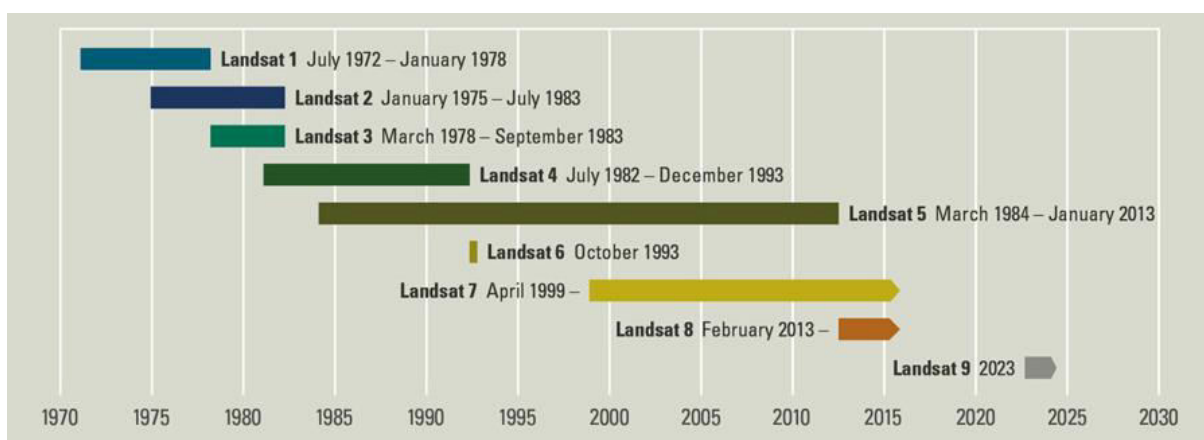
4.2 Sistemas imageadores

4.2.1 Satélite *Landsat 8*

Alguém disse: “Suba ao espaço para ver a Terra.” E os sensores a bordo dos satélites de sensoriamento remoto tornaram-se extensões dos olhos humanos para ver nosso planeta. Esses “olhos” conseguiram superar o poder de visão do homem, estendendo sua capacidade de identificar os objetos terrestres muito além dos comprimentos de onda da luz normalmente percebidos (MENESES e NETTO, 2001, p. 11).

A série *Land Remote Sensing Satellite (Landsat)* é responsável a partir do ano de 1972 pelo lançamento dos satélites de origem estadunidense *Landsat 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8*, no intuito de realizar o mapeamento multiespectral da superfície terrestre (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY, 2016). No Brasil, a antena do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) localizada em Cuiabá é responsável pelo recebimento de imagens do território brasileiro desde a década de 1970. O satélite *Landsat 5* lançado em 1984 é dos satélites da série o que por mais tempo permaneceu em órbita, período superior a 28 anos (Figura 8).

Figura 8 - Período de atividade dos satélites da série *Landsat*.



Fonte: Adaptado da United States Geological Survey (2016).

O satélite *Landsat 8*, lançado em 11 de fevereiro de 2013, com período de revisita de 16 dias apresenta algumas novidades em relação aos satélites anteriores da série, o sensor espectral *Operational Land Imager (OLI)* apresenta duas novas bandas espectrais, o canal do visível projetado para pesquisas na zona costeira e outro canal no infravermelho para a detecção de nuvens cirrus, além do sensor termal *Thermal Infrared Sensor (TIRS)*. O tamanho dos arquivos também sofreu alterações devido às bandas adicionais e os produtos estarem disponíveis em 12 bits (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY, 2016). A tabela 2 apresenta características quanto a resolução espectral e espacial do sensor *OLI* do satélite *Landsat 8*.

Tabela 2 - Características do sensor *OLI* do satélite *Landsat 8*.

Bandas do <i>Landsat 8</i>	Resolução espectral	Resolução espacial
	(μm)	(m)
Banda 1 – Aerossol Costeiro	0,43 - 0,45	30
Banda 2 - Azul	0,45 - 0,51	30
Banda 3 - Verde	0,53 - 0,59	30
Banda 4 - Vermelho	0,64 - 0,67	30
Banda 5 – Infravermelho Próximo	0,85 - 0,88	30
Banda 6 – Infravermelho Médio 1	1,57 - 1,65	30
Banda 7 – Infravermelho Médio 2	2,11 - 2,29	30
Banda 8 – Pancromática	0,50 - 0,68	15
Banda 9 – Nuvens Cirrus	1,36 - 1,38	30

Fonte: Adaptado da United States Geological Survey (2016).

Kirk (2000) obteve resultados satisfatórios ao correlacionar dados de sólidos em suspensão e valores de radiância de determinados comprimentos de onda do satélite *Landsat*. Após o desenvolvimento do *Landsat 8*, um novo satélite está previsto à ser lançado em 2023, com o nome *Landsat 9*, dando continuidade a série (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY, 2016).

4.2.2 Correção dos efeitos atmosféricos

A radiação eletromagnética antes de chegar ao sensor orbital atravessa um percurso atmosférico substancial. Em virtude das condições atmosféricas e do comprimento de onda, a radiação pode ser substancialmente modificada (ROSA, 2009). O resultado da interação da energia eletromagnética com os constituintes da atmosfera é designado de efeito atmosférico, e conforme Fonseca e Fernandes (2004) produz distorções nas imagens de sensoriamento remoto. Entre os efeitos causados pela atmosfera nas imagens de satélite, pode-se citar a redução do contraste entre os objetos de uma cena e a dificuldade de diferenciação entre objetos que possuem pequenas variações na intensidade do sinal (NOVO, 2010).

A influência atmosférica nas imagens de satélite difere de banda para banda, e sua correção é somente possível por meio da aplicação de modelo matemático de correção atmosférica. A aplicação de modelos têm como objetivo estimar a radiância de trajetória atmosférica que chega ao sensor orbital e remover este sinal, a fim de obter o valor de reflectância dos objetos (ROSA, 2009; NOVO, 2010). O satélite *Landsat 8* disponibiliza as bandas das imagens em reflectância de superfície e os efeitos atmosféricos removidos ao utilizar o método *Second Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S)*, além das imagens em reflectância, outros produtos do *Landsat 8* como *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)* e o *Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)* podem ser obtidos por demanda no site da *United States Geological Survey* (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY, 2015).

4.3 Sistemas não-imageadores

Os sistemas não-imageadores disponibilizam os valores de reflectância para cada comprimento de onda do espectro eletromagnético em forma de gráficos denominados de curva de reflectância espectral. A técnica que permite obter o valor de reflectância pela razão da radiância refletida pelo alvo e pela irradiância incidente sobre a superfície chama-se

espectrorradiometria de reflectância (MENESES, 2001). Uma placa de referência padrão (*spectralon* ou placa 100% refletora revestida com óxido de magnésio ou sulfato de bário) é utilizada em campo, como também, em laboratório para medir a radiação emitida pelo alvo (MENESES, 2001).

A reflectância da amostra é calculada conforme a equação 3.

$$R_{\text{água}} = \frac{L_{\text{água}}(\lambda)}{L_{\text{placa}}(\lambda)} \times R_{\text{placa}}(\lambda) \quad (3)$$

Onde: $R_{\text{água}}$ é o fator de reflectância bidirecional da água, $L_{\text{água}}(\lambda)$ é o valor da radiância medido na água, $L_{\text{placa}}(\lambda)$ é o valor da radiância medido na placa de referência e $R_{\text{placa}}(\lambda)$ é o fator de reflectância bidirecional da placa de referência.

4.4 Técnicas de análise dos espectros de reflectância

4.4.1 Suavização da curva espectral

A técnica de suavização da curva espectral consiste na eliminação dos ruídos dos espectros de reflectância. Uma das técnicas de suavização da curva espectral comumente utilizada, chama-se filtro de média móvel. Esta técnica suaviza as informações de uma janela predetermina, e estabelece o valor médio, o novo valor corresponde ao valor central da janela.

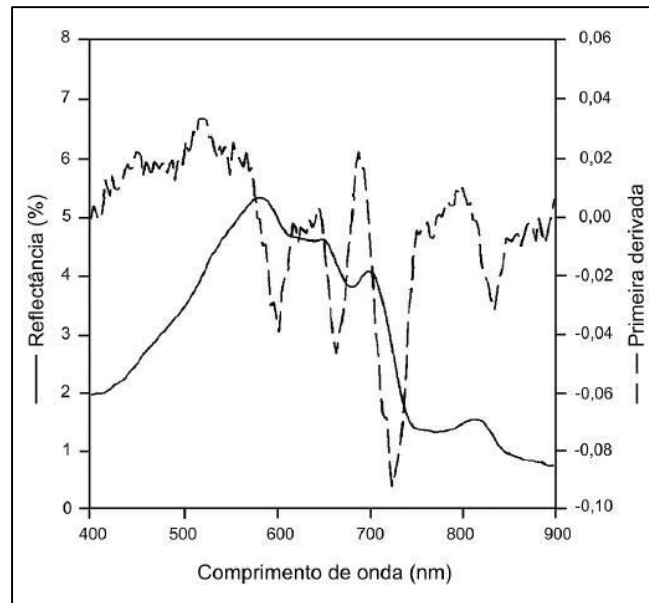
O principal fator que controla a suavização é o tamanho (largura de banda) da janela utilizada para a obtenção do valor médio. Tsai e Philpot (1998) destacam que quanto maior for o tamanho da janela maior será a suavização da curva espectral, neste sentido, precauções devem ser tomadas no momento de aplicar o filtro de média móvel a fim de não suavizar informações espectrais importantes para análise. A suavização espectral ideal é aquela que remove o ruído sem alterar as características espectrais dos dados (TSAI e PHILPOT, 1998).

4.4.2 Análise derivativa

As feições de mudanças bruscas no espectro original de reflectância da água podem ser atribuídas à absorção e ao espalhamento da radiação eletromagnética por determinados componentes opticamente ativos. O método de análise derivativa consiste no realce de feições que se destacam na assinatura espectral de um alvo, tanto em picos de reflectância como em

bandas de absorção (Figura 9). Trentin (2009) ao utilizar a análise derivativa pode identificar feições espectrais não visíveis nas curvas espectrais originais o que auxiliou na análise dos resultados.

Figura 9 – Curva de reflectância e primeira derivada.



Fonte: Han e Rundquist (2007).

Rudorff *et al.* (2007) ao aplicar a análise derivativa no estudo da variação dos constituintes opticamente ativos da água, por meio de dados de campo e de imagens do sensor orbital *Hyperion/EO-1*, pode identificar a maior eficiência da primeira derivada para estimar a distribuição espacial da concentração de sólidos inorgânicos em suspensão e de clorofila a quando comparado aos valores originais de reflectância. A análise derivativa permite calcular a taxa de mudança da reflectância em relação à taxa de variação do comprimento de onda, ao utilizar a equação 4:

$$\frac{ds}{dx} \cong \frac{p(\lambda_{n+1}) - p(\lambda_{n-1})}{2\Delta\lambda} \quad (4)$$

Onde, $\Delta\lambda$ é a separação entre as bandas adjacentes ($\Delta\lambda = \lambda_j - \lambda_i$) para (λ_j – maior comprimento de onda e λ_i – menor comprimento de onda com intervalo entre as bandas constante), e $p(\lambda_n)$ é o valor de espectro na faixa de comprimento de onda λ_n . A segunda derivada é obtida ao aplicar esta equação nos dados resultantes da primeira derivada.

Ennes (2008) ao estudar o potencial das imagens hiperespectrais na detecção de componentes opticamente ativos no reservatório de Itupararanga do estado de São Paulo identificou a análise derivativa dentre as técnicas de análise do espectro a que melhor proporcionou a diferenciação dos componentes opticamente ativos.

5 METODOLOGIA

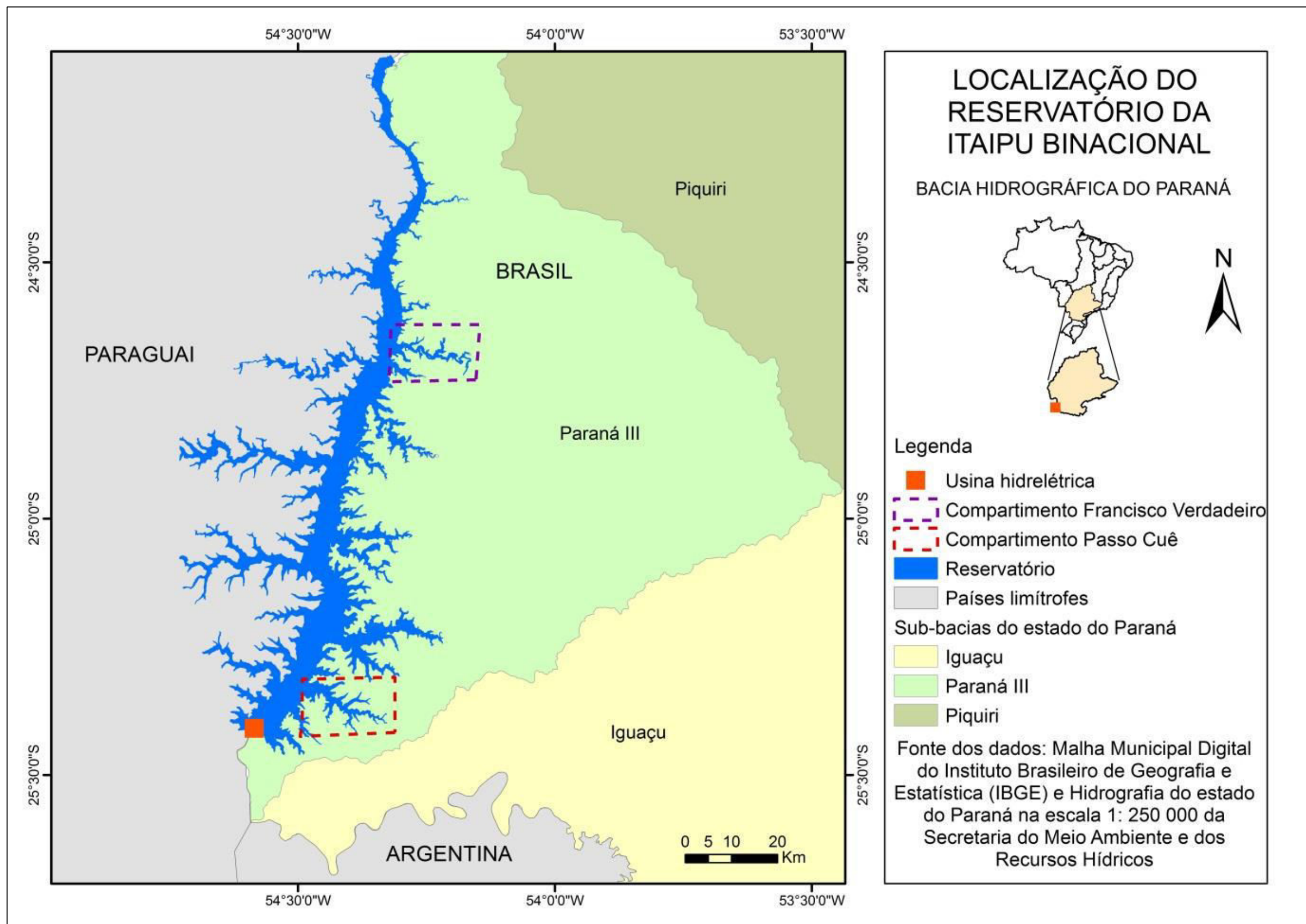
5.1 Caracterização da área de estudo

As águas drenadas pela bacia hidrográfica do Paraná são originárias de seis estados e do Distrito Federal, abrangem 10% do território brasileiro, sendo que um dos afluentes da bacia hidrográfica drena as águas da região mais industrializada e urbanizada do país. O reservatório Itaipu é considerado o sétimo maior reservatório do país e o primeiro em aproveitamento para produção de energia, com uma área de 1350 Km² podendo variar entre 1460 km² (quando totalmente cheio) e 1305 km² (em período de rebaixamento). Sua extensão é de 170 Km, a largura máxima de 12 km e média de 7 km, possui a profundidade média de 22,5 m e a máxima de 170 m próximo a barragem (ITAIPU BINACIONAL, 2014; IAP, 2009). Conforme a Itaipu Binacional (2014) a usina é considerada atualmente a maior geradora de energia do mundo, com 20 unidades geradoras e 14000 Mw de potência instalada.

A concepção e construção da Usina Hidrelétrica de Itaipu (UHE Itaipu Binacional) iniciaram-se na década de 70 e é ainda considerada, pela Sociedade Americana de Engenharia Civil, como um dos maiores empreendimentos hidrelétricos do mundo. Construída durante um momento muito peculiar do país, [...], um período no qual as questões ambientais não possuíam um arcabouço jurídico constituído que norteasse as ações de mitigação e/ou compensação como ocorre atualmente com empreendimento similares, as legislações eram inexistentes ou estavam em estágios iniciais, como a Política Nacional de Meio Ambiente (Lei de nº 6938, de 31 de agosto de 1981). (BENASSI, MACIELE BENASSI 2010, p. 1).

Além da usina hidrelétrica de Itaipu, outras três grandes usinas geradoras de energia (Jupia, Ilha Solteira e Porto Primavera) interrompem o curso natural do rio Paraná, que recebe ao longo do seu curso águas proveniente de rio Grande, Paranaíba, Tietê, Parapanema e Iguazu (ITAIPU BINACIONAL, 2014). O rio Paraná, além de possuir um importante papel na produção energética do país, é também em sua extensão de 190 km o divisor natural entre os países do Brasil e do Paraguai. Entre as sub-bacias que compõem a bacia do Paraná, destaca-se em importância a do Paraná III (Figura 10), por drenar diretamente as águas do território paranaense para o reservatório. Esta sub-bacia possui área de 8.000 km² e abrange 28 municípios do estado do Paraná e 1 município do estado do Mato Grosso do Sul.

Figura 10 - Localização do reservatório Itaipu.



O reservatório Itaipu possui características dendríticas com a formação de seis grandes braços na margem esquerda, denominados de compartimentos aquáticos, sendo quatro braços monitorados pelo Instituto Ambiental do Paraná (IAP). Os compartimentos aquáticos Passo Cuê e São Francisco Verdadeiro são dois dos braços monitorados pelo IAP, e encontram-se inseridos na sub-bacia hidrográfica do Paraná III. O compartimento aquático São Francisco Verdadeiro é formado pelo rio do mesmo nome, localizado no município de Entre Rios do Oeste (IAP, 2009) e o compartimento aquático Passo Cuê localizado ao sul do reservatório Itaipu é abrangido pelos municípios de Foz do Iguaçu, Santa Terezinha de Itaipu e São Miguel do Iguaçu (IBGE, 2016).

No que se refere aos aspectos físicos, o tipo climático da sub-bacia hidrográfica do Paraná III é o clima temperado úmido com verão quente (Cfa). Este tipo climático possui temperatura média do mês mais frio inferior a 18°C e a temperatura média do mês mais quente acima de 22°C, a estação do ano do verão é bastante quente, as geadas são pouco frequentes e as precipitações pluviométricas concentram-se nos meses de verão (IAP, 2016). A vegetação predominante é composta pela Floresta Estacional Semidecidual pertencente ao bioma Mata Atlântica, a porção sudeste da bacia apresenta formação transitória para a Floresta Ombrófila Mista (SEMA, 2015).

Conforme a Itaipu Binacional (2014) o uso da terra sofreu grandes transformações ao longo dos ciclos econômicos o que alterou a paisagem natural e ocasionou o desmatamento. Atualmente, a agricultura intensiva é a atividade que predomina na sub-bacia hidrográfica do Paraná III com destaque para as culturas da soja, milho e trigo (SEMA, 2015). Outros usos do solo, com é o caso dos usos mistos, campos naturais e pastagens artificiais para criatórios de bovinos de leite e corte, cobertura florestal e as áreas urbanas também são identificados na sub-bacia hidrográfica porém em menor percentual.

Em decorrência do preenchimento do reservatório Itaipu, o salto Grande de Sete Quedas, também chamado de salto de Guaíra foi inundado pelas águas do rio Paraná (SLONGO, 2014). A sub-bacia hidrográfica do Paraná III faz limite ao norte com a Área de Proteção Ambiental (APA) Federal das Ilhas e Várzeas do Rio Paraná e com o Parque Nacional de Ilha Grande, e na porção sul com Parque Nacional do Iguaçu, além disto, Corredores de Biodiversidade e Unidades de Conservação podem ser identificados na porção central da sub-bacia (SEMA, 2015). As margens do reservatório no lado brasileiro estão sendo preservadas por uma faixa de 100 metros de florestas (Figura 11), e que condiz com o Código Florestal Brasileiro (BRASIL, 2012).

Figura 11 – Área de floresta próxima a uma das margens do compartimento aquático Passo Cuê, reservatório Itaipu.

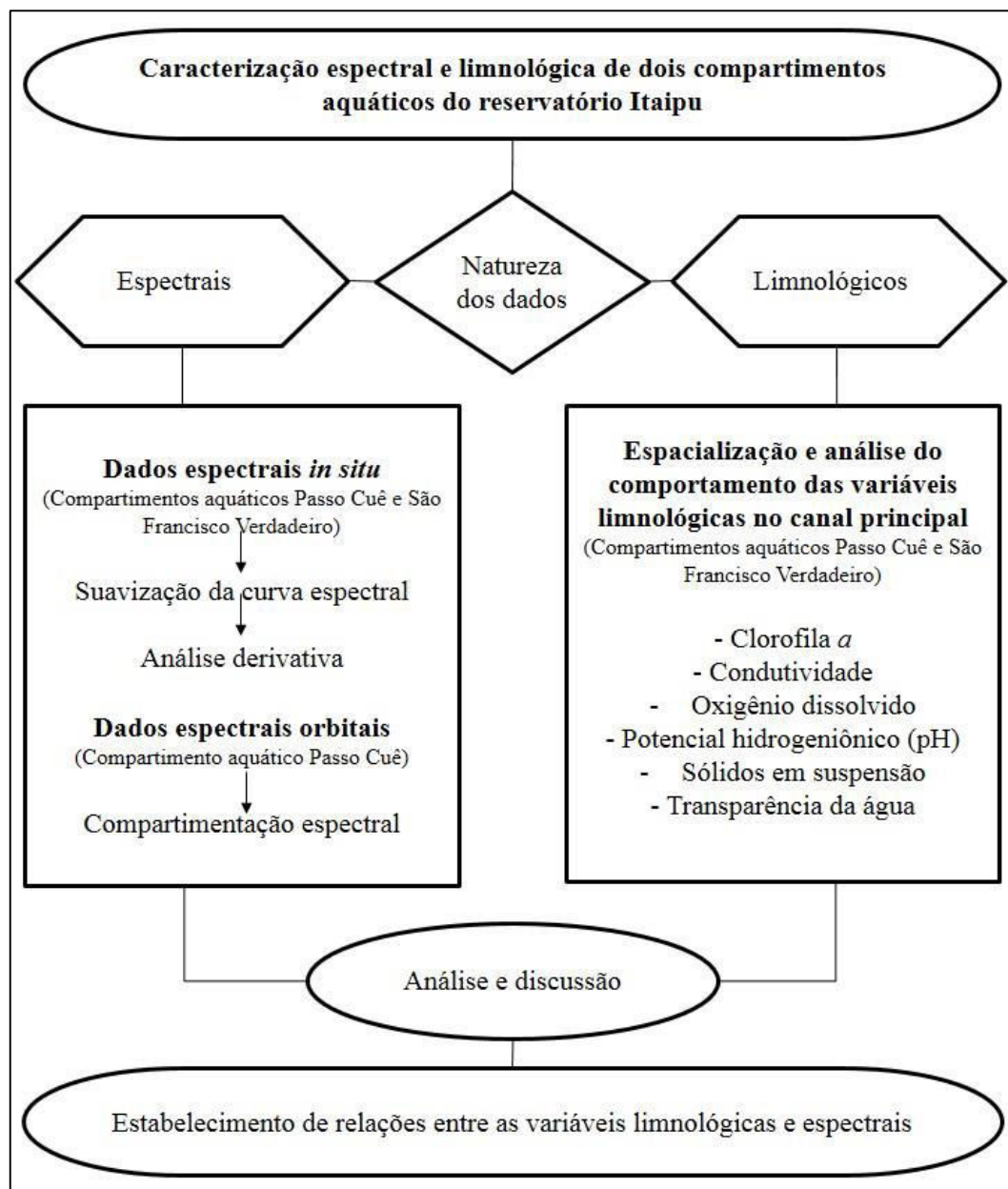


Fonte: Virgilio (2014).

5.2 Procedimentos metodológicos

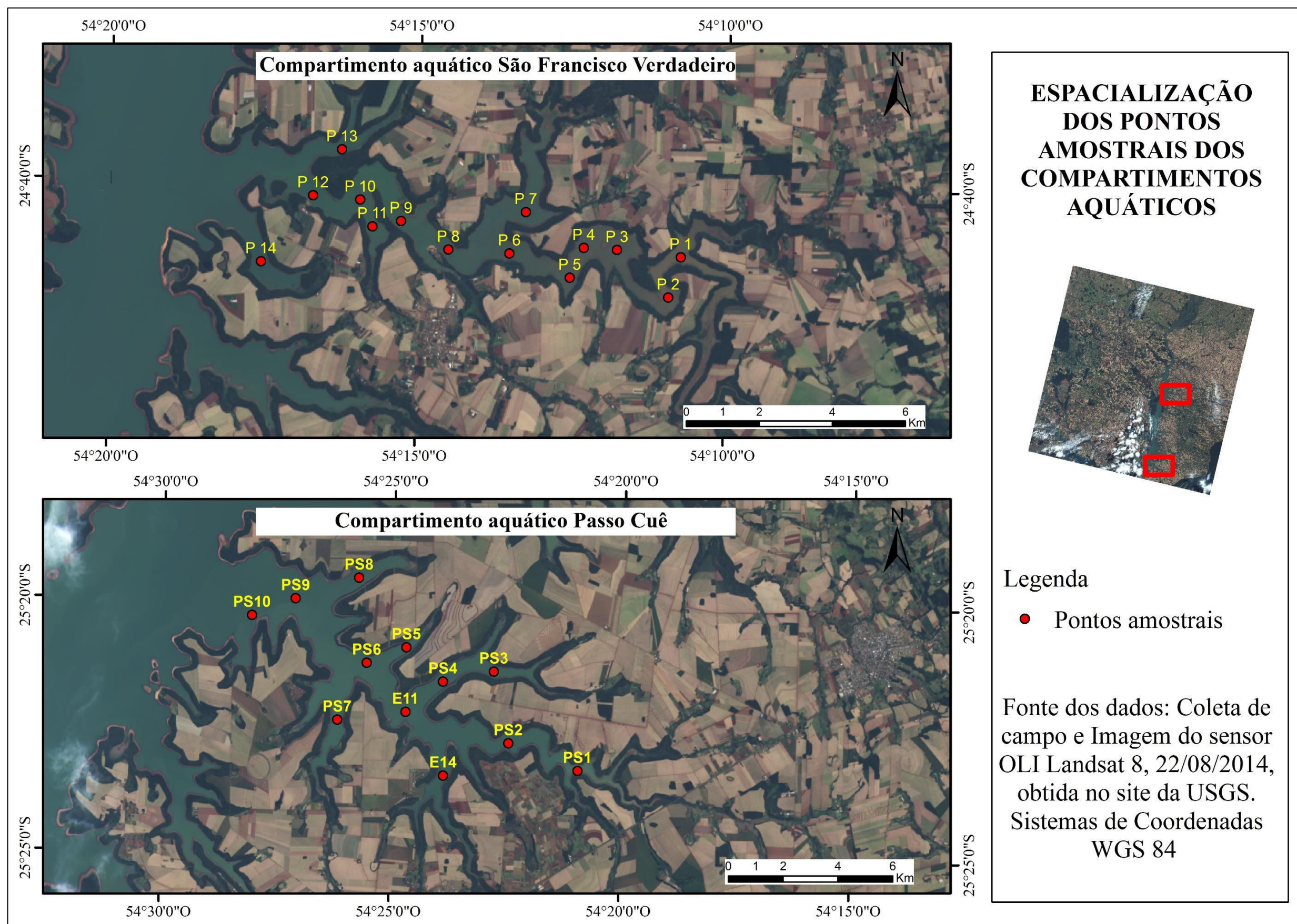
No intuito de atender aos objetivos da pesquisa que aborda a análise de variáveis limnológicas com o uso do sensoriamento remoto em dois compartimentos aquáticos do reservatório Itaipu, e ao utilizar para isto variáveis limnológicas obtidas *in situ* e provenientes da análise de laboratório a fim de integrar com os dados espectrais do sensor *OLI* do satélite *Landsat 8* e com os dados espectrais obtidos com o uso do espectrorradiômetro *FielSpec Hand Held*, adotou-se os seguintes procedimentos metodológicos (Figura 12).

Figura 12 – Fluxograma da dissertação.



Os trabalhos de campo para aquisição dos dados das variáveis limnológicas e espectrais dos pontos amostrais foram realizados nas seguintes datas, no dia 22 de agosto de 2014 no compartimento aquático Passo Cuê e no dia 21 de maio de 2015 no compartimento aquático São Francisco Verdadeiro (Figura 13). Os trabalhos de campo foram pré-programados para coincidirem com a data de passagem do satélite *Landsat* 8 que revisita a área de estudo a cada 16 dias. A amostragem de campo foi realizada no período de maior incidência solar, o que permite conforme Rudorff *et al.* (2007) minimizar os efeitos de geometria de iluminação durante a coleta dos dados.

Figura 13 - Espacialização dos pontos amostrais dos compartimentos aquáticos, reservatório Itaipu.



No compartimento aquático Passo Cuê realizou-se a coleta de 12 pontos amostrais distribuídos na zona fluvial, transição e lacustre. Dois dos pontos amostrais coletados no compartimento aquático são estações de monitoramento do reservatório Itaipu, que além destas, possuem outras distribuídas no reservatório (BENASSI, MACIEL e BENASSI, 2010). Em virtude disto, estes dois pontos amostrais possuem a letra E na nomenclatura do ponto amostral (E11 e E14), e os demais pontos amostrais possuem a nomenclatura PS anterior ao número cardinal (PS1, PS2, PS3, PS4, PS5, PS6, PS7, PS8, PS9 e PS10).

O número de pontos amostrais do compartimento aquático São Francisco Verdadeiro foi de 14, o valor numérico dos pontos amostrais é condizente com a ordem de coleta dos dados limnológicos e espectrais, que inicia na zona fluvial do compartimento aquático, próximo ao tributário principal do canal, e segue em direção a zona lacustre, contemplando as três zonas do compartimento aquático.

5.3 Variáveis limnológicas

Os constituintes opticamente ativos coletados nos compartimentos aquáticos são os sólidos em suspensão e a clorofila *a*. A transparência da água considerada variável auxiliar para análise dos dados espectrais também é coletada, além da condutividade elétrica, oxigênio dissolvido e o potencial hidrogeniônico (pH). As variáveis limnológicas coletadas nos trabalhos de campo foram analisadas no Laboratório da Itaipu, exceto a variável clorofila *a* analisada pelo IAP.

A análise das variáveis limnológicas no Laboratório da Itaipu ocorreu em virtude da proximidade do local de coleta de água e da oferta deste serviço pela própria instituição, que monitora regularmente estações distribuídas no reservatório. A fim de verificar o grau de associação entre as variáveis limnológicas, obteve-se os valores de R^2 para os compartimentos aquáticos Passo Cuê (Apêndice A) e São Francisco Verdadeiro (Apêndice B).

5.3.1 Clorofila *a*

As concentrações de clorofila *a* dos pontos amostrais coletadas nos trabalhos de campo dos dias 22 de agosto de 2014 e 21 de maio de 2015 foram analisadas pelo IAP. Todos os pontos amostrais dos compartimentos aquáticos, exceto para o ponto amostral P1 do compartimento aquático São Francisco Verdadeiro, possuem dados de clorofila *a*.

Os pigmentos de clorofila juntamente com o carotenóide e a ficobilina são responsáveis pelo processo fotossintético que ocorre no corpo d'água devido a penetração da radiação eletromagnética. Dos pigmentos de clorofila (*a*, *b*, *c* e *d*), a clorofila *a* por representar aproximadamente 1 a 2% do material orgânico das algas, considerando o peso seco, é a mais utilizada universalmente (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2009). Conforme o autor, a clorofila *a*, além de ser um indicador de biomassa das algas é utilizada como uma das principais variáveis na identificação do estado trófico dos corpos d'água.

5.3.2 Condutividade elétrica

Consiste na variável que indica a capacidade da água em conduzir correntes elétricas. É portanto, um reflexo da composição da água, especialmente no que diz respeito a concentração mineral. Neste sentido, a condutividade elétrica possui relação direta com a concentração mineral, quanto maior a condutividade elétrica maior é a concentração de minerais na água (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2009).

Os principais cátions e ânions presentes nos corpos d'água são o cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), sódio (Na^+), potássio (K^+), ferro (Fe^{3+}), manganês (Mn^{2+}), cloreto (Cl^-), sulfato (SO_4^{2-}), carbonato (CO_3^{2-}) e bicarbonato (HCO_3^-). Dos minerais, os macronutrientes são os íons diretamente responsáveis pela condutividade elétrica das águas (ESTEVEES, 1998). Conforme o autor, a geologia da área de drenagem, a precipitação pluviométrica e áreas impactadas pela ação humana são alguns dos fatores que influenciam na composição iônica dos corpos d'água.

5.3.3 Oxigênio dissolvido

O nível de oxigênio dissolvido na água indica a capacidade do ambiente aquático em preservar a vida, e portanto, é um dos principais parâmetros utilizados em programas de monitoramento da qualidade das águas (IAP, 2009; ESTEVES, 1998). As principais fontes de oxigênio dissolvido na água são a atmosfera e a fotossíntese, enquanto, as perdas de oxigênio dissolvido ocorrem devido à decomposição de matéria orgânica, perdas para a atmosfera, respiração dos organismos aquáticos e a oxidação de íons metálicos (ESTEVEES, 1998).

Conforme o Instituto Ambiental do Paraná (2009) a concentração de oxigênio dissolvido na água é de fundamental importância para os corpos d'água, pois influencia na maioria dos processos químicos e biológicos que ocorrem na água. A concentração de oxigênio dissolvido

na água varia em função de fatores como temperatura, salinidade, turbulência, pressão atmosférica, a presença de poluentes e a atividade fotossintética das algas (IAP, 2009). Corpos d'água altamente poluídos constituem-se em ambientes com baixas concentrações de oxigênio dissolvido, enquanto, altas concentrações indicam ambientes com águas limpas.

Conforme o Instituto Ambiental do Paraná (2009) concentrações de oxigênio dissolvido inferiores a 5mg/L interferem no funcionamento das comunidades biológicas, porém a situação torna-se crítica, quando concentrações da variável inferiores a 2mg/L acarretam a mortandade de peixes.

5.3.4 Potencial hidrogeniônico (pH)

O potencial hidrogeniônico popularmente conhecido como pH, é considerado um parâmetro importante na avaliação e monitoramento dos corpos d'água, uma vez que produz efeitos diretos, principalmente na fisiologia das espécies aquáticas (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2009). A maioria dos corpos d'água possuem valores de pH entre 6 e 8, podendo encontrar ambientes aquáticos mais alcalinos ou ácidos, e que apresentam comunidades vegetais e animais bastante específicas (ESTEVES, 1998). Como critério de proteção da vida aquática a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2009) fixou o pH entre 6 e 9, valores de pH não abrangidos pelo intervalo restringem a colonização de determinados organismos aquáticos.

Conforme o Instituto Ambiental do Paraná (2009) o pH é um importante indicador de poluição dos corpos d'água, quando os dejetos industriais não são corretamente tratados, o que influencia no balanço ácido-base do ambiente aquático. Em estações de tratamento de água a determinação do pH é suma relevância para consumo humano em decorrência das águas ácidas serem corrosivas, enquanto que, as águas alcalinas serem incrustantes (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2009).

5.3.5 Sólidos em suspensão

Os sólidos suspensos fazem parte juntamente com os sólidos dissolvidos dos sólidos totais. A concentração de sólidos em suspensão é estabelecida em função da porção de material retida em um filtro de 0,45 µm de porosidade. Os sólidos em suspensão são constituídos de pequenas partículas suspensas na água, formados por uma fração mineral (inorgânica) e outra orgânica que permanece como resíduo, após os processos de evaporação e secagem a uma

temperatura pré-estabelecida durante um tempo fixado (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2009; INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ, 2009).

De acordo com o Instituto Ambiental do Paraná (2009) altas concentrações de sólidos em suspensão influenciam na diminuição da visibilidade da água, na alteração da natureza do sedimento de fundo devido a deposição de material, na redução da penetração da radiação eletromagnética no corpo d'água e no aumento da turbidez da água.

5.3.6 Transparência da água

A transparência da água é obtida ao utilizar o Disco de Secchi, que consiste em uma placa branca circular com diâmetro de 20 cm acoplada em um cabo graduado (WETZEL e LIKENS, 2000; COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2009; INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ, 2009). O valor da profundidade em que o disco desaparece ao ser introduzido na coluna d'água indica a transparência da água, quanto menor a transparência da água menor é a profundidade que o disco é introduzido na água. O Disco de Secchi é também utilizado para estimar a zona eufótica do ambiente aquático, que compreende a região da massa de água iluminada com até 1% de luz e que indica o nível de atividade fotossintética do corpo d'água (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2009; INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ, 2009).

Uma das vantagens da utilização do Disco de Secchi para medição da transparência da água é em virtude de ser de fácil manuseio, porém, dependente da percepção do sujeito que manipula o equipamento, e portanto, as medidas devem ser realizadas pela mesma pessoa (JENSEN, 2009). Conforme o Instituto Ambiental do Paraná (2009) a transparência da água varia de um corpo d'água para outro em virtude do regime de circulação da massa de água, a natureza geoquímica da bacia hidrográfica, o regime de chuvas, além de outros fatores.

5.4 Espacialização e análise do comportamento das variáveis limnológicas no canal principal

A espacialização das variáveis limnológicas dos dois compartimentos aquáticos do reservatório Itaipu foi realizada com a inserção dos dados limnológicos em um banco de dados do *software* SPRING versão 4.3.3 (CÂMARA, *et al.* 1996). Para cada um dos modelos numéricos do terreno (MNT) das variáveis limnológicas são geradas grades retangulares com o uso do interpolador média ponderada, em seguida, é realizado o fatiamento em classes, em

formato temático. Para a definição das classes temáticas das variáveis limnológicas observou-se os valores máximos e mínimos a fim de obter intervalos idênticos.

A análise do comportamento das variáveis limnológicas no canal principal se fez por meio da identificação dos pontos amostrais localizados na área do canal principal dos dois compartimentos aquáticos e medição das distâncias entre os pontos amostrais no software ArcGIS (ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, 2015). Neste sentido, o espaço que separa os pontos amostrais distribuídos no gráfico elaborado no programa Excel corresponde à distância em Km dos pontos amostrais no compartimento aquático. No compartimento aquático Passo Cuê são identificados os pontos amostrais PS1, PS2, E11, PS6, PS9 e PS10, enquanto, para o compartimento aquático São Francisco Verdadeiro são identificados os seguintes pontos amostrais P1, P2, P3, P4, P5, P6, P8, P9, P10 e P12.

5.5 Dados espectrais

5.5.1 Sistema imageador

Os trabalhos de campo foram pré-programados para coincidirem com a data de passagem do satélite *Landsat 8* (Tabela 3) que revisita a área de estudo a cada 16 dias. A imagem da data de 22 de agosto de 2014 referente ao trabalho de campo realizado no compartimento aquático Passo Cuê não apresenta a influência de nuvens, porém, a imagem da data de 21 de maio de 2015 do trabalho de campo realizado no compartimento aquático São Francisco Verdadeiro não é possível de ser utilizada em virtude das condições atmosféricas do dia. A cena do sensor OLI do satélite *Landsat 8* da data de 22 de agosto de 2014, órbita ponto 224/77, foi obtida por demanda no site da USGS (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY, 2015), a imagem em reflectância é disponibilizada com correção geométrica e atmosférica.

A imagem em reflectância obtida no site da USGS (USGS, 2015), foi compartimentada espectralmente no *software* SPRING versão 4.3.3 (CÂMARA, *et al.* 1996) a fim de espacializar a variação espectral do compartimento aquático Passo Cuê, e relacionar com as concentrações dos constituintes opticamente ativos clorofila *a* e sólidos em suspensão, além dos valores de transparência da água dos pontos amostrais do compartimento aquático.

Tabela 3 - Características do satélite *Landsat 8*.

Características	<i>Landsat 8</i>
Abrangência espectral	433 - 12500 nm
	15 m (Pancromático – B8)
Resolução espacial	30 m (Multiespectral – B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7 e B9)
	100 m (Termal – B10 e B11)
Área imageada	185 x 185 Km
Cobertura espectral	Não contínua
Número de bandas	11
Bandas OLI	433 – 1390 nm
Bandas TIRS	10300 – 12500 nm

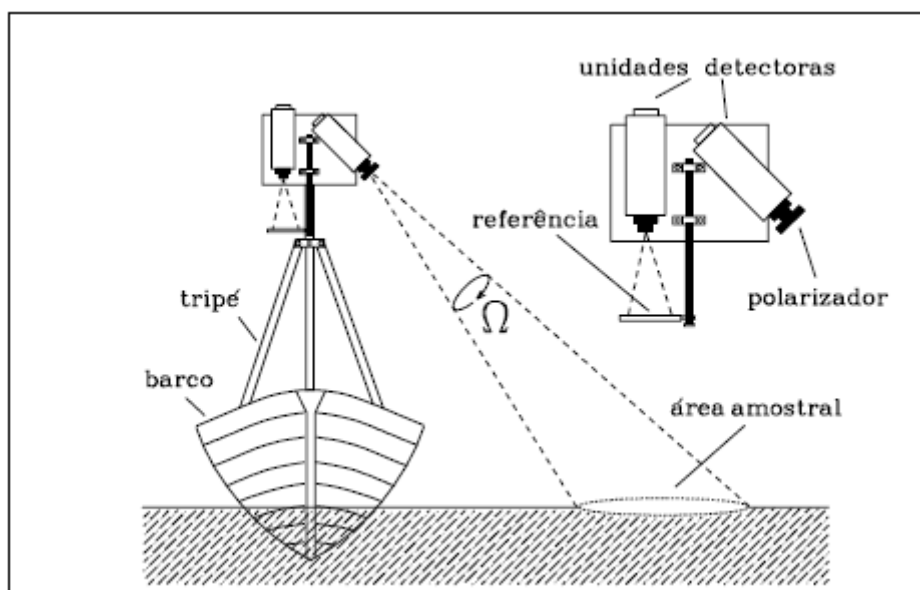
Fonte: Adaptado de Embrapa Monitoramento por Satélite (2016).

5.5.2 Sistema não-imageador

A metodologia de coleta dos dados de reflectância para a superfície da água é descrita por Steffen (1996), na qual utiliza o espectrorradiômetro spectron SE-590, composta de duas partes, uma unidade controladora e outra unidade detectora. O procedimento de coleta dos dados espectrais consiste primeiramente na calibração do espectrorradiômetro, ao direcionar o mesmo para uma placa de referência recoberta com sulfato de bário (BaSO_4) com reflectância próxima a 100%, após a calibração o espectrorradiômetro é posicionado em um ângulo de inclinação de 45° em relação a vertical e com 90° em relação ao azimute do sol, a uma altura de aproximadamente 50 cm acima do nível da água (STEFFEN, 1996).

Em decorrência da dificuldade em realizar a medida dos espectros do objeto e o da referência simultaneamente, o intervalo entre as aquisições deve ser o menor possível a fim de evitar variações nas condições de iluminação. Conforme Steffen (1996), para que seja possível a coleta dos dados espectrais é necessário condições de campo adequadas na data de coleta dos dados. A configuração aproximada de coleta de dados espectrais em nível de campo, com o uso do espectrorradiômetro pode ser visualizada pela Figura 14.

Figura 14 - Aquisição de dados espectrais em nível de campo com o uso do espectrorradiômetro.



Fonte: Steffen (1996).

A coleta dos dados espectrais no dia 22 de agosto de 2014 do compartimento aquático Passo Cuê é realizada com o uso do espectrorradiômetro *FieldSpec Hand Held* que abrange os comprimentos de onda de 325 a 1075 nm. A análise dos dados espectrais restringiu-se ao intervalo espectral de 400 a 800 nm, que possui resolução de 1 nm e abrange a região do visível e do infravermelho próximo, o intervalo espectral de 800 a 900 nm não foi incluso na análise devido a presença de ruídos. Para o processamento dos dados espectrais utilizou-se o programa computacional *ViewSpecPro* versão 6.0 para a obtenção da média dos espectros coletados em cada ponto amostral.

Na coleta dos dados espectrais de campo do dia 21 de maio de 2015 no compartimento aquático São Francisco Verdadeiro utilizou-se o espectrorradiômetro cedido pela Itaipu Binacional a fim de registrar os valores de reflectância dos pontos amostrais nos comprimentos de onda entre 400 a 900 nm. Para os dados espectrais do compartimento aquático não é necessário utilizar o programa *ViewSpecPro* versão 6.0, uma vez que os dados espectrais encontravam-se disponíveis em valores de reflectância, e a média dos espectros coletados em cada ponto amostral é realizada no programa Excel.

No intuito de amenizar os ruídos nos espectros originais dos compartimento aquáticos Passo Cuê e São Francisco Verdadeiro aplicou-se a técnica de suavização espectral a partir de um filtro de média móvel de 7 pontos. Na definição do número de pontos do filtro de média

móvel levou-se em consideração o fato da diminuição dos ruídos não alterar as características dos dados espectrais (TSAI e PHILPOT, 1998).

Com os dados suavizados aplicou-se a primeira derivada no intuito de identificar variações sutis nos espectros de reflectância devido a presença dos constituintes opticamente ativos na água, e responsáveis pelos processos de absorção e espalhamento que ocorre nos corpos d'água. Com o objetivo de realçar as feições espectrais aplicou-se a equação da primeira derivada (4) no programa Excel. A segunda derivada também é realizada no mesmo programa ao aplicar novamente a equação da primeira derivada (4) nos dados resultantes da primeira derivada.

5.6 Análise estatística dos dados espectrais e limnológicos

A análise estatística dos dados espectrais e limnológicos se fez por meio da utilização de correlações. O objetivo da utilização desta técnica estatística é verificar a existência de associação entre as variáveis limnológicas e espectrais quantitativamente, como também, identificar o grau de associação. A existência de associação entre as variáveis permite aferir se estas são correlacionadas, ou seja, quando constata-se que as variáveis variam juntas (JACQUES-CALLEGARI, 2003).

A associação entre as variáveis são representadas por meio de gráficos cartesianos de pontos denominados de diagramas de dispersão. O coeficiente de correlação (r) permite aferir sobre o grau de associação das variáveis, e varia de +1 a -1, valores positivos indicam que as variáveis variam no mesmo sentido (correlação positiva perfeita), e valores negativos indicam uma correlação do tipo inversa (correlação negativa perfeita), ou seja, quando a concentração de uma variável aumenta (eixo x) a concentração da outra variável diminui (eixo y), ou vice-versa (JACQUES-CALLEGARI, 2003). Valores de r próximo a zero indicam fraca associação entre as variáveis, enquanto, valores próximos a +1 ou -1 indicam forte associação entre as variáveis.

Conhecido o coeficiente de correlação (r), é possível estabelecer o coeficiente de determinação (r^2), que corresponde ao quadrado de r . O coeficiente de determinação indica que fração da variabilidade de uma característica é explicada estatisticamente por outra variável (JACQUES-CALLEGARI, 2003).

Os valores de reflectância do compartimento aquático Passo Cuê foram correlacionados com as variáveis opticamente ativas (clorofila *a* e sólidos em suspensão), além da transparência da água. O número reduzido de espectros de reflectância dos pontos amostrais do

compartimento aquático São Francisco Verdadeiro devido as condições atmosféricas do dia de coleta dos dados não permitiu a elaboração do correlograma para este compartimento aquático.

6 RESULTADOS

6.1 Espacialização e análise do comportamento das variáveis limnológicas no canal principal

A fim de melhor compreender o comportamento das variáveis limnológicas obteve-se a estatística descritiva das variáveis limnológicas (Tabela 4). Desta forma, calculou-se os valores médios, máximos, mínimos, desvio padrão, variâncias e coeficientes de variâncias das variáveis limnológicas coletadas nos compartimentos aquáticos Passo Cuê e São Francisco Verdadeiro. Os dados estatísticos são abordados para efeito de análise comparativa entre os dois compartimentos aquáticos, e encontram-se melhor descritos no decorrer desta sessão.

Tabela 4 - Estatística descritiva das variáveis limnológicas

	Variável	Média	Máximo	Mínimo	Desvio padrão	Variância	Coefficiente variância
Passo Cuê	Clorofila <i>a</i>	1,60	3,11	0,44	0,84	0,71	0,52
	Condutividade elétrica	0,044	0,051	0,040	0,003	0,00001	0,07
	Oxigênio dissolvido	10,20	10,64	9,68	0,29	0,08	0,02
	pH	7,26	7,87	6,80	0,32	0,10	0,04
	Sólidos em suspensão	4,86	7,60	3,60	1,01	1,03	0,20
	Transparência	0,96	1,30	0,50	0,18	0,03	0,19
São Francisco Verdadeiro	Clorofila <i>a</i>	4,01	10,78	0,37	3,58	12,58	0,89
	Condutividade elétrica	0,064	0,0740	0,061	0,003	0,00001	0,05
	Oxigênio dissolvido	4,75	6,58	3,70	0,80	0,64	0,16
	pH	8,05	8,74	7,41	0,44	0,19	0,05
	Sólidos em suspensão	3,52	8,8	0,8	1,95	3,83	0,55
	Transparência	0,85	1,1	0,6	0,16	0,02	0,19

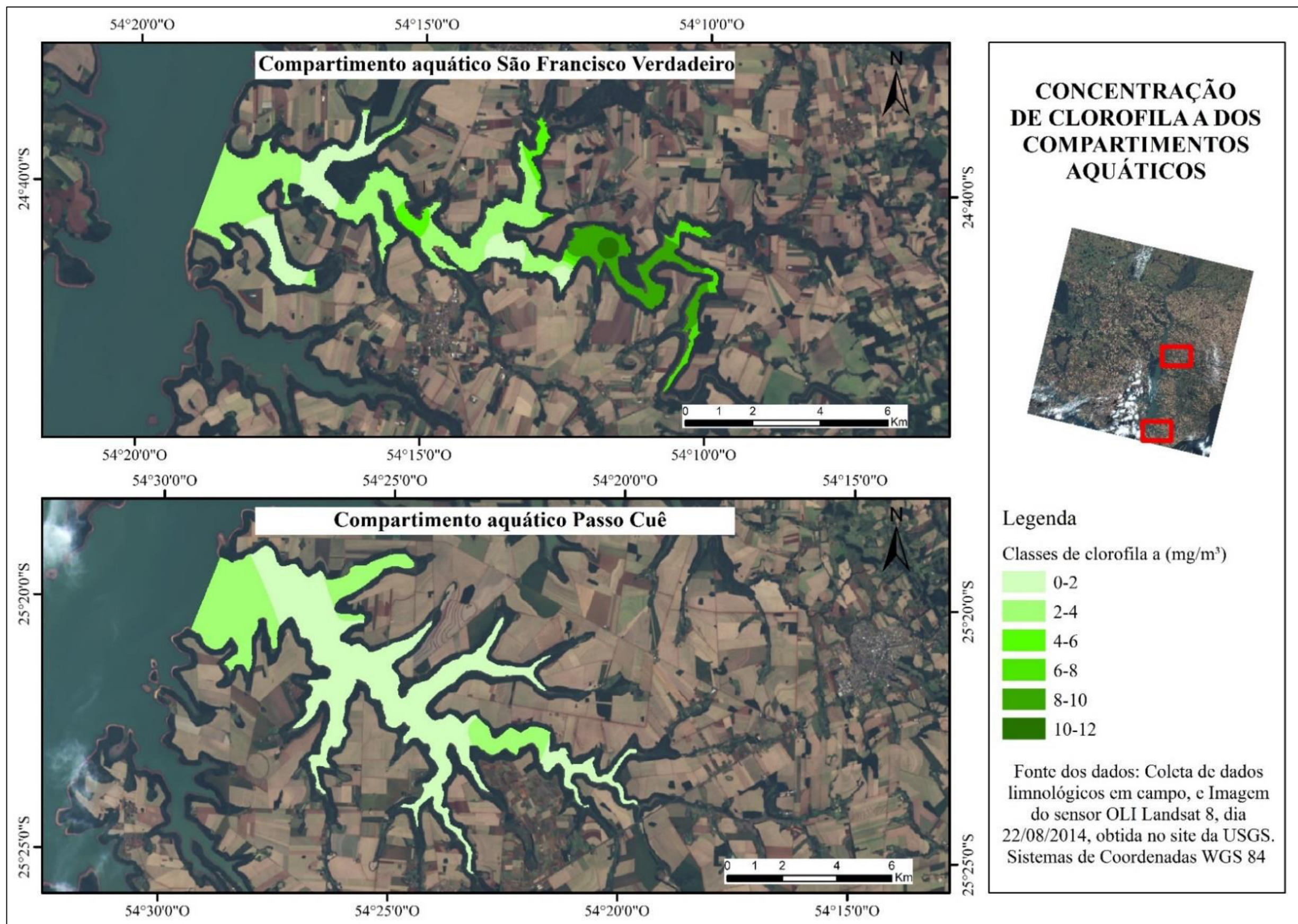
6.1.1 Clorofila *a*

A variável limnológica clorofila *a* em superfície apresentou comportamento distinto nos dois compartimentos aquáticos do reservatório Itaipu. No compartimento aquático Passo Cuê, o valor médio de clorofila *a* para os doze pontos amostrais é de 1,6 mg/m³, a máxima concentração de clorofila *a*, 3,11 mg/m³ é identificada em dois pontos amostrais localizados na zona lacustre (PS8 e PS10), o valor mínimo de clorofila *a* de 0,44 mg/m³ é identificado no ponto amostral PS9, situado próximo aos pontos amostrais de máxima concentração. O compartimento aquático São Francisco Verdadeiro, por sua vez, apresenta valor médio de clorofila *a* de 4,01 mg/m³, valor superior a concentração média para o compartimento aquático Passo Cuê, a máxima concentração de clorofila *a* de 10,78 mg/m³ é identificada no ponto amostral P3, localizado na zona fluvial do compartimento aquático, enquanto, a concentração mínima de 0,37 mg/m³ é identificada no ponto amostral P6 localizado na zona de transição do compartimento aquático.

As concentrações de clorofila *a* dos 14 pontos amostrais indicaram a existência de áreas heterogêneas no compartimento aquático São Francisco Verdadeiro (Figura 15). A variação das concentrações de clorofila *a* identificado n mos pontos amostrais é representado pelo valor do coeficiente de variância de 0,89, o maior coeficiente de variância das variáveis limnológicas obtidas nos dois compartimentos aquáticos. As variações das concentrações de clorofila *a* permite identificar as áreas de maior e menor concentração da variável limnológica no compartimento aquático, neste sentido, os pontos amostrais localizados na zona fluvial apresentam as maiores concentrações comparado as demais áreas do compartimento aquático.

No compartimento aquático Passo Cuê a variável limnológica clorofila *a* apresenta comportamento homogêneo, o coeficiente de variância dos pontos amostrais é de 0,52. As menores concentrações de clorofila *a* dificultam a identificação das áreas de maior ocorrência da variável no compartimento aquático. No entanto, os pontos amostrais de máxima concentração (PS 8 e PS10), além do ponto amostral PS2 destacam-se em relação aos demais pontos amostrais (Figura 15).

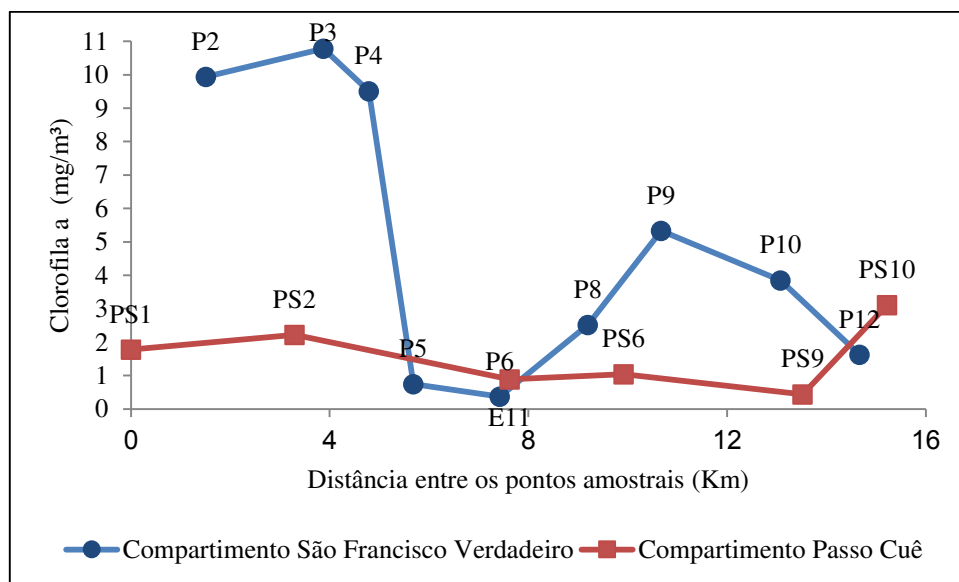
Figura 15 – Espacialização das concentrações de clorofila *a* dos compartimentos aquáticos.



O comportamento homogêneo da clorofila *a* no compartimento aquático Passo Cuê tornou-se evidente ao analisar o comportamento da variável no canal principal (Figura 16). A ausência de informação referente a concentração de clorofila *a* no ponto amostral P1 do compartimento aquático São Francisco Verdadeiro impossibilita a representação gráfica do ponto amostral, ao iniciar no ponto amostral P2. Os pontos amostrais de maior concentração de clorofila *a* identificados na zona fluvial do compartimento aquático São Francisco Verdadeiro destacam-se em relação aos demais pontos amostrais do canal principal, além do pico de concentração no ponto amostral P9.

Os dois pontos amostrais dos compartimentos aquáticos localizados próximos ao corpo do reservatório apresentam concentrações de clorofila *a* similares, 3,11 mg/m³ para o ponto amostral PS10 do compartimento aquático Passo Cuê e 1,63 mg/m³ para o ponto amostral P12 do compartimento aquático São Francisco Verdadeiro, o que indica a uniformização das águas dos compartimentos aquáticos e do corpo do reservatório nesta zona do compartimento aquático.

Figura 16 – Concentração de clorofila *a* no canal principal dos compartimentos aquáticos Passo Cuê e São Francisco Verdadeiro.



Conforme o Instituto Ambiental do Paraná (2009) concentrações elevadas de fósforo identificados em determinados períodos no compartimento aquático São Francisco Verdadeiro associadas as características hídricas são os responsáveis pelo desenvolvimento de fitoplâncton e a ocorrência de eventuais florações de cianobactérias no compartimento aquático.

Além disto, de acordo o mesmo autor, 35 taxa de fitoplâncton são registrados no período de 2005 a 2008, com predomínio de 3 espécies indicadoras de ambientes aquáticos eutrofizados.

Nishimura, Moschini-Carlos e Pompêo (2015) ao analisar o comportamento da comunidade fitoplanctônica dos braços Rio Grande e Taquacetuba da represa Billing no estado de São Paulo identificaram as maiores concentrações de biomassa neste último braço, além da ocorrência de florações de cianobactérias em virtude do maior aporte de nutrientes. A maior concentração de nutrientes no braço Taquacetuba deve-se principalmente ao recebimento das águas do Rio Pinheiro, com grande quantidade de esgoto doméstico e industrial proveniente da cidade de São Paulo.

6.1.2 Condutividade elétrica

Os valores de condutividade elétrica dos compartimentos aquáticos demonstram diferenças hídras entre os mesmos (Figura 17). O compartimento aquático São Francisco Verdadeiro apresenta os maiores valores de condutividade elétrica ao abranger as classes de 0,060 a 0,075 $\mu\text{S}/\text{cm}$, enquanto, o compartimento aquático Passo Cuê abrange classes de 0,040 a 0,055 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Em relação, a variação dos valores de condutividade elétrica dos pontos amostrais verifica-se que os dois compartimentos aquáticos apresentam baixos coeficientes de variação, 0,07 para o compartimento aquático Passo Cuê e 0,05 para o compartimento aquático São Francisco Verdadeiro (Apêndice C).

No compartimento aquático São Francisco Verdadeiro os maiores valores de condutividade elétrica são identificados na zona fluvial. O aporte de nutrientes na água pelo tributário principal do compartimento aquático, o rio São Francisco Verdadeiro, contribui no aumento da condutividade elétrica da zona fluvial em decorrência da concentração mineral do corpo d'água possuir relação direta com a condutividade elétrica (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2009). A medida que afasta-se da zona fluvial e aproxima-se da zona lacustre os valores de condutividade elétrica diminuem gradativamente até estabelecer na classe de 0,060 a 0,065 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 18).

Figura 17 – Espacialização da condutividade elétrica dos compartimentos aquáticos.

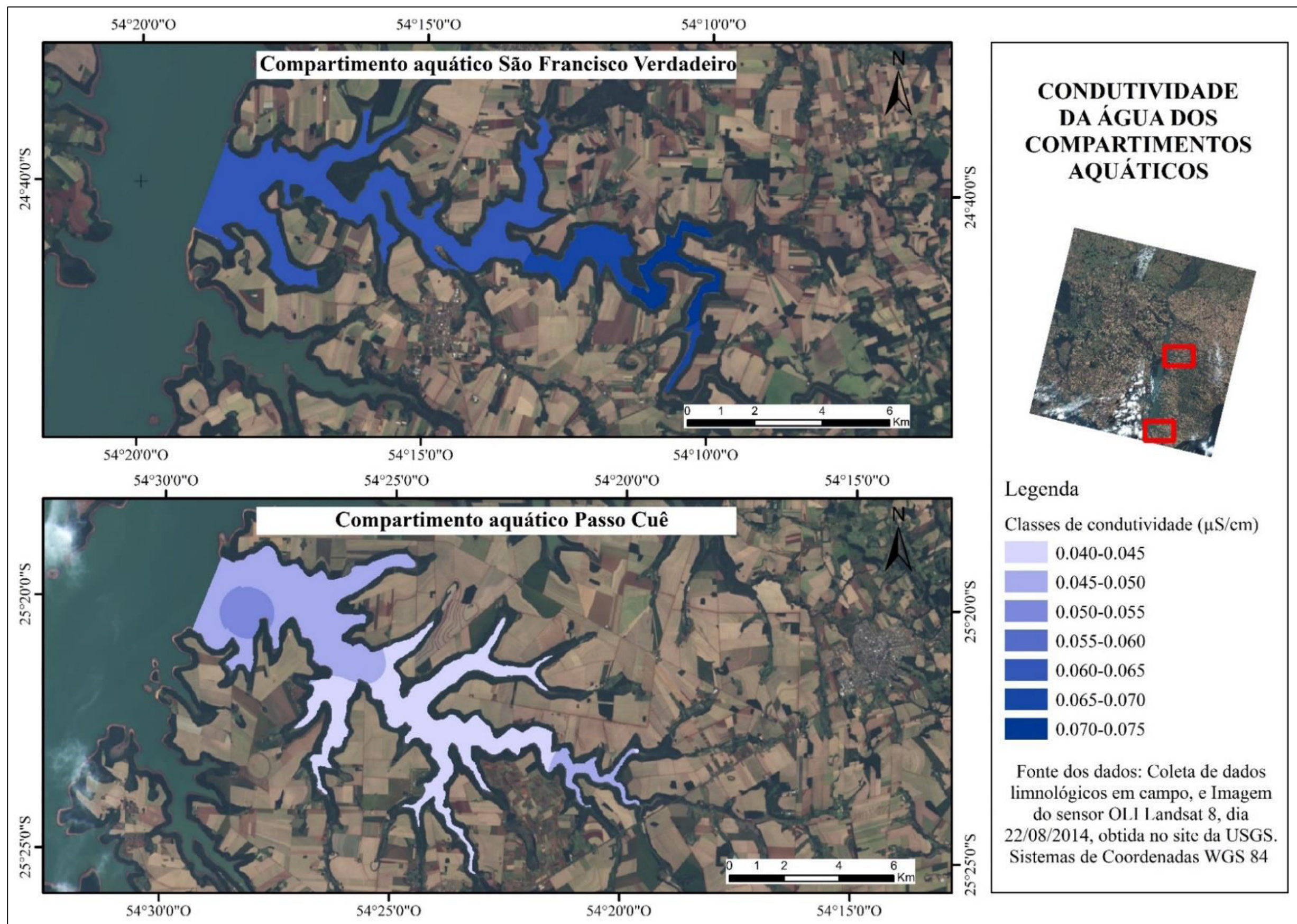
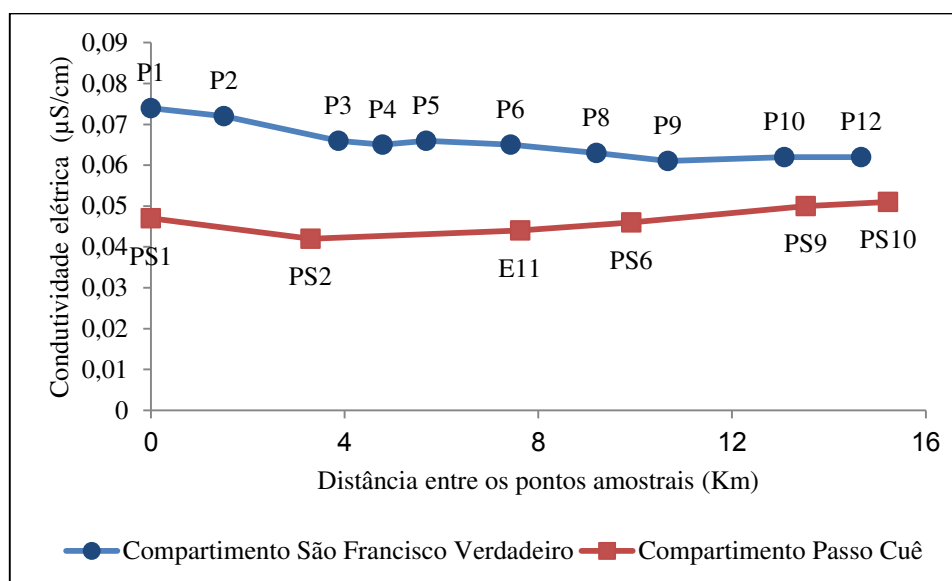


Figura 18- Condutividade elétrica no canal principal dos compartimentos aquáticos Passo Cuê e São Francisco Verdadeiro.



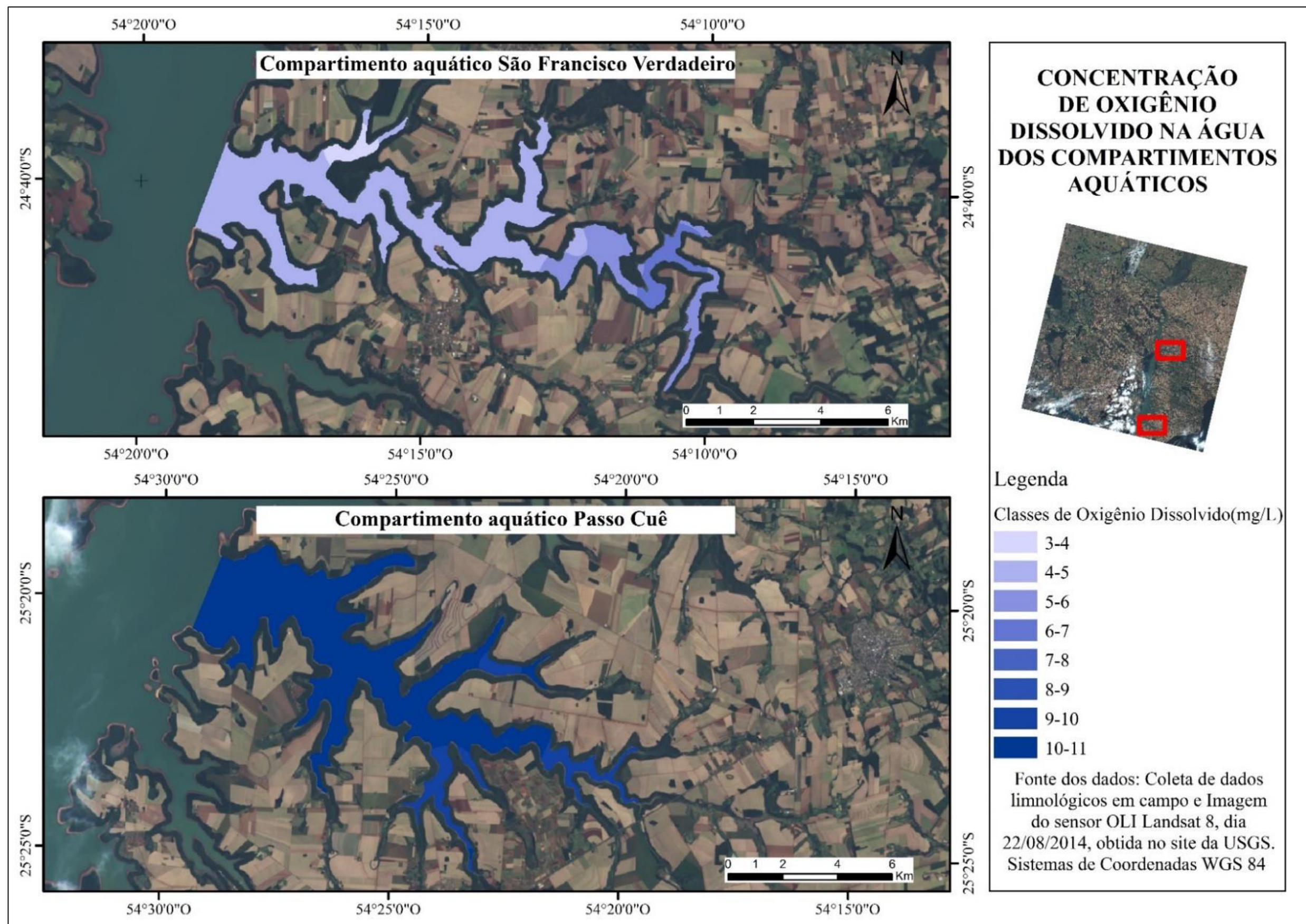
A condutividade elétrica do compartimento aquático Passo Cuê não apresenta comportamento semelhante ao do compartimento aquático São Francisco Verdadeiro. No compartimento aquático localizado ao sul do reservatório, verifica-se a diminuição nos valores de condutividade elétrica a medida que afasta-se da zona fluvial e aproxima-se da zona de transição, fato que se deve ao aporte de nutrientes pelo tributário principal do compartimento aquático. Porém, a partir da zona de transição em direção a zona lacustre os valores de condutividade elétrica aumentam gradativamente, o ponto amostral de máximo valor de condutividade elétrica PS10 esta localizado na zona lacustre.

A discrepância nos valores de condutividade elétrica no canal principal dos dois compartimentos aquáticos diminui gradativamente a medida que afasta-se da zona fluvial e aproxima-se da zona lacustre, que ocorre devido a proximidade do corpo do reservatório.

6.1.3 Oxigênio dissolvido

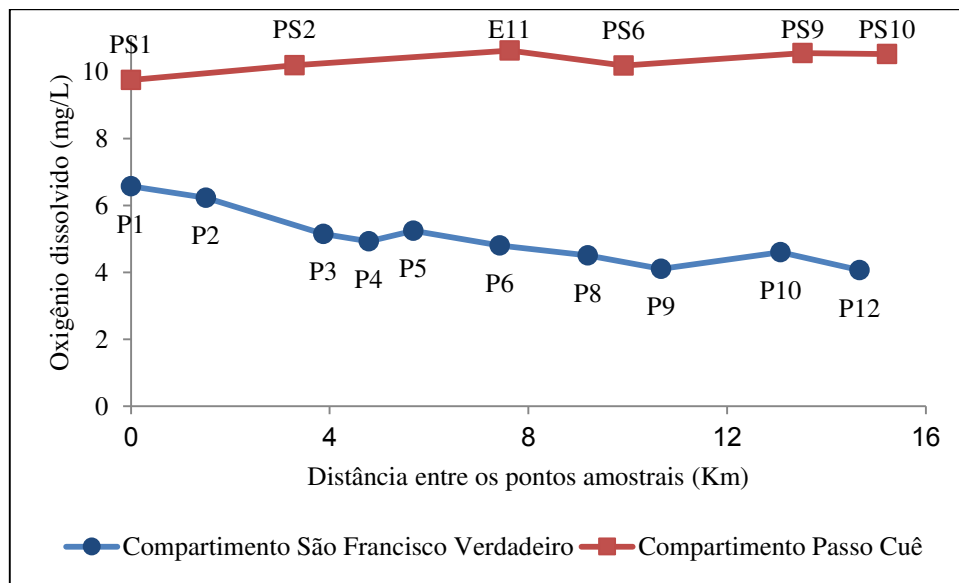
Em virtude de influenciar em grande parte dos processos químicos e biológicos que ocorrem nos corpos d'água, o oxigênio dissolvido é um dos principais parâmetros utilizados no monitoramento dos corpos d'água (INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ, 2009; ESTEVES, 1998). As concentrações de oxigênio dissolvido dos dois compartimentos aquáticos variam de 3,70 a 10,64 mg/L (Figura 19). O compartimento aquático Passo Cuê apresenta as maiores concentrações da variável, entre 9,68 a 10,64 mg/L, enquanto, o compartimento aquático São Francisco Verdadeiro possui concentrações que variam de 3,70 a 6,58 mg/L.

Figura 19 – Espacialização da concentração de oxigênio dissolvido dos compartimentos aquáticos.



No compartimento aquático Passo Cuê os valores de oxigênio dissolvido são homogêneos (Figura 20), o coeficiente de variância nos pontos amostrais de 0,02 explica a baixa heterogeneidade dos dados obtidos neste compartimento aquático. Em decorrência da elevada homogeneidade, somente duas das oito classes, definidas para representar a variação do oxigênio dissolvido nos compartimentos aquáticos englobam áreas do compartimento aquático Passo Cuê. A concentração média de oxigênio dissolvido para o compartimento aquático São Francisco Verdadeiro, 4,75 mg/L é inferior a média do compartimento aquático Passo Cuê, 10,20 mg/L, porém, o coeficiente de variância dos pontos amostrais de 0,16, é superior ao compartimento aquático Passo Cuê, e explica a maior variação da variável limnológica no compartimento aquático São Francisco Verdadeiro.

Figura 20- Concentração de oxigênio dissolvido no canal principal dos compartimentos aquáticos Passo Cuê e São Francisco Verdadeiro.



O compartimento aquático São Francisco Verdadeiro apresenta decréscimo nos valores de oxigênio dissolvido a medida que afastava-se na zona fluvial e aproxima-se da zona lacustre, a concentração máxima de 6,58 mg/L é identificada no ponto amostral P1 localizado próximo ao tributário principal do compartimento aquático, enquanto, o valor mínimo de 3,7 mg/L é identificado na zona lacustre, próximo ao corpo do reservatório. Conforme Pompêo (2004) a zona fluvial é geralmente bem oxigenada, embora a degradação de compostos orgânicos alóctones demande de oxigênio dissolvido. Na zona de transição em direção a zona lacustre, é possível identificar a baixa da concentração de oxigênio dissolvido no canal principal,

representada na Figura 19 pela classe de 4 a 5 mg/L, e que segundo o Instituto Ambiental do Paraná (2009) compromete o funcionamento das comunidades biológicas.

A discrepância nos valores de oxigênio dissolvido no canal principal dos dois compartimentos aquáticos aumenta gradativamente a medida que afasta-se da zona fluvial e aproxima-se da zona lacustre, ou seja, as concentrações da variável próximo ao corpo do reservatório são distintas para os dois compartimentos aquáticos.

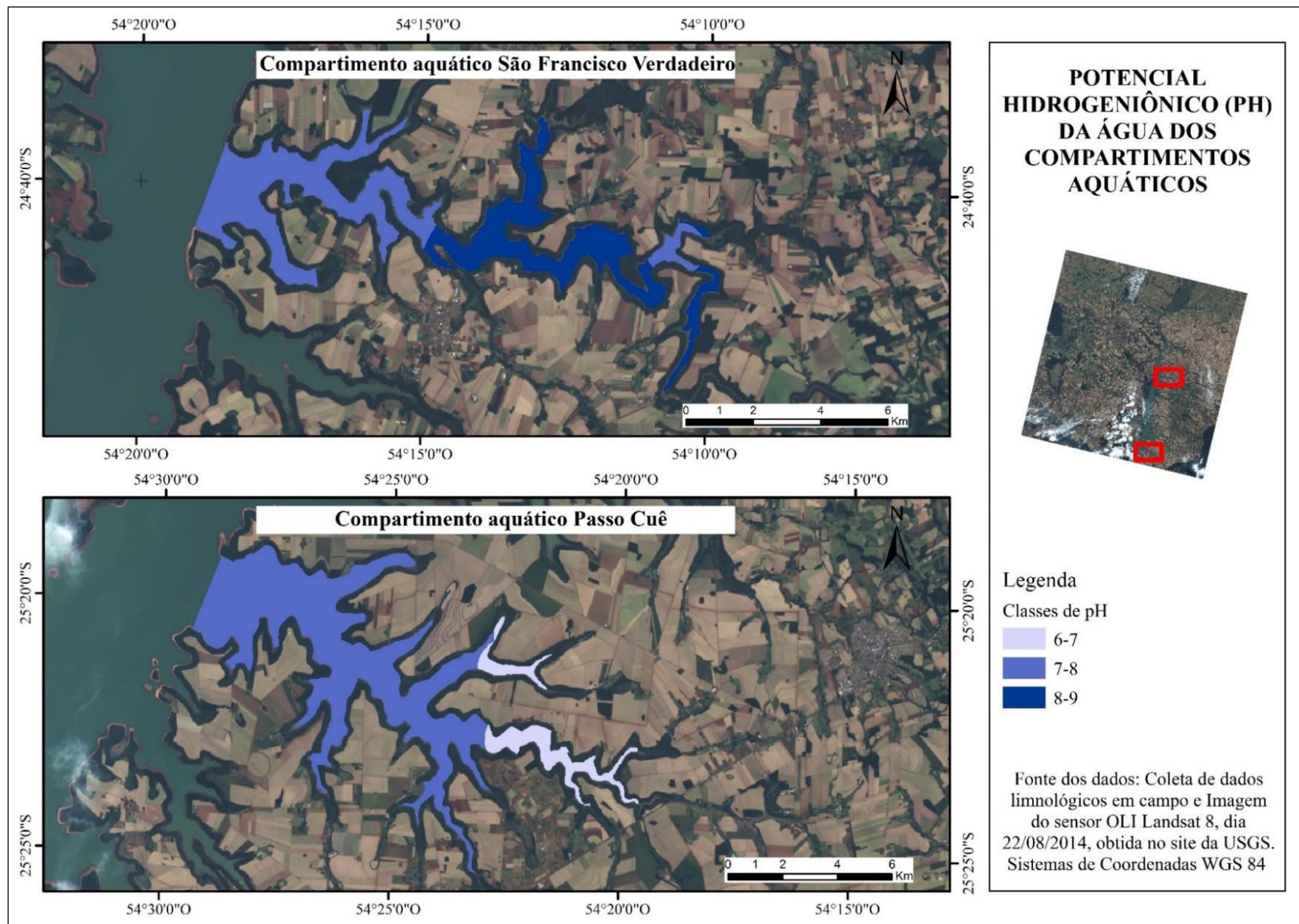
6.1.4 Potencial hidrogeniônico (pH)

O potencial hidrogeniônico está representado na Figura 21 pelo intervalo das classes entre 6 a 9. Valores de pH abrangidos pelo intervalo conforme a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2009) não restringem a colonização de organismos aquáticos. Os maiores valores de pH são identificados no compartimento aquático São Francisco Verdadeiro, a concentração média de pH para os 14 pontos amostrais é de 8,05, enquanto, o compartimento aquático Passo Cuê com valores inferiores de pH possui valor médio para os 12 pontos amostrais de 7,25 (Apêndice C).

Os baixos coeficientes de variação do pH, 0,04 para o compartimento aquático Passo Cuê e 0,19 para o compartimento aquático São Francisco Verdadeiro refletem na pequena variação dos valores de pH dos pontos amostrais no canal principal dos compartimentos aquáticos (Figura 22). O valor máximo de pH de 7,87 identificado na zona lacustre do compartimento aquático Passo Cuê é inferior ao valor máximo de pH de 8,74 identificado entre a zona fluvial e a zona de transição do compartimento aquático São Francisco Verdadeiro. Em relação ao valor mínimo, o pH de 6,8 é identificado na zona fluvial do compartimento aquático Passo Cuê, enquanto, o valor mínimo do compartimento aquático São Francisco Verdadeiro de 7,41, corresponde ao ponto amostral situado na zona lacustre.

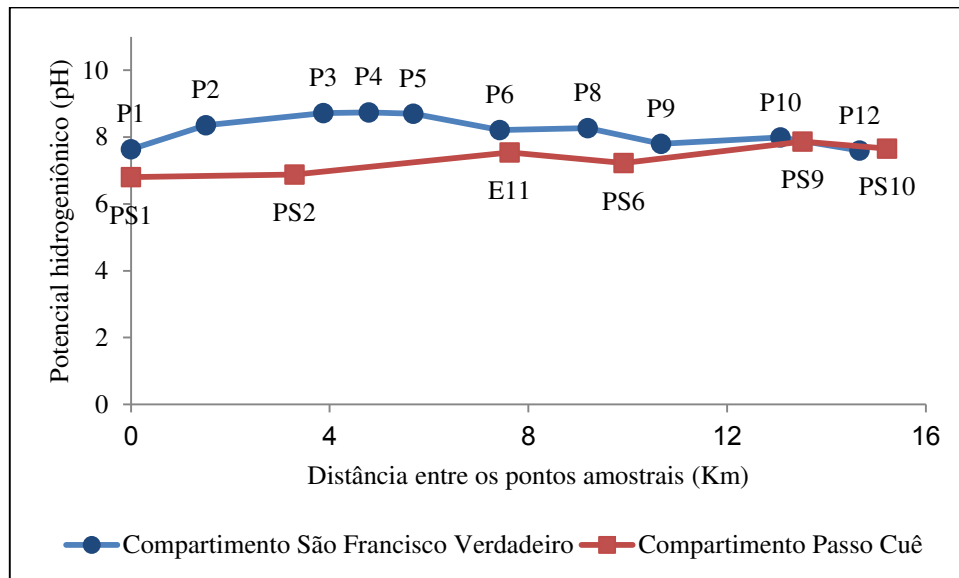
A classe de pH que predomina no compartimento aquático Passo Cuê é de 7 a 8, o restante das águas do compartimento aquático possuem pH entre 6 e 7. Conforme Esteves (1998) a maioria dos corpos d'água possuem valores de pH entre 6 e 8, podendo encontrar ambientes aquáticos mais alcalinos ou ácidos, e que apresentam comunidades vegetais e animais bastante específicas. A classe de pH entre 7 e 8 é também identificada em parte da zona fluvial e na zona lacustre do compartimento aquático São Francisco Verdadeiro, as demais áreas são abrangidas pela classe de pH de 8 a 9.

Figura 21 – Espacialização do potencial hidrogeniônico (pH) dos compartimentos aquáticos.



As maiores discrepâncias nos valores de pH são identificadas na zona fluvial dos dois compartimentos aquáticos. Nesta área do compartimento aquático Passo Cuê são identificados os menores valores de pH, enquanto, a zona fluvial do compartimento aquático São Francisco Verdadeiro apresenta os maiores valores de pH, que se estendem até a zona de transição. Na zona lacustre, próximo ao corpo do reservatório, os dois compartimentos aquáticos são englobados pela classe de intervalo de 7 a 8, o que indica a uniformização das águas dos compartimentos aquáticos e a do reservatório.

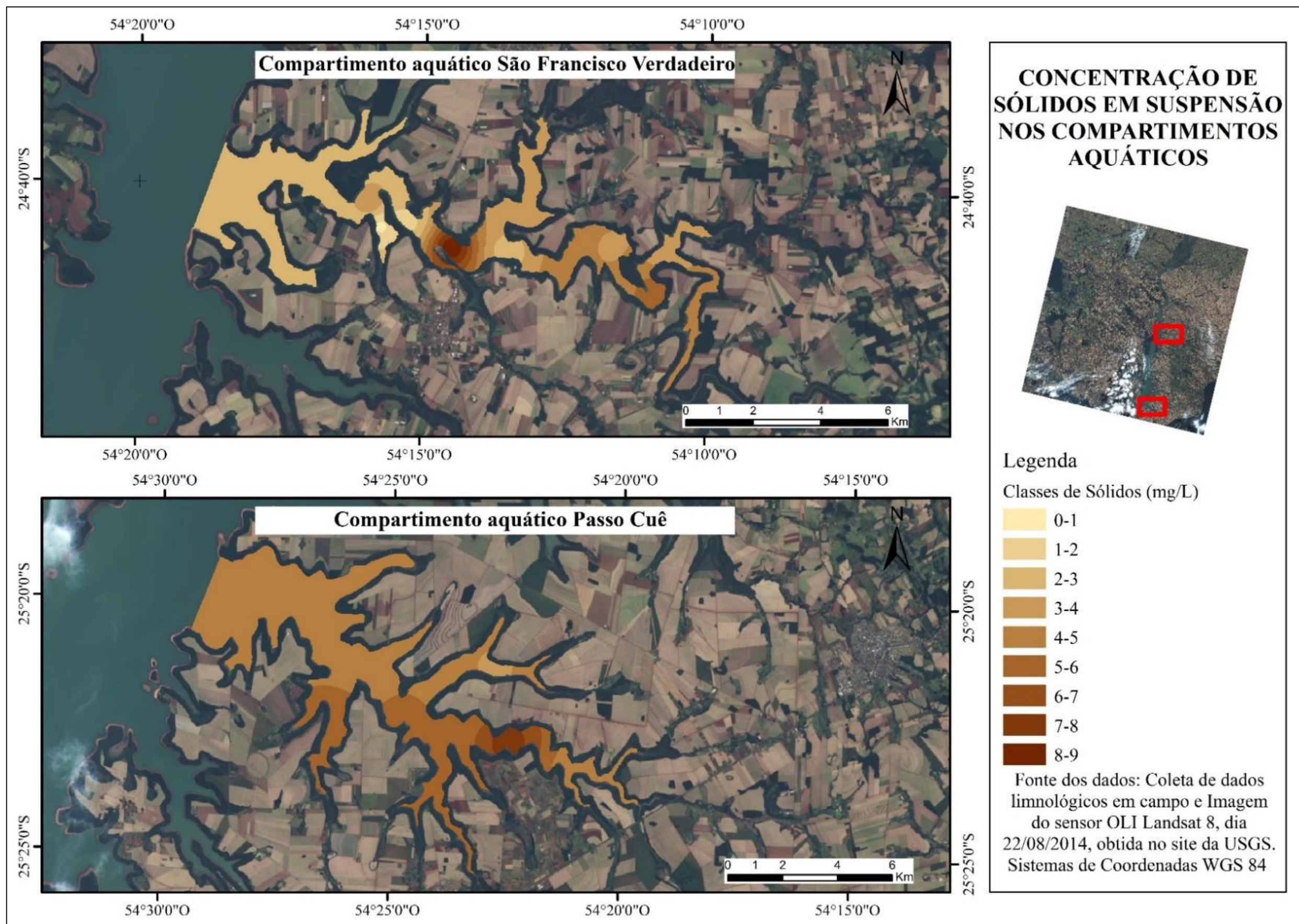
Figura 22 - Potencial hidrogeniônico (pH) no canal principal dos compartimentos aquáticos Passo Cuê e São Francisco Verdadeiro.



6.1.5 Sólidos em suspensão

Os valores de sólidos em suspensão comportam-se de maneira distinta nos dois compartimentos aquáticos. As maiores diferenças nos valores dos sólidos em suspensão são observadas no compartimento aquático São Francisco Verdadeiro (Figura 23), o coeficiente de variância dos pontos amostrais de 0,55 é considerado elevado comparado ao valor de 0,20 obtido no compartimento aquático Passo Cuê. Os valores de máxima e mínima concentração obtidos no compartimento aquático são 8,8 mg/L e 0,8 mg/L, respectivamente, e a concentração média de sólidos em suspensão de 3,52 mg/L (Apêndice C).

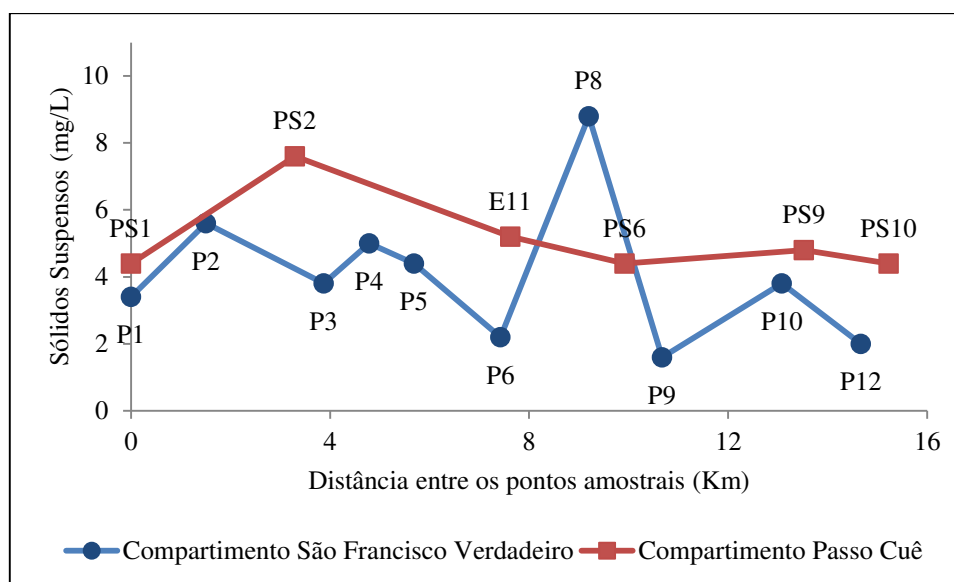
Figura 23 – Espacialização das concentrações de sólidos em suspensão dos compartimentos aquáticos.



O compartimento aquático Passo Cuê, por sua vez, possui concentração de sólidos em suspensão mínima de 3,6 mg/L, e máxima de 7,6 mg/L. A maior concentração é identificada no ponto amostral PS2 localizado na zona fluvial, a zona de transição do compartimento aquático é representada pelo intervalo das classes de 4 a 6 mg/L, exceto para o ponto amostral PS3, que possui concentração de 3,6 mg/L. As demais áreas do compartimento aquático, isto inclui a zona lacustre, apresentam concentrações de sólidos em suspensão na classe de 4 a 5 mg/L, classe esta, que abrange a concentração média de sólidos em suspensão do compartimento aquático, 4,8 mg/L.

No canal principal do compartimento aquático São Francisco Verdadeiro os pontos amostrais apresentam concentração de sólidos em suspensão inferior ao compartimento aquático Passo Cuê, exceto no ponto amostral P8, que destaca-se em relação aos demais por representar a maior concentração de sólidos em suspensão dos dois compartimentos aquáticos (Figura 24). O ponto amostral PS8 ressaltado pelas Figuras 23 e 24 localiza-se próximo a uma ponte, o que pode ter influenciado no aumento da concentração de sólidos em suspensão do ponto amostral.

Figura 24 – Concentração de sólidos em suspensão no canal principal dos compartimentos aquáticos Passo Cuê e São Francisco Verdadeiro.



6.1.6 Transparência da água

A espacialização da transparência da água nos dois compartimentos aquáticos está representada na Figura 25. Os valores de transparência da água do compartimento aquático

Passo Cuê variam de 0,5 a 1,3 metros, e possuem o coeficiente de variância de 0,19, valor idêntico ao coeficiente de variação dos pontos amostrais do compartimento aquático São Francisco Verdadeiro, que possui valores de transparência da água entre 0,6 e 1,1 metros. Por sua vez, o valor médio de transparência da água do compartimento aquático Passo Cuê, 0,96 metros, é superior ao valor médio de transparência da água do compartimento aquático São Francisco Verdadeiro, 0,85 metros (Apêndice C).

A transparência da água no canal principal do compartimento aquático Passo Cuê apresenta o seguinte comportamento, os pontos amostrais (PS1 e PS2) localizados na zona fluvial do compartimento aquático possuem os menores valores de transparência da água. A medida que afastam-se da zona fluvial e aproximam-se da zona de transição, torna-se evidente o acréscimo nos valores de transparência da água dos pontos amostrais (E11 e PS6). Os pontos amostrais localizados na zona lacustre, denominados de P9 e P10 apresentam valores de transparência da água de 0,9 metros, o que sugere a uniformização das águas do compartimento aquático e as do reservatório nesta área do compartimento aquático (Figura 26).

Wachholz (2007) também identifica maiores valores de transparência da água na zona de transição do reservatório Rodolfo Costa e Silva localizado no sul do Brasil, e que conforme o autor se deve a deposição da matéria orgânica e inorgânica nas reentrâncias, próximo as nascentes, local onde são observadas os menores valores de transparência dos corpos d'água represados.

Os valores de transparência da água do canal principal do compartimento aquático São Francisco Verdadeiro não possuem comportamento similar ao identificado no compartimento aquático Passo Cuê. É evidente a variação da transparência da água no canal principal do compartimento aquático, principalmente na zona de transição. Os pontos amostrais localizados no canal principal (P1, P2, P3, P4, P5, P6, P8, P9, P10, P12) apresentam variação da transparência da água de 0,6 a 1 metro, valor similar a variação da transparência da água identificada para os 14 pontos amostrais do compartimento aquático, 0,6 a 1,1 metros.

O maior número dos pontos amostrais e a menor largura do canal podem ter influenciado na variação da transparência da água do compartimento aquático São Francisco Verdadeiro. O ponto amostral localizado próximo ao tributário principal do compartimento aquático, denominado de P1 apresenta valor de transparência da água de 0,7 metros. Na zona de transição, os valores de transparência da água comportam-se de forma irregular, valores de transparência entre 0,65 a 0,95 metros são obtidos com o Disco de Secchi, de maneira que quatro das oito classes definidas para representar ao comportamento da variável são identificadas nesta área.

Figura 25 – Espacialização da variação da transparência da água dos compartimentos aquáticos.

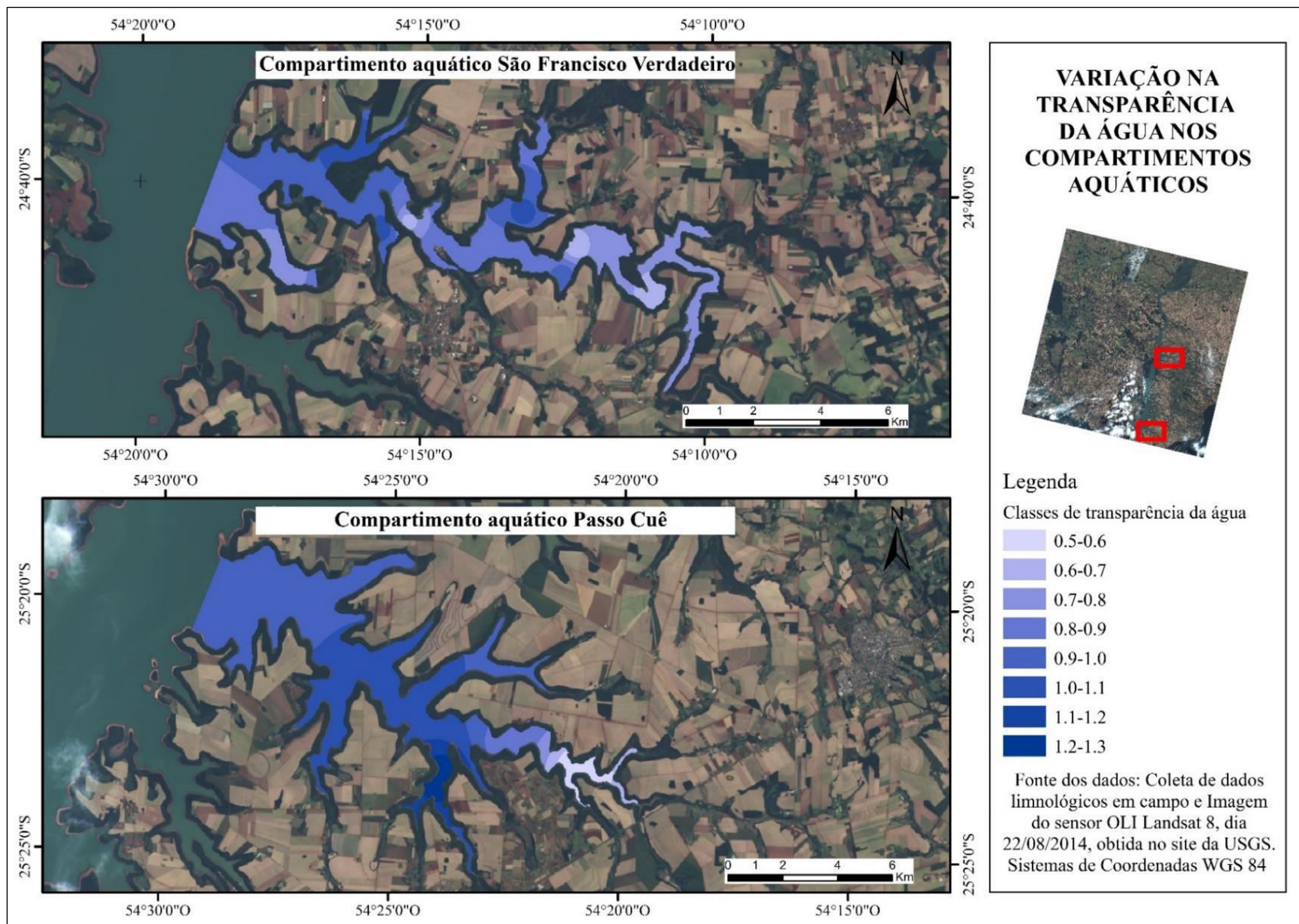
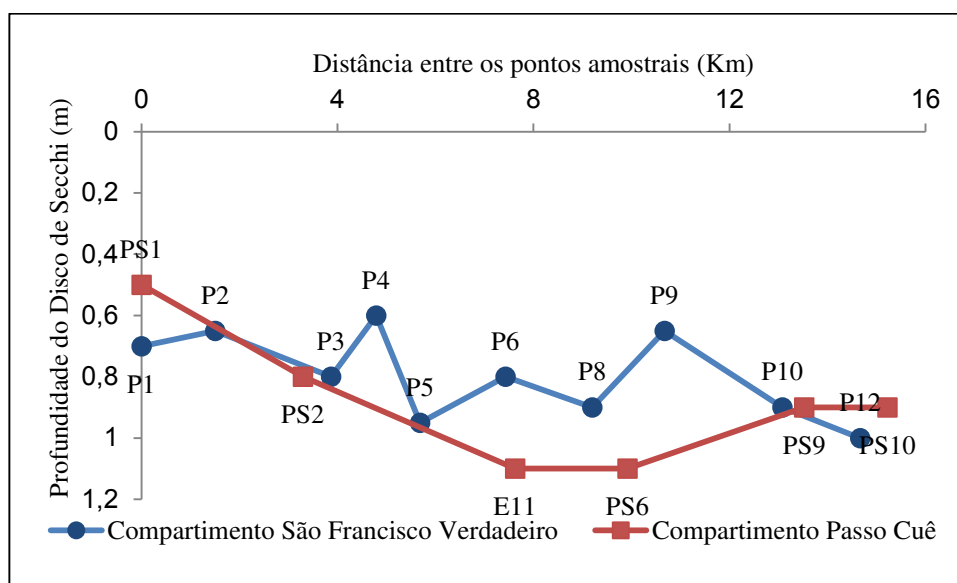


Figura 26 – Variação da transparência da água no canal principal dos compartimentos aquáticos Passo Cuê e São Francisco Verdadeiro.



Na zona lacustre, os valores de transparência da água do compartimento aquático São Francisco Verdadeiro variam de 0,9 a 1 metro, silimar ao valor de transparência da água identificado para a mesma área do compartimento aquático Passo Cuê, 0,9 metros. Desta forma, pode-se dizer que os dois compartimentos aquáticos possuem valores de transparência da água similares na zona lacustre. Outros parâmetros referentes a coloração e a turvação da água, além dos registros fotográficos dos pontos amostrais dos compartimentos aquáticos da data de coleta dos dados encontram-se detalhados nos Anexos 1 e 2.

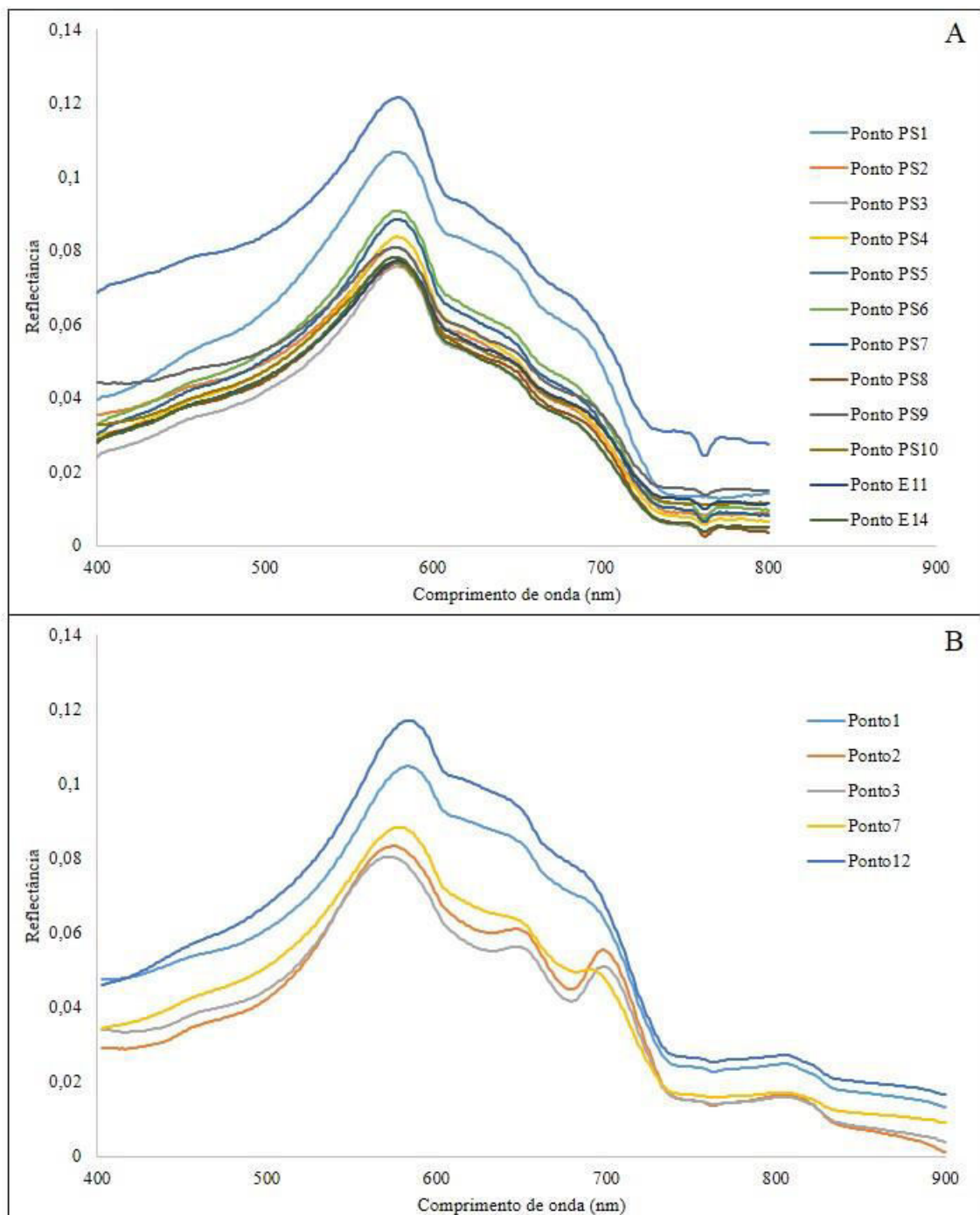
6.2 Análise dos espectros de reflectância bidirecional dos compartimentos aquáticos

O comportamento espectral dos corpos d'água obtidos por sensoriamento remoto fornece indícios da presença ou ausência dos componentes opticamente ativos na água. Conforme Kirk (2000) e Novo (2001) os componentes opticamente ativos que influenciam no comportamento espectral da água são os organismos vivos, representado pelo pigmento de clorofila *a*, os sólidos em suspensão e as substâncias orgânicas dissolvidas, sendo a última categoria não contemplada no estudo. A Figura 27 ilustra os espectros de reflectância bidirecional obtidos *in situ* com uso de espectrorradiômetro nos compartimentos aquáticos Passo Cuê e São Francisco Verdadeiro.

No compartimento aquático localizado ao norte do reservatório Itaipu não foi possível coletar os dados espectrais dos quatorze pontos amostrais devido às condições atmosféricas não

serem as ideais, desta forma, somente são coletados os espectros de reflectância bidirecional de 5 pontos amostrais do compartimento aquático São Francisco Verdadeiro. A fim de identificar as feições espectrais de absorção e espalhamento e relacioná-las com os constituintes opticamente ativos da água realizou-se a análise simultânea dos dados espectrais *in situ* e os limnológicos.

Figura 27 - Espectros de reflectância bidirecional obtidos *in situ* (A) compartimento aquático Passo Cuê e (B) compartimento aquático São Francisco Verdadeiro, reservatório Itaipu.



O comportamento espectral dos pontos amostrais distribuídos no compartimento aquático Passo Cuê permite separá-los em dois grupos (Figura 27A). O primeiro grupo abrange os pontos amostrais PS1 e PS5, que apresentam curvas espectrais de maior reflectância e albedo máximo entre 0,10 e 0,13. O segundo grupo de pontos amostrais, com valores de reflectância inferior, possuem valor máximo de albedo entre 0,70 e 0,10, e abrangem os pontos amostrais PS2, PS3, PS4, PS6, PS7, PS8, PS9, PS10, E11 e E14.

Os pontos amostrais do primeiro grupo (PS1 e PS5) apresentam valores de clorofila *a* próximos ao valor médio do compartimento aquático (Apêndice C). A região de maior absorção da energia eletromagnética dos pontos amostrais são os comprimentos de onda do azul e do vermelho, enquanto, o comprimento de onda do verde compreende a região de maior reflectância. Em decorrência das concentrações de clorofila *a* serem bastante inferiores, a feição típica de absorção do pigmento de clorofila *a* em 675 nm ocorre de maneira sutil.

No que se refere as concentrações de sólidos em suspensão, os pontos amostrais PS1 e PS5 apresentam valores inferiores a média do compartimento aquático Passo Cuê, 4,8 mg/L. As curvas espectrais dos pontos amostrais não apresentam feições espectrais decorrentes da presença de sólidos em suspensão, na qual ocorre a ampliação da região espectral de máxima reflectância da água nos comprimentos de onda entre 500 a 700 nm, o aumento da reflectância na região do infravermelho e o deslocamento do pico de máxima reflectância para comprimentos de onda maiores a medida que aumenta a concentração de sólidos em suspensão (NOVO, 2001).

O segundo grupo de pontos amostrais do compartimento aquático Passo Cuê apresenta comportamento similar ao identificado no primeiro grupo no que diz respeito as regiões de máxima e mínima reflectância. Este grupo abrange os pontos amostrais PS8 e PS10 que possuem as maiores concentrações de clorofila *a*, 3,11 mg/m³, além do ponto amostral PS9 que dispõe do menor valor de clorofila *a* do compartimento aquático, 0,44 mg/m³. As baixas concentrações de clorofila *a* são os responsáveis pelas feições de absorção do pigmento se manifestar de forma discreta nos comprimentos de onda de 435 nm e 675 nm (LONDE, NOVO e CALIJURI, 2011).

Os pontos amostrais PS2, PS7, E11 e E14 identificados com as maiores concentrações de sólidos em suspensão e integrantes do segundo grupo apresentam curvas espectrais de baixa reflectância. A concentração máxima de sólidos em suspensão no compartimento aquático não ultrapassa o valor de 7,60 mg/L, o que faz com que a variável exerça pouca influência na resposta espectral da água devido as concentrações serem bastante inferiores no compartimento aquático Passo Cuê.

O comportamento espectral dos pontos amostrais do compartimento aquático São Francisco Verdadeiro permite separá-los em três grupos (Figura 27B). O primeiro grupo abrange os pontos amostrais que apresentam os maiores valores de reflectância no espectro eletromagnético (P1 e P12), o segundo grupo amostral é formado por um único ponto amostral, denominado P7, e o terceiro grupo amostral é representado pelos pontos amostrais P2 e P3, que possuem os menores valores de reflectância nos comprimentos de onda do espectro eletromagnético.

Os pontos amostrais P1 e P12 possuem em relação aos demais valores de reflectância maior na região do azul devido às baixas concentrações de clorofila *a* e sólidos em suspensão. As concentrações dos constituintes opticamente ativos destes pontos amostrais inferiores às concentrações médias do compartimento aquático São Francisco Verdadeiro influenciam na maior reflectância do grupo amostral. Conforme Novo (2001) o comportamento espectral da água pura, ou seja, quando não há presença de constituintes opticamente ativos é caracterizado pela maior reflectância na região do azul.

O ponto amostral P7 representante do segundo grupo amostral apresenta valores de clorofila *a* e sólidos em suspensão próximos aos valores médios identificados para o compartimento aquático. A curva espectral do ponto amostral indica valores de reflectância inferiores ao primeiro grupo amostral. No comprimento de onda de 675 nm ocorre de forma discreta a feição de absorção pelo pigmento de clorofila *a*, a concentração da variável é superior a identificada nos pontos amostrais P1 e P12.

O terceiro grupo amostral do compartimento aquático São Francisco Verdadeiro é representado pelos pontos amostrais P2 e P3, que apresentam concentrações de sólidos em suspensão acima da média e de clorofila *a* superiores aos demais pontos amostrais. A maior concentração de clorofila *a* nestes dois pontos amostrais resultam em feições espectrais nítidas de absorção do componente opticamente ativo no comprimento de onda de 675 nm (GITELSON, 1992; NOVO, 2001; JENSEN, 2000). O pigmento de clorofila é responsável pela elaboração da fotossíntese, para isto, absorve parte da radiação eletromagnética, determinados comprimentos de onda permitem identificar a presença do pigmento, como ocorre com a clorofila *a* na banda do vermelho, em 675 nm e, no comprimento de onda do azul, em 435 nm (NOVO, 2001).

No comprimento de onda do azul, a clorofila *a* teve participação na formação da discreta feição de absorção em 435 nm. Além disto, pode-se observar que o aumento da concentração de clorofila *a* acarreta a diminuição da reflectância da água do compartimento aquático São Francisco Verdadeiro. No que se refere aos sólidos em suspensão, a baixa concentração da

variável no compartimento aquático São Francisco Verdadeiro que não ultrapassa 8,8 mg/L pouco influência na resposta espectral da água ou encontra-se obliterado devido a absorção da radiação eletromagnética pelo pigmento de clorofila *a*.

Ao analisar comparativamente os espectros de reflectância bidirecional dos dois compartimentos aquáticos é possível observar a baixa variação do pico de máxima reflectância. Os compartimentos aquáticos possuem albedo máximo próximo a 0,12, na região verde do visível e que indica a presença do pigmento de clorofila *a*. As concentrações superiores de clorofila *a* identificadas no compartimento aquático São Francisco Verdadeiro encontram-se evidenciadas pelas feições típicas de absorção do constituinte opticamente ativo, enquanto, concentrações menores de clorofila *a* identificadas no compartimento aquático Passo Cuê revelam feições discretas de absorção pelo pigmento.

As baixas concentrações de sólidos em suspensão dos dois compartimentos aquáticos não possibilitam a formação de feições espectrais típicas do componente opticamente ativo. Além disto, a presença do pigmento de clorofila *a* pode obliterar as feições espectrais dos sólidos em suspensão devido a absorção de grande parte da energia eletromagnética na região do vermelho. A fim de melhor identificar a influência dos constituintes opticamente ativos na resposta espectral da água optou-se por empregar a técnica de análise derivativa.

6.2.1 Primeira e segunda derivadas

É de consenso por parte dos estudiosos de sensoriamento remoto da água a utilização de técnicas de análises de espectros com o intuito de realçar feições espectrais (ENNES, 2008; HAN e RUDQUIST, 2007; RUDORFF *et al.* 2007; TRENTIN, 2009). A derivada permite identificar sutis variações na resposta espectral de um alvo que não poderiam ser percebidas caso a análise fosse limitada aos espectros de reflectância originais. Desta forma, pequenas variações de reflectância no espectro original são realçadas com o uso da técnica.

As Figuras 28 e 29 representam os gráficos de primeira e segunda derivadas dos compartimentos aquáticos Passo Cuê e São Francisco Verdadeiro, respectivamente. A identificação das variações de reflectância dos espectros originais ocorre por meio do comportamento das inflexões nos gráficos de primeira e segunda derivada. O aumento da reflectância da água associa-se a inflexões em que o gráfico da derivada se acentua positivamente, enquanto, inflexões em direção a valores negativos está associado à diminuição nos valores de reflectância.

Figura 28 – (A) Espectros de refletância bidirecional obtidos *in situ*, (B) Primeira derivada e (C) Segunda derivada do compartimento aquático Passo Cuê, reservatório Itaipu.

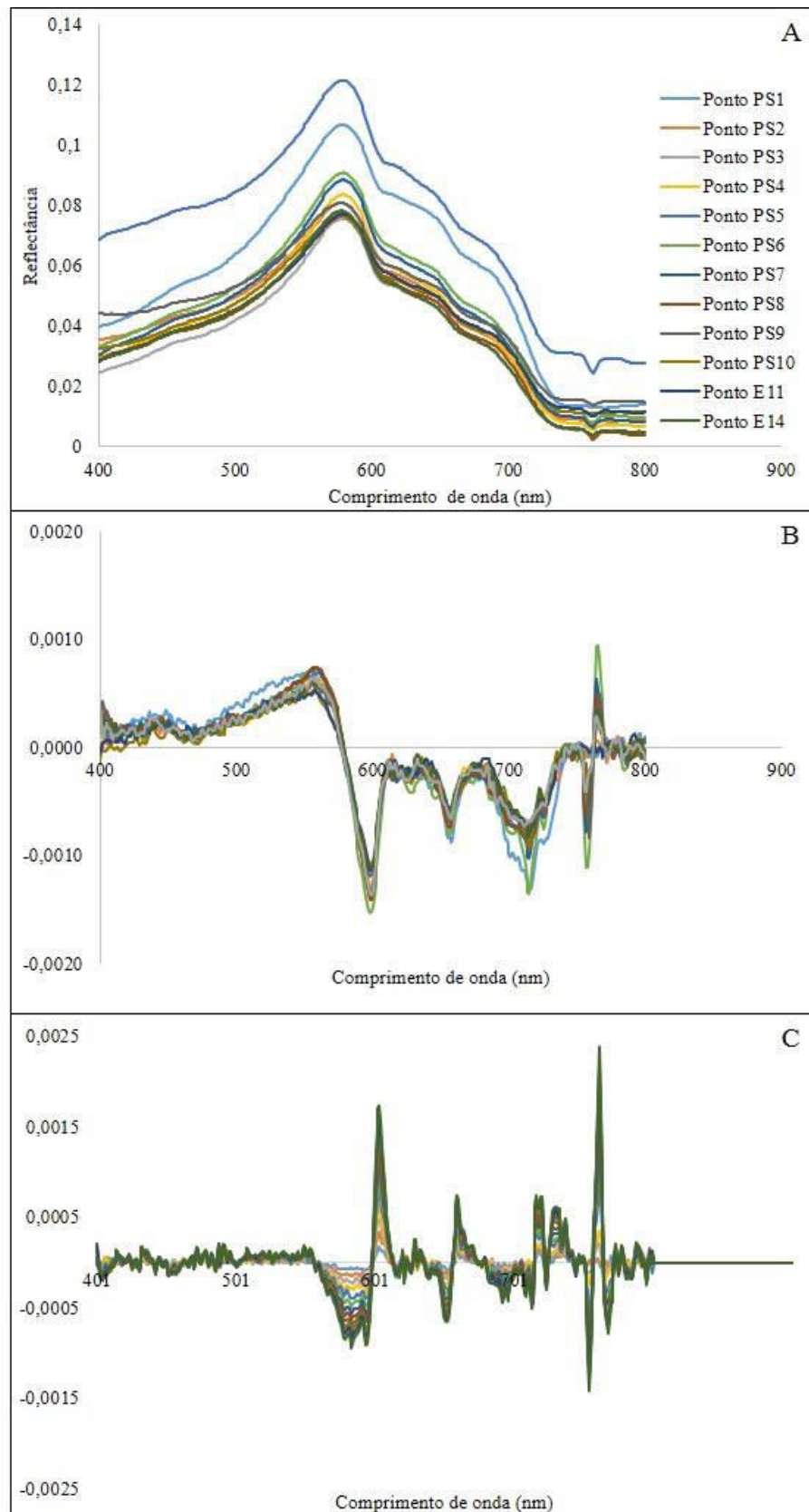
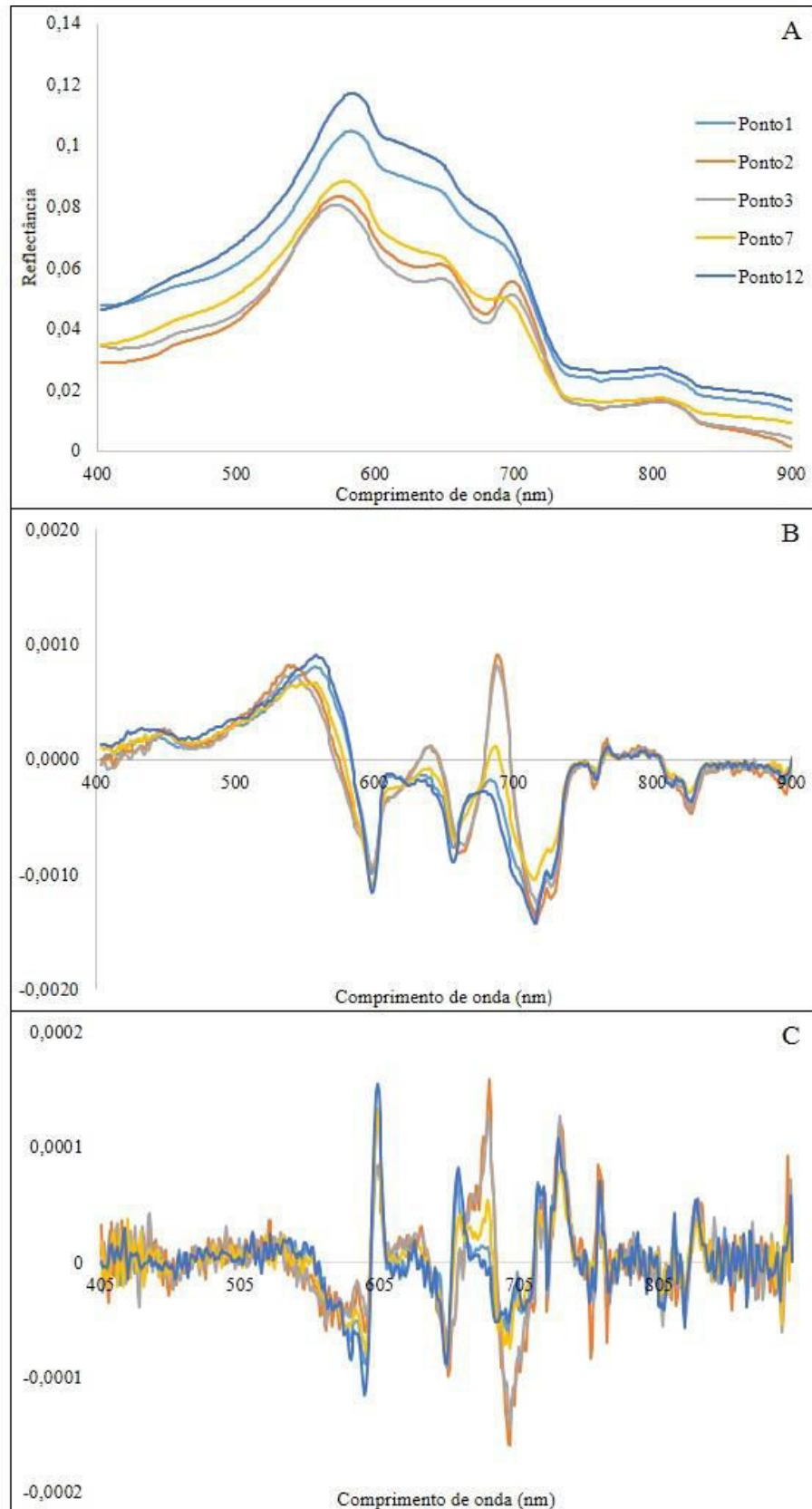


Figura 29 – (A) Espectros de reflectância bidirecional obtidos *in situ*, (B) Primeira derivada e (C) Segunda derivada do compartimento aquático São Francisco Verdadeiro, reservatório Itaipu.



Para os comprimentos de onda entre 400 a 500 nm e que abrangem a região do azul, a primeira derivada possui comportamento similar nos dois compartimentos aquáticos. Os valores próximos a zero indicam baixa variação da reflectância resultante da primeira derivada nos primeiros comprimentos de onda do visível. No que diz respeito a segunda derivada, esta permite a identificação da típica feição de absorção de clorofila *a* em 435 nm no compartimento aquático São Francisco Verdadeiro.

No entanto, se a região do azul apresenta comportamento similar e sem a ocorrência de variações, os comprimentos de onda do verde e do vermelho são as regiões onde ocorrem as maiores variações resultantes da primeira derivada. Os picos de máxima reflectância da água dos compartimentos aquáticos encontram-se evidenciados nas figuras 28B e 29B, pela existência da inflexão positiva seguida por uma inflexão negativa próximo a 570 nm. O pico de máxima reflectância da água na região do verde ocorre em corpos d'água com pigmentos de clorofila *a* devido a menor absorção da luz verde pelas algas (GITELSON, 1992).

No comprimento de onda de 640 nm resultante da aplicação da primeira derivada é possível identificar no compartimento aquático São Francisco Verdadeiro um ponto de inflexão dos pontos amostrais (P2 e P3) que apresentam as maiores concentrações de clorofila *a* do compartimento aquático. Conforme Gitelson (1992) este pequeno ponto de inflexão não evidenciado no gráfico da primeira derivada do compartimento aquático Passo Cuê, ocorre devido a presença de pigmentos acessórios. A feição de absorção típica do pigmento de clorofila *a* em 675 nm encontra-se ressaltada nos gráficos da primeira e segunda derivadas dos dois compartimentos aquáticos, porém, mais proeminente no compartimento aquático São Francisco Verdadeiro.

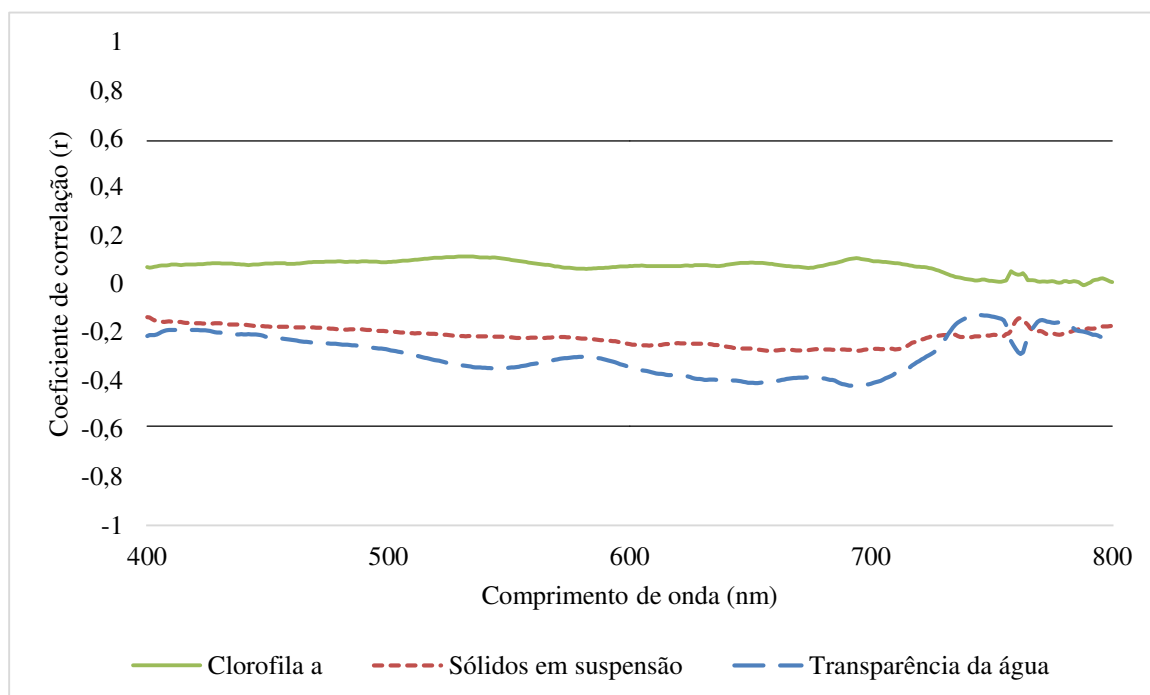
O pico de reflectância em 700 nm na região do infravermelho ressaltado pelo gráfico da segunda derivada no compartimento aquático São Francisco Verdadeiro ocorre em virtude da presença do pigmento de clorofila. Os pontos amostrais P2 e P3 com as maiores concentrações de clorofila *a* do compartimento aquático São Francisco Verdadeiro possuem inflexões positivas de maior valor quando comparado aos pontos amostrais do primeiro e segundo grupos (P1, P7 e P12) que apresentam concentrações inferiores de clorofila *a*. De acordo com Gitelson (1992) e Jensen (2009) a elevação do pico pode ser utilizada para estimar a concentração do constituinte opticamente ativo na água.

No compartimento aquático Passo Cuê as concentrações inferiores do pigmento de clorofila *a* não propiciam a formação do pico de reflectância resultante da primeira derivada em 700 nm.

Em virtude do pequeno número de pontos amostrais coletados no compartimento aquático São Francisco Verdadeiro e da ausência da imagem orbital do satélite *Landsat 8* da data do trabalho de campo, a análise estatística dos dados é restrita aos dados do compartimento aquático Passo Cuê. A figura 30 representa as correlações obtidos para os valores de reflectância na faixa espectral de 400 a 800 nm e as variáveis limnológicas do compartimento aquático Passo Cuê. Os constituintes opticamente ativos e a transparência da água apresentam valores não significativos de correlação ao utilizar o nível de significância de 5%, e que podem ser justificados pelas baixas concentrações das variáveis limnológicas no compartimento aquático Passo Cuê.

Ennes, Galo e Tachibana (2009) também obtiveram baixos valores de correlação entre os dados hiperespectrais e limnológicos, exceto para a variável pigmentos totais, o que segundo os autores deve-se às baixas concentrações dos constituintes opticamente ativos no reservatório Itupararanga, SP utilizado para o abastecimento de água. A concentração de pigmentos totais dos 13 pontos amostrais coletados neste reservatório não ultrapassa 7,86 $\mu\text{g/L}$, enquanto, a variável sólidos em suspensão possui valor máximo de 0,805 mg/L.

Figura 30 – Correlação entre os valores de reflectância e variáveis limnológicas em função do comprimento de onda no compartimento aquático Passo Cuê, reservatório Itaipu.

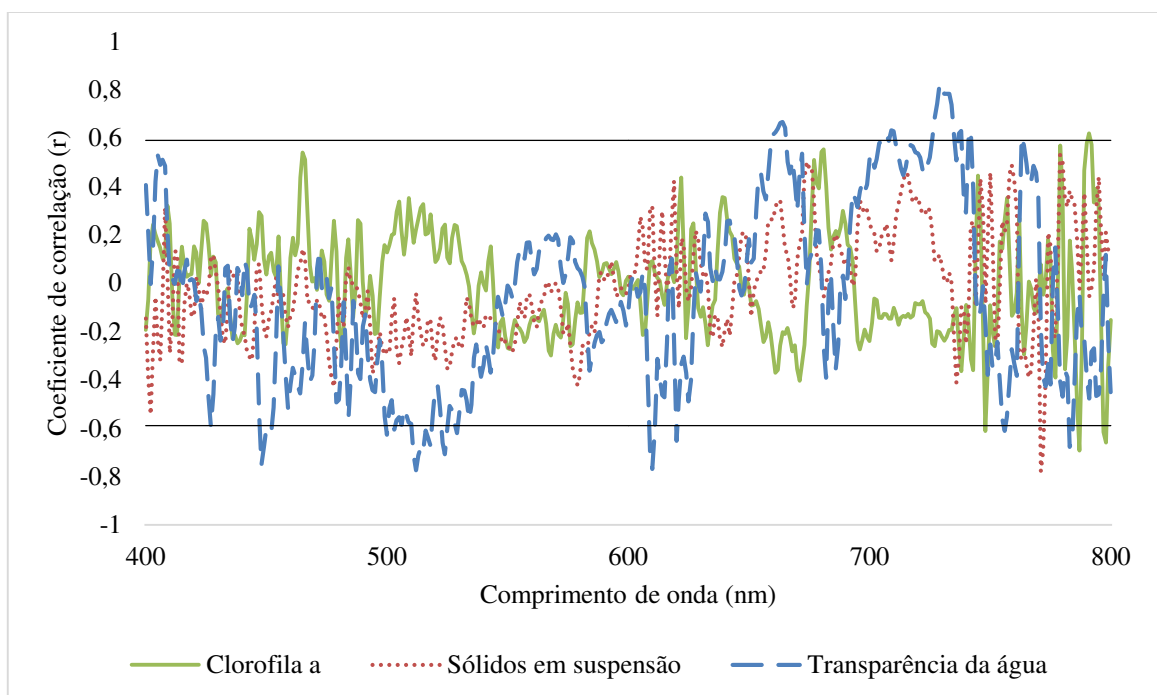


Além disto, observa-se que a clorofila *a* e a transparência da água são inversamente correlacionadas no compartimento aquático Passo Cuê, quanto maior a concentração do constituinte opticamente ativo menor é a transparência da água.

Os constituintes opticamente ativos também tiveram sua correlação avaliada com os espectros resultantes da aplicação da análise derivativa (Figura 31). A maior correlação da primeira derivada de reflectância e a clorofila *a* nos comprimentos de ondas iniciais ocorre em 466 nm ($r= 0,53$), porém, estatisticamente não significativa. Nos comprimentos de onda finais são identificados valores significativos de correlação em 748 nm ($r= -0,61$), 787 nm ($r= -0,69$), 791 nm ($r= 0,61$) e 798 nm ($r= -0,61$).

Bonanseia *et al.* (2015) ao correlacionar valores de clorofila *a* e as bandas do sensor TM e ETM+ do *Landsat* no reservatório Tercero na Argentina identificou o maior valor de correlação na comprimento de onda correspondente a banda do verde. As correlações da primeira derivada de reflectância com a concentração de sólidos em suspensão não são estatisticamente significantes. O melhor resultado obtido ocorre com a primeira derivada em 779 nm ($r= 0,53$), na faixa do infravermelho.

Figura 31 - Correlograma dos valores de reflectância resultantes da primeira derivada e variáveis limnológicas em função do comprimento de onda no compartimento aquático Passo Cuê, reservatório Itaipu.



6.3 Compartimentação espectral do compartimento aquático Passo Cuê

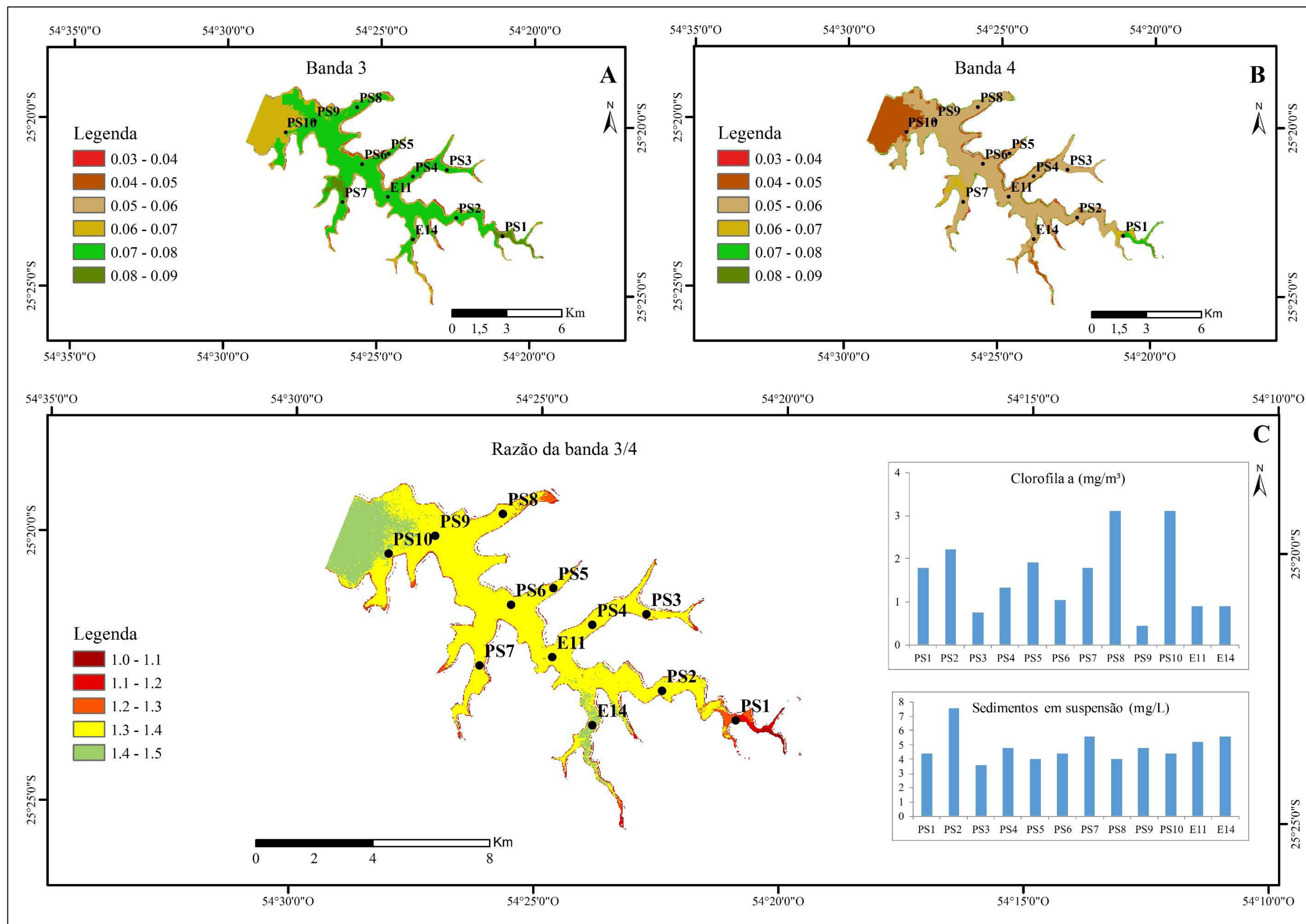
A fim de compreender o comportamento espectral da água no compartimento aquático Passo Cuê a nível orbital e os baixos valores de correlação resultantes da associação entre os constituintes opticamente ativos e os valores de reflectância coletados *in situ* optou-se por realizar a compartimentação espectral das bandas 3 e 4 do satélite *Landsat 8*, como também, a razão destas duas bandas.

A banda 3 do *Landsat 8* corresponde a região do verde no espectro eletromagnético e ao intervalo espectral entre 530 a 590 nm. O pigmento de clorofila *a* presente no corpo d'água possui máxima reflectância neste intervalo espectral, devido a menor absorção da energia eletromagnética. Contudo, os sólidos em suspensão apresentam nesta faixa espectral comportamento distinto, grande parte da energia eletromagnética incidente é absorvida e apenas uma pequena parcela retorna ao sensor em forma de sinal.

A banda 4 elegida para a compartimentação espectral corresponde a região do vermelho e ao intervalo espectral de 640 a 670 nm. A escolha da banda 4, deve-se ao comportamento espectral dos constituintes opticamente ativos neste intervalo espectral. O pigmento de clorofila *a* absorve radiação eletromagnética na região do vermelho, em virtude disto, apenas uma pequena parcela da energia incidente retorna ao sensor em forma de radiância, por sua vez, os sólidos em suspensão apresentam máximo valor de reflectância no intervalo espectral abrangido pela banda do vermelho.

Seis classes de igual intervalo foram definidas para a compartimentação espectral das bandas 3 e 4, ao considerar a amplitude espectral, ou seja, o valor mínimo e máximo de reflectância dos pixels identificados nas duas bandas (Figuras 32A e 32B). Ao aplicar a compartimentação espectral da banda 3 verificou-se o predomínio de 3 classes espectrais representantes dos maiores valores de reflectância, enquanto, a compartimentação espectral da banda 4 sugere o predomínio de 4 classes espectrais com valores inferiores de reflectância, sendo uma das áreas não abrangidas por nenhum ponto amostral. O predomínio das classes espectrais em determinadas áreas do compartimento aquático permite o estabelecimento de setores aquáticos quanto a variação espectral, a fim de associar os setores aquáticos com o comportamento limnológico dos pontos amostrais abrangidos por cada setor.

Figura 32 – Compartimentação espectral (A) banda 3, (B) banda 4 e (C) razão da banda 3/4 do compartimento aquático Passo Cuê.



Desta forma, três setores foram identificados no compartimento aquático Passo Cuê resultantes da compartimentação espectral das duas bandas. O primeiro setor, localizado na zona lacustre abrangeu o ponto amostral PS10, enquanto, o segundo setor predominou no compartimento aquático e abrangeu a maior parte dos pontos amostrais (PS2, PS3, PS4, PS5, PS6, PS7, PS8, PS9, E11 e E14), por fim, o último e terceiro setor abrangeu apenas um único ponto amostral localizado na zona fluvial do compartimento aquático, o ponto amostral PS1. Todos os setores aquáticos apresentaram comportamento espectral decorrente da presença do pigmento de clorofila *a*, em virtude dos valores de reflectância diminuem da região do verde para a região do vermelho.

O primeiro setor aquático representado pelo amostral PS10 apresentou a menor reflectância da água dos três setores aquáticos, os valores de reflectância dos pixels não ultrapassaram 0.07 na banda 3 e 0.05 para a banda 4. A concentração de clorofila *a* do ponto amostral PS10 foi uma das maiores concentrações identificadas no compartimento aquático, o que pode ter influenciado para os baixos valores de reflectância do setor. A concentração da variável sólidos em suspensão do ponto amostral manteve-se inferior a média, desta forma, pouco interfere na resposta espectral deste setor aquático.

O segundo setor aquático abrangeu a maior parte do compartimento aquático Passo Cuê, quando comparado aos demais setores que restringiram suas áreas de influência as zonas lacustre e fluvial. A classe espectral representativa do setor aquático na banda 3 foi a de 0.07 a 0.08, enquanto, a classe espectral com intervalo de 0.05 a 0.06 foi a representativa para a banda 4. É possível observar que este setor aquático possui valores de reflectância da água superiores aos identificados no primeiro setor aquático, além disto, verifica-se que diferentes concentrações de clorofila *a* e sólidos em suspensão foram agrupadas neste setor aquático.

Ao analisar os gráficos das concentrações das variáveis limnológicas dos pontos amostrais e a classe espectral a qual pertencem, é possível verificar que as concentrações de clorofila *a* pouco influenciam na resposta espectral da água, uma vez que, diferentes concentrações de clorofila *a* são abrangidas pela mesma classe espectral. Outro fato, é a ocorrência de concentrações de clorofila *a* similares, porém abrangidas por classes espectrais distintas. O ponto amostral PS8 identificado com uma das maiores concentrações de clorofila *a* possui valores de reflectância na banda 4 superior aos pontos amostrais com menores concentrações de clorofila *a*.

O mesmo ocorre com a variável sólidos em suspensão, a concentração média da variável no compartimento aquático é de 4,86 mg/L. As concentrações máxima e mínima, 7,60 mg/L e 3,60 mg/L, respectivamente, são abrangidas pela mesma classe espectral, 0.05 a 0.06. Ao passo

que, concentrações de sólidos em suspensão próximo ao valor médio do compartimento aquático são abrangidas por classes espectrais de maior reflectância.

O setor que apresentou as maiores classes de reflectância do compartimento aquático Passo Cuê foi o terceiro setor aquático. O ponto amostral PS1, representativo deste setor possui máximo valor de reflectância da banda 3 de 0.09 e para a banda 4 de 0.08. A concentração de clorofila *a* próximo ao valor médio e a concentração de sólidos em suspensão inferior a média foram os responsáveis por este setor aquático apresentar os maiores valores de reflectância do compartimento aquático Passo Cuê, em virtude da menor absorção de energia eletromagnética pelo pigmento de clorofila *a*.

As demais classes espectrais estabelecidas e não abrangidas pelos três setores aquáticos foram identificadas no entorno do compartimento aquático, decorrentes da mistura espectral da água com os demais alvos, como por exemplo, o solo exposto e as áreas de vegetação no entorno do reservatório.

O mapa resultante da razão de bandas 3/4 demonstra com clareza os três setores aquáticos definidos na análise. Além disto, indica o prolongamento do primeiro setor aquático junto ao ponto amostral E14, setor este que apresenta os menores valores de reflectância da água. Outro fato, trata-se das áreas de maior reflectância evidenciadas não somente na zona fluvial do canal principal do compartimento aquático mas também nas áreas de aporte de materiais dos tributários secundários, devido a maior entrada de sólidos em suspensão, a presença de pontos amostrais nestas áreas evidenciariam este comportamento espectral.

As baixas concentrações das variáveis opticamente ativas, clorofila *a* e sólidos em suspensão, identificadas nos pontos amostrais podem ser a causa da baixa variação espectral da imagem do satélite *Landsat 8* no compartimento aquático Passo Cuê. A concentração média da variável clorofila *a* no compartimento aquático é de 1,60 mg/m³, e a concentração máxima identificada nos pontos amostrais PS8 e PS10 não ultrapassa o valor de 3,11 mg/m³, em ambos os pontos amostrais. Portanto, as baixas concentrações de clorofila *a* no compartimento aquático influenciam de maneira pouco significativa nos valores de reflectância da água, o que implica em baixos valores de associação entre as variáveis limnológicas e espectrais.

7 CONSIDERAÇÕES

A caracterização limnológica e espectral dos compartimentos aquáticos Passo Cuê e São Francisco Verdadeiro permitem afirmar que:

Os compartimentos aquáticos Passo Cuê e São Francisco Verdadeiro apresentam diferenças em relação ao comportamento limnológico e espectral. As variáveis limnológicas do compartimento aquático Passo Cuê possuem comportamento mais homogêneo quando comparado ao comportamento das variáveis limnológicas no compartimento aquático São Francisco Verdadeiro.

A espacialização das variáveis limnológicas permite caracterizar as zonas fluvial, transição e lacustre dos compartimentos aquáticos. As maiores concentrações de clorofila *a*, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido do compartimento aquático São Francisco Verdadeiro são identificadas na zona fluvial, as demais zonas apresentam concentrações inferiores das variáveis. A variável pH possui as maiores concentrações nas zonas fluvial e de transição do compartimento aquático São Francisco Verdadeiro, enquanto, a mesma zona do compartimento aquático Passo Cuê é identificada com as menores concentrações da variável.

A análise das variáveis limnológicas no canal principal do compartimento aquático auxilia na compreensão do comportamento das variáveis limnológicas nas zonas aquáticas. As variáveis limnológicas clorofila *a*, condutividade elétrica, pH, sólidos em suspensão e transparência da água dos dois compartimentos aquáticos possuem a tendência em apresentar nos pontos amostrais localizados na zona lacustre valores de concentrações próximos, o que demonstra a uniformização da água dos compartimentos aquáticos com a do restante do reservatório. A variável oxigênio dissolvido é a única das variáveis limnológicas analisadas que possui valores disprepantes a medida que aproxima-se da zona lacustre para os dois compartimentos aquáticos.

No que se refere ao comportamento espectral dos pontos amostrais dos dois compartimentos aquáticos, o compartimento aquático São Francisco Verdadeiro apresenta pontos amostrais com nítida presença do pigmento de clorofila *a* (P2, P3 e P7). Por sua vez, o compartimento aquático Passo Cuê por possuir baixas concentrações dos constituintes opticamente ativos na água não possui no espectro eletromagnético feições típicas de absorção e espalhamento da radiação eletromagnética por constituinte opticamente ativos. Desta forma, a análise espectral qualitativa por agrupamento mostrou-se mais eficaz no compartimento

aquático São Francisco Verdadeiro, pois permite separar de acordo com o comportamento espectral pontos amostrais que apresentam distintas concentrações do pigmento de clorofila *a*.

A não ocorrência de feições espectrais decorrentes da presença de sólidos em suspensão nos compartimentos aquáticos na água deve-se as baixas concentrações da variável, que não ultrapassou o valor de 7,6 mg/L no compartimento aquático Passo Cuê e 8,8 mg/L no compartimento aquático São Francisco Verdadeiro. Além disto, a presença do pigmento de clorofila *a* pode ter obliterado as feições espectrais decorrentes da presença dos sólidos em suspensão. A utilização da técnica de análise do espectro derivada destaca a presença do pigmento de clorofila *a* nos pontos amostrais localizados na zona fluvial do compartimento aquático.

Por fim, constatou-se ao utilizar a imagem de satélite *Landsat 8*, que o comportamento homogêneo e as baixas concentrações das variáveis limnológicas não influenciam de maneira significativa na resposta espectral da água do compartimento aquático Passo Cuê e, portanto, esta, pode ter sido uma das causas dos baixos valores obtidos das associações entre as variáveis limnológicas e espectrais coletas *in situ*. Uma vez que, diferentes concentrações de clorofila *a* e sólidos em suspensão são abrangidas pela mesma classe espectral.

Como recomendação para os estudos futuros que poderão ser realizados e que envolvem a temática ou a área de estudo, alerta-se para a necessidade da coleta de um maior número de pontos amostrais, como também, de uma série temporal de dados limnológicos e espectrais, a fim de perceber se de fato o compartimento aquático Passo Cuê apresenta comportamento das variáveis limnológicas mais homogêneo para o mês de agosto de 2014 comparado ao compartimento aquático São Francisco Verdadeiro que possui comportamento mais heterogêneo para o mês de maio de 2015, sendo este comportamento, também verificado nos espectros de reflectância dos pontos amostrais dos dois compartimentos aquáticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto da dinâmica da circulação da água do sistema planície de Curuai, rio Amazonas**. 2005. 282 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.

BELLINGER, E. G.; SIGEE, D. C. Algae as Bioindicators. In: _____. **Freshwater Algae**. Hoboken: Wiley Blackwell, 2015. cap. 3, p. 101-140.

BENASSI, S. F.; MACIEL, J. N.; BENASSI, R. F. Trajetória do programa de monitoramento limnológico do reservatório da UHE Itaipu. **Boletim da Associação Brasileira de Limnologia**. Rio Claro, v. 38(2), set. 2010.

BITENCOURT, M. D.; MANTELLI, L. R. Análise espacial de parâmetros limnológicos utilizando sensoriamento remoto e geoprocessamento: dois estudos de caso. In: POMPÊO et al. (Org.). **Ecologia de reservatórios e interfaces**. São Paulo: Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, 2015. cap. 12, p. 160-176.

BRASIL. Lei n. 12.651, de 25 de maio de 2012. Institui o novo Código Florestal. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 25 maio. 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm>. Acesso em: 02 jun. 2015.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro**. Brasília, 2015. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/2027273/Boletim+de+Monitoramento+do+Sistema+El%C3%A9trico+-+Agosto-2015.pdf/5efc24ca-ea15-445b-845a-d724b3308cc9>>. Acesso em: 16 out. 2015.

BRASIL, **Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA n. 357**, de 17 de março de 2005. Disponível em: <http://www.hidrolabor.com.br/Conama357.pdf>. Acesso em: 14 maio. 2015.

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

BONANSEA, A. *et al.* Using multi-temporal Landsat imagery and linear mixed models for assessing water quality parameters in Río Tercero reservoir (Argentina). **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 158, p. 28-41, 2015.

CÂMARA, G. *et al.* Spring: Integrating remote sensing and GIS by objectoriented data modelling. **Computers & Graphics**, [S.l.], v. 20, n. 3, p. 395-403, maio-jun. 1996.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo**. São Paulo, 2009. Série Relatórios. Disponível em: <<http://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/32/2013/11/variaveis.pdf>>. Acesso em: 18 fev. 2016.

CORAZZA, R. **Relações entre variáveis espectrais e limnológicas no reservatório da Usina Hidrelétrica Dona Francisca-RS**. 2010. 91 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

DEKKER, A. G. **Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing**. 1993. 260 f. Tese (PhD theses) - Free University, Amsterdam, 1993.

EMBRAPA MONITORAMENTO POR SATÉLITE. **Satélites de monitoramento**. Campinas, 2016. Disponível em: <<http://www.sat.cnpm.embrapa.br/index.html>>. Acesso em: 17 fev. 2016.

ENNES, R. **Potencial das imagens hiperespectrais orbitais na detecção de componentes opticamente ativos no reservatório de Itupararanga**. 2008. 127 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2008.

ENNES, R.; GALO, M de L. B. T.; TACHIBANA, V. M. Caracterização espectral da água do reservatório de Ituparanga, SP, a partir de imagens hiperespectrais Hyperion e análise derivativa. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, vol. 15, n. 3, jul-set. 2009.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **ArcGIS**. Califórnia, 2015. Versão 10.2.2.

ESTEVES, F de A. **Fundamentos de Limnologia**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998. 602 p.

EXELIS VISUAL INFORMATION SOLUTIONS. **ENVI**. Boulder, 2012. Versão 5.1.

FERREIRA, A. B.; PEREIRA FILHO, W. Avaliação da reflectância espectral de corpo d' água em Santa Maria-RS por meio de espectrorradiometria de campo. **Geoambiente On-line**, Jataí, n. 13, jul-dez. 2009. Disponível em: <<http://www.revistas.ufg.br/index.php/geoambiente/article/viewFile/25996/14965>>. Acesso em: 04 maio. 2015.

FLORENZANO, T. G. O uso de imagens no estudo de ambientes transformados. In: _____. **Imagens de satélite para estudos ambientais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. cap. 7, p. 81-86.

FONSECA, A. D.; FERNANDES, J. C. A radiação eletromagnética. In: _____. **Detecção Remota**. Lisboa: Lidel, 2004. cap. 1, p. 1-24.

GALO, M de L. B. T.; ENNES, R.; SAMIZAVA, T. M. Detecção de componentes ópticamente ativos no reservatório de Itupararanga a partir de imagens hiperespectrais: uma aplicação de análise derivativa. IN: II SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 2008, Recife. **Anais ... Recife: UFPE, 2008**. Disponível em: <https://www.ufpe.br/cgtg/SIMGEOII_CD/Organizado/sens_foto/139.pdf>. Acesso em: 15 maio. 2015.

GALVÃO, L. S. Métodos para análise de espectros de reflectância. In: MENESES, P. R.; NETTO, J da S. M. (Org.). **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília: UnB, 2001. cap. 7, p. 225-247.

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.

HAN, L.; RUNDQUIST, D. C. Comparison of NIR/RED ratio and first derivative of reflectance in estimating algal-chlorophyll concentration: a case study in a turbid reservoir. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 62, p. 253-261, 1997.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Cartas climáticas do Paraná**. Londrina, 2016. Disponível em: <<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=863>>. Acesso em: 10 mar. 2016.

INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ. **Qualidade da água: reservatórios do estado do Paraná 2005 a 2008**. Curitiba, 2009. Disponível em: <www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/boletins/RELATORIO_AGUA/relatorio_RESERVATORIOS_2005_2008.pdf> . Acesso em: 13 mar. 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapas**. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <<http://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/bases-cartograficas/malhas-digitais.html>>. Acesso em: 02 fev. 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2000**. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicao_de_vida/pnsb/pnsb.pdf>. Acesso em: 02 dez. 2014.

ITAIPU BINACIONAL. **Nossa História**. Disponível em: <<http://www.itaipu.gov.br/nossa-historia>>. Acesso em: 12 de out. 2014.

KIRK, J. T. O. **Light e Photosynthesis in Aquatic Ecosystems**. 2. ed. New York: Cambridge University Press, 2000. 509 p.

JACQUES-CALLEGARI, S. M. Correlação linear simples. In: _____. **Bioestatística: Princípios e Aplicações**. Porto Alegre: Artmed, 2003. cap. 10, p. 84-93.

JENSEN, J. R. Sensoriamento Remoto da Água. In: _____. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma perspectiva em Recursos Terrestres**. (tradução da 2. ed.). São José dos Campos: Parêntese, 2009. cap. 12, p. 411-444.

LOBO, F de L. *et al.* Propriedades da reflectância de *Microcystis aeruginosa* (Cyanobacteria) manipulada em altas concentrações de pigmentos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais eletrônicos...** Natal: INPE, 2009. Disponível em: <<http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.14.17.59/doc/4747-4754.pdf>>. Acesso em: 16 out. 2015.

LOBO, E. A.; CALLEGARO, V. L. M.; BENDER, E. P. Utilização de algas diatomáceas epilíticas como indicadoras da qualidade da água em rios e arroios da Região Hidrográfica do Guaíba, RS, Brasil. Santa Cruz do Sul: Edunisc, 2002.

LONDE, L de R.; NOVO, E. M. L de M.; CALIJURI, M de C. Aplicação de técnicas de Sensoriamento Remoto ao estudo do fitoplâncton de águas interiores. In: ALCÂNTARA, E. H.; NOVO, E. M. L de M.; STECH, J. L. (Org.). **Novas tecnologias para o monitoramento e estudo de reservatórios hidrelétricos e grandes lagos**. Rio de Janeiro: Parêntese, 2011. cap. 6, p. 219-253.

LONDE, L de R.; NOVO, E. M. L de M.; CALIJURI, M de C. Avanços no estudo do comportamento espectral do fitoplâncton e identificação remota de algas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais eletrônicos...** Goiânia: INPE, 2005. Disponível em: <<http://marte.sid.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.19.18.09.49/doc/389.pdf>>. Acesso em: 25 maio. 2015.

LORENZZETTI, J. A. O conceito de sensoriamento remoto. In: _____. **Princípios Físicos de Sensoriamento Remoto**. São Paulo: Blucher, 2015, p. 15-38.

MENESES, P. R.; NETTO, J da S. M. (Org.). **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília: UnB, 2001. 262 p.

MENESES, P. R. Fundamentos de Radiometria Óptica Espectral. In: MENESES, P. R.; NETTO, J da S. M. (Org.). **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília: UnB, 2001. cap. 1, p. 15-40.

MONTAVANI, J. E.; NOVO, E. M. L de M. Comportamento Espectral da Matéria Orgânica Dissolvida. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8., 1996, Salvador. **Anais eletrônicos ...** Salvador, 1996. Disponível em: <marte.sid.inpe.br/attachment.cgi/sid.inpe.br/deise/1999/02.../T144.pdf>. Acesso em: 26 maio. 2015.

NISHIMURA, P. Y.; MOSCHINI-CARLOS, V.; POMPÊO, M. A comunidade fitoplanctônica como discriminador da qualidade da água na represa Billings (São Paulo, SP). In: POMPÊO et al. (Org.). **Ecologia de reservatórios e interfaces**. São Paulo: Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, 2015. cap. 3, p. 49-58.

NOVO, E. L. de M. Comportamento Espectral da Água. In: MENESES, P. R.; NETTO, J da S. M. (Org.). **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília: UnB, 2001. cap. 6, p. 203-222.

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

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 eletrônicos ...** Natal, 2009. Disponível em:

<<http://mar.te.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.16.19/doc/48134819.pdf?languagebutton=pt-BR>>. Acesso em: 13 dez. 2015.

PEREIRA FILHO, W. *et al.* Reflectância associada a diferentes classes de algas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17., 2015, João Pessoa. **Anais eletrônicos ...** João Pessoa, 2015. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p1463.pdf>>. Acesso em: 13 dez. 2015.

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 eletrônicos ...** Curitiba, 2011. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p1472.pdf>>. Acesso em: 27 nov. 2014.

PEREIRA FILHO, W.; NOVO, E. L. de M. Limnological variables and macrophyte infestation in Tucuruí reservoir - Pará – Brazil. **Geoscience and Remote Sensing Symposium**, v. 5, p. 3092-3094, 2002. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1026879&tag=1>>. Acesso em: 7 jun. 2016.

PEREIRA FILHO, W.; STRASSBURGUER, L.; BARBOSA, C. C. F. Caracterização espectral do reservatório de Itá – Sul do Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais eletrônicos...** Belo Horizonte: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2003. Disponível em: <<http://urlib.net/rep/ltid.inpe.br/sbsr/2002/11.14.11.49?ibiurl.language=pt-BR>>. Acesso em: 23 abr. 2015.

PIRES, J. S. R.; SANTOS, J. E dos.; DEL PRETTE, M. E. A utilização do Conceito de Bacia Hidrográfica para a Conservação dos Recursos Naturais. In: SCHIAVETTI, A.; CAMARGO, A. F. M. (Ed.). **Conceitos de bacias hidrográficas: teorias e aplicações**. Ilhéus: Editus, 2008. cap. 1, p. 17-35.

POMPÊO, M. In: *Compartimentação em reservatórios*. São Paulo, 2004. Disponível em: <<http://www.ib.usp.br/limnologia/Represa/Compartimentacao.htm>>. Acesso em: 8 jun. 2016.

PONZONI, F. J.; SKIMABUKURO, Y. E. A imagem como fonte de dados radiométricos (abordagem quantitativa). In: _____. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2010, p. 67-75.

ROSA, R. Correção de imagens. In: _____. **Introdução ao sensoriamento remoto**. 7. ed. Uberlândia: EDUFU, 2009. cap. 8, p. 197-202.

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

SANTOS, F. C dos. **Influência dos constituintes opticamente ativos na reflectância espectral da água do reservatório Passo Real, RS**. 2012. 87 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. **Bacias Hidrográficas do Paraná**: série histórica. Curitiba: SEMA, 2010-. Trienal. Disponível em: <<http://www.meioambiente.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=176>> . Acesso: 20 maio. 2016.

SLONGO, D. R. **A nova lei florestal brasileira (lei nº 12.651/12) aplicada às áreas de preservação permanente (apps) nas margens da usina hidrelétrica de Itaipu vista pelo princípio de proibição de retrocesso ambiental**. 2014. 151 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Desenvolvimento) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

STEFFEN, C. A. Técnicas radiométricas com o Spectron SE-590. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8., 1996, Salvador. **Anais eletrônicos...** Salvador: INPE, 1996. Disponível em: <<http://marte.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/deise/1999/02.01.11.01/doc/T177.pdf>>. Acesso em: 15 maio. 2015.

THORTON, K. W. Perspectives on Reservoir Limnology. In: THORTON, K. W.; KIMMEL, B. J.; PAYNE, F. E. **Reservoir Limnology: Ecological Perspectives**. Canada: John Wiley & Sons, Inc, 1990. cap. 1, p. 1-14.

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.

TSAI, F.; PHILPOT, W. Derivative Analysis of Hyperspectral Data. **Remote Sensing of Environment**, New York, n. 66, p. 41-51, 1998.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. **Limnologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 870 p.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Earth Explorer**. Disponível em: <<http://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 18 de jul. 2015.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Landsat Missions**. Disponível em: <<http://landsat.usgs.gov/>>. Acesso em: 18 de mar. 2016.

VIRGILIO, H. **Reservatório Itaipu, compartimento aquático Passo Cuê** [fotografia pessoal]. 2014. 12 fotografias, color.

VIRGILIO, H. **Reservatório Itaipu, compartimento aquático Passo Cuê** [fotografia pessoal]. 2015. 14 fotografias, color.

WACHHOLZ, F. **Compartimentação aquática do reservatório Rodolfo Costa e Silva-RS, a partir de variáveis limnológicas e imagens orbitais**. 2007. 99 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

WETZEL, R. G.; LIKENS, G. E. Light and Temperature. In: _____. **Limnological Analyses**. 3. ed. New York: Springer, 2000. cap. 2, p. 15-32.

APÊNDICES

Apêndice A - Valores de R² obtidos por correlação entre as variáveis limnológicas do compartimento aquático Passo Cuê

	Clorofila <i>a</i>	Condutividade elétrica	Oxigênio dissolvido	pH	Sólidos em suspensão	Transparência
Clorofila <i>a</i>	1	0,1021	0,0236	0,0769	0,0002	0,1415
Condutividade elétrica		1	0,2612	0,2152	0,0736	0,1761
Oxigênio dissolvido			1	0,3322	0,0005	0,0009
pH				1	0,0001	0,1808
Sólidos em suspensão					1	0,0021
Transparência						1



Apêndice B - Valores de R² obtidos por correlação entre as variáveis limnológicas do compartimento aquático São Francisco Verdadeiro

	Clorofila <i>a</i>	Condutividade elétrica	Oxigênio dissolvido	pH	Sólidos em suspensão	Transparência
Clorofila <i>a</i>	1	0,3330	0,3540	0,3304	0,0985	0,3663
Condutividade elétrica		1	0,9255	0,0876	0,0987	0,2094
Oxigênio dissolvido			1	0,1564	0,1488	0,3355
pH				1	0,3447	0,1189
Sólidos em suspensão					1	0,0614
Transparência						1

Apêndice C - Registros fotográficos dos pontos amostrais do compartimento aquático Passo Cuê, reservatório Itaipu






	<p>PONTO AMOSTRAL PS1 (Localizado a 54° 20' 56"W e 25° 23' 17"S)</p> <p>O ponto amostral situa-se próximo ao tributário principal do compartimento aquático, na zona fluvial. A cor da água é identificada no dia da coleta dos dados como esverdeada e mediamente turva.</p>
	<p>PONTO AMOSTRAL PS2 (Localizado a 54° 22' 27" W e 25° 22' 46"S)</p> <p>Este ponto amostral é o que apresenta o segundo menor valor de transparência da água, em relação a cor da água no dia da coleta dos dados é descrita como esverdeada e pouco turva.</p>
	<p>PONTO AMOSTRAL PS3 (Localizado a 54° 22' 48"W e 25° 21' 21"S)</p> <p>Ponto amostral situado na margem direita do compartimento aquático, a coloração da água é esverdeada.</p>
	<p>PONTO AMOSTRAL PS4 (Localizado a 54° 23' 54"W e 25° 21' 34"S)</p> <p>Localizado na zona de transição do compartimento aquático, a coloração da água do ponto amostral é esverdeada e mediamente turva.</p>
	<p>PONTO AMOSTRAL PS5 (Localizado a 54° 24' 43"W e 25° 20' 54"S)</p> <p>Situado no lado direito da zona de transição do compartimento aquático, a cor da água é descrita como esverdeada e pouco turva.</p>






	<p>PONTO AMOSTRAL PS6 (Localizado a 54° 25' 34" e 25° 21' 14"S)</p> <p>Este ponto amostral localizado no canal principal do compartimento aquático apresenta um dos maiores valores de transparência da água. A coloração da água é descrita no dia da coleta dos dados como esverdeada e pouco turva.</p>
	<p>PONTO AMOSTRAL PS7 (Localizado a 54° 26' 11"W e 25° 22' 22"S)</p> <p>Ponto amostral situado no lado esquerdo da zona de transição do compartimento aquático, a coloração da água é descrita como esverdeada e pouco turva.</p>
	<p>PONTO AMOSTRAL PS8 (Localizado a 54° 25' 46"W e 25° 19' 33"S)</p> <p>Localizado na zona lacustre do compartimento aquático, o ponto amostral apresenta valor de transparência da água idêntico aos demais pontos amostrais desta área. A coloração da água é esverdeada e pouco turva.</p>
	<p>PONTO AMOSTRAL PS9 (Localizado a 54° 27' 08"W e 25° 19' 58"S)</p> <p>O valor de transparência da água do ponto amostral é idêntico aos dos pontos amostrais PS8 e PS10 localizados na zona lacustre do compartimento aquático.</p>
	<p>PONTO AMOSTRAL PS10 (Localizado a 54° 28' 05"W e 25° 20' 19"S)</p> <p>Observa-se neste ponto amostral uma uniformização da água do compartimento aquático com a do reservatório, sendo a coloração da água descrita no dia da coleta dos dados como esverdeada.</p>





	<p>PONTO AMOSTRAL E11 (Localizado a 54° 24' 42"W e 25° 22' 11"S)</p> <p>Este ponto amostral situado no canal principal do compartimento aquático apresenta um dos maiores valores de transparência da água. A coloração da água é descrita como esverdeada e mediamente turva.</p>
	<p>PONTO AMOSTRAL E14 (Localizado a 54° 23' 52"W e 25° 23' 26"S)</p> <p>É dos pontos amostrais do compartimento aquático Passo Cuê o que apresenta o maior valor de transparência da água, 1,3 metros.</p>

Fonte: Virgilio (2014).

Apêndice D - Registros fotográficos dos pontos amostrais do compartimento aquático São Francisco Verdadeiro, reservatório Itaipu

		<p>PONTO AMOSTRAL 1 (Localizado a 54° 10' 45"W e 24° 41' 01"S) Ponto amostral situado próximo ao tributário principal do compartimento aquático.</p>
		<p>PONTO AMOSTRAL 2 (Localizado a 54° 10' 56"W e 24° 41' 37"S) Este ponto amostral, juntamente com o ponto amostral P9 possuem o segundo menor valor de transparência da água, 0,7 metros.</p>
		<p>PONTO AMOSTRAL 3 (Localizado a 54° 11' 47"W e 24° 40' 56"S) Situado na zona fluvial do compartimento aquático, o ponto amostral apresenta valor de transparência da água de 0,8 metros.</p>
		<p>PONTO AMOSTRAL 4 (Localizado a 54° 12' 19"W e 24° 40' 55"S) O ponto amostral situa-se no canal principal do compartimento aquático e apresenta o menor valor de transparência da água, 0,6 metros.</p>
		<p>PONTO AMOSTRAL 5 (Localizado a 54° 12' 32"W e 24° 41' 22"S) Situado no canal principal do compartimento aquático, o valor de transparência da água do ponto amostral é de 0,95 metros.</p>

	<p>PONTO AMOSTRAL 6 (Localizado a 54° 13' 31"W e 24° 41' 01"S) A transparência da água deste ponto amostral situado na zona de transição do compartimento aquático é de 0,8 metros.</p>
	<p>PONTO AMOSTRAL 7 (Localizado a 54° 13' 16"W e 24° 40' 24"S) O ponto amostral apresenta o segundo maior valor de transparência da água do compartimento aquático, 1,05 metros.</p>
	<p>PONTO AMOSTRAL 8 (Localizado a 54° 14' 31"W e 24° 40' 58"S) Situado próximo a ponte, o valor de transparência da água é de 0,9 metros.</p>
	<p>PONTO AMOSTRAL 9 (Localizado a 54° 15' 17"W e 24° 40' 34"S) Situado na zona de transição do compartimento aquático, o valor de transparência da água do ponto amostral é de 0,65 metros, o segundo menor valor da variável no compartimento aquático.</p>
	<p>PONTO AMOSTRAL 10 (Localizado a 54° 15' 57"W e 24° 40' 16"S) O valor de transparência da água do ponto amostral, 0,9 metros, é próximo ao valor médio da variável para o compartimento aquático.</p>

		<p>PONTO AMOSTRAL 11 (Localizado a 54° 15' 45"W e 24° 40' 39"S)</p> <p>O valor de transparência da água do ponto amostral, 1,1 metros, é um dos maiores valores da variável identificados no compartimento aquático.</p>
		<p>PONTO AMOSTRAL 12 (Localizado a 54° 16' 43"W e 24° 40' 13"S)</p> <p>O ponto amostral situado na zona lacustre do compartimento aquático apresenta valor de transparência da água de 1 metro.</p>
		<p>PONTO AMOSTRAL 13 (Localizado a 54° 16' 16"W e 24° 39' 31"S)</p> <p>Este ponto amostral, juntamente com o ponto amostral P11, possuem os maiores valores de transparência da água do compartimento aquático.</p>
		<p>PONTO AMOSTRAL 14 (Localizado a 54° 17' 33"W e 24° 41' 12"S)</p> <p>Situado na zona lacustre do compartimento aquático, o ponto amostral apresenta valor de transparência da água de 0,7 metros.</p>

Fonte: Virgilio (2015).