

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

Charles Tebaldi

**RELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS DE QUALIDADE DE ÁGUA E  
DADOS DO SENSOR OLI, LANDSAT 8, NO GUAÍBA - RIO  
GRANDE DO SUL, BRASIL.**

Porto Alegre

2015

Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto

Charles Tebaldi

**RELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS DE QUALIDADE DE ÁGUA E  
DADOS DO SENSOR OLI, LANDSAT 8, NO GUAÍBA - RIO  
GRANDE DO SUL, BRASIL.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul em cumprimento ao requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Sensoriamento Remoto.

Linha de pesquisa: Sensoriamento Remoto Aplicado

Orientador: Professor Dr. Laurindo Antonio Guasselli

Porto Alegre

2015

CHARLES TEBALDI

**RELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS DE QUALIDADE DE ÁGUA E  
DADOS DO SENSOR OLI, LANDSAT 8, NO GUAÍBA - RIO  
GRANDE DO SUL, BRASIL.**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul em cumprimento ao requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Sensoriamento Remoto.

Aprovada em 31 de Agosto de 2015.

---

Prof. Dr. Laurindo Antônio Guasselli – PPGSR/UFRGS (Orientador)

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Dejanira Luderitz Saldanha – PPGSR/UFRGS (Membro da Banca)

---

Prof. Dr. Guilherme Garcia de Oliveira - *CEPSRM – CETE/Univates/RS* (Membro da Banca)

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Kátia Kellem da Rosa - POSGEA/UFRGS (Membro da Banca)

Aos meus pais Neivete e Nadir,  
irmã Deise e namorada Liliam pela dedicação  
e apoio incondicional em todos os momentos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador Dr. Laurindo Antonio Guasselli e os professores, Dr<sup>a</sup>. Dejanira Luderitz Saldanha, D.Sc. Jorge Ricardo Ducati, Dr. Marcelo Tomio Matsuoka, Dr. Ulisses Franz Bremer pela dedicação, exemplo, e comprometimento com a pesquisa e o ensino.

Acredito que sem o auxílio do laboratorista Gilberto, do colega Mestre Fernando Scottá e do Daniel Sganzerla do Núcleo de apoio ao estudante (NAE) meu trabalho seria muito mais difícil e os dedico especial agradecimento, como cabe também aos funcionários da UFRGS e terceirizados, colegas de laboratório, secretárias e bolsistas do Laboratório de Geoprocessamento e Análise Ambiental. Também agradeço ao amigo e geógrafo Camilo Pacheco pelo auxílio nas saídas de campo e empréstimo de equipamentos, assim como os colegas Tauã, Tomaz e a namorada Liliam Ramos da Silva. Agradeço ao clube S.C.Internacional pela permissão em adentrar a suas estruturas, em especial ao funcionário Juarez pela ajuda na hidratação no dia 6 de fevereiro de 2014, dia mais quente das últimas décadas na capital gaúcha.

Por fim agradeço ao ensino publico gratuito e de qualidade oferecido pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, a Instituto de Geociências, ao Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto - PPGSR, o e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ).

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características espectrais dos instrumentos imageadores OLI e TIR. ....	32
Tabela 2 - Classificação das águas do rio Guaíba e seus principais afluentes. Fonte: adaptado de Bendati, 2003. ....	49
Tabela 3 - Datas da passagem do satélite Landsat 8, pontos de coleta de amostras durante o período do estudo, estação do ano e embarcação utilizada. ....	58
Tabela 4 - Localização dos 14 pontos de amostragem no Guaíba-RS .....	61
Tabela 5 – Dados de CMT, CSS e CMO, 20 de dezembro de 2013, no Guaíba-RS.	72
Tabela 6 – Valores de Transparência da água, 20 de dezembro de 2013, no Guaíba - RS. ....	77
Tabela 7 - Correlação entre a transparência (SECCHI) e CSS, CMO e com as bandas do visível (B2, B3 e B4), com base nas correções de Pixel Escuro (DP), QUAC e FLAASH.....	80
Tabela 8 – Valores de correlação entre os dados limnológicos (CSS e CMO) e a reflectância (bandas do visível b2, b3 e b4) nos pontos K, L e M nas 7 amostragens do Guaíba-RS.....	83
Tabela 9 – Dados nos pontos K, L e M em 7 amostragens, transecto no Guaíba – RS. ....	86
Tabela 10 - Correlação entre os dados limnológicos e de reflectância nos pontos K, L e M, transecto no Guaíba-RS. ....	98

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Trajetória e Interação da REM com a atmosfera, água e o fundo.....	20
Figura 2 - Reflectância da água com 10mg.L <sup>-1</sup> de sólido em suspensão (linha pontilhada) e água com 99mg/l de sólido em suspensão (linha contínua) em função do comprimento de onda. Fonte: Adaptado de Bartolucci <i>et al.</i> , 1977. ....	21
Figura 3 – Curvas de reflectância espectral para lagos com água limpa, altos índices de clorofila e altos níveis de carbono orgânico dissolvido (DOC). Fonte: Adaptado de Lillesand <i>et al.</i> , 2007. ....	23
Figura 4 – Resposta espectral do Lago Kinneret, Fevereiro de 1994 com moderada a altas concentrações de Chl. Fonte: Adaptado de Gitelson <i>et al.</i> ,2000. ....	24
Figura 5 - Relação entre SSC e a reflectância de um corpo aquático com muitas algas. Fonte: Adaptado de Han, 1997.....	26
Figura 6 - Relação entre Concentração total de sedimento em suspensão (CSS) e reflectância. Fonte: Han, 1997.....	27
Figura 7 – Reflectância de misturas de água com sedimento em diferentes concentrações, a partir de amostras coletadas no rio Manacapuru na Amazônia.Fonte: Adaptado de Mertes <i>et al.</i> ,1993. ....	28
Figura 8 - Redução de contraste ao longo de um caminho através do composto ar, superfície ar-água e água. Fonte: Preisendorfer, 1976.....	35
Figura 9 – A relação entre a reflectância e como o comprimento de onda é afetado pela concentração de sedimentos em suspensão. Fonte: Adaptado de Ritchie <i>et al.</i> , 1976. ....	36
Figura 10 - A relação entre a reflectância e como o comprimento de onda é afetado pela concentração clorofila em suspensão. Fonte: Adaptado de Ritchie <i>et al.</i> , 1976.	39
Figura 11 - Bacia hidrográfica do Lago Guaíba, com os rios Gravataí, Sinos, Caí, Taquari e Jacuí além de riachos que descarregam suas águas no Guaíba, destacando a area de estudo. Fonte: SEMA, 2013. ....	40
Figura 12 - Bacia do Lago Guaíba seus contribuintes. Fonte: < <a href="http://www.planolagogaiba.com.br/bacia">www.planolagogaiba.com.br/bacia</a> > acessado em maio de2015. ....	42
Figura 13 - Vista dos bancos de areia criados no Guaíba pelo DMAE. Fonte: < <a href="http://www.popa.com.br">www.popa.com.br</a> > Acessado em maio de 2015.....	43
Figura 14 - Sedimentos do fundo do Rio Guaíba aflorados em banco criado pelas obras do Projeto PISA. Fonte: < <a href="http://www.popa.com.br">www.popa.com.br</a> > Acessado em maio de 2015....	44

Figura 15 - Segmentação do Lago Guaíba em sete tipos de regiões, com base no padrão de circulação da água. Fonte: Paz <i>et al.</i> ,2005. ....	48
Figura 16 - IQA do Guaíba em pontos do Delta do Jacuí e no Canal de navegação. 50	
Figura 17 - IQA do Guaíba em pontos distribuídos nas margens direita e esquerda. 51	
Figura 18 - Temperatura média no Rio Grande do Sul em cada estação do Ano em °C.....	53
Figura 19 - Fluxograma da Metodologia. ....	56
Figura 20 – Área de estudo e pontos de coletas, distribuídos ao longo do Guaíba. ..	60
Figura 21 - Equipamento para filtragem sob pressão.....	65
Figura 22 - Processo de queima em duas etapas, do filtro de acetato e do material orgânico em suspensão, primeiro por combustão e em seguida em mufla. ....	66
Figura 23– Mapa de Concentração de Sedimentos, 20 de dezembro de 2013, no Guaíba - RS.....	73
Figura 24 - Variação mensal da descarga e da CSS, de 2003 a 2006, no Guaíba. Fonte: Andrade Neto et al. (2012).....	74
Figura 25 - Mapa de Concentração de Material Orgânico, 20 de dezembro de 2013, .....	76
Figura 26 – Mapa de Transparência, 20 de dezembro de 2013, no Guaíba - RS. ....	78
Figura 27 - Correlação linear e exponencial entre transparência e CSS, 20 de dezembro de 2013, no Guaíba - RS.....	82
Figura 28 - Mapa Batimétrico e a localização dos pontos K, L e M no transecto do estudo no Guaíba - RS e. Fonte: Adaptado de Nicolodi et al. (2010) .....	84
Figura 29 – Imagem do transecto no dia 20/12/13, contendo os pontos K, L e M. A linha achurada representa o canal de navegação. Composição RGB 432, cores verdadeiras. Fonte: sensor OLI, Landsat-8.....	87
Figura 30 – Fotografia na margem leste, em frente ao transecto, K, L e M em 05/01/2014, do Guaíba – RS. ....	87
Figura 31 – Imagem do transecto no dia 05/01/14, contendo os pontos K, L e M.A linha achurada representa o canal de navegação. Composição RGB 432, cores verdadeiras. Fonte: sensor OLI, Landsat-8.....	89
Figura 32 – Fotografia de coleta de amostra, ponto L em 06/02/2014, no Guaíba - RS. ....	90
Figura 33– Imagem do transecto no dia 06/02/14, contendo os pontos K, L e M. A linha achurada representa o canal de navegação. Composição RGB 432, cores verdadeiras. Fonte: sensor OLI, Landsat-8.....	91
Figura 34 – Fotografia no ponto K em 29/05/2014, no Guaíba - RS.....	92



Figura 35– Imagem do transecto no dia 29/05/14, contendo os pontos K, L e M. A linha achurada representa o canal de navegação. Composição RGB 432, cores verdadeiras. Fonte: sensor OLI, Landsat-8. ....	93
Figura 36 – Fotografia do ponto K em 16/07/2014, no Guaíba - RS. ....	94
Figura 37– Imagem do transecto no dia 16/07/14, contendo os pontos K, L e M. A linha achurada representa o canal de navegação. Composição RGB 432, cores verdadeiras. Fonte: sensor OLI, Landsat-8. ....	95
Figura 38– Imagem do transecto no dia 20/10/14, contendo os pontos K, L e M. A linha achurada representa o canal de navegação. Composição RGB 432, cores verdadeiras. Fonte: sensor OLI, Landsat-8. ....	96
Figura 39– Imagem do transecto no dia 07/12/14, contendo os pontos K, L e M. A linha achurada representa o canal de navegação. Composição RGB 432, cores verdadeiras. Fonte: sensor OLI, Landsat-8. ....	97

## RESUMO

A bacia hidrográfica do Guaíba possui uma área de 2.253 km<sup>2</sup> e apresenta uma população de mais de um milhão de habitantes, a grande maioria concentrada na região metropolitana de Porto Alegre. Estudos apontam um elevado nível de poluição nas suas águas, deixando-as longe das condições sanitárias adequadas. A utilização de técnicas de sensoriamento remoto para o gerenciamento de rios e lagoas se baseia no fato de que a descarga de sedimentos, a eutrofização e o aumento na produtividade de algas estão associadas às mudanças nas propriedades ópticas da camada superficial do corpo de água. O objeto deste trabalho é a análise das variáveis limnológicas das águas do Lago Guaíba - transparência, concentração de sedimentos em suspensão (CSS) e concentração de material orgânico (CMO) – no dia 20 de dezembro de 2013 e a relação entre elas e a resposta espectral nas bandas do visível (0,45 a 0,67  $\mu\text{m}$ ), do sensor OLI - Landsat 8, naquela e em mais 6 datas durante o ano de 2014 em um transecto do Lago. Realizou-se a análise de correlação entre as variáveis limnológicas e os dados de reflectância. Observou-se uma relação inversamente proporcional entre transparência e CSS. Estatisticamente, a correlação (-0,605) se mostrou com nível de confiança de 0,05 entre a banda 2 (0,45 e 0,51  $\mu\text{m}$ ), do sensor OLI e a transparência da água. Para CSS também se verificou uma correlação ao nível de significância de 0,01 com a transparência da água, gerando um coeficiente de regressão ( $R^2$ ) 0,87 entre eles. A transparência apresentou correlação (-0,644) com CMO ao nível de significância de 0,05. Encontrou-se uma relação baixa (0,443) entre CSS e a banda 2, significativa a 95%. As demais correlações das bandas do visível com CSS e CMO os resultados não foram significativos. Os resultados permitiram espacializar a distribuição espacial da transparência, CSS e CMO da água, através de mapas e, com isso, caracterizar o Guaíba de maneira satisfatória para o dia 20 de dezembro de 2013. A análise considerando apenas um transecto monitorado apresentou resultados satisfatórios apenas para as relações: “transparência e banda 2” e “CSS e banda 2”. A baixa correlação com as demais bandas do espectro do visível do sensor OLI – Landsat 8 e os dados limnológicos mostram como é complexo trabalhar com dados de sensoriamento remoto utilizando sensor multiespectral em um corpo d’água natural como o Guaíba.

**Palavras-chave:** Comportamento Espectral da Água; Lago Guaíba; Variáveis Limnológicas; Resposta Espectral; Correlação.

## ABSTRACT

The Guaíba watershed has an area of 2,253 km<sup>2</sup> and has a population of over one million population, mostly concentrated in the metropolitan region of Porto Alegre. Studies indicate a high level of pollution in its waters, leaving them far from adequate sanitary conditions. The use of remote sensing techniques for the management of rivers and Lakes is based on the fact that the discharge of sediments, eutrophication and the increase in productivity of algae are associated to changes in optical properties of the surface layer of the water body. The objective of this work is the analysis of limnological variables in the waters of Lake Guaiba - transparency, concentration of suspended sediment (CSS) and concentration of organic material (CMO) - on December 20, 2013 and the relation between them and the spectral response bands in the visible bands (0.45 to 0.67 μm), the OLI sensor - Landsat 8, and more 6 dates between 2014 in a transect of the Lake. There was the analysis of correlation between the variables limnological and reflectance data. There was an inverse relation between transparency and CSS. Statistically, the correlation (-0.605) proved with 0.05 level trusty between the band 2 (0.45 and 0.51 μm), the OLI sensor and water transparency. The CSS also has been a correlation to the 0.01 significance level to the transparency of the water, beget a regression coefficient (R<sup>2</sup>) 0.87 between them. Transparency correlated (-0.644) with CMO at the 0.05 significance gap. A low proportion (0.443) between CSS and the band 2, significant at 95% was found. The other correlations of the visible bands and CSS and CMO and the results were not significant. Results allowed spacialized distribution transparency, CSS and CMO of water, through maps and thereby characterize the Guaiba Lake on December 20, 2013. The analysis considering one transect monitored show satisfactory just a results for relationship: "transparency and band 2" and "CSS and Band 2". Low correlation with other visible spectrum bands of the visible sensor OLI - Landsat 8 and limnology data show how complex work with remote sensing data using multispectral sensor in a natural body of water as the Guaiba Lake.

**Key words:** Spectral Water behavior; Guaiba Lake; Limnological variables; Spectral response; Correlation.

## Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1 <i>Objetivos</i>	16
1.2 <i>Estrutura da Dissertação</i>	17
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>18</b>
2.1 <i>Sensoriamento Remoto Aplicado ao Estudo da Água</i>	18
2.1.1 Comportamento espectral da água	18
2.1.2 Fatores que alteram o comportamento da água	22
2.1.3 Relações entre Características Espectrais e Parâmetros de Qualidade da Água	28
2.1.4 Satélite Landsat 8	31
2.2 <i>Dados In Situ</i>	32
2.2.1 Técnica “disco de Secchi”	34
2.2.2 Sedimento em Suspensão	35
2.2.3 Clorofila-a	38
<b>3 ÁREA DE ESTUDO</b>	<b>40</b>
3.1 <i>Área de estudo</i>	40
3.2 <i>Qualidade das águas do Guaíba</i>	48
3.3 <i>Variáveis climáticas</i>	52
<b>4 METODOLOGIA</b>	<b>56</b>
4.1 <i>Coleta de Variáveis Limnológicas</i>	56
4.1.1 Campo do dia 20 de Dezembro de 2013	58
4.1.2 Campos no Transecto junto aos pontos K, L e M	61
4.1.3 Dados <i>In Situ</i> e Laboratório	63
4.2 <i>Processamento de Imagens</i>	66
4.2.1 Correções Atmosféricas	67
4.2.2 Leitura, Extração e Correlação dos valores de Reflectância	70
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>71</b>
5.1 <i>Campo do dia 20 de dezembro de 2013</i>	71
5.1.2 Correlação dos dados de campo	79
5.2 <i>Transecto no Guaíba</i>	83
5.2.1 Análise de dados Limnológicos e de Reflectância, no transecto.	85

5.2.2 Correlação entre a resposta espectral da água e as variáveis limnológicas.	97
<b>6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>	<b>102</b>
<b>7. REFERÊNCIAS</b>	<b>105</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No estado do Rio Grande do Sul a área de maior densidade demográfica se encontra no eixo Porto Alegre - Caxias do Sul, com densidade superior a 200hab/km<sup>2</sup>. Somente em Porto Alegre vivem 1.409.351 pessoas (IBGE – Censo 2010). Esta capital é banhada ao oeste pelas águas do Guaíba, um ambiente aquático natural formado pelas águas dos rios Jacuí, Sinos, Caí, Gravataí e Taquari, sendo também ele a principal fonte de abastecimento para consumo. Ao norte do Guaíba situa-se o delta do rio Jacuí e após percorrer aproximadamente 50 km para o sul, junto à ponta de Itapuã, suas águas encontram a foz, na Laguna dos Patos. Este corpo d'água possui uma área de 470 km<sup>2</sup> de superfície, uma profundidade média de 2 metros e máxima de 31 metros. (BENDATI, 2003).

Entre 1960 e 2010 a população absoluta no RS, que era pouco superior a 5 milhões, ultrapassou os 10,5 milhões, entretanto os investimentos relativos ao saneamento básico e o tratamento de água não foram acompanhados de forma tão significativa. Com isso ocorre o despejo do esgoto doméstico não tratado diretamente no leito dos rios (SEPLAG, 2013).

As atividades industriais e agrícolas também cresceram no estado, aumentando assim o uso de produtos químicos, defensivos e pesticidas que, por conseguinte acabam chegando à calha dos rios. Lobo *et al.* (2002) revela que o rio Gravataí, por exemplo, possui condições eutróficas e uma baixa qualidade em aspectos sanitários. As atividades agrícolas causam impactos ainda mais significativos que incluem a erosão e o assoreamento no trecho superior do rio Gravataí.

Apesar de não haver racionamento, e não faltar água na maioria das cidades do Rio Grande do Sul, o problema da poluição industrial e doméstica, o avanço do cultivo agrícola em áreas de nascente e a redução de matas ciliares estão acarretando em mais gastos para purificação e tratamento da água para consumo humano. Ocorre também um aumento significativo de áreas impróprias até mesmo para recreação ao longo do Guaíba. A crise da

água é, antes de tudo, uma crise de gestão desse recurso natural, mais do que a escassez ou contaminação (REBOUÇAS *et al.*, 2006).

O DMAE e a prefeitura de Porto Alegre monitoram o Guaíba em relação à floração de cianobactérias, em 26 pontos ao longo de duas décadas. Esse monitoramento mostra que os melhores valores de IQA estão na margem direita e na foz do rio Jacuí. Os pontos mais comprometidos são a foz do rio Gravataí, Sinos e arroio Dilúvio. Os locais de maior favorecimento à floração estão próximo ao bairro Tristeza e Menino Deus, locais estes com condições regulares de qualidade da água.

Atualmente está em fase de implementação o Programa Integrado Socioambiental, PISA com objetivo de reduzir em mais de 90% a densidade de coliformes fecais lançados na extensão que vai desde a foz do Arroio Dilúvio até a praia de Ipanema até o ano de 2028. A proposta é recuperar a balneabilidade do Guaíba, além de melhorar a qualidade da água captada para consumo. Segundo o DMAE, nos meses de verão acompanhados de estiagem favorecem o fenômeno de proliferação de algas do tipo cianofíceas, dando assim gosto e cheiro à água.

Atrelado aos estudos geográficos e de crescente importância, o sensoriamento remoto, como instrumento de pesquisa relacionado ao comportamento espectral de alvos, é aplicável ao planejamento ambiental, monitoramento e estudo do meio-ambiente. As características da água e a presença de variáveis que alteram sua coloração podem ser detectadas e quantificadas por satélites orbitais (NOVO, 2010).

A utilização de técnicas de sensoriamento remoto para o gerenciamento de rios e lagoas se baseia principalmente no fato de que a descarga de sedimentos, a eutrofização e o aumento na produtividade são associadas a mudanças nas propriedades ópticas da camada superficial do corpo de água.

Cada vez mais escassas e com parâmetros físicos, químicos e biológicos de qualidade deteriorada, as águas interiores não podem ser analisadas puramente através da ferramenta do sensoriamento remoto, mas as substâncias opticamente ativas que nela se encontram podem nos dar sua

caracterização bio-óptica. As imagens de satélite obtidas de ambientes aquáticos nos fornecem uma visão sinótica de pequenas ou grandes áreas, incluindo seu entorno de influência. E o método de coleta *in situ* identifica a concentração das substâncias opticamente ativas - fitoplâncton, matéria orgânica dissolvida e material inorgânico em suspensão.

Corazza *et al.* (2013) utilizou para coleta de dados limnológicos e espectrais um espectrorradiômetro, para verificar a influência das variáveis limnológicas sobre as características espectrais do Guaíba, buscando a correlação entre os parâmetros espectrais e os componentes opticamente ativos da água (COA). Encontrou as maiores correlações principalmente nos comprimentos de onda do visível (400-700 nm), com ênfase nas proximidades do pico de absorção em 675nm.

Por fim é importante mencionar que nomenclatura do Guaíba é um tema que ainda gera debates. O nome da bacia é “Bacia Hidrográfica do Lago Guaíba”, rotulando assim o Guaíba como um lago. Outros autores como Toldo Jr. *et al.* (2009) do Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica - CECO/ UFRGS, entretanto, trazem argumentos caracterizando este corpo d’água como um rio. Nesta dissertação não se entrará nesse mérito, e se referirá apenas como Guaíba, ou conforme nomenclatura utilizada pela referência pesquisada.

## **1.1 Objetivos**

### **Objetivo Geral**

Analisar a relação entre variáveis limnológicas (transparência, CSS e CMO), e da resposta espectral das bandas do visível do sensor OLI, Landsat 8 nas águas do Guaíba – Rio Grande do Sul, Brasil

### **Objetivos Específicos**

A partir de uma amostragem no Guaíba no dia 20/12/2013:



- Gerar mapas das variáveis limnológicas: Transparência, Concentração de Sedimentos em Suspensão (CSS) e Concentração de Material Orgânico em Suspensão (CMO).

A partir de um transecto no Guaíba, em 6 datas ao longo de 2014:

- Obter e quantificar as variáveis limnológicas;
- Determinar a relação entre as variáveis limnológicas;
- Realizar a análise de correlação entre as variáveis limnológicas e os dados de reflectância do sensor OLI, Landsat 8.

## **1.2 Estrutura da Dissertação**

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos. O primeiro dá um panorama geral e introdutório aos temas parâmetros de qualidade e sensoriamento remoto da água e define os objetivos da pesquisa. O segundo capítulo, referencial teórico, detalha conceitos fundamentais de sensoriamento remoto aplicado a ambientes aquáticos e o que pode modificá-lo; detalha dados técnicos do sensor OLI a bordo do Landsat-8; aborda os tipos de correção atmosférica existentes; as técnicas de coletas de dados limnológicos em campo e por fim faz um resgate dos trabalhos sobre o Guaíba já produzidos.

O terceiro capítulo aborda a área de estudo, o Guaíba, e os fatores climáticos que o influenciam os dados limnológicos e o comportamento espectral da camada superficial da água. O quarto capítulo contém os materiais e métodos empregados, tanto no trabalho de campo, e posterior análise laboratorial, e o processamento das imagens do satélite Landsat 8. O último capítulo contém os resultados e as correlações geradas em cumprimento aos objetivos propostos na pesquisa.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Sensoriamento Remoto Aplicado ao Estudo da Água

#### 2.1.1 Comportamento espectral da água

O comprimento de onda ideal para medir parâmetros da qualidade da água depende da substância a ser medida, sua concentração e as características do sensor (RITCHIE, 2003). A água doce representa uma mistura complexa de diversos constituintes dissolvidos ou particulados. Diferente da água pura, esses materiais possuem propriedades ópticas diversas, e interagem com a luz modificando a sua cor. Através da absorção e do espalhamento seletivo as mudanças na cor da água revelam informações úteis sobre as propriedades químicas, físicas e biológicas de lagos e rios (KAMPBEL E NOVO, 2009).

O desenvolvimento de técnicas de sensoriamento remoto para o monitoramento da qualidade da água inicia na década de 1970, com aplicação de técnicas para medir diferenças espectrais e térmicas (em energia emitida) a partir de superfícies de água (RITCHIE *et al.* 2003). A radiação eletromagnética que chega até o sensor a bordo do satélite é formada pela composição da radiação espalhada pela atmosfera, refletida especularmente pela superfície do corpo d'água e emergente da superfície da água. O escopo de revelar as propriedades físicas e químicas da água é somente possível com a luz emergente da água contendo informações úteis (KAMPBEL E NOVO, 2009).

Os sensores como OLI do Landsat 8 são passivos e dependem da radiação eletromagnética (REM) solar para iluminar o alvo, conforme **figura 1**. De acordo com os autores Bukata *et al.* (1995) e Jensen<sup>1</sup> (2009) ao chegar à atmosfera a radiação solar interage e é espalhada por ela, portanto no alvo chegam a Irradiação Solar (Esun) e a atmosférica descendente (Esky), que sofreu espalhamento. Já a radiância total (Lt) que o sensor, em órbita, registra

---

<sup>1</sup> A primeira publicação desta obra data de 1949, porém este trabalho utiliza a tradução para o português realizada em 2009.

é uma função da energia eletromagnética proveniente de quatro fontes, conforme a equação

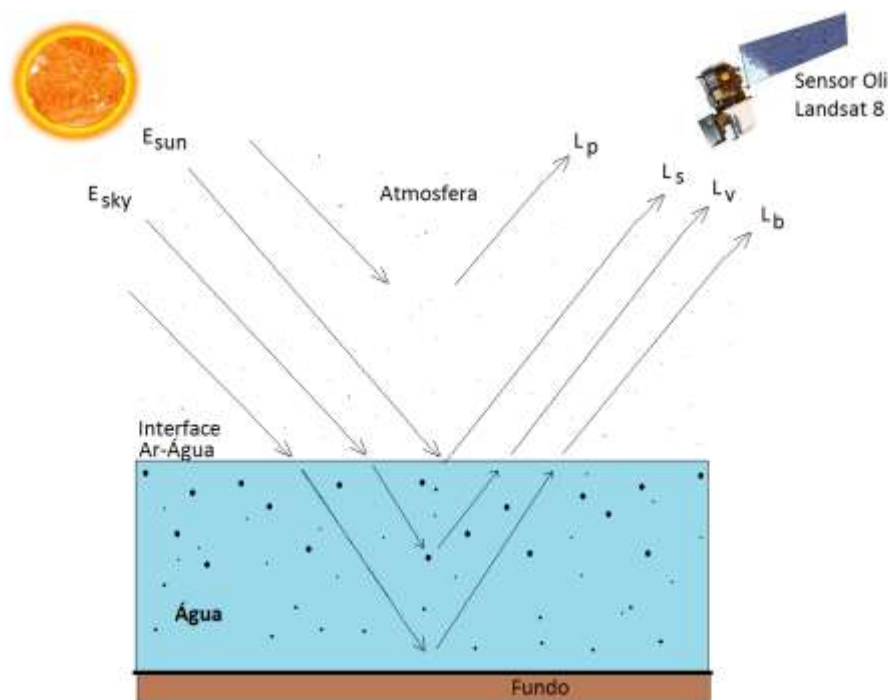
$$L_t = L_p + L_s + L_v + L_b \quad (1)$$

Onde:  $L_p$  é a radiância de espalhamento atmosférico, considerado um ruído atmosférico, ou seja, uma radiância de trajetória indesejável, uma parcela da radiação eletromagnética que não chega a atingir a superfície da água;  $L_s$  é a porção da radiação solar e atmosférica que alcança a interface ar-água (chamada também de camada limite ou camada de superfície livre) e penetra não mais do que 1 milímetro na água, sendo essencialmente a parcela da radiação refletida da superfície da água. Essa parcela traz informações sobre as características da superfície do corpo d'água, exceto quando o ângulo zenital e o ângulo de visada do sensor forem os mesmos, podendo obter uma reflexão puramente especular (conhecido também por *sunlight* ou reflexão solar);  $L_v$  é a radiância volumétrica de subsuperfície, oriunda da radiação solar e da atmosférica que de fato penetra na água, interage com ela e com seus constituintes opticamente ativos (orgânicos / inorgânicos) e então emerge da coluna d'água sem interagir com o fundo, trazendo a informação sobre as características da composição da coluna d'água;  $L_b$  é a porção da radiância que resulta da interação da radiação solar e atmosférica que atinge o fundo do corpo d'água e alcança o sensor. Ressalta-se que existe uma grande dificuldade em separação ou desagregação de  $L_b$  e  $L_v$ .

Nesta dissertação o interesse está em identificar os constituintes orgânicos e inorgânicos na coluna d'água e, portanto em  $L_v$ , a parcela da radiação volumétrica de subsuperfície, aquela que penetra, interage e traz consigo a informação da água e seus constituintes opticamente ativos.

Nas últimas décadas ocorreram alguns lançamentos de satélites em órbita na Terra com objetivo de monitorar a qualidade das águas interiores e costeiras e de sistemas de água doce, com uma ampla gama de variações de

concentrações de corantes aquáticos orgânicos e inorgânicos, e que apresentem variações temporais e espaciais. Isso é opticamente mais complexo do que os sistemas de água no meio do oceano e, portanto, requerem modelos e algoritmos de maior sofisticação do que aqueles que extraem somente clorofila. (BUKATA *et al.*, 1995)

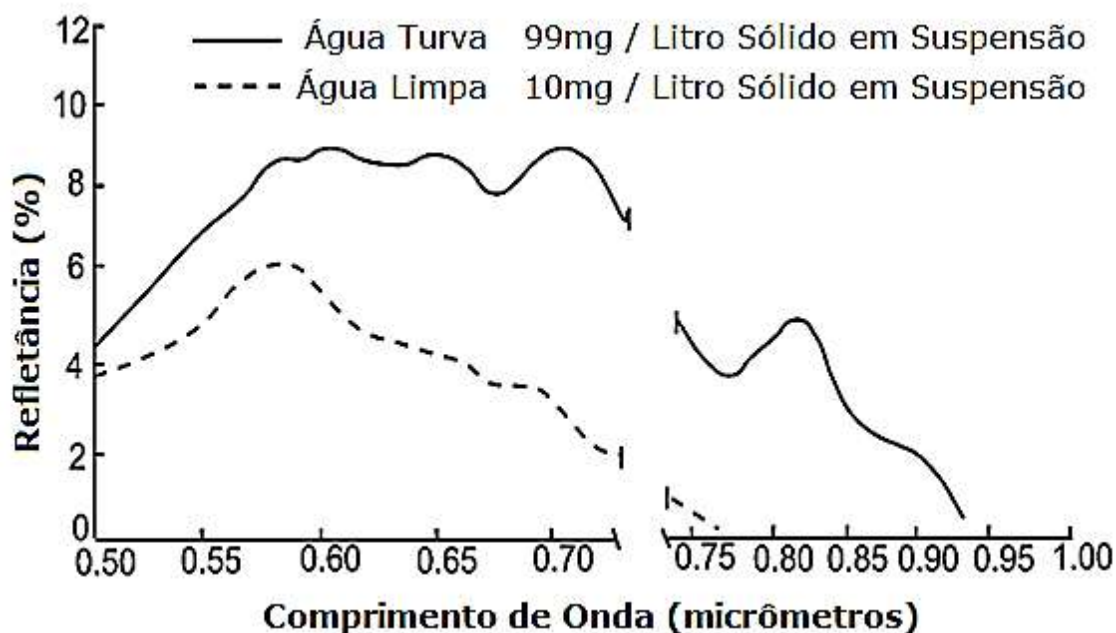


**Figura 1** - Trajetória e Interação da REM com a atmosfera, água e o fundo.  
Fonte: o autor, 2015.

O ramo da física que lida com a interação da radiação espectral e sua propagação no interior da molécula da água e de tudo que se encontra dissolvido, ou em sua suspensão é a ótica aquática. A cor da água é definida pela gama da radiação visível, e situada entre o intervalo de comprimento de onda ( $\lambda$ ) de 400 a 700 nanômetros. De características ópticas complexas, a coloração das massas de água naturais é resultado de processos de dispersão, absorção e da emissão pela coluna de água, além da reflectância do substrato de fundo, caso ele seja percebido do ponto de vista logo acima da interface ar-água (BUKATA *et al.*, 1995).

A resposta da reflexão difusa típica da água limpa (linha pontilhada) e com sedimentos suspensos (linha contínua), é apresentada na **figura 2**. Observa-se a influência que o aumento da turbidez da água produz no pico da

curva de reflectância, nos comprimentos de onda do vermelho, e alcança uma reflectância perto de 10%. Assim, a resposta espectral da água turva assume uma característica de resposta do material que está em suspensão (McCOY, 2005).



**Figura 2** - Reflectância da água com 10mg.L<sup>-1</sup> de sólido em suspensão (linha pontilhada) e água com 99mg/l de sólido em suspensão (linha contínua) em função do comprimento de onda. Fonte: Adaptado de Bartolucci *et al.*, 1977.

A radiação eletromagnética (REM) penetra no corpo de água limpa, e seus feixes são atenuados pelos fenômenos de dispersão e absorção. Comprimentos de onda ( $\lambda$ ) maiores que 900 nm são absorvidos nos primeiros centímetros; entre 700 e 800 nm a radiação percorre aproximadamente um metro; o  $\lambda$  do vermelho percorre até 4 metros antes de ser totalmente absorvido e; com mais energia, a faixa entre 450 e 550 nm tem um poder de penetração ainda maior; e, como apontam estudos de Swain & Davis (1978) quando  $\lambda$  está em 480 nm, justamente o pico de penetração de energia em águas limpas, a radiação eletromagnética pode atingir até 20 metros de profundidade (NOVO, 2010).

## 2.1.2 Fatores que alteram o comportamento da água

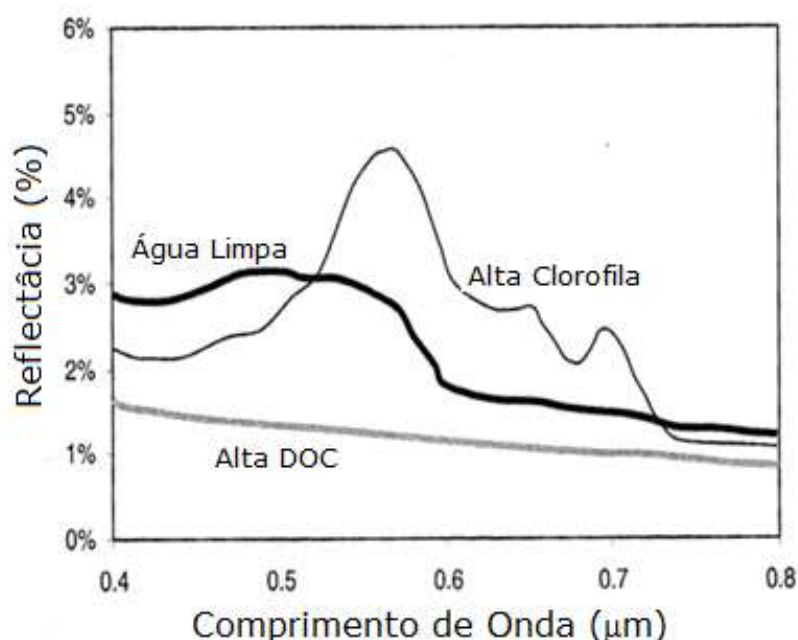
O sensoriamento remoto busca a análise das variações na magnitude e características espectrais da radiação do alvo. Para compreender o que ocorre, é necessário entender as propriedades dos processos ópticos do meio. Neste caso específico, da água, quando analisamos as propriedades ópticas, é necessário distinguir os efeitos da própria água no campo de luz a partir dos efeitos do material dissolvido e suspenso presentes. Neste contexto, utiliza-se o termo água pura para indicar água desprovida de outras substâncias, moléculas e sais inorgânicos dissolvidos. É reconhecido que as propriedades ópticas dos corpos de água naturais são influenciadas por várias substâncias. De uma forma prática podemos reconhecer os 3 componentes principais, para além da própria água pura: o fito e o zôoplâncton, o material em suspensão e as substâncias amarelas (material orgânico dissolvido) (IOCCG, 2000).

O fitoplâncton, incluindo organismos microscópicos, convenientemente é chamado de componente "fitoplanctônico" devido a sua grande influência sobre as propriedades ópticas. Este componente constitui a base da cadeia alimentar aquática e é muito importante no ciclo global do carbono. Seu principal pigmento, a clorofila-a, é muitas vezes denominado de "índice de biomassa" do fitoplâncton, e sua composição varia de acordo com a estrutura da comunidade da população de fitoplâncton da amostra e do estado fisiológico das células (IOCCG, 2000).

Muitas características importantes da água, como concentração de oxigênio dissolvido, pH e concentração de sal não podem ser observados diretamente através de mudanças na reflectância da água. No entanto tais parâmetros são correlacionados com a reflectância observada (LILLESAND *et al.*, 2007).

A reflectância da água muda conforme a concentração de clorofila presente. Com o aumento, essa concentração de clorofila tende a diminuir a reflectância no comprimento de onda do azul e aumentar na do verde, e essas mudanças servem para monitorar a presença e estimar a concentração

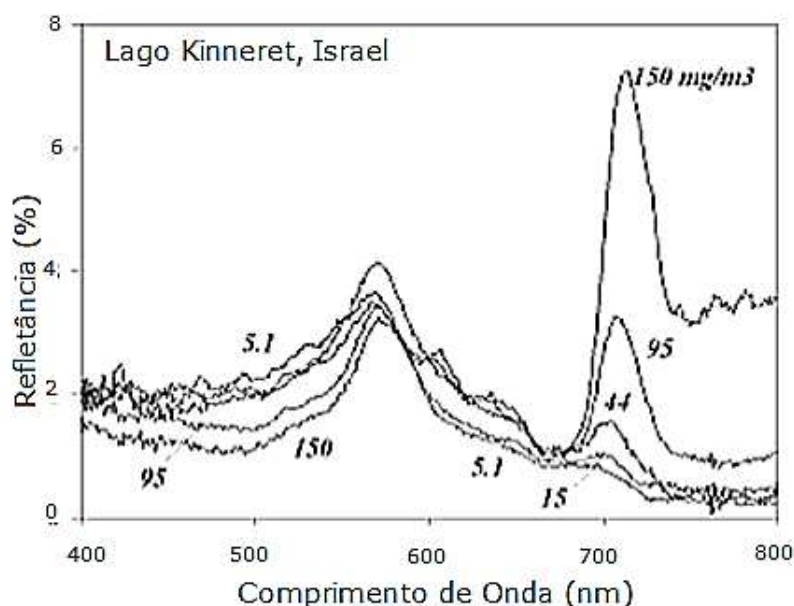
de algas através de dados oriundos de sensoriamento remoto. A **figura 3** ilustra alguns desses efeitos, a linha do espectro da água limpa, em um lago oligotrófico com nível de clorofila de 1,2  $\mu\text{g/l}$  e apenas 2.4  $\text{mg/l}$  de material orgânico dissolvido (MOD). Essa reflectância é relativamente alta na porção azul e verde do espectro e diminui na porção do vermelho e do infravermelho próximo. No espectro com alta concentração de clorofila, 12,3  $\mu\text{g/l}$  durante período de floração de algas aparece um pico de reflectância na faixa espectral do verde e uma absorção característica na região do azul e do verde, associadas aos vários pigmentos presentes nas algas. Já com alta concentração de material orgânico dissolvido (MOD), em um lago pantanoso ombrotófico, uma curva de reflectância quase plana aparece em todo o espectro visível (LILLESAND *et al.*, 2007).



**Figura 3** – Curvas de reflectância espectral para lagos com água limpa, altos índices de clorofila e altos níveis de carbono orgânico dissolvido (DOC). Fonte: Adaptado de Lillesand *et al.*, 2007.

Um pico proeminente da reflectância na faixa do verde representa a absorção mínima de todos os pigmentos da alga. Gitelson *et al.* (2000) em seu trabalho, durante período de proliferação de algas no Lago Kinneret no vale do Jordão - Israel, com concentração de matéria em suspensão não

orgânica muito baixa obteve a concentração fitoplantônica como único constituinte determinante das propriedades ópticas da água, conforme mostra a **figura 4**. Concentrado em características espectrais determinados pela absorção da clorofila e espalhamento por células fitoplanctônicas, todos os componentes da água possuem resposta óptica significativa na faixa espectral 400-500 nm. Incluindo a absorção pela MOD, o espalhamento pelo material particulado e a diminuição nos comprimentos de onda mais longos, pela absorção das clorofilas e carotenóides. De especial importância é um mínimo de reflectância perto de 440 nm, causada por absorção Chl, característica presentes em águas de estado oligotrófico (KIRK, 1994 *apud* GITELSON *et al.*, 2000).



**Figura 4** – Resposta espectral do Lago Kinneret, Fevereiro de 1994 com moderada a altas concentrações de Chl. Fonte: Adaptado de Gitelson *et al.*, 2000.

Na faixa de 400-550 nm, a absorção pelos pigmentos é tão forte que torna-se difícil distinguir entre espectros com Chl variando entre 5 e 150 mg / m<sup>3</sup>, já a magnitude e posição do pico do NIR dependem muito da concentração Chl (GITELSON *et al.*, 2000).

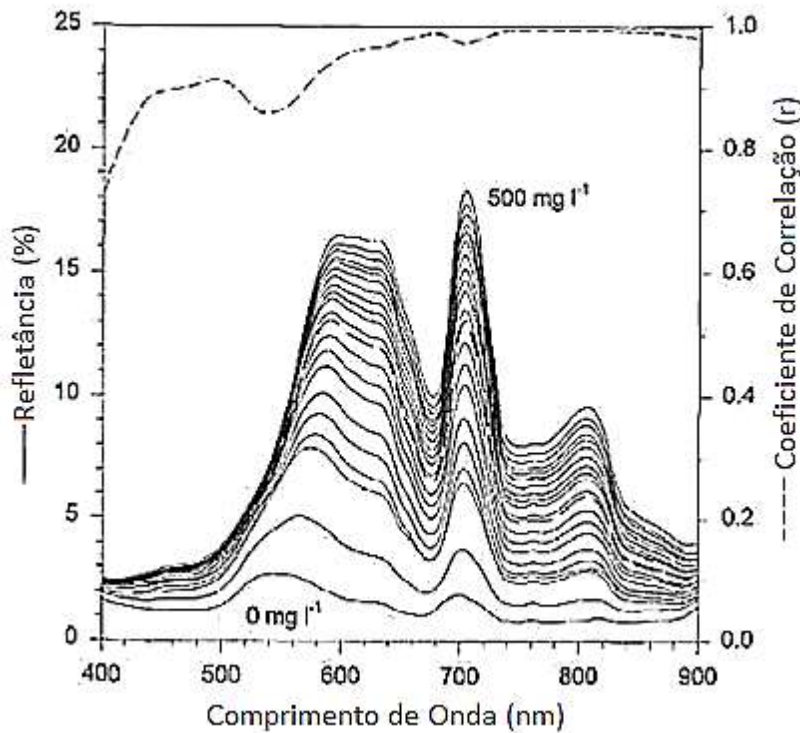
O mínimo próximo à região de 440 nm no espectro é muitas vezes indistinto em espectros de reflectância das águas produtivas, devido à forte absorção pela matéria orgânica dissolvida e espalhamento por partículas em



suspensão. Assim, todos os constituintes opticamente activos (dissolvidos e matérias em suspensão) contribuem para a reflectância na gama de 400 nm a 500nm, e uma característica comum de espectros de reflectância neste intervalo é a baixa sensibilidade da densidade de reflectância de fitoplâncton. A absorção de pigmentos é mascarado pela absorção da matéria orgânica dissolvida e pelo espalhamento em materiais em suspensão (GITELSON *et al.*, 2000).

O material em suspensão representa o material de natureza inorgânica, apesar de organismos microscópicos serem também materiais suspensos. Como exemplo rios enlameados, estuários e foz de rios são locais onde se pode prever a quantificação do material particulado na água. Contudo, este termo, material particulado, não representa apenas um tipo de material, mas uma gama de materiais. Suas características intrínsecas dependem de sua origem como areias brancas de uma praia de coral, ou barro vermelho de um rio e até mesmo poeira continental trazida por água, vento ou depósitos vulcânicos e se revelarão tonalizando a água de diferentes cores (IOCCG, 2000).

Ao estudar um corpo d'água tomado de algas, Han (1997) encontrou uma associação forte entre SSC e reflectância no intervalo entre 400 e 500 nm. Já os coeficientes de correlação de 0,99 ou superior foram observados a comprimentos de onda acima de 727 nm, com o coeficiente mais elevado, de 0,9944, ocorrem em 767, 769 e 770 nm. No que diz respeito aos picos de reflectância no verde e no infravermelho próximo (NIR), observou-se que, a partir de 225 mg/l (a linha tracejada mais espessa na **figura 5**), o pico de verde foi maior do que o pico de NIR (HAN, 1997).

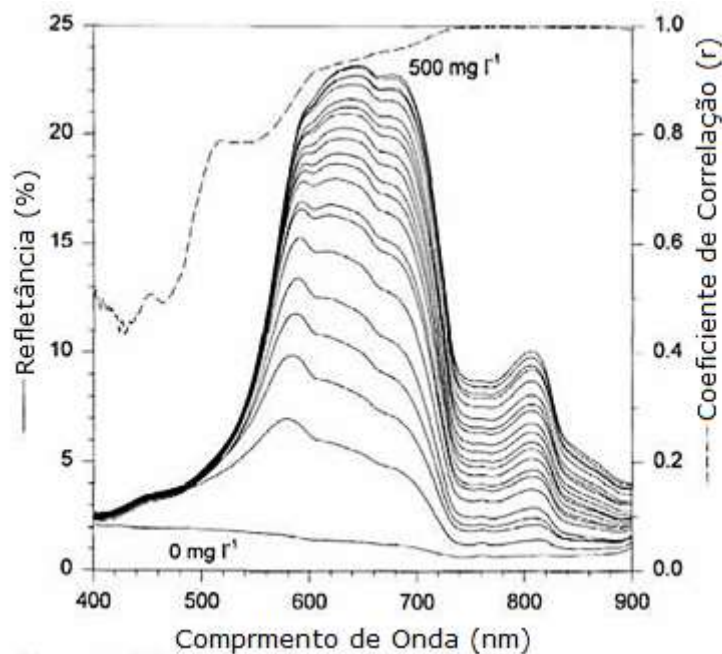


**Figura 5** - Relação entre SSC e a reflectância de um corpo aquático com muitas algas. Fonte: Adaptado de Han, 1997.

A **figura 6** mostra que a adição de sedimentos em água limpa influencia na resposta espectral nos comprimentos de onda entre 500nm e 900nm. Observa-se que o coeficiente de correlação( $r$ ) entre Concentração de Sólidos em Suspensão (SSC) e reflectância é maior que 0,7 acima de 500nm e 0,99 entre 722 e 900nm, indicando uma relação quase linear entre SSC e a reflectância nessa faixa. A maior correlação ocorreu em 827, 830 e 847 nm, entretanto, entre 400 e 500 nm a correlação não foi significativa (HAN, 1997).

As substâncias amarelas são substâncias orgânicas dissolvidas, assim classificadas devido a sua coloração. Esta componente inclui também material particulado detrítico, que geralmente tem características de absorção semelhantes às substâncias amarelas (IOCCG, 2000).

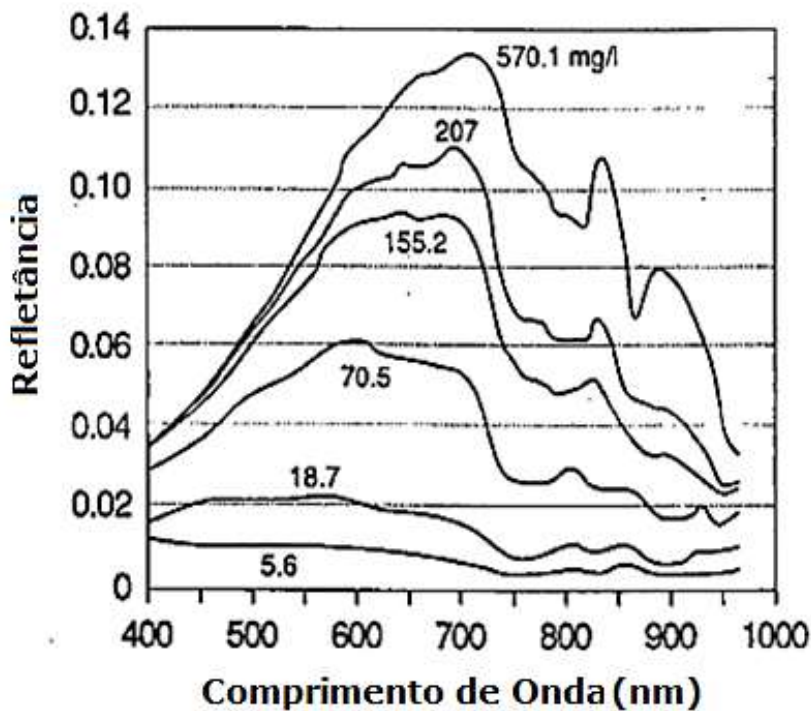
Em relação à água pura, suas características de absorção, podem, com maior confiança, serem consideradas invariantes. Apesar de corpos d'água ser considerados um dos sistemas mais dinâmico da Terra, com mudanças diárias de aspecto, ou mesmo em horas (McCOY, 2005).



**Figura 6** - Relação entre Concentração total de sedimento em suspensão (CSS) e reflectância. Fonte: Han, 1997.

A espessura óptica, também denominada turbidez é percebida através de uma avaliação da transparência da água, e a relevância nisto é que com o aumento de material particulado (orgânico ou inorgânico) haverá maior aumento no espalhamento (NOVO, 2010). Na água turva o pico de reflectância situa-se entre os comprimentos de onda de 550 e 600 nm, ou seja, a profundidade de penetração da energia diminui devido a estes “obstáculos”. O comportamento da água se modifica de tal forma que em determinados corpos d’água rasos é difícil discernir entre o fundo (solo) ou matéria em suspensão na água, em locais onde existe uma concentração de material em suspensão alta (McCOY, 2005).

A partir de amostras obtidas no rio Manacapuru, em Manaus, na Amazônia, Mertes *et al.* (1993), seguiu procedimentos de laboratório conforme reportado por Witte *et al.* (1981) e obteve uma reflectância conforme **figura 7**. A presença de sedimentos em concentração menor que 20mg/l aponta para um pico entre 550 e 600nm, no entanto, conforme a CSS aumenta, o pico de reflectância aumenta para valores de 600 até 750 mg/l.



**Figura 7** – Reflectância de misturas de água com sedimento em diferentes concentrações, a partir de amostras coletadas no rio Manacapuru na Amazônia. Fonte: Adaptado de Mertes *et al.*, 1993.

### 2.1.3 Relações entre Características Espectrais e Parâmetros de Qualidade da Água

Ritchie *et al.* (1974) desenvolveram uma abordagem empírica para estimar sedimentos em suspensão, estabelecendo relações empíricas entre propriedades espectrais e os parâmetros de qualidade da água. As formas gerais destas equações empíricas são:

$$Y = A + BX \text{ ou } Y = A B^X \quad (2)$$

Onde: Y é o valor obtido via SR (como radiância, reflectância e/ou energia); X é o parâmetro de qualidade de água de interesse (como sedimento em suspensão e clorofila); A e B são fatores derivados empiricamente.

Em abordagens empíricas, relações estatísticas são determinadas entre propriedades espectrais medidas e parâmetros de qualidade de água. Esses modelos empíricos servem para aplicações em que foram coletadas amostras, e só devem ser usados para estimar os parâmetros de qualidade de água para corpos d'água com semelhantes condições (RITCHIE *et al.*, 2003).

Schiebe *et al.* (1992, *apud* Ritchie *et al.*, 2003) utilizaram uma aproximação baseada nas propriedades ópticas da água e nos parâmetros da qualidade da água para desenvolver um modelo com base na relação física entre as características espectrais e físicas da camada superficial da água. Foi aplicado com sucesso para estimar sedimentos em suspensão e seu modelo tem a forma

$$R_i = B_i \left[ 1 - e^{(c/S_i)} \right] \quad (3)$$

Onde:  $R_i$  é a reflectância em cada banda  $i$ ;  $c$  é a concentração de sedimentos em suspensão;  $B_i$  representa o nível de saturação da reflectância em altas concentrações de sedimentos em suspensão na faixa de onda;  $i$  e  $S_i$  é o parâmetro de concentração quando a reflectância atinge 63% da saturação na faixa de onda  $i$  (RITCHIE *et al.* 2003).

Ambas as equações (1) e (2) citadas por Schiebe e Ritchie são limitadas ao uso de detecção remota para monitorar sedimentos suspensos e algas (além de plantas aquáticas vasculares e a temperatura da água) principais poluentes das águas dos Estados Unidos (RITCHIE *et al.* 2003).

Resultados preliminares alcançados parecem sugerir que o índice de estado trófico das águas, em sistemas aquáticos continentais, baseados na razão entre as bandas b4/b3 do sensor TN Landsat-7 (IET\_R TM4/TM3), podem ser úteis para a avaliação semi-qualitativa destes ambientes. Novo (2013) ao avaliar o reservatório da UHE Ibitinga, obteve resultados a partir de alguns cuidados como seleção de imagens que minimizem o efeito das

condições de iluminação sobre as interações entre a radiação eletromagnética e os campos opticamente ativos.

Novo (2013) testou algoritmos empíricos e semi-empíricos para estimar a concentração de clorofila-a em águas costeiras e continentais com base em medidas radiométricas obtidas *in situ* ou em simulações laboratoriais e com uso de imagens de sensores orbitais aerotransportados, a partir de pesquisas bibliográficas (GITELSON e KONDRATYEV, 1991; GONS *et al.*, 2002; DAAL'OLMO *et al.*, 2003; DAAL'OLMO e GITELSON, 2005; GITELSON *et al.*, 2010; YAKOBI *et al.*, 2011). Através dessa pesquisa, observa que a região espectral compreendida entre o vermelho e o infravermelho próximo é útil para estimar a concentração de clorofila em ambientes eutróficos onde a concentração de matéria orgânica dissolvida (colored dissolved organic matter - CDOM) é abundante.

Resultados preliminares indicam que os índices de vegetação aplicados no estudo de ecossistemas terrestres, tradicionalmente podem ser adaptados para o monitoramento do estado trófico de sistemas aquáticos. O uso concomitante de dados de sistemas automáticos permite que, a partir da identificação de um aumento da concentração de clorofila por períodos mais longos, possam ser obtidas imagens de satélite para a espacialização do problema, e assim planejar ações de mitigação dos danos ambientais (NOVO, 2010).

Mantovani (1993) obteve resultados de radiometria em laboratório utilizando diferentes concentrações de *C. vulgaris* em suspensão, e simulou a influência dos componentes fitoplâncton, matéria orgânica dissolvida (MOD) e material inorgânica particulado em suspensão (MIP) pela parede de revestimento interno do tanque de radiometria. Em ambiente com revestimento mais refletivo, ocorreu maior sensibilidade nas faixas em torno de 660 nm e de 480 nm, onde predominam as bandas de absorção de clorofila e dos carotenóides, respectivamente. Já com o revestimento preto do tanque, as algas promoveram diminuição da reflectância no azul e parte do vermelho, e aumento a partir de 680 nm até 900 nm. O pico de reflectância, que pode estar ligado ao fenômeno da fluorescência, ocorreu com o comprimento de onda de 690 nm. Segundo o autor, o tanque de paredes

pretas apresentou maior sensibilidade ao retroespalhamento pelas células das algas em suspensão enquanto o outro caso, com paredes mais refletivas responde melhor a absorção.

Utilizando espectroradiômetro para analisar as águas do rio Guaíba, Corazza *et al.* (2013) verificaram que o pico máximo de reflectância aparece localizado na faixa espectral entre 500 e 600 nm, indicativo do espalhamento interno das células dos organismos fitoplanctônicos de acordo com Novo (2001). O pico máximo de reflectância se deu bastante próximo à faixa dos comprimentos de onda do vermelho (entre 600 e 700 nm) indicando uma provável influência da resposta espectral de sedimentos inorgânicos suspensos. Esta influência confere a água uma coloração marrom, via combinação das cores verde e vermelha. Segundo Kirk (1994) e Novo (2001) a feição de absorção próxima aos 675 nm é resultante das características do pigmento fotossintético Chl-a, que absorve fortemente neste comprimento de onda. Enquanto a Chl-a apresentou as maiores correlações nos comprimentos de onda entre 553 e 697 nm, e com o pico de absorção em 675 nm, para o total de sólido em suspensão (TSS), as maiores correlações se deram na faixa do infravermelho, entre 706 e 900 nm. A Chl-a apresentou as maiores correlações, indicando que este pigmento foi o principal elemento constituinte opticamente ativo da água do lago Guaíba considerando a data de 07 de março de 2012.

#### **2.1.4 Satélite Landsat 8**

O satélite Landsat 8 entrou em operação em 2013, foi lançado a bordo de um foguete Atlas V da *Base Vandenberg Air Force* na Califórnia EUA e iniciou a disponibilização gratuita de imagens a partir do segundo semestre de 2013, utilizando a projeção UTM, Datum WGS 1984. A largura da faixa, ou seja, o tamanho de uma cena do Landsat-8 é de 170 km (N-S) e 183 km (L-O) e suas imagens são orientadas ao norte verdadeiro. A resolução radiométrica de suas imagens é de 16 bits e sua projeção é a UTM com o Datum WGS 1984. Possui uma frequência de revisita de 16 dias, sua altitude nominal é de

705 quilômetros e possui uma precisão cartográfica de 12 metros (USGS, 2013).

A plataforma Landsat 8, que é uma colaboração entre a NASA e o Serviço Geológico dos EUA, é composta de dois instrumentos imageadores, o Operacional Terra Imager (OLI) o Thermal Infrared Sensor (TIRS). O OLI possui uma resolução espacial de 30 metros das bandas 1 a 7 e 9. Na banda 8, a pancromática, sua resolução é de 15 metros. Já o sensor TIRS opera nas faixas do infravermelho termal e seus dados são coletados na resolução de 100 metros (USGS, 2013b). Na **tabela 1**, estão as características espectrais dos sensores do Landsat 8:

**Tabela 1** - Características espectrais dos instrumentos imageadores OLI e TIR.

Fonte: Adaptado de USGS, 2013b.

<b>Bandas do Landsat 8</b>	<b>Comprimento de Onda (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Resolução Espacial (m)</b>
Banda 1 – Costeira/Aerossol	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 (NIR)	0,85 – 0,88	30
Banda 6 – Infravermelho Curto 1	1,57 – 1,65	30
Banda 7 – Infravermelho Curto 2	2,11 – 2,29	30
Banda 8 – Pancromático	0,50 – 0,68	15
Banda 9 – Cirrus	1,36 – 1,38	30
Banda 10 – Infravermelho Termal (TIRS) 1	10,60 – 11,19	100
Banda 11 – Infravermelho Termal (TIRS) 2	11,50 – 12,51	100

## **2.2 Dados *In Situ***

O sensoriamento remoto pode ser usado para monitorar concentrações de sedimentos em suspensão, requerendo medidas *in situ* de concentrações de sedimentos para que se possa correlacionar com os dados do sensor remoto, gerando uma relação quantitativa (JENSEN, 2009). Recomenda-se que as medidas sejam feitas em dias com pouco vento, para evitar a



rugosidade da superfície e a ocorrência de reflexões especulares e que, assim os dados de concentração de sedimentos em suspensão estimada via sensoriamento remoto sejam prejudicados. O método do disco de Secchi depende da acuidade da percepção visual humana e pode variar substancialmente de indivíduo para indivíduo (PREISENDORFER, 1986).

Sriwongsitanon *et al.* (2011) ao estudar o lago Bung Boraphet (Tailândia), adverte que relações empíricas entre a aquisição da imagem de satélite e a observação na superfície são sempre necessárias para estimar a espacialização das variáveis da qualidade de água. Ao utilizar equações para previsões simples sobre os parâmetros de qualidade de água, aplicáveis às imagens obtidas em datas diferentes, da mesma localização, não foram bem sucedidas. Como as condições de intensidade de iluminação e ângulo solar são responsáveis diretos pela mudança na transparência da água, podem ocorrer alterações significativas em um curto período de tempo, ficando claro que o momento da aquisição da imagem via satélite deve ser concomitante ao das medidas *in loco*, utilizando disco de Secchi.

A quantidade mínima de pontos de amostragem, *in loco*, necessários para criar uma relação entre a concentração de sedimentos suspensos e imagens de satélite e a transparência da água pelo disco de Secchi merece importância. Um ponto a cada superfície de 0,85km<sup>2</sup> é estimado como suficiente, escolhidos aleatoriamente ou mesmo selecionados a fim de serem distribuídos uniformemente (SRIWONGSITANON *et al.*, 2011).

Pesquisas utilizando a técnica do disco de Secchi, buscando prever valores através de imagens de satélite, apontam a necessidade de investigação quanto à determinação de intervalos ideais para previsões de concentração de sedimento em suspensão, além de obtenção de uma maior confiabilidade em modelos superficiais e lagos profundos. O autor LI (2004) aponta que as imagens Landsat possuem resolução espectral suficiente para monitorar claridade e estado trófico de água de lagos, e ainda considerando um acervo histórico que inicia nos anos 70 foi possível uma comparação multitemporal com uma longa e regular série de dados. A desvantagem na utilização de imagens do Landsat é o ciclo de revisita, de apenas 16 dias para re-imagear o mesmo ponto na Terra, combinando isso a possibilidade de

nebulosidade temos uma limitação significativa (SRIWONGSITANON *et al.*, 2011).

Destaca-se que os autores citados até aqui sugerem para a série de cuidados preliminares para coleta de dados *in situ*. Como a fonte de radiação é o Sol, devem-se levar em consideração os efeitos atmosféricos que a radiação sofre na sua trajetória antes de chegar ao sistema sensor orbital. Assim, dois procedimentos são absolutamente necessários: correção atmosférica e conversão do número digital em grandeza física (reflectância). No caso de análises sazonais feitas com estas imagens estes procedimentos são absolutamente indispensáveis.

### **2.2.1 Técnica “disco de Secchi”**

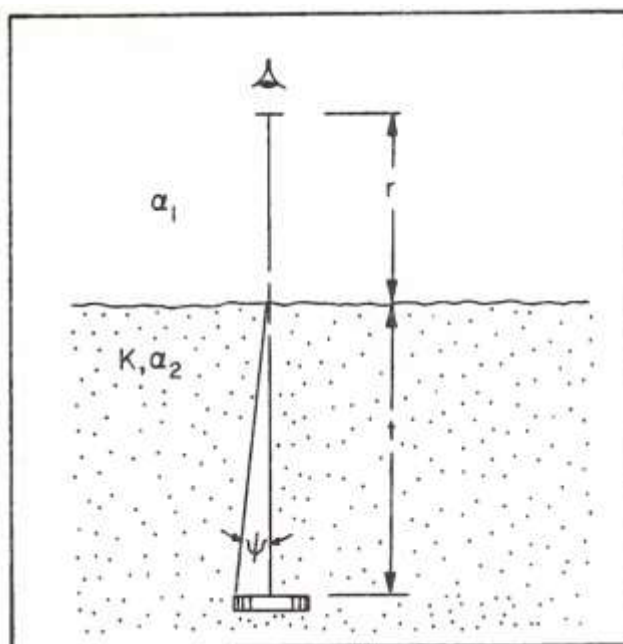
A técnica do disco de Secchi, **figura 8**, criada por Fr. Pietro Ângelo Secchi em abril de 1865 para obtenção de dados sobre a claridade das águas do Mar Mediterrâneo, serve para estudos de águas naturais com precisão de instrumentação óptica. Esta técnica depende de regras metodológicas de utilização para extração de medidas e das propriedades ópticas inerentes de um corpo de água. A clareza geral das águas tem, portanto uma relação com a profundidade em que o disco desaparece (PREISENDORFER, 1986).

A turbidez é uma propriedade óptica relacionada à luz espalhada pelo material em suspensão e depende do comprimento de onda utilizado, do tamanho, da forma e da natureza das partículas (PEREIRA, 1992).

A técnica de utilização do disco de Secchi (um disco branco e preto circular com 30 cm de diâmetro) consiste em imergi-lo em um corpo natural de água por um observador humano, com o auxílio de uma corda, até que não possa mais ser visualizada, essa medida gera um índice de clareza visual simples (PREISENDORFER, 1986).

Este procedimento empírico para encontrar um índice de claridade da água usando a profundidade de desaparecimento de um disco padronizado, deve obedecer alguns procedimentos como, por exemplo, deixar a água tão

profundamente sob o disco que o fundo não tenha efeito significativo sobre o campo de luz (PREISENDORFER, 1976).



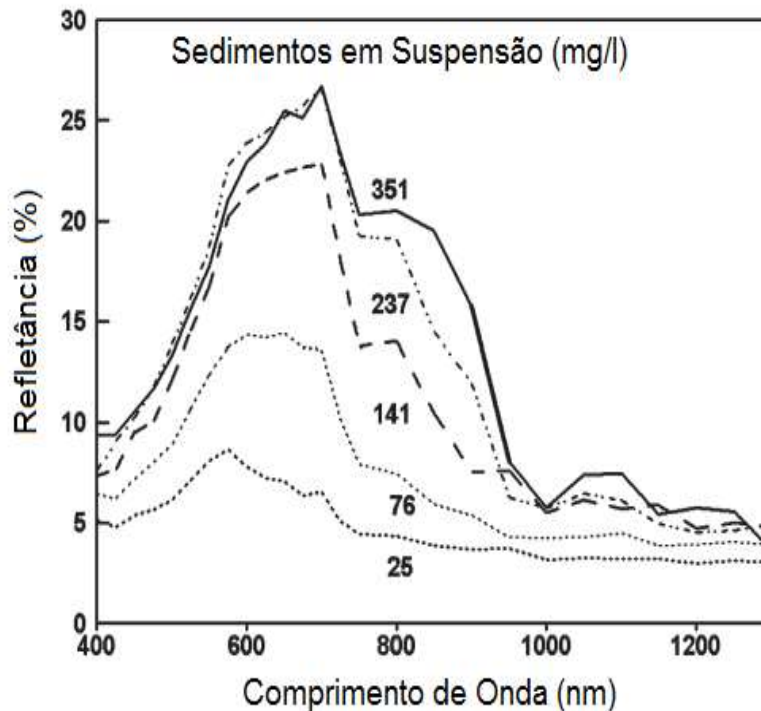
**Figura 8** - Redução de contraste ao longo de um caminho através do composto ar, superfície ar-água e água. Fonte: Preisendorfer, 1976.

Pesquisando ambientes lênticos Noernberg *et al.* (1996) concluíram que foi possível avaliar o comportamento espectral da água, sobretudo na região do visível, relacionando a profundidade Secchi à gradientes de atenuação da radiação eletromagnética. As maiores profundidades Secchi refletem uma maior penetração da radiação eletromagnética na água e são associadas às menores concentrações de sólidos em suspensão e clorofila. As bandas de absorção e fluorescência da clorofila também foram bem evidenciadas.

### 2.2.2 Sedimento em Suspensão

O sedimento em suspensão é o poluente mais comum, tanto em peso quanto em volume, encontrado nas águas doce superficiais, resultando em uma radiância emergente da superfície da água nas faixas do visível e do infravermelho próximo do espectro eletromagnético (RITCHIE *et al.*, 1976).

Medidas *In situ* e laboratoriais controladas, por aeronaves e por satélite, mostraram que a radiação das águas de superfície é afetada pelo tipo de sedimento, textura e cor (NOVO *et al.*, 1989), vista do sensor, ângulos solares (RITCHIE *et al.*, 1975) e profundidade da água.



**Figura 9** – A relação entre a reflectância e como o comprimento de onda é afetado pela concentração de sedimentos em suspensão. Fonte: Adaptado de Ritchie *et al.*, 1976.

Ritchie *et al.* (1976) em estudos *in situ* concluíram que, conforme a **figura 9**, os comprimentos de onda entre 700 e 800 nm são mais utilizáveis para determinar sedimentos em suspensão na superfície da água. Mostraram que relações empíricas (algoritmos) desenvolvidos para relacionar a concentração de sedimentos em suspensão com radiância ou reflectância, desenvolvido para em um alvo específico, em um ano pode ser aplicável por vários anos.

A relação entre sedimentos em suspensão e a radiância ou a reflectância encontrada depende da concentração de sedimentos em suspensão, pois a quantidade de radiação refletida tende a saturar com seu aumento. Se a concentração de sólidos em suspensão variar entre zero e 50

mg/l a reflectância, de praticamente qualquer comprimento de onda, se relacionada linearmente com concentrações de sedimentos suspensos. No entanto, à medida que a concentração de sedimentos em suspensão aumenta de 50 para 150 mg/l ou superior, são necessárias relações curvilíneas (RITCHIE *et al.*, 1976). A maioria dos pesquisadores concluiu que os sedimentos em suspensão podem ser mapeados e monitorados em grandes massas de água que utilizam sensores disponíveis em satélites atuais (RITCHIE *et al.*, 2003).

Cabral *et al.* (2009) em seu estudo no reservatório de Cachoeira Dourada, GO/MG utilizou o disco de Secchi com diâmetro de 20 cm, para avaliar a transparência da água correlacionando com o material em suspensão na água. As leituras ocorreram entre as 9 e as 15 horas. A correlação, feita através do método de Pearson, entre dados obtidos *in situ* e a concentração de sedimentos em suspensão (CSS) em unidade de mg/l. A presença de altos valores de concentração de CSS provocou maior turbidez na água, impedindo assim a penetração da luz nas águas do reservatório de Cachoeira Dourada. Quando correlacionado CSS e visibilidade da água, demonstrou-se que a compreensão dos padrões de distribuição da água a partir de dados de disco de Secchi em reservatórios são fortemente reguladas pela descarga fluvial.

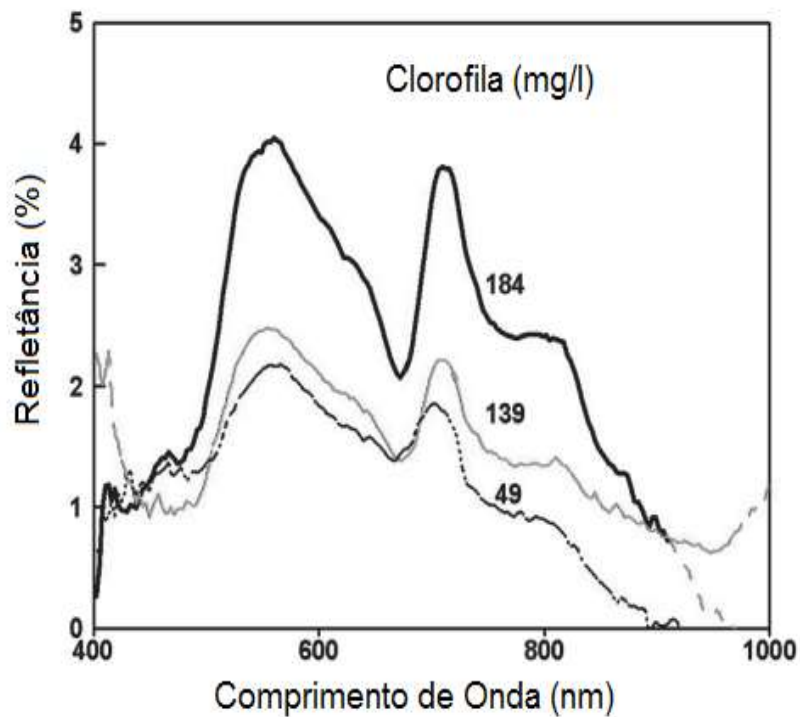
Alguns fatores apontados por Cabral *et al.* (2009) são que a baixa transparência da água registrada pela profundidade do disco de Secchi em algumas áreas também é acompanhada pelo aumento da CSS, e em alguns setores do lago onde encontram-se as maiores seções transversais, as menores velocidades de escoamento da água e onde grande parte da água que chega ali já passou pelo processo de precipitação do material particulado em suspensão, tem-se portanto maior disponibilidade de luz neste trecho, e isso acaba refletindo em valores mais elevados medidos com disco de Secchi e menores para a CSS.

### 2.2.3 Clorofila-a

De acordo com Lorenzen (1980) a grande variação na profundidade do disco de Secchi em baixas concentrações de clorofila deve ocorrer apenas em lagos com pequenos valores de  $\alpha$  (coeficiente de extinção de algas e outros fatores). Se assumirmos que a profundidade do disco de Secchi possa ser aproximada pela profundidade de 20% de luz de superfície, a profundidade do disco de Secchi pode ser expressa como proporcional ao coeficiente de extinção total.

Quando as concentrações de clorofila são elevadas, o coeficiente de extinção, e assim a profundidade do disco de Secchi, são em grande parte controlada pela concentração de clorofila. No entanto, quando a concentração de clorofila é baixa, o coeficiente de extinção total de luz, e a profundidade do disco de Secchi, são largamente controlados por outras propriedades de absorção de luz que a clorofila. Embora a profundidade do disco de Secchi seja inversamente proporcional à concentração de fitoplâncton, a constante de proporcionalidade é muito pequena; por exemplo, a uma concentração de cerca 25  $\mu\text{g/l}$  de clorofila-a. em água bastante clara ( $\alpha = 0,1$ ) a mudança na profundidade do disco de Secchi, resultante em um acréscimo de 10  $\mu\text{g}$  por litro em clorofila é de apenas 0,3 m. Para as águas mais turvas, a mudança seria ainda menor (LORENZEN, 1980).

Assim como acontece com sedimentos em suspensão, a maioria dos estudos de sensoriamento remoto de clorofila na água é baseada em relações empíricas entre radiância ou reflectância em faixas estreitas, ou razão de bandas, e a clorofila. Os dados de campo são utilizados para calibrar a relação estatística ou para validar os modelos desenvolvidos. As medições efetuadas *in situ* mostram os espectros (**figura 10**) com o aumento da reflectância associado ao aumento da concentração de clorofila na maior parte dos comprimentos de onda, com exceção as faixas de absorção de clorofila (675-680 nm) que ocorre a diminuição da reflectância na região espectral (RITCHIE *et al.*, 2003).



**Figura 10** - A relação entre a reflectância e como o comprimento de onda é afetado pela concentração clorofila em suspensão. Fonte: Adaptado de Ritchie *et al.*, 1976.

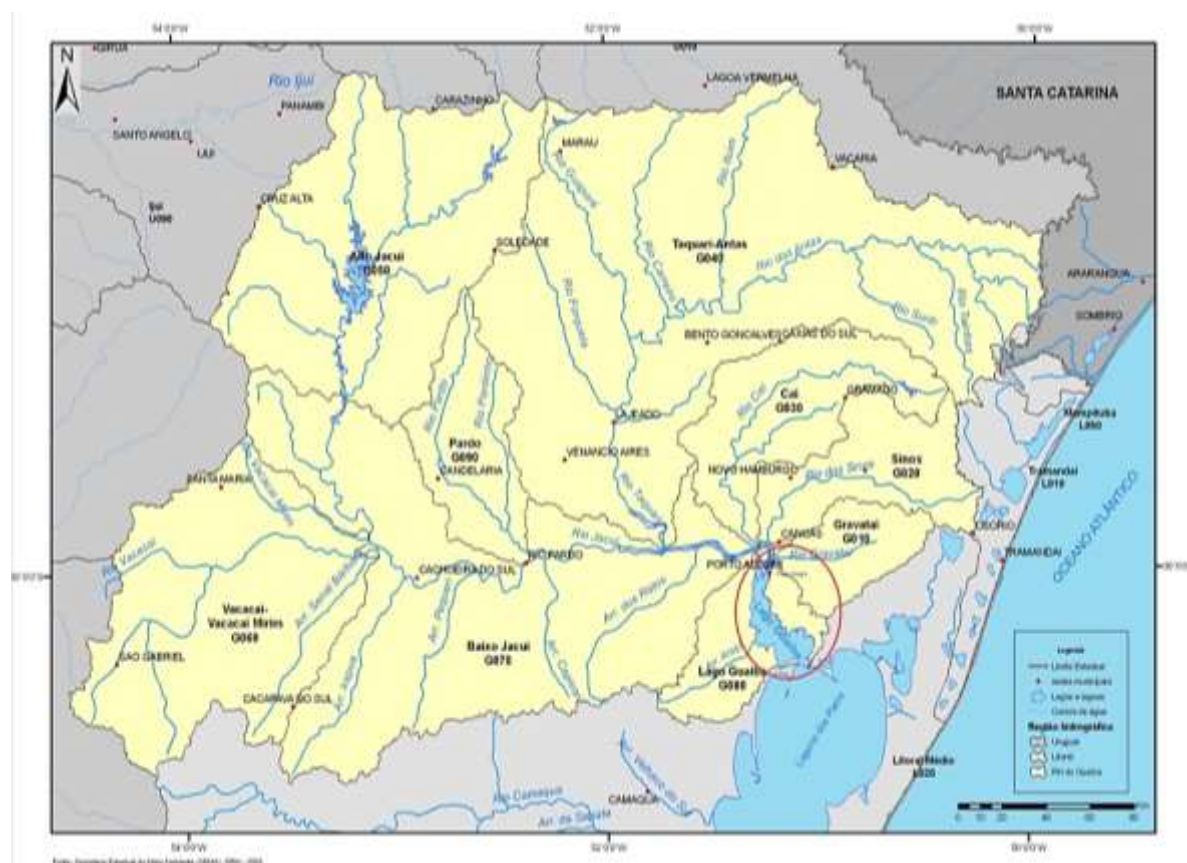
Enquanto que a estimativa de clorofila seja possível de se obter utilizando técnicas de sensoriamento remoto, alguns estudos de Dekker (1993b) e do próprio autor apontam que satélites como Landsat, que possuem bandas com comprimentos de onda mais largas não permitem a discriminação de clorofila em águas que possuam uma grande concentração de sedimentos em suspensão (RITCHIE *et al.*, 2003).

Existe uma relação linear entre a clorofila e a diferença entre a energia emergente no intervalo entre 700 e 705 nm do espectro, devido ao espalhamento e a faixa de absorção da clorofila no intervalo entre 675 e 680 nm. Essa relação é válida, mesmo na presença de altas concentrações de sedimentos suspensos que podem dominar o restante do espectro (RITCHIE *et al.*, 2003).

### 3 ÁREA DE ESTUDO

#### 3.1 Área de estudo

A área de estudo corresponde ao Guaíba, corpo de água doce, limitado ao Norte pelo complexo deltaico do Jacuí (contendo oito ilhas grandes e oito menores, com sedimentação deltaica resultante das descargas de cinco rios: Jacuí, Taquari, Gravataí, Sinos e Caí) e ao sul pela Laguna dos Patos. A leste encontra-se o município de Porto Alegre e a Oeste os municípios de Guaíba e Barra do Ribeiro. Este importante corpo de água doce está inserido na bacia hidrográfica do Lago Guaíba (**figura 11**), e está situado a oeste da Planície Costeira e do Sistema Lagunar dos Patos. Suas águas dão acessibilidade às navegações marítimas devido à conexão de suas águas da Laguna dos Patos e assim ao Oceano Atlântico (VERDUM, 2010).



**Figura 11** - Bacia hidrográfica do Lago Guaíba, com os rios Gravataí, Sinos, Caí, Taquari e Jacuí além de riachos que descarregam suas águas no Guaíba, destacando a área de estudo. Fonte: SEMA, 2013.

A bacia hidrográfica do Lago Guaíba possui uma área de 2.253km<sup>2</sup> e apresenta uma população de mais de um milhão de habitantes, a grande maioria concentra-se junto a áreas urbanas como a região metropolitana de

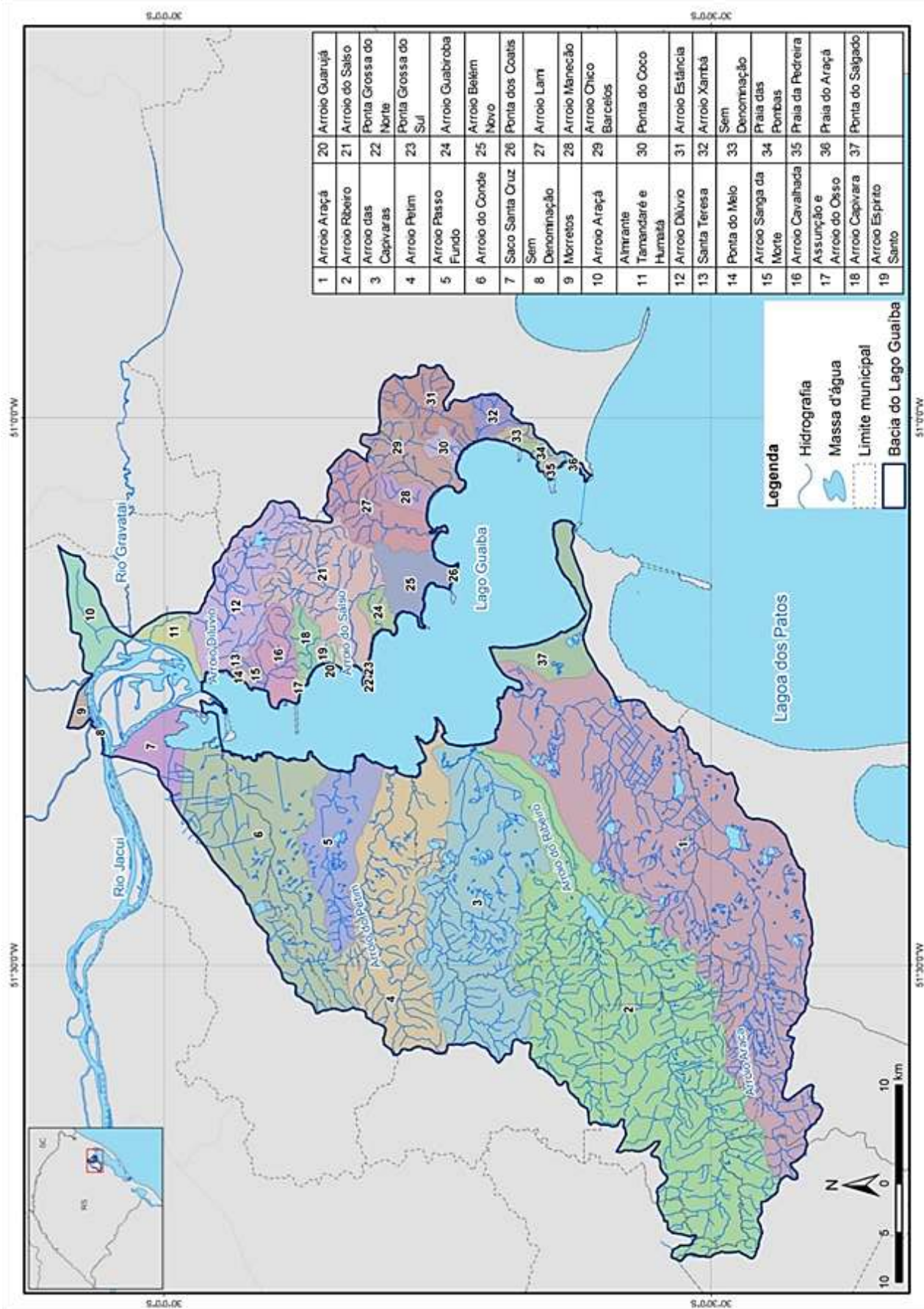


Porto Alegre. As atividades econômicas da região são o comércio e serviços, indústria e em sua porção sul, a agricultura com o cultivo de arroz em destaque. Além de ser fonte de captação de água para abastecimento de toda população, o Lago Guaíba possui um canal de navegação que liga a região central do estado a Laguna dos Patos e, por conseguinte o Oceano Atlântico (BENDATI, 2003).

A bacia do Guaíba é drenada por 37 arroios principais, que contribuem diretamente ao Guaíba. Além deles existe (**figura 12**) também o lançamento de efluentes de esgoto não tratado, emitidos por um emissor, junto à região da Ponta Grossa, distante 1600m da margem. Os principais provedores de água para o Guaíba são os rios Jacuí, Caí e Sinos, representando 90,6% de toda descarga que entra no sistema. Entre os anos de 2003 e 2006 a vazão média entre os três rios de maior significância foi de 781m<sup>3</sup>/s, um valor apontado como relativamente baixo pelo autor, porém condizente com um período de El Niño médio fraco (NETO, 2011).

Oliveira *et al.* (2012) ao analisarem a qualidade da água a partir da coleta de amostras e da aplicação do teste colimétrico, pela técnica de tubos múltiplos, contagem de bactérias heterotróficas e uma análise físico-química da água, encontraram resultados que apontam que quanto mais próximo da foz do Arroio Dilúvio, maiores foram os valores de coliformes totais. Essa concentração está associada ao recebimento de dejetos de esgoto cloacal, doméstico e hospitalar que o arroio recebe.

Os estudos de Oliveira *et al.* (2012) e do DMAE (2009) apontam sobre a existência de um elevado nível de poluição, deixando as águas longe das condições sanitárias adequadas e, portanto bastante poluídas. O Arroio Dilúvio está entre os córregos mais poluídos do município de Porto Alegre.



**Figura 12 -** Bacia do Lago Guaíba seus contribuintes. Fonte: <[www.planolagogaiba.com.br/bacia](http://www.planolagogaiba.com.br/bacia)> acessado em maio de 2015.

Amostras de água do Arroio Dilúvio mostram a contaminação do manancial com esgoto doméstico e fezes, verificando a baixa qualidade da água, de acordo com a contagem de bactérias heterotróficas e a colimetria. A única exceção é na área da nascente, onde a água se encontra mais preservada, local onde fica o parque Saint' Hilaire no município de Viamão (OLIVEIRA *et al.*, 2012).

O Arroio Passo Fundo é um importante arroio situado no município de Guaíba sofre de maneira semelhante ao arroio Dilúvio em Porto Alegre com a descarga de resíduos domésticos e industriais (GUERRA *et al.*, 2002). Estes despejos evidenciam que a deficiência do sistema de abastecimento de água e do sistema de esgotos sanitários resulta no aparecimento de vetores e uma maior probabilidade de ocorrência de doenças na população.

Em um estudo recente, Matos *et al.* (2002) verificaram a perda de qualidade das águas fluviais das nascentes conforme elas fluem em direção à foz, com base em análises laboratoriais, as águas do Arroio Passo Fundo são impróprias tanto para o consumo humano, quanto para balneabilidade, com exceção das nascentes.



**Figura 13** - Vista dos bancos de areia criados no Guaíba pelo DMAE. Fonte: <[www.popa.com.br](http://www.popa.com.br)> Acessado em maio de 2015.

A instalação de dutos do emissário subaquático canalizando o esgoto para estações de tratamento na zona sul da cidade, vide Projeto PISA, segundo denúncias no ano de 2012, estão criando bancos de areias em áreas de tráfego de embarcações. Conforme as **figuras 13 e 14** é possível observar que o fundo do rio foi escavado para instalação da tubulação, ressuspendendo material depositado no fundo e criando bancos de areias. Além disso, arrastando os sedimentos e contribuindo para o assoreamento do canal de navegação e seus acessos (RIBEIRO, 2012).



**Figura 14** - Sedimentos do fundo do Rio Guaíba aflorados em banco criado pelas obras do Projeto PISA. Fonte: <[www.popa.com.br](http://www.popa.com.br)> Acessado em maio de 2015.

Um exemplo de atividade que causa poluição química no Guaíba, financiada pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e autorizada pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental (Fepam), é a expansão da fábrica Celulose Riograndense (CMPC). Com objetivo de quadruplicar a produção e obter 4,1 milhões de toneladas anuais de celulose branqueada a fábrica irá despejar ainda mais resíduos químicos no Guaíba (BELMONTE, 2013). Somente nesta fábrica, o total de efluentes aumentará 3,3 vezes, o que fará com que o Guaíba receba diariamente 154.400 m<sup>3</sup> de resíduos industriais, frente aos 46.400 m<sup>3</sup> atualmente lançados diariamente (FEPAM, 2008). O mais questionável, nesta licença é a

autorização do aumento de emissão de mercúrio, um metal pesado e causador de inúmeros problemas para saúde animal e para o meio ambiente (BELMONTE, 2013).

Os rios Jacuí, Taquari, Sinos e Gravataí são os responsáveis pelos expressivos volumes de sedimentos transportados para o Guaíba, a partir da drenagem da Bacia do Sudeste do RS, constituída por rochas plutônicas, vulcânicas e sedimentares (TOLDO Jr., 1994 *apud* BACHI, 2000).

O delta do Jacuí, complexo deltaico, é formado devido à perda de competência de seus tributários ao ingressar na bacia deposicional do Guaíba, e por ali ficam depositados os sedimentos mais grosseiros. Já os sedimentos mais finos (silte e argila compostos por quartzo, argilominerais e matéria orgânica) acompanham as descargas dos tributários e ingressam no Guaíba como plumas de material em suspensão (BACHI, 2000).

As condições de deposição de sedimentos do Guaíba são estabelecidas por parâmetros controlados pelo nível de energia das correntes. Essas correntes são induzidas pelo vento e pelo fluxo natural de suas águas, direcionadas para Laguna dos Patos ao Sul. A deposição desses sedimentos se dá principalmente em partes mais profundas do Guaíba rasas (profundidades maiores que 3 metros), ou seja, em seu canal de navegação (BACHI, 2000).

Bachi (2000), em seu estudo sobre a Sedimentação do Guaíba, lembra que a turbulência por ondas induz a ressuspensão de sedimentos depositados pelas ações de correntes, e isso reduz a taxa de deposição nas áreas rasas (profundidade inferior a 3 metros). O fundo do Guaíba, portanto, entre a margem e a profundidade de 3 metros é arenoso, sem a cobertura de sedimentos finos, removidos constantemente pela ação das ondas. As ondas no Guaíba, geradas pelo vento, são caracterizadas pelo pequeno porte, curto período e baixa frequência, porém, devido à área de 500Km<sup>2</sup> da Bacia do Guaíba, a ondulação tem importância na geração e distribuição de energia e portanto na distribuição de sedimentos em todo sistema.

Nicolodi *et al.* (2013) em seu trabalho sobre os ambientes de sedimentação do lago Guaíba analisou as características das ondas



incidentes no Lago Guaíba e suas relações com a ressuspensão de sedimentos junto ao fundo. Como resultado obteve um mapa, conforme figura 14, de fundo classificado em ambientes: deposicionais (51% da área do lago), transicionais (41%) e erosionais ou de não deposição (8%).

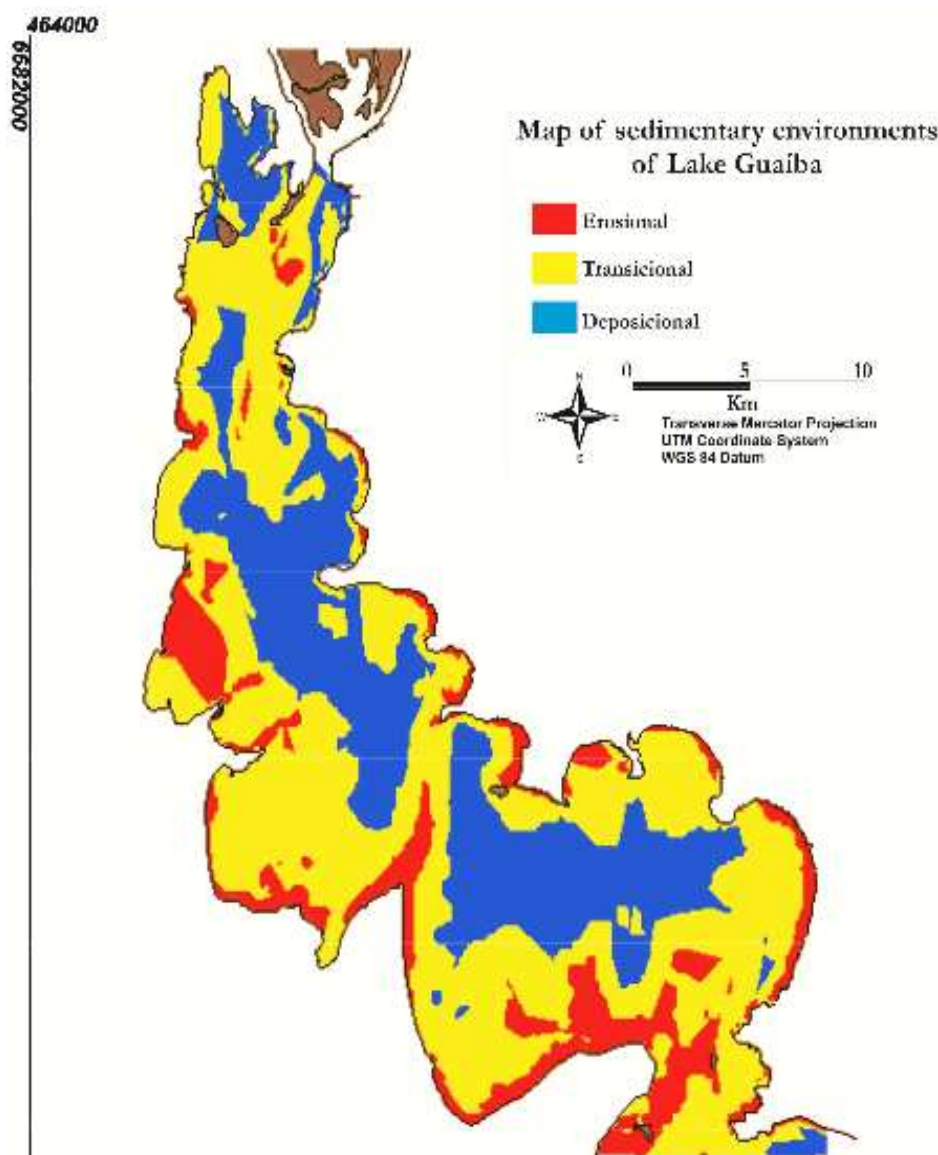
O comportamento hidrodinâmico de um corpo d'água tem papel destacado sobre todo o ecossistema, influenciando a dinâmica de nutrientes, poluentes e sedimentos e a distribuição espacial de fitoplâncton e zooplâncton (PAZ *et al.*, 2005).

A **figura 15** mostra os resultados da simulação hidrodinâmica bidimensional do Lago Guaíba, classificando-o em sete regiões, conforme metodologia realizada por Paz *et al.* (2005) possibilitando inferir sobre o comportamento de determinadas regiões do lago quanto ao padrão de circulação da água.

O mapa da **figura 15** mostra como o Guaíba está segmentado em relação à velocidade de escoamento de suas águas, e as classes foram separadas em:

- Região 1: afluentes formadores do Lago Guaíba, apresenta velocidade do escoamento em torno de 0,1 m/s;
- Região 2: desembocadura do escoamento afluente do Delta do Jacuí, apresenta as mais elevadas velocidades do escoamento em todo o Lago Guaíba;
- Região 3: prolongamento da região, sempre mantendo-se pelo centro do lago (junto ao canal de navegação) e apresenta velocidades altas, mas inferiores às da região 2;
- Região 4: seguindo o canal de navegação desde a região anterior, com menores velocidades do escoamento que esta;
- Região 5: estreita área nas laterais do canal de navegação, estendendo-se por todo ele, percebe a mudança significativa na velocidade do escoamento em relação ao canal;
- Região 6: zonas de baixas velocidades (em torno de 0,03 m/s) que ocupam a maior área do lago, situando-se entre o canal de navegação e as margens;
- Região 7: quase estagnação do fluxo, em relação às demais regiões, com velocidades inferiores a 0,01 m/s. São áreas caracterizadas por estarem “protegidas” do escoamento nas demais áreas do lago devido à própria

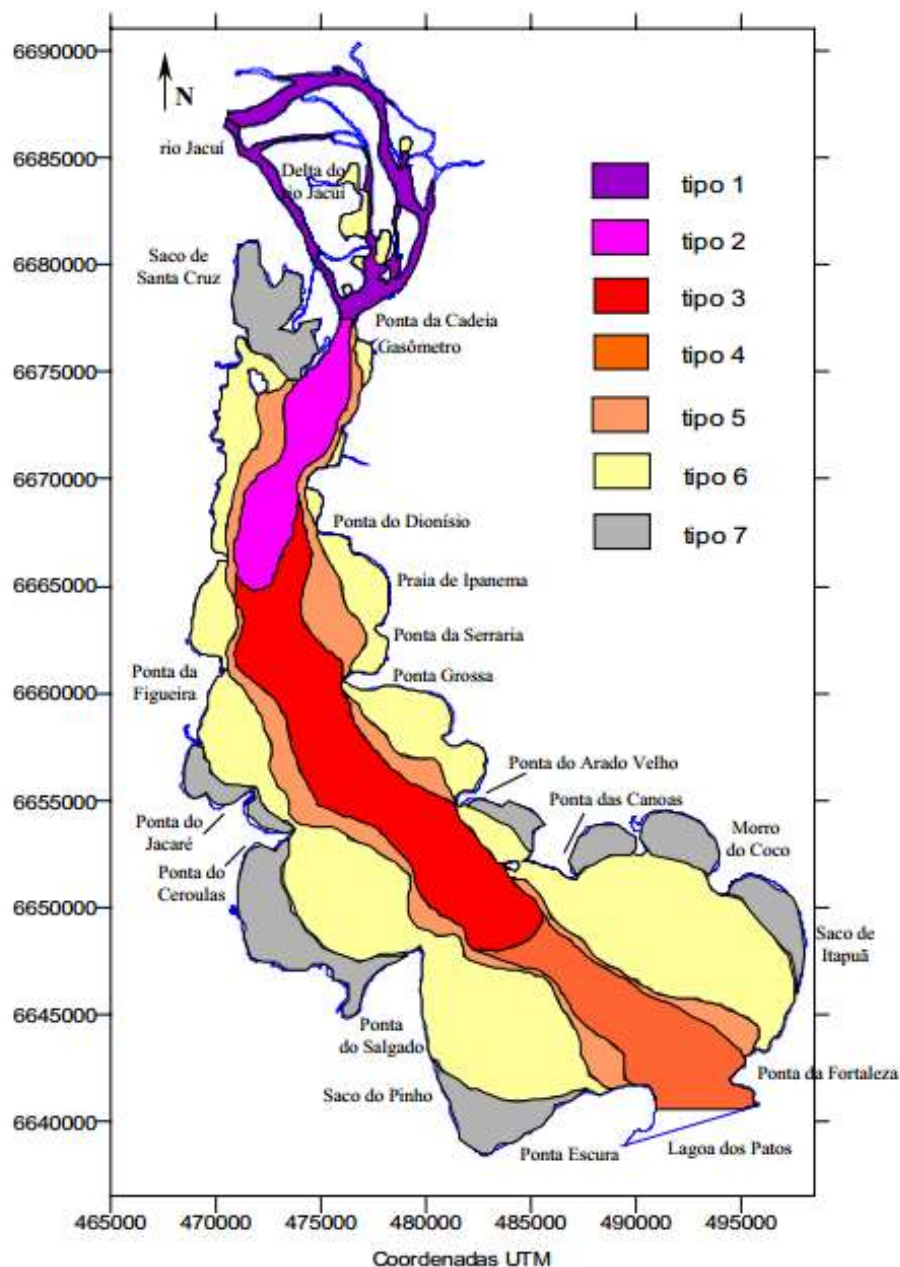
configuração da margem e à presença de pontas, como as Pontas do Ceroulas e do Salgado (PAZ *et al.*, 2005).



**Figura 14** – Ambientes sedimentares do Lago Guaíba.

Fonte: Nicolodi *et al.*, 2013.

A deposição de sedimentos no fundo do Guaíba está diretamente relacionada à velocidade do escoamento, influenciando as áreas com granulometrias diferentes dos sedimentos. Nesse sentido, a hidrodinâmica das águas do Guaíba como ocorre o transporte e a dispersão de poluentes (PAZ *et al.*, 2005).



**Figura 15** - Segmentação do Lago Guaíba em sete tipos de regiões, com base no padrão de circulação da água. Fonte: Paz *et al.*,2005.

### 3.2 Qualidade das águas do Guaíba

O Guaíba têm a classificação de suas águas sob responsabilidade do Departamento Municipal de Águas e Esgoto (DMAE), através do Índice de Qualidade de Água (IQA), que leva em conta os parâmetros: oxigênio dissolvido (OD), coliformes fecais, pH, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), fosfato total, nitrato, turbidez e sólidos totais.



**Tabela 2** - Classificação das águas do rio Guaíba e seus principais afluentes. Fonte: adaptado de Bendati, 2003.

<b>Rio/Arroio</b>	<b>IQA (DMAE)</b>	<b>Classe de Classificação (CONAMA)</b>
Gravataí	entre ruim e muito ruim	4
Sinos	entre regular e ruim	4
Caí	entre as melhores qualidades dos formadores do Guaíba	2
Jacuí	entre as melhores qualidades dos formadores do Guaíba	2
Dilúvio	entre muito ruim e ruim	4
Guaíba (próximo ao arroio Dilúvio)	entre regular e ruim	4

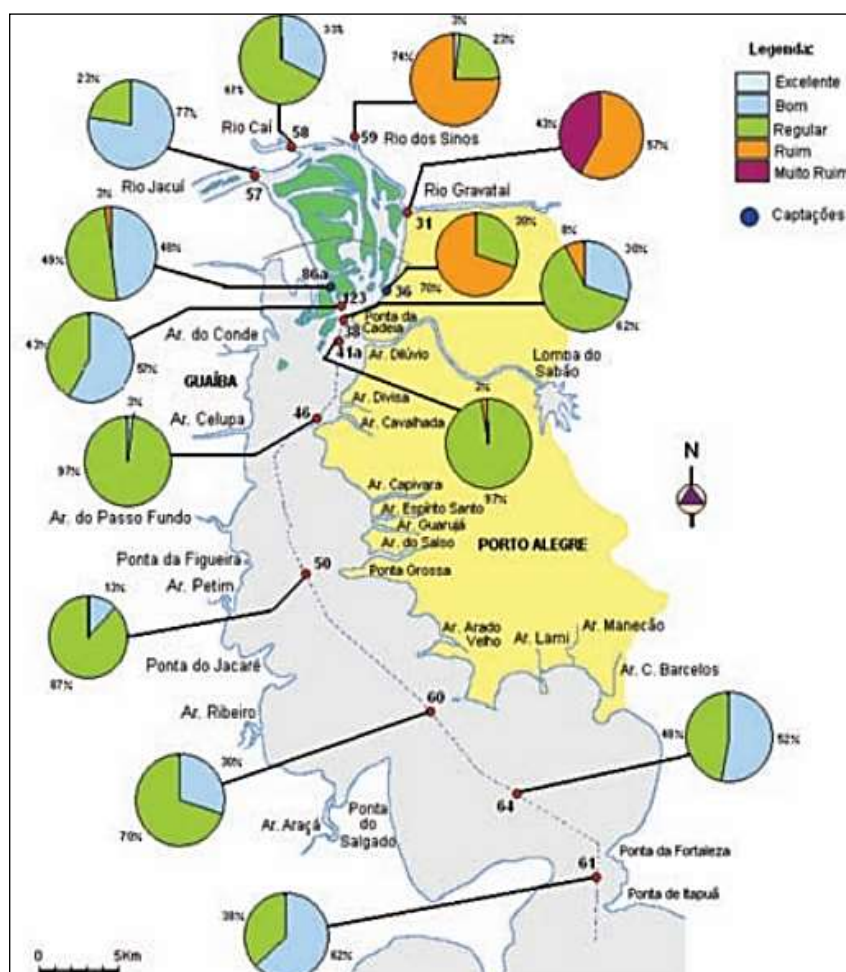
O IQA é enquadrado nas seguintes classes: Muito Ruim (0 a 25); Ruim (26 a 50); Regular (51 a 70); Bom (71 a 90); Excelente (91 a 100). A Resolução CONAMA N. 357, de 17 de março de 2005 classifica as águas como: Muito boa (Classe 1); Boa (Classe 2); Pouco poluída (Classe 3); Medianamente poluída (Classe 3); Poluída (Classe 4); Muito poluída e Extremamente poluída (ambas fora de Classe).

Em um estudo mais recente, Ribeiro et. al. (2011) segundo classificação do comitê da bacia do Rio Caí e do PROFIL (2008) classifica as águas do Rio Caí como de classe 1 em sua região de nascente até a região do trecho baixo do Alto Caí. A partir deste trecho a qualidade das águas diminui, e transforma-se em classe 2. Os principais responsáveis por essa mudança são os arroios: Piaí, Pinhal, Cadeia, Feitoria e Bom Jardim, que possuem classificação 3 e são responsáveis por, ao lançar suas águas no curso do Rio Caí, diminuir sua qualidade (RIBEIRO, 2011).

O Guaíba como um todo é, segundo resoluções do CONAMA, classificado como classe 2, ou seja, suas águas são indicadas para abastecimento doméstico somente após tratamento convencional e a

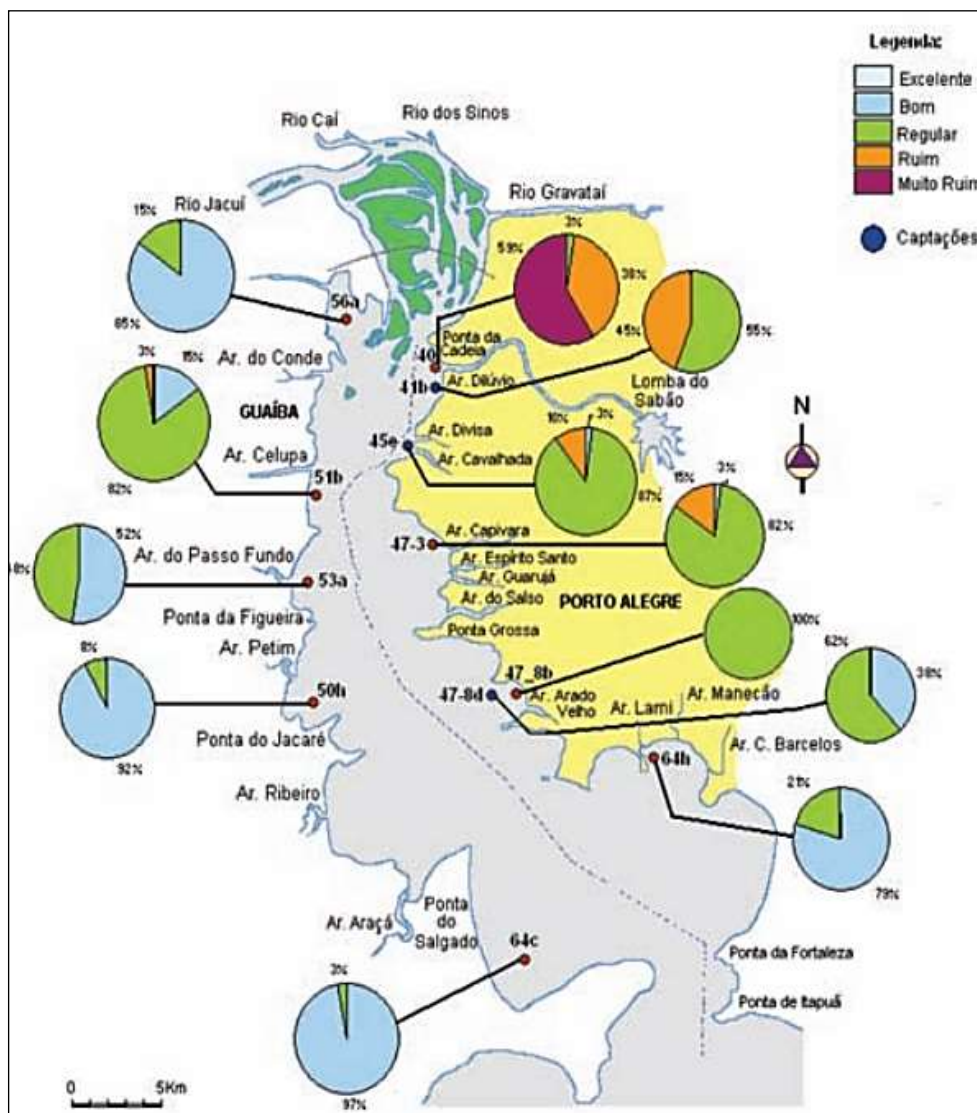
recreação de contato primário (junto as praias monitoradas pelo DMAE). Entretanto é possível observar que os rios formadores apresentam um grau maior de poluição de suas águas, inclusive o próprio Guaíba (tabela 1) próximo a foz do arroio Dilúvio, está classificado como classe 4 (BENDATI, 2003).

Em estudo publicado na revista do DMAE - Ecos volume 32 - Andrade *et al.* (2012) classificaram o Guaíba a cerca do IQA entre os anos 2000 e 2009 resultando nos mapas das **figuras 16** e **17**. Concluíram que a foz dos rios Gravataí, Sinos e arroio Dilúvio, assim como em pontos da margem esquerda estão mais degradados, explicado em parte pelo maior adensamento populacional e a menor vazão da água. Em pontos na margem direita e na foz do rio Jacuí encontram-se os melhores valores de IQA. Ao Sul devido ao poder de depuração ao longo de seu percurso, as águas de melhor qualidade foram detectadas.



**Figura 16** - IQA do Guaíba em pontos do Delta do Jacuí e no Canal de navegação. Fonte: Andrade *et al.*, 2012.

A linha pontilhada, na **figura 16** representa o canal de navegação e, portanto os lugares de maior profundidade da coluna de água. Ali as águas possuem maiores velocidade de escoamento do que nas margens. O Guaíba é um grande receptor de descarga fluvial, recebendo em média uma vazão de 1.493m<sup>3</sup>/s (TORRES, 2000). Sua vazão em direção a Laguna dos Patos foi quantificada em 1.463m<sup>3</sup>/s por Vaz *et al.* (2006), já o autor Baisch (1994) encontrou 878 m<sup>3</sup>/s e o autor Rigon (2009) verificou 1.493 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 17** - IQA do Guaíba em pontos distribuídos nas margens direita e esquerda. Fonte: Andrade *et al.*, 2012.

Em nota recente (26 de dezembro de 2014), a Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler (FEPAM/RS), divulgou, por meio

de sua campanha do Projeto Balneabilidade para o período 2014-2015, que na Região Hidrográfica do Guaíba aparecem condições impróprias para banho em sete dos 14 balneários monitorados. São eles: Balneário Passo do Verde, no Rio Vacacaí, em Santa Maria; Praia do Encontro, Rio Jacuí, em São Jerônimo; balneário Santa Vitória, Rio Jacuí, em Rio Pardo; praia da Alegria, Lago Guaíba, em Guaíba; balneário Cachoeirinha, Rio Jacuí, em General Câmara; praia Carlos Larger, Rio Pardo, em Candelária; e praia Recanto das Mulatas, no Lago Guaíba, em Barra do Ribeiro. A nota da FEPAM remete o aumento do nível de poluição, e a consequente classificação de não balneabilidade nos pontos de monitoramento (Disponível em <http://www.fepam.rs.gov.br>).

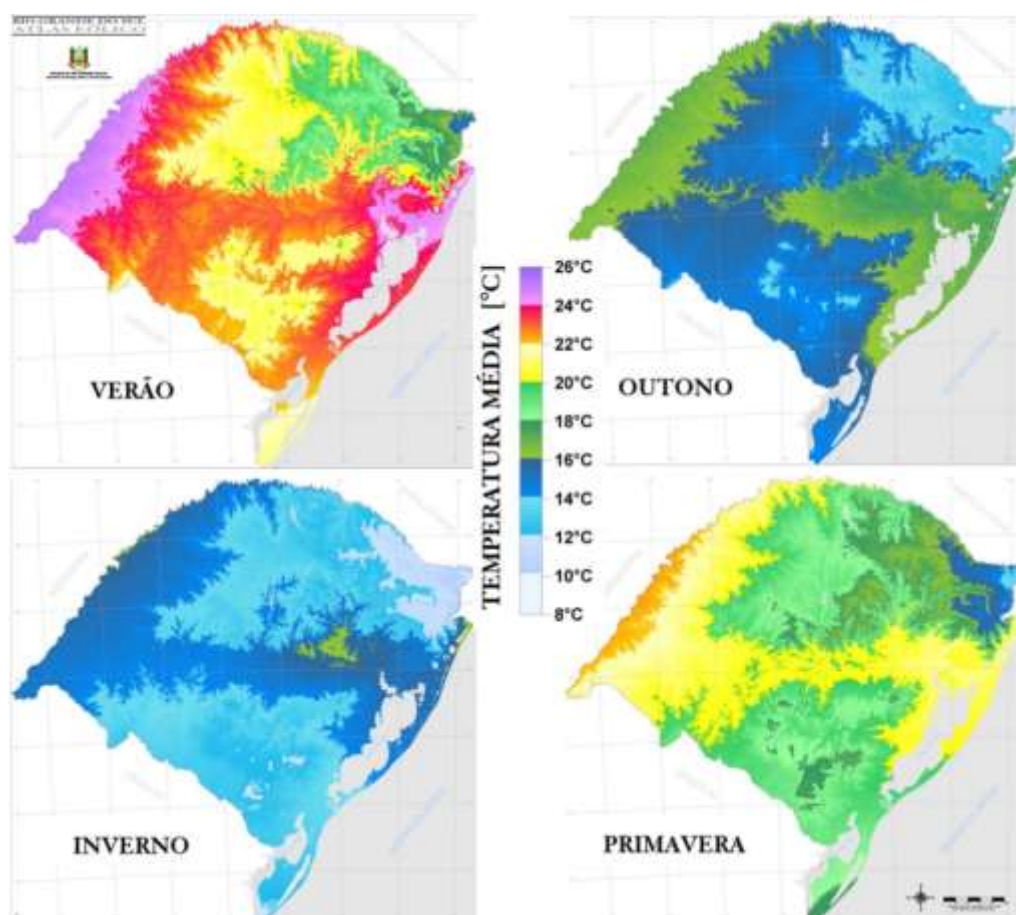
### 3.3 Variáveis climáticas

A **figura 18** apresenta a temperatura média em cada estação do ano no Rio Grande do Sul, com base em séries climatológicas, com características de um clima temperado subtropical. Por se situar na parte meridional do Brasil, o Rio Grande do Sul apresenta as maiores amplitudes térmicas anuais, com temperaturas mínimas absolutas diárias negativas no inverno, e máximas absolutas diárias superiores aos 30°C no verão.

Em termos sazonalidade se sobressaem os ventos mais intensos na segunda metade do ano, ocorrendo em todas as regiões do estado do Rio Grande do Sul. A região do litoral do Rio Grande do Sul possui vento com velocidades superiores a 7m/s predominantemente de leste-nordeste, e são intensificados pela ação diurna das brisas marinhas, ao longo dos meses de primavera, verão e início de outono (CAMARGO, 2002).

A passagem de massas polares, e o caráter dinâmico das circulações sobre o Rio Grande do Sul, em especial no inverno e primavera, trazem o vento Minuano, que sopra de SW sobre a campanha e tem características de ser de baixas temperaturas, por ser de origem polar, e bastante força, podendo exceder os 10 m/s, com duração aproximada de três dias a cada

passagem de frente fria. O Minuano não é predominante, porém agrega uma importante contribuição ao potencial eólico do estado (CAMARGO, 2002).



**Figura 18** - Temperatura média no Rio Grande do Sul em cada estação do Ano em °C.

Fonte: Camargo, 2002.

No Guaíba, a ação das brisas marinhas aumenta as velocidades de vento entre as 11:00h até as 18:00h durante a primavera e nos meses de verão e devido a grande amplitude térmica anual dessa região, esta situação chega a se reverter nos meses mais frios do inverno, onde as menores velocidades foram registradas no período entre as 14:00h e as 23:00h no litoral sul do estado. A Costa ao longo da Lagoa dos Patos é uma área considerada bastante favorável aos ventos inclusive já está sendo explorada para geração de energia eólica. Como é bastante plana, com vegetação predominante de restinga baixa e atividades agrícolas e possui uma extensa

região de areia e dunas ao longo da costa a velocidade dos ventos médios anuais tem valores entre 7 e 8m/s (CAMARGO, 2002).

O clima da região do Sul do Brasil apresenta grandes contrastes nos regimes de precipitação e temperatura, devido sua localização, na transição entre os trópicos e as latitudes médias, e ao seu relevo acidentado. A variabilidade espacial e sazonal do clima é influenciada por episódios interanuais do tipo EL Niño e La Niña e interdecenais (GRIMM, 2009).

No inverno os valores médios da temperatura variam de 11°C no Sul a 18°C no Norte e nos meses de verão, a maior influencia é a diferença de aquecimento que sofrem o continente e o oceano, tornando a temperatura do litoral mais amena, com médias de 22°C ante os 25°C de média no extremo oeste. Nos estações da primavera e outono, as temperaturas são semelhantes. Conforme Grimm (2009), a maior precipitação observada ocorre nos meses verão, e na região norte, a umidade específica é maior sobre a esta região, decrescendo em direção ao Sul. Em estações de transição a umidade específica média é um pouco maior em abril que em outubro (GRIMM, 2009).

Wollmann (2013) analisa dados de precipitação entre 2000 e 2011 e observa que na Região Hidrográfica do Guaíba a gênese das enchentes do ponto de vista da circulação atmosférica regional e da participação de correntes perturbadoras está associada às Frentes Estacionárias (FE) com participação da ciclogênese (C). Em mais de 90% dos casos, a gênese das enchentes no estado gaúcho está condicionada à participação das correntes perturbadas de origem polar (Frente Polar) e apenas em alguns casos há participação de correntes perturbadas de origem tropical (Instabilidade Tropical).

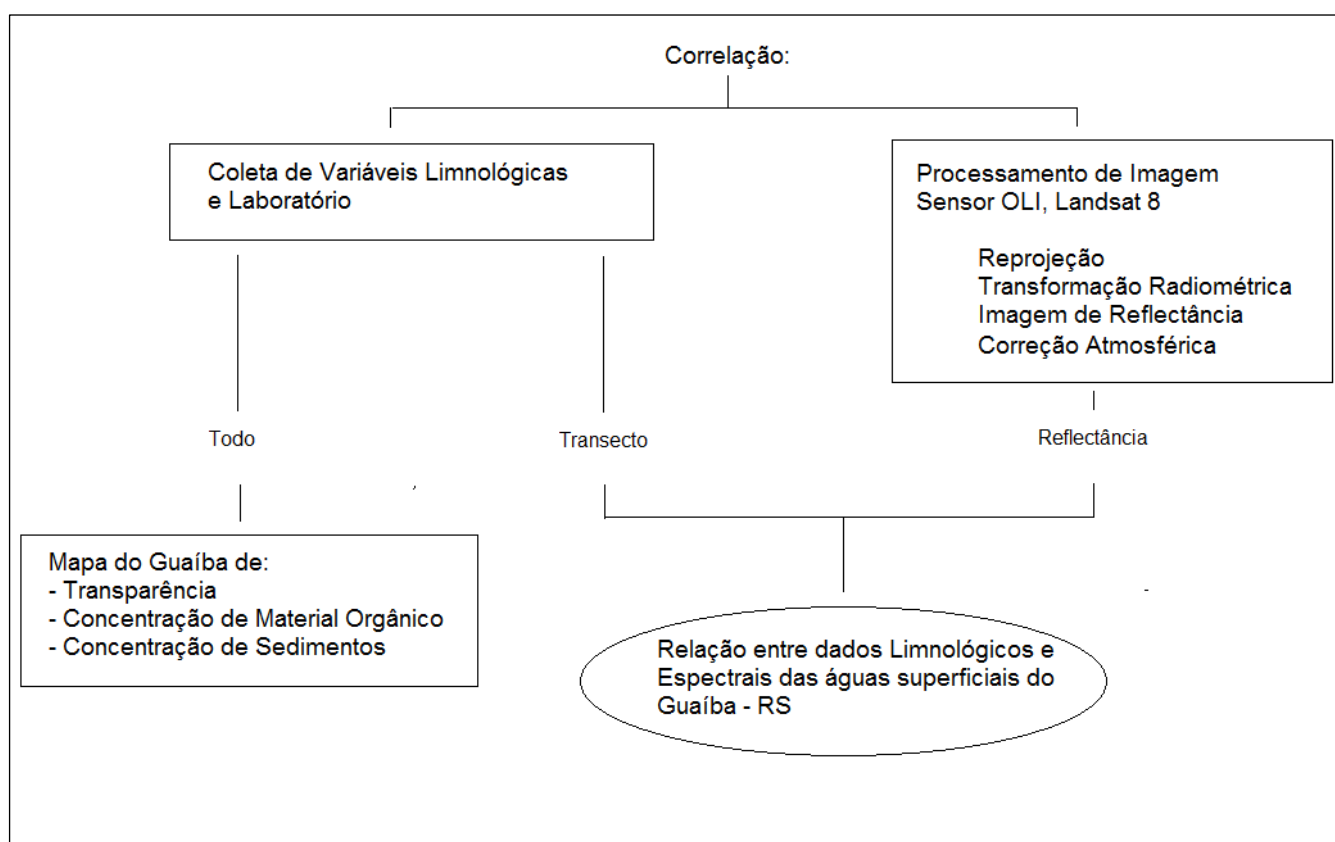
Quanto à precipitação pluviométrica e de dias de chuva destaca-se o ciclo de 3,5 anos que corresponde ao ciclo El Niño-Oscilação Sul (ENOS) incrementando assim os valores de precipitação no estado. A umidade relativa do ar se relaciona tanto com os ciclos de ENOS quanto da atividade solar, portanto apresenta uma diversidade maior de ciclos. A partir da interpolação de dados médios mensais, oriundos das estações de

monitoramento, o autor definiu a variabilidade mensal dos elementos do clima em todo período e conjugados com a influência da dinâmica climática que envolve o deslocamento dos sistemas atmosféricos sobre o RS. O estado possui uma divisão clara quando levamos em conta os dados de umidade relativa do ar, o leste/SE mais úmido e oeste/NW menos úmido, uma relação direta do efeito da continentalidade/maritimidade. Os menores valores de umidade estão no interior do estado, nas regiões noroeste, extremo oeste e sudoeste, e os maiores estão na região do litoral e noroeste (ROSSATO, 2011).



## 4 METODOLOGIA

O fluxograma da **figura 19** apresenta a metodologia utilizada para atingir os objetivos propostos nesse estudo. A coluna da esquerda representa a sequência desenvolvida a partir dos dados limnológicos, obtidos em campo e analisado em laboratório (CECO), já a da direita se refere aos dados de reflectância oriundos do sensor OLI, do satélite Landsat 8 e manuseado pelos softwares ENVI 5.1 e QGIS (v 2.6 64 bits). Os processos serão detalhados a seguir.



**Figura 19** - Fluxograma da Metodologia.

### 4.1 Coleta de Variáveis Limnológicas

O presente trabalho teve o segmento de campo executado entre dezembro de 2013 e dezembro de 2014. Como o satélite Landsat 8 imageia o Guaíba, no horário local entre as 10 e 12 h da manhã, dependendo do



horário de verão, foram adquiridas *in loco* as medidas de transparência, através da técnica do disco de Secchi, com a mesma configuração de cena - ângulo e inclinação de luminosidade, direção e intensidade de vento, concentração e temperatura de gases atmosféricos - que o sensor OLI obteve remotamente, e a coleta de amostras de água na superfície da água.

Em laboratório, conforme detalhado no item 4.1.3, obteve-se a concentração de material total em suspensão, após a filtração, obteve-se a concentração de sedimento e após a queima, chegou-se à concentração de matéria orgânica. Obteve-se a transparência e a resposta espectral das águas do Guaíba concomitantemente e com repetição em todas as estações do ano ao longo deste período. Esta técnica tornou possível a criação de um modelo, a fim de calibrar dados de satélite, validando as características ópticas das águas (COAs) do Guaíba, através dos dados obtidos *in situ*.

As coletas de dados em campo ocorreram em todas quatro estações do ano (entre 2013 e 2014) possibilitando assim uma melhor compreensão da dinâmica do fluxo de matéria total em suspensão, sedimentos e matéria orgânica, além da análise multitemporal das condições e concentrações das partículas opticamente ativas presente nas águas do Guaíba. A **tabela 3**, mostra as datas de coleta de amostras em campo, que coincidem com a passagem de satélite Landsat 8. A coleta e consequente aquisição das imagens estiveram atreladas a um céu livre da cobertura de nuvens e, portanto, as condições atmosféricas influenciaram decisivamente na escolha e na quantidade de dias com possibilidade de ir a campo.

A carga suspensa não se distribui homogeneamente ao longo do canal como a carga dissolvida e apresenta variação vertical na distribuição das partículas de acordo com o diâmetro, a velocidade e a profundidade do fluxo. A concentração destes materiais suspensos varia com a distância da foz dos rios, que conduzem suas águas para o Guaíba (no ponto N) e conforme as características do fluxo, velocidade, formato e tamanho do curso d'água, que possui características distintas no centro e em suas margens laterais. (PAZ *et al.* 2005.)

**Tabela 3** - Datas da passagem do satélite Landsat 8, pontos de coleta de amostras durante o período do estudo, estação do ano e embarcação utilizada.

<b>Datas da Passagem Landsat 8</b>	<b>Pontos de Coleta</b>	<b>Estação</b>	<b>Embarcação</b>
<b>04 de Dezembro de 2013</b>	H, I e X	Primavera	Caiaque
<b>20 de Dezembro de 2013</b>	A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M e N	Primavera	Barco a motor
<b>05 de Janeiro de 2014</b>	K, L e M	Verão	Caiaque
<b>06 de Fevereiro de 2014</b>	K, L e M	Verão	Caiaque
<b>29 de Maio de 2014</b>	K, L e M	Outono	Caiaque
<b>16 de Julho de 2014</b>	K, L e M	Inverno	Caiaque
<b>20 de Outubro de 2014</b>	K, L e M	Primavera	Caiaque
<b>07 de Dezembro de 2014</b>	K, L e M	Primavera	Caiaque

#### **4.1.1 Campo do dia 20 de Dezembro de 2013**

Nesta data foi realizada a saída de campo passando por todos os pontos de coleta escolhidos na área de estudo (**figura 20**). A não repetição dessa saída de campo se deu em função da mudança de logística e a impossibilidade de utilizar uma embarcação a motor.

Os pontos de coleta de amostra foram distribuídos em 5 transectos, divididos em 3 setores de interesse. O objetivo desta distribuição foi o de identificar as possíveis variações na contribuição e na concentração da carga suspensa de material total, sedimentos e material orgânico em cada setor de interesse ao longo de todo Guaíba. Outro motivo para essa divisão em setores se deu devido à logística da embarcação, possibilitando a coleta antes, durante e imediatamente após a passagem do satélite, respeitando o máximo de 1,5h antes e após sua passagem.

O setor 1, mais ao Norte possui alta carga de sedimentos, matéria orgânica e material orgânico dissolvido (substância amarela) devido à descarga de rios (Caí, Gravataí, Sinos, Jacuí e Taquari) que despejam suas águas nesta bacia, e é representada neste estudo pelos pontos K, L, M e N. Nestes transectos também estão o Arroio Dilúvio, riacho que corta a cidade

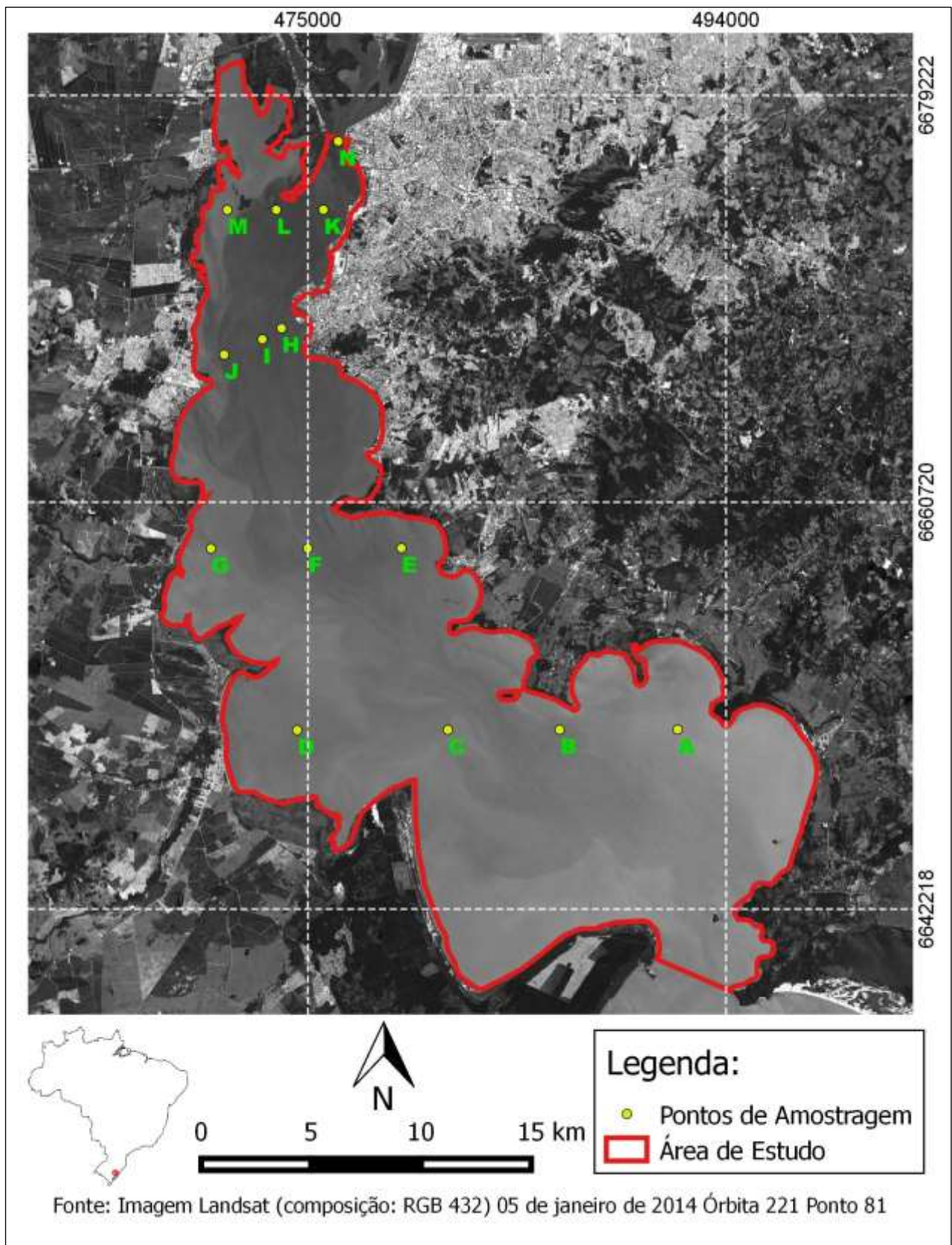
de Porto Alegre, e sofreu um processo de canalização de seu curso médio até junto a foz no Guaíba e o escoamento pluvial da mancha urbana bastante povoada da capital gaúcha, além de uma quantidade considerável de esgoto não tratado que chega ao Guaíba por intermédio deste e outros riachos. Neste setor (pontos, K,L,M e N) a coleta se deu posteriormente ao imageamento via sensor OLI (Landsat 8).

No setor 2, representado pelos pontos E, F, G, H, I e J é intermediário, a área maior é maior e a distância entre os os pontos também. Ainda possui influência da descarga de grandes quantidades de material em suspensão, porém já tem um comportamento distinto do setor 1. No setor 2, a coleta se deu de forma a coincidir com o horário da passagem do satélite Landsat 8.

O setor 3, ao Sul, possui as maiores dimensões e volume de água e só recebe grandes quantidades de material em suspensão em eventos de forte chuva. É uma região menos povoada, suas margens recebem menos quantidade de descarga de esgotos não tratados, porém suas margens, na maioria das vezes, conforme indicação da FEPAM, são imprópria para banho. Ainda que historicamente receba menos poluentes. Neste setor, as amostras foram coletadas com pequena procedência a passagem do satélite, mas dentro de uma margem que não ultrapassou 1,5 horas.

A leitura da profundidade do disco de Secchi foi executada, em cada uma dos três setores representados e localizados nos pontos da **tabela 4**, e resultaram em um mapa de transparência apresentado nos resultados e discussão, junto ao capítulo 5 dessa dissertação.

Com a utilização do GPS foi feita a coleta de uma amostra de água em cada ponto (**figura 20**), que posteriormente foi analisada em laboratório e serviu para confecção dos mapas de concentração de sedimentos em suspensão (CSS) e de concentração de matéria orgânica (CMO) das amostras coletadas em campo do dia 20 de Dezembro de 2013. Os mapas foram gerados utilizando o software QGis (v1.6 64bits) através do método de interpolação do inverso do quadrado da distância.



**Figura 20** – Área de estudo e pontos de coletas, distribuídos ao longo do Guaíba.

**Tabela 4** - Localização dos 14 pontos de amostragem no Guaíba-RS

Pontos	Latitude	Longitude
A	30°16'41.84"S	51° 5'6.75"O
B	30°16'41.84"S	51° 8'27.44"O
C	30°16'41.84"S	51°11'37.46"O
D	30°16'41.84"S	51°15'53.89"O
E	30°12'13.21"S	51°12'56.16"O
F	30°12'13.21"S	51°15'35.21"O
G	30°12'13.21"S	51°18'19.83"O
H	30° 6'47.93"S	51°16'18.87"O
I	30° 7'4.29"S	51°16'51.49"O
J	30° 7'26.78"S	51°17'56.53"O
<b>K</b>	<b>30° 3'53.00"S</b>	<b>51°15'7.35"O</b>
<b>L</b>	<b>30° 3'53.00"S</b>	<b>51°16'27.37"O</b>
<b>M</b>	<b>30° 3'53.00"S</b>	<b>51°17'50.49"O</b>
N	30° 2'12.00"S	51°14'42.00"O
X	30° 07'0.68"S	51°17'04.15"O

Em negrito os 3 pontos do transecto monitorado ao longo do ano de 2014.

#### **4.1.2 Campos no Transecto junto aos pontos K, L e M**

As demais saídas de campo se deram apenas no transecto junto ao setor 1, logo após a foz do Arroio Dilúvio. A coleta dos dados de transparência, material total, matéria orgânica e sedimentos em suspensão se deu em um intervalo de tempo próximo ao da aquisição da imagem via satélite, não ultrapassando a margem de 1 hora antes e 1 hora após a sua passagem.

A logística de coleta e execução do trabalho *in situ* foi modificada, a fim de reduzir os custos e aumentar a possibilidade de dias de campo. A dependência de uma embarcação de grande porte, a motor, foi substituída pela praticidade do uso do caiaque, porém à distância e o tempo tiveram que ser recalculados. Dessa maneira o transecto contendo os pontos K, L e M foi

escolhido para repetir e assim calibrar as características óticas do rio Guaíba através do maior número de coletas em dias sem cobertura de nuvens.

Cabe aqui ressaltar que o clube privado de esportes náuticos, que havia inicialmente apoiado esta pesquisa cedendo o barco, e apenas cobrando pelo combustível, após a primeira saída de campo, retirou seu apoio logístico (barco a motor e comandante). A coleta em todos os pontos, de A à N em um intervalo de tempo inferior a 1,5h antes e após a passagem do satélite, não pode ser executada. Desse modo ficou impossibilitada a manutenção da mesma condição de iluminação da cena durante a passagem do satélite e a aplicação da técnica do Disco de Secchi em todos os pontos de coleta concomitantes.

Dessa forma, os trabalhos de campo realizados posteriormente ao dia 20 de dezembro de 2013, foram concentrados no transecto contendo os pontos K, L e M. A escolha deste transecto se deu, pois o ponto K se situa no canal de navegação com grande dinâmica e profundidade de suas águas, o ponto L é uma área de transição, com uma profundidade menor, e o ponto M está em uma área cuja dinâmica de suas águas é pequena (comparada à região que passa pelo canal de navegação), ficando bastante raso em determinadas épocas do ano. Assim, o trabalho de campo se focou em uma área menor do Guaíba, mas com uma taxa de revisita maior, aumentando os dias possíveis de ir a campo e não dependendo mais de uma embarcação, de tripulação e de custo de combustível.

As configurações de intensidade e condição de iluminação da cena são primordiais na obtenção dos dados através do disco de Secchi, por isso é importante que sua coleta seja feita em um intervalo de tempo mínimo com a aquisição da imagem via satélite. Com a utilização da embarcação do tipo caiaque, a coleta no ponto K se deu com minutos de antecedência, do ponto L em sincronia e no ponto M alguns minutos após a passagem e aquisição da imagem via sensor OLI (Landsat 8). Com essa metodologia, mantiveram-se as mesmas características de cena para a extração da transparência via disco de Secchi e o imageamento via satélite.

Foram realizados, no total, oito trabalhos de campo nas datas expostas na **tabela 3**, a fim de coletar amostras de água e dados de transparência no Guaíba. Quatorze pontos foram amostrados em uma data (20 de dezembro de 2013), e três pontos (K, L e M) foram monitorados e amostrados em todas as demais datas.

A partir disso, foram adquiridas imagens do satélite Landsat 8, sensor OLI, do período de 20/12/13 a 07/12/14, totalizando 7 cenas. Buscou-se que os trabalhos de campo e as imagens de satélite ocorressem ao mesmo tempo, sendo atrelada assim a realização dos trabalhos de campo somente em dias sem cobertura de nuvens.

A escolha do transecto, contendo os pontos K, L e M se deu em função da sua localização favorável, menor dimensão, possibilitando assim a coleta de amostras dentro do tempo e aplicação da técnica do disco de Secchi a bordo de um caiaque. Além disso, como já foi apontando anteriormente, possui características que os outros transectos também possuem como: um dos pontos ficar próximo à margem, com profundidade menor, um dos pontos localizar-se junto ao canal de navegação, com profundidade maior e características e dinâmicas distintas dos demais pontos e um ponto ser intermediário, porém com profundidade pequena.

O transecto que contém os pontos K, L e M possui dados em todas as estações do ano e apesar de não resultar em mapas, especializando assim os resultados como era o objetivo inicial, seus dados serviram para calibrar o modelo e assim correlacionar os dados de campo com os dados de satélite.

#### **4.1.3 Dados *In Situ* e Laboratório**

O uso do GPS de portátil Garmin eTrex Vista HCx foi fundamental para localização e revisita dos pontos de coleta de amostras. Ele possui 12 canais paralelos que continuamente rastreiam e atualizam a sua posição, o tempo de aquisição varia entre 15 e 45 segundos, dependendo da temperatura. Possui uma taxa de atualização de 1 segundo e sua precisão é de aproximadamente

15 metros em 95% dos casos típicos com sua antena interna. Seu receptor possui alta sensibilidade para um posicionamento rápido e preciso em locais de difícil recepção, sua precisão de posição de 15 metros em 95% dos casos.

A coleta das amostras na camada superficial de água se deu de forma pontual e instantânea, em cada uma dos pontos e datas de campo (Tabela 2). As garrafas foram previamente limpas e identificadas por letras, posteriormente foram acondicionadas em uma caixa com gelo (durante o processo de coleta) e se mantiveram sob refrigeração e protegidas da luz até serem levadas para análise laboratorial, evitando assim uma possível proliferação de algas.

As análises das amostras coletadas foram executadas no Centro de Estudo e Geologia Costeira - CECO, com orientação e auxílio do técnico em geologia e pesquisador nas áreas de geologia marinha/costeira e sedimentologia Gilberto Silveira dos Santos.

O processo de filtração é um procedimento comum aos trabalhos de análise e quantificação de carga suspensa. Foram utilizadas como filtro membranas brancas de acetato de celulose com  $47\mu\text{m}$  de diâmetro e poros de  $0,45\mu\text{m}$ , fabricadas pelo laboratório Sartorius Steim biotech ([www.sartorius-stedim.com](http://www.sartorius-stedim.com)), esterilizadas e fornecidas em embalagem de 100 unidades individualizadas. Estes filtros possuem estabilidade térmica e característica de absorção muito baixa, e são recomendadas para uso em dispositivos de filtração por pressão.

Primeiramente descobre-se a massa, em gramas, do filtro (M0). Para iniciar a filtração a amostra de água deve ser muito bem agitada para que as partículas saiam do fundo e não adiram nas paredes da garrafa e a temperatura da água deve estar próxima aos valores do ambiente. Os filtros são colocados em uma passagem de tubos de vidro, acoplados em uma bomba a vácuo (**figura 21**).





**Figura 21** - Equipamento para filtração sob pressão.

Após a filtração, e com o conhecimento do volume de água utilizada ( $V_a$ ) - em unidade de litros -, o filtro é armazenado e aguarda-se a evaporação da água. Após sua completa secagem, as membranas e o material total retido no processo de filtração voltam para a balança a fim de determinar a massa ( $M_1$ ). Através da subtração da massa obtém-se a massa total de material em suspensão ( $M_1 - M_0 = MMS$ ) em unidades de grama. A seguir, dividindo  $MMS$  pelo volume de água que foi filtrado obtemos a concentração de material total em suspensão ( $MMS/V_a = CMT$ ) - em unidade de gramas/litro (g/l).

Para a separação de  $CMT$  (g/L) em carga orgânica ( $M_0$ ) e carga sólida ( $M_S$ ) executou-se a queima em duas etapas (**figura 22**), primeiramente manualmente com auxílio de álcool isopropílico por combustão instantânea, e seguida em mufla por 5 horas em uma temperatura constante de  $550^\circ\text{C}$ , evaporando assim a membrana de acetato e a  $M_0$  retida no processo de filtração. Por fim, levou-se à balança a fim de determinar a massa da  $M_S$  - em unidade de grama. Para descobrir a concentração em mg/l fez-se a razão de  $M_S$  por  $V_0$ , e obteve-se a Concentração de Sedimentos em Suspensão. A diferença entre a  $CMT$  e  $M_S$  resulta na massa de  $M_0$ , e pela razão com  $V_0$  chegou-se também a Concentração de Material Orgânico ( $CMO$ ).



**Figura 22** - Processo de queima em duas etapas, do filtro de acetato e do material orgânico em suspensão, primeiro por combustão e em seguida em mufla.

## 4.2 Processamento de Imagens

As bandas do sensor OLI, do Landsat 8, utilizadas neste trabalho são:

- Banda 2 (Comprimento de Onda entre  $0.45 - 0.51 \mu\text{m}$ ) correspondente à banda azul;
- Banda 3 (Comprimento de Onda entre  $0.53 - 0.59 \mu\text{m}$ ) correspondente à banda do verde;
- Banda 4 (Comprimento de Onda entre  $0.64 - 0.67 \mu\text{m}$ ) correspondente à banda do vermelho.

As imagens de satélite Landsat 8 estão disponibilizadas no endereço <http://glovis.usgs.gov/> pelo *Land Remote Sensing (LRS) Program* através do *U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey*. Elas podem ser visualizadas na página do *USGS Global Visualization Viewer* e após preenchimento de cadastro e escolha de local e data, a aquisição das imagens é feita através da página do *Earth Explorer* no endereço <http://earthexplorer.usgs.gov/> acessado em 23 dezembro de 2014.

As bandas 2, 3 e 4 adquiridas a partir do sensor OLI do Landsat 8, proporcionaram a elaboração de uma base de dados manipuladas através do software QGIS (v 2.6 64 bits), já georeferenciadas, cada uma das bandas, foram reprojctadas (de 22N para 22S). Com o uso do software ENVI 5.1 cada imagem foi corrigida radiometricamente por 3 métodos: 1) correção por subtração de pixel escuro (DP), 2) Correção Atmosférica Rápida (QUAC) e 3) *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes* (FLAASH), importada para camadas de planos de informação individuais, possibilitando extração dos valores de resposta espectral (reflectância) de cada um dos pontos do nosso alvo, mesmo local que aconteceram as coletas de amostra e aplicação da técnica do disco de Secchi *in loco*.

#### **4.2.1 Correções Atmosféricas**

Imagens obtidas pelo sensor OLI do Landsat 8 possuem informações espectrais chamadas de números digitais (DN), estão relacionados ao nível de cinza e dependem do formato na imagem (NOVO, 2010). Os DN podem ser convertidos para Radiância e Reflectância, porém alguns autores apontam ao fato da necessidade de, em estudos que correlacionam dados de sensoriamento remoto com componentes opticamente ativos (COA's), executar a correção atmosférica (CURRAN e NOVO, 1988).

A detecção de parâmetros remotamente requer que a radiação solar passe através da atmosfera antes de alcançar o sensor. Devido a isso as imagens de sensoriamento remoto incluem informações sobre a atmosfera e da superfície da Terra. Neste trabalho optou-se pela execução de três

métodos a fim de comparação entre as diferentes técnicas e comparação dos resultados.

Denominada remoção do pixel escuro, esta técnica utiliza a teoria de que em determinados alvos, como sombra de nuvens e águas límpidas, o valor de DN é nulo, absorvendo então toda radiação que nele incide. Esta técnica foi primeiramente aplicada por Chavez (1988), basicamente retira o valor de cada pixel da cena, do menor pixel registrado. Esta técnica é muito útil para remover a influência (interferência) da atmosfera, que adiciona um valor uniforme em toda cena, como resultado do espalhamento da radiação na atmosfera.

Desenvolvido pela *Spectral Sciences, Inc.*, o *Quick Atmospheric Correction - QUAC* efetua a correção atmosférica através de modelos empíricos utilizando somente as informações contidas na cena, descartando assim informações auxiliares. O seu processamento tem característica de ser rápido e consiste em buscar a resposta espectral média nos objetos que compõem a cena compensando o efeito atmosférico, criando uma imagem recuperada da reflectância de superfície, com escala em números inteiros de dois bytes utilizando um fator de escala de reflectância de 10.000.

O QUAC é aplicável tanto para imagens hiperspectrais (na faixa do visível e no infravermelho próximo) como multiespectrais e está disponível no software Envi5.1e. (Disponível em: [www.envi.com.br/index.php/modulos/acm](http://www.envi.com.br/index.php/modulos/acm) acessado em 20 dezembro de 2014.)

Também desenvolvido pela *Spectral Sciences, Inc.*, o *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes – FLAASH*, a correção atmosférica através do módulo FLAASH-ENVI (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*) utiliza os algoritmos MODTRAN para a correção atmosférica de imagens multiespectrais e hiperespectrais. Este método preenche cada cena com parâmetros de coordenada, tipo e altitude do sensor, elevação, tamanho do pixel, data e hora em que a imagem foi coletada. É solicitada para inserir informações do modelo atmosférico, vapor de água e temperatura do ar na superfície da posição geográfica em que a imagem foi coletada. A seleção entre Rural, Urbano, Marítimo e Troposférico

ajuda na seleção do modelo de aerossol da cena, assim como a visibilidade média usando uma razão de reflectância de pixels escuros.

O modelo de correção usado pelo FLAASH aplica-se somente no intervalo de comprimento de onda entre 350 e 2500 nm. A imagem é lida automaticamente em radiância, sendo desnecessária a conversão de DN para radiância. O módulo FLAASH exige que o arquivo de entrada apresente-se no formato numérico de ponto flutuante e que a calibração em radiância apresente-se na unidade  $\text{mW} / (\text{cm}^2 / \text{nm} / \text{sr})$ , portanto é necessário aplicar um fator de escala para ajustar a unidade em radiância do arquivo de entrada no momento do processamento dentro do módulo FLAASH. (Disponível em: <<http://www.exelisvis.com/docs/FLAASH.html>> consultado em 20 dezembro de 2014)

Antes de serem realizadas as correções atmosféricas, foi necessário reprojeter as imagens, que originalmente foram orientadas para o Norte verdadeiro, utilizando o software Qgis 2.6. Cada uma das bandas, oriundas das imagens captadas pelo sensor OLI foi reprojeta para o hemisfério Sul.

Através do software ENVI 5.1 as imagens, em cada uma das datas, foram corrigidas radiometricamente e os valores, que originalmente representam os pixels das imagens de 16-bits do sensor OLI a partir dos valores de DN e variavam de zero até 55.000, foram transformados em valores de Reflectância.

O primeiro método de correção foi a técnica de Subtração do Pixel Escuro (DP), antigo e amplamente utilizado, não sendo necessário assim de informações adicionais. Este procedimento atenuou o efeito de dispersão da energia eletromagnética nas partículas de água suspensas na atmosfera, possibilitando que os alvos, independentes da data, fossem interpretados da mesma forma (CHAVEZ, 1988).

O segundo método de correção, executado também através do software ENVI 5.1, o QUAC, se baseia em modelos empíricos, servindo tanto para imagens multiespectrais (como o Landsat 8) como para hiperespectrais capturadas no espectro visível, infravermelho próximo e médio. Esta correção

se baseia somente em informações contidas na cena, não necessitando de informações auxiliares.

O terceiro método de correção, baseado em modelos físicos, e que levam em consideração as informações adicionais, contidas nos arquivos GeoTIFF que são fornecidos juntamente com as imagens Landsat 8, a correção atmosférica FLAASH foi aplicada em cada uma das cenas. Esta correção utiliza algoritmos MODTRAN4+, com uma melhor capacidade para correção atmosférica, e com isso, trata de condições atmosféricas mais difíceis, com presença de nuvens e neblina com técnicas modernas. Esta correção leva em conta os parâmetros da cena - coordenada central, elevação média da superfície, tipo do sensor, altitude do sensor, data e hora (UTC) de imageamento – e com isso o FLAASH consegue determinar a posição solar e sua incidência sobre a superfície. As instruções necessárias para esta técnica de correção atmosférica estão no endereço <http://www.envi.com.br/index.php/modulos/acm> .

Foram comparados os diferentes métodos de correção atmosférica DP, QUAC e FLAASH aplicados nas bandas do visível (b2, b3 e b4). Através dos resultado de suas correlações entre as variáveis limnológicas, se optou pela utilização de apenas um método (DP) por apresentar um resultado mais satisfatório, revelando estatisticamente valores mais significativos. A correção foi aplicada nas bandas do visível, em cada uma das imagens, em toda cena, e após foram extraídos os valores de reflectância.

#### **4.2.2 Leitura, Extração e Correlação dos valores de Reflectância**

A leitura e extração dos valores de reflectância foi executada com o software ENVI 5.1 com o auxílio da planilha eletrônica OpenOffice 4.1.1. O pixel do sensor OLI possui um tamanho de 30m na cena e o GPS possui uma acurácia de aproximadamente 15m, portanto a resolução espacial dos valores de reflectância é de 30m. A correlação dos dados e análise estatística foi executada a partir do aplicativo IBM SPSS Statistics 18.0.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados serão apresentados em duas partes, a primeira remete ao campo de 20 de dezembro de 2013, onde os pontos visitados constam na **figura 20**, de A à N, ao longo de boa parte do Guaíba. A segunda parte refere-se apenas ao transecto K, L e M do Guaíba, revisitado por mais 6 vezes ao longo do ano de 2014.

### 5.1 Campo do dia 20 de dezembro de 2013

Em dezembro de 2013, período de aquisição da imagem e da coleta de dados, as precipitações na região hidrográfica do Guaíba, área de influência da área de estudo, ficaram abaixo do padrão climatológico. Em Porto Alegre a precipitação acumulada durante o mês, foi de 76,6 mm segundo o INMET (2014). De acordo com o Centro Integrado de Comando da Cidade de Porto Alegre - CEIC (2013) - Metroclima, não há registro de pluviosidade, no dia 20 de dezembro de 2013, e nem nos cinco dias que o antecedem.

O nível do Guaíba, medido pela Superintendência de Porto e Hidrovias (SPH) através do linígrafo situado junto a Ilha da Pintada (estação código 87450005) a mais próxima e em funcionamento, revela que a cota estava com 0,50 metros na passagem do satélite. Durante o mês de dezembro o valor máximo e mínimo foi de 1,1 metros e de 0,26 metros, com uma média da régua de 0,63 m (ANA, 2013 <http://hidroweb.ana.gov.br/>).

Como resultado das análises laboratoriais, para a área do Guaíba, a partir da coleta de campo de 20 de dezembro de 2013, obteve-se a Concentração de Material Total em Suspensão (CMT), Concentração de Matéria Orgânica em Suspensão (CMO) e a Concentração de Sedimentos em Suspensão (CSS), conforme **Tabela 5**. A **figura 23** mostra a espacialização, a partir do processo de interpolação dos 14 pontos amostrais, de concentração de sedimentos no Guaíba.

No período que antecede à cena Landsat 8, houve ausência de pluviosidade associado à condição sinótica - em condições de aragem, com ventos direcionados a 110 graus às 10 horas e com velocidade de 2 m/s, segundo INMET (2013). Essa condição é capaz de criar pequenas rugas, uma leve ondulação sem rebentação. Destaca-se que não se nota uma pluma de sedimentos oriunda da descarga dos cinco rios (Caí, Jacuí, Taquari, Sinos e Gravataí) no sentido Norte-Sul, junto ao canal de navegação. Essa condição influencia com maior intensidade as áreas mais rasas (inferior a 2 metros), como é o caso das margens do Guaíba.

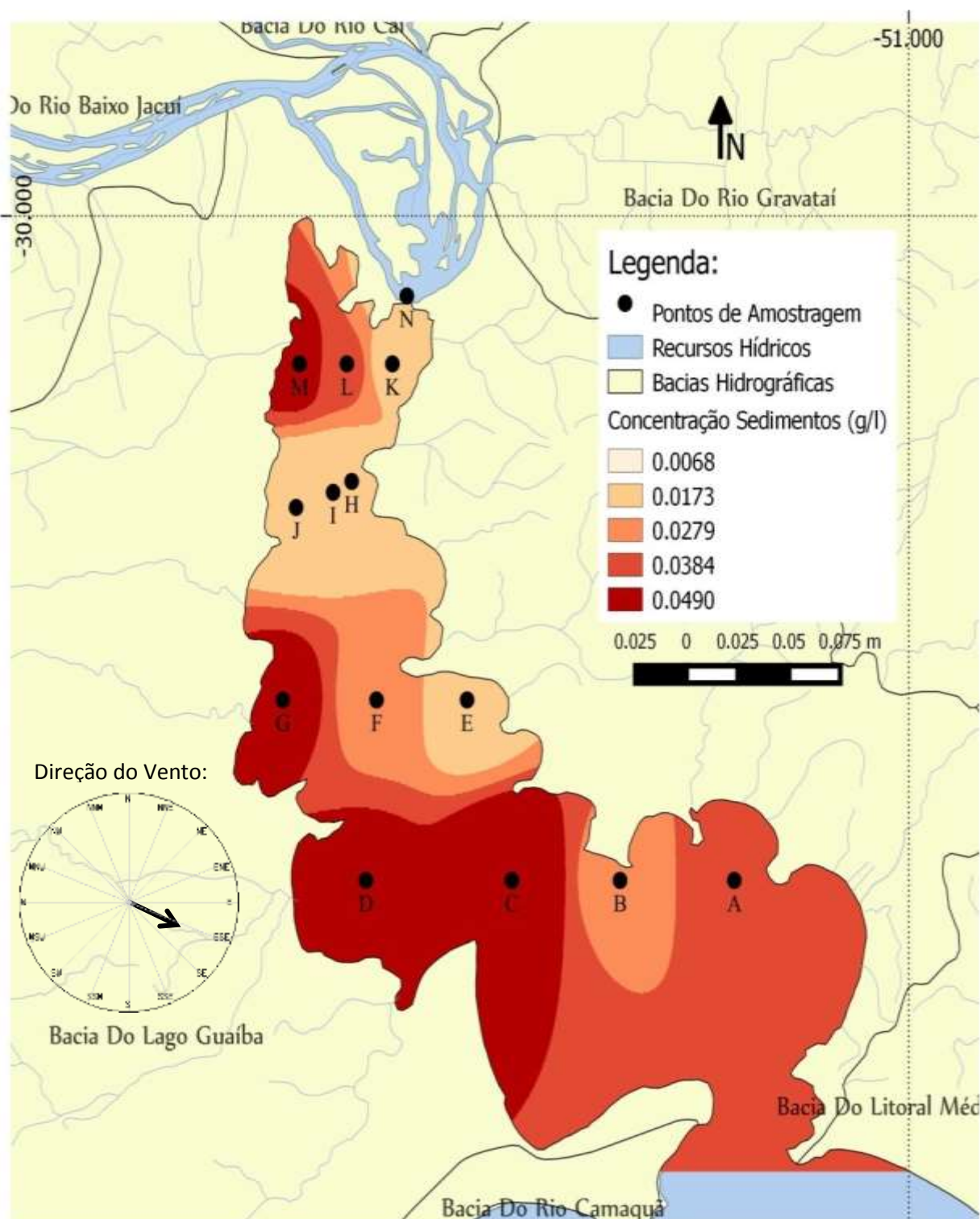
**Tabela 5** – Dados de CMT, CSS e CMO, 20 de dezembro de 2013, no Guaíba-RS.

	<b>CMT(g/L)</b>	<b>CSS(g/L)</b>	<b>CMO(g/L)</b>
<b>A</b>	0,0373	0,0313	0,006
<b>B</b>	0,0367	0,0253	0,0113
<b>C</b>	0,069	0,049	0,02
<b>D</b>	0,073	0,04	0,033
<b>E</b>	0,032	0,012	0,02
<b>F</b>	0,0354	0,024	0,0114
<b>G</b>	0,056	0,041	0,015
<b>H</b>	0,0212	0,0068	0,0144
<b>I</b>	0,0147	0,011	0,0037
<b>J</b>	0,0156	0,0128	0,0028
<b>K</b>	0,0164	0,0132	0,0032
<b>L</b>	0,036	0,03	0,006
<b>M</b>	0,0475	0,044	0,0035
<b>N</b>	0,0165	0,012	0,0045

No mapa da figura 23, percebe-se uma influência da condição eólica, onde a perturbação que ela causa na superfície da água é responsável pela ressuspensão dos sedimentos. Condição essa apontada por Nicolodi (2007), em que o Guaíba possui, além de seus escoamentos e do canal, uma ampla superfície que está exposta à ação de ventos favorecendo a formação de



ondas. Essa forçante hidrodinâmica possui direção e intensidade diretamente proporcional à direção e força dos ventos responsável por movimentar constantemente as areias no fundo raso do Guaíba (NICOLODI, 2007).

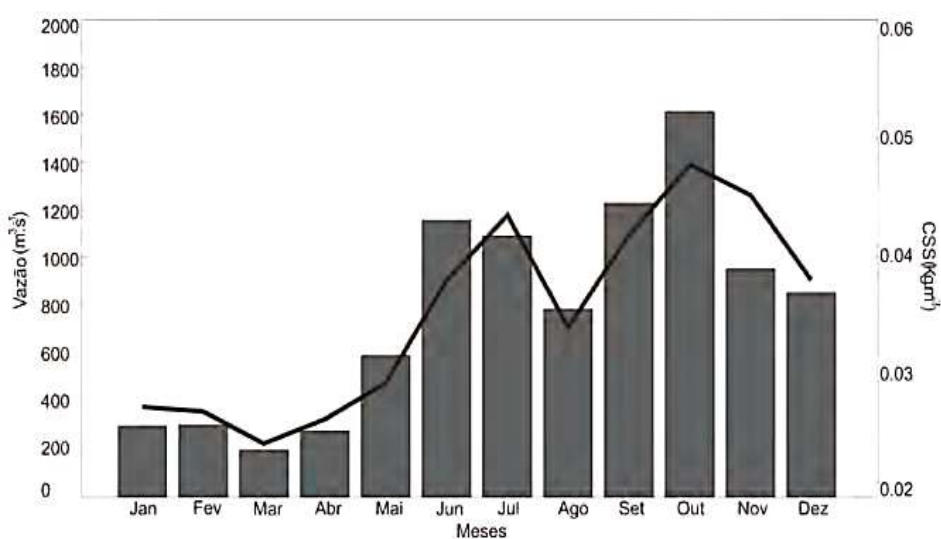


**Figura 23**– Mapa de Concentração de Sedimentos, 20 de dezembro de 2013, no Guaíba - RS.

Nos pontos posicionados a oeste, como os pontos M, G e D a concentração de sedimentos atinge os maiores valores para a cena (0,0490 g/l). Estes locais são mais rasos (< 2m) e com uma menor hidrodinâmica, sendo, portanto, mais influenciados pela direção de perturbação do vento (110°). Já no ponto J, também situado na margem oeste o valor de CSS é menor devido a possuir uma profundidade maior (> 4 m), e por ali passar o canal.

Conforme Bacchi (2000) o Guaíba está em processo de sedimentação acelerado, devido à ação antrópica nas últimas décadas, principalmente, associados à prática de atividades agrícolas em áreas de influência da bacia de drenagem. A deposição de silte, argila e matéria orgânica ocorrem nas partes mais profundas, a partir da isóbata de 3 metros. Já entre a linha de praia e a isóbata de 3 metros o fundo é arenoso e desprovido da cobertura de sedimentos finos devido principalmente à ação das ondas (BACCHI, 2000).

Andrade Neto *et al.* (2012) apontam que existe uma relação direta e não linear entre CSS e a vazão do Guaíba, com variação no tempo, conforme **figura 24** Apontam ainda que a CSS durante eventos de descarga elevadas não aumenta em demasia, e seus resultados demonstraram que a descarga sólida em suspensão possui uma variação considerável ao longo do tempo, principalmente durante eventos de alta vazão e curta duração (ANDRADE NETO *et al.*, 2012).



**Figura 24** - Variação mensal da descarga e da CSS, de 2003 a 2006, no Guaíba. Fonte: Andrade Neto et al. (2012)

Cabe apontar que, conforme o gráfico da figura 24, apesar do mês de dezembro historicamente apontar uma descarga e uma CSS considerável, o padrão de descarga é diretamente relacionado com a ocorrência de chuva. As médias mensais históricas apontam que nesta região ocorrem entre os meses de junho e outubro (inverno). O Guaíba possui uma dinâmica alta e mesmo em dias com ausência de pluviosidade, ocorre uma CSS devido a ressuspensão do fundo, em maior intensidade nas partes rasas, próximas a margem, e em direção e intensidade diretamente proporcional ao sentido do vento, diminuindo assim a transparência da água (WOLLMANN, 2013)

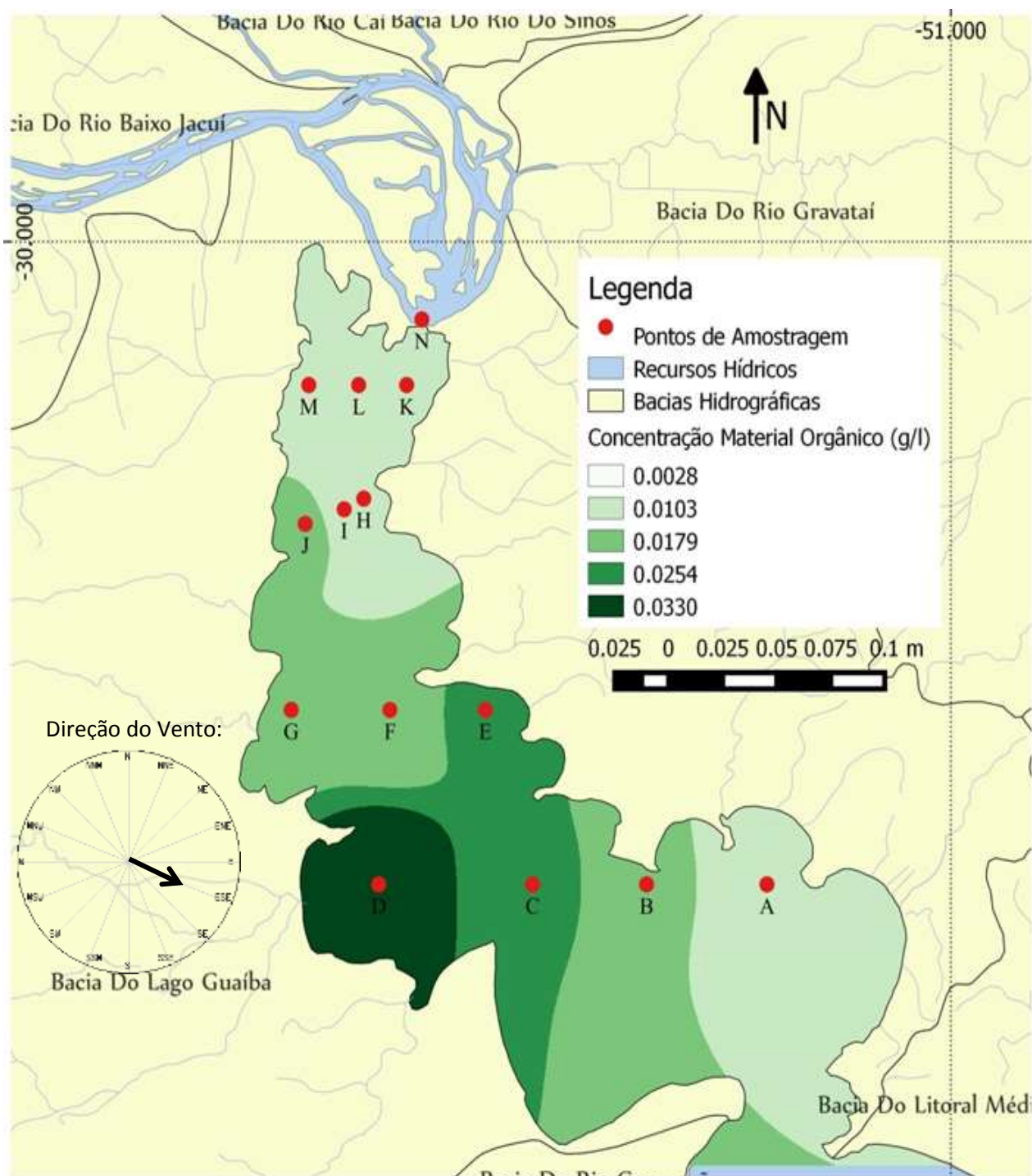
A partir dos valores interpolados pelo inverso do quadrado da distância, da Concentração de Material Orgânico (CMO) da água obtidos *in loco*, conforme a **figura 25**, um mapa foi gerado, mostrando a distribuição espacial de material orgânico na camada superficial nas águas do Guaíba presentes nessa data.

Os menores valores de Concentração de Material Orgânico ocorrem nos pontos A (0,028 mg/l), junto a praia de Itapuã, e nos pontos ao norte (N, M, L, K, I e J) que destoam dos dados de qualidade das águas obtidos pelo DMAE. O ponto K, por exemplo, é o mais próximo da foz do arroio Dilúvio e ao emissário, local monitorado e classificado quanto a sua qualidade das águas, pelo DMAE (2013), como Ruim e Muito Ruim, entretanto para essa data os dados apontam para a menor CMO.

Cabe aqui ressaltar que o material orgânico é encontrado na natureza aderido aos sedimentos em suspensão e sua separação só foi alcançada após o procedimento de queima em mufla. A separação laboratorial entre os dados limnológicos CSS e CMO revela uma distribuição semelhante de material orgânico, com a margem oeste do Guaíba com valores mais expressivos em relação a margem leste, em função da ação eólica, portanto.

O maior valor de CMO ocorre no ponto D (0,033 mg/l), na margem oeste, em uma região rasa (< 2 metros), afastado do canal de navegação. Esses dados são diferentes dos resultados encontrados pelo DMAE (2013) que apontam que a maior ocorrência de algas ocorre junto à margem leste, próximo ao bairro Tristeza e da foz do arroio Dilúvio. Neste ponto (D)

encontra-se a foz do arroio Araçá, que possui a maior vazão depois dos rios do delta do Jacuí.



**Figura 25** - Mapa de Concentração de Material Orgânico, 20 de dezembro de 2013, no Guaíba - RS.

O arroio Araçá era utilizado para escoamento da produção de arroz em chatas puxadas por rebocadores, ligando os produtores ao Guaíba (segundo:

[http://www.popa.com.br/cartas\\_mapas/track-aracah\\_CBV.htm](http://www.popa.com.br/cartas_mapas/track-aracah_CBV.htm)), entretanto, a dragagem do arroio Araçá e o transporte da produção agrícola não é mais realizado. Cabe ressaltar que a foz deste arroio fica distante do canal de navegação e, portanto, despeja suas águas em uma região de baixa profundidade (< 2 metros) e de baixa circulação hidrodinâmica, acentuada pela ausência de chuva nos dias que antecederam a coleta de campo.

Através da técnica do disco de Secchi obteve-se, **tabela 6**, o valor de transparência em cada um dos pontos.

**Tabela 6** – Valores de Transparência da água, 20 de dezembro de 2013, no Guaíba - RS.

<b>Transparência (m)</b>	
<b>A</b>	0,35
<b>B</b>	0,43
<b>C</b>	0,25
<b>D</b>	0,25
<b>E</b>	0,38
<b>F</b>	0,27
<b>G</b>	0,22
<b>H</b>	0,52
<b>I</b>	0,65
<b>J</b>	0,57
<b>K</b>	0,72
<b>L</b>	0,46
<b>M</b>	0,35
<b>N</b>	0,65

O mapa gerado pela interpolação através do método do inverso do quadrado da distância, da **figura 26**, foi dividido em 5 classes, apresentando o valor máximo de transparência no ponto K (0,72 m). Este ponto situa-se no canal de navegação, e juntamente com os pontos N e I, são os locais de maior velocidade e profundidade das águas. Os pontos mais afastados do canal, e mais próximos às margens, como por exemplo, G e D, apresentam valores de 0,22 e 0,25 m de transparência. Essa variação mostra que existe uma diferença de concentração de material em suspensão entre as águas no



canal de navegação e as águas das margens. Isso pode estar associado, em parte devido à ação dos ventos, de direção 110°, que agitam as águas e ressuspendem o material de fundo.

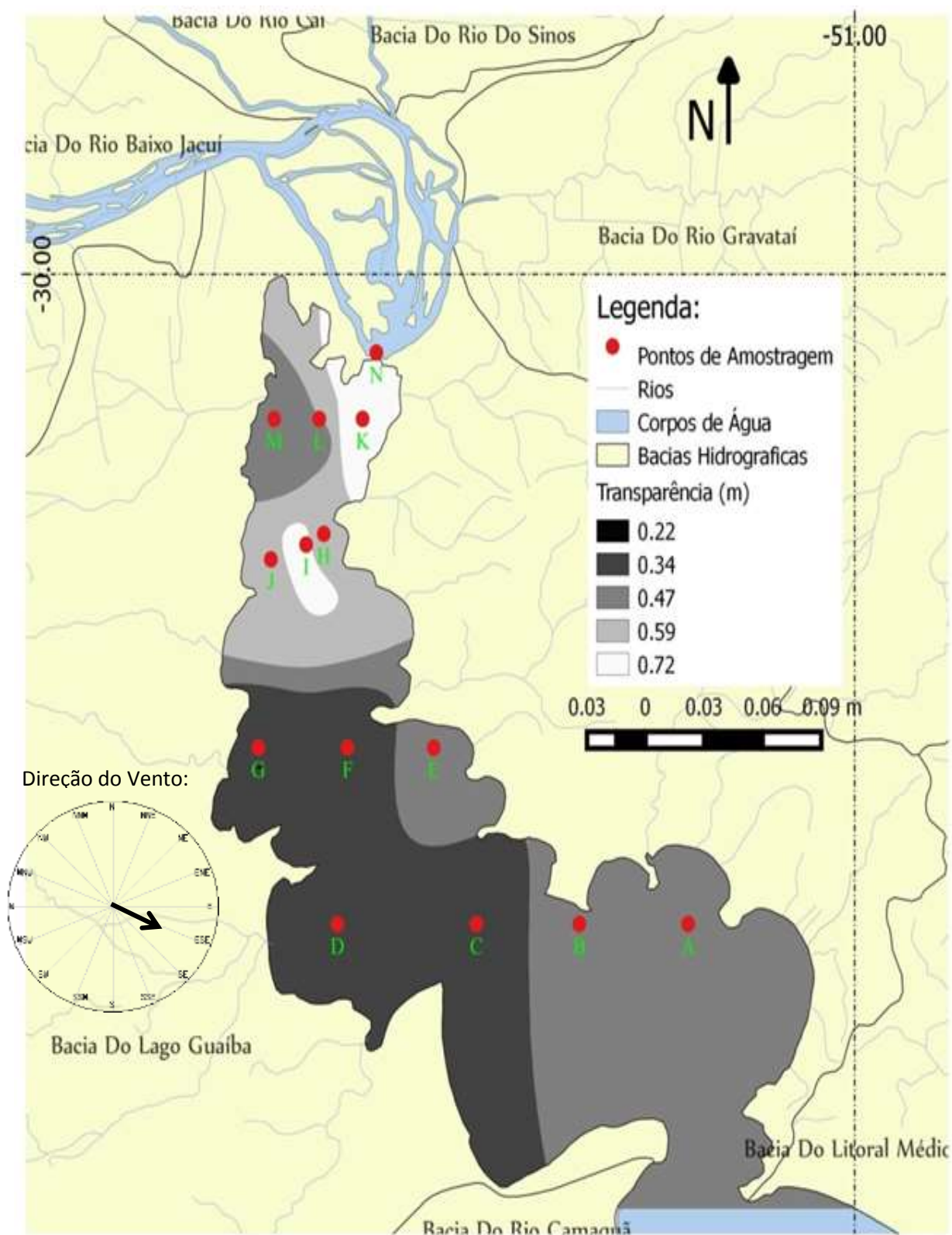


Figura 26 – Mapa de Transparência, 20 de dezembro de 2013, no Guaíba - RS.

As águas na margem leste, próximo às pontas do Jacaré e do Salgado e foz do Arroio Passo Fundo, conforme Matos *et al.* (2002), possuem baixa qualidade – e contemplam os menores valores de transparência (0,22 metros). Coincidindo com as características já mencionadas nos mapas de CMO e CSS, em função de sua menor profundidade na borda oeste, longe do canal de navegação, região de maior vazão e dinamismo em suas águas. O vento é, portanto o principal responsável pela ressuspensão de material de fundo, diminuindo a transparência da água em águas rasas.

Segundo Cabral *et al.* (2009), a baixa transparência da água é acompanhada pelo aumento da CSS, em setores do lago onde ocorrem as menores velocidades de escoamento, e onde grande parte da água já passou pelo processo de precipitação do material particulado em suspensão, tem-se maior disponibilidade de luz, refletindo em valores mais elevados de transparência e menores para a CSS. Entretanto isso não ocorre nas partes rasas do Guaíba, em 20 de dezembro de 2013, pois a ondulação gerada pelo vento revira o fundo ressuspensando o material depositado, e também não ocorre no canal, local de maior velocidade de escoamento.

### 5.1.2 Correlação dos dados de campo

O resultado dos dados de campo do dia 20 de dezembro de 2013 para os valores de transparência, foram correlacionados com as bandas do azul (b2), do verde (b3) e do vermelho (b4) do Sensor OLI, Landsat 8, e com os dados obtidos a partir das amostras de CSS e CMO. Na **tabela 7** podemos observar que as análises de correlação foram significantes a 5% para a banda do azul (B2) em todos os métodos de correção atmosférica (DP, QUAC e FLAASH). As bandas do verde e do vermelho não tiveram correlação estatisticamente significativas, mas apontam uma relação inversa com a transparência.

A **tabela 7** mostra que os três diferentes métodos de correção atmosférica possuem uma diferença pouco significativa entre eles, com uma

pequena vantagem ao método do pixel escuro (DP), portanto para as futuras análises optou-se por desconsiderar os outros dois métodos.

**Tabela 7** - Correlação entre a transparência (SECCHI) e CSS, CMO e com as bandas do visível (B2, B3 e B4), com base nas correções de Pixel Escuro (DP), QUAC e FLAASH.

	Azul (b2)	Verde (b3)	Vermelho (b4)	CSS	CMO
Transparência (DP)	-0,605*	-0,411	-0,292		
Transparência (QUAC)	-0,594*	-0,377	-0,212	-0,785**	-0,644*
Transparência (FLAASH)	-0,585*	-0,394	-0,302		

(\*) representa as correlações com nível de significância de 0,05; (\*\*) representa as correlações com nível de significância de 0,01.

Em trabalho recente, Corazza *et al.* (2013), sobre as características dos componentes opticamente ativos e sua relação com dados limnológicos (Transparência, Total de Sólidos em Suspensão e Chl-a) no Guaíba, encontraram para a data da análise (07 de março de 2012) valores altos de transparência, (valor médio de transparência 0,91 metros) e a CSS com valores baixos (média de 0,0956 mg/L). A possível explicação se deve ao período de estiagem, ocorrendo diminuição no carregamento de materiais sólidos e de nutrientes para o Guaíba.

Em seu trabalho no reservatório da Usina Hidrelétrica de Dona Francisca/RS, Corazza (2010) obteve sucesso na correlação entre parâmetros espectrais e os componentes opticamente ativos presentes na água. Através de testes estatísticos, correlações e testes de significâncias, comprovando a influência das variáveis limnológicas sobre as características espectrais da água.

Os valores de correlação estão negativos, **tabela 7**, evidenciando uma relação inversamente proporcional, ou seja, quanto maior o valor de transparência menor a concentração de sedimentos, material orgânico e conseqüentemente da resposta espectral da banda 2 do Landsat 8.



Observados por Corazza (2010), as maiores correlações para Total de Sólidos em Suspensão (TSS), se deram na faixa de reflectância entre 400 e 500 nm, coincidindo com a banda 2 do sensor OLI, Landsat 8 ( $\lambda$  entre 0.45 – 0.51  $\mu\text{m}$ ) correspondente à banda azul.

Nesta dissertação a correlação com os dados de laboratório, oriundos das amostras do trabalho de campo, mostram, conforme a **tabela 7**, uma correlação a um nível de significância de 0,01 com a Concentração de Sólidos em Suspensão e a transparência, e a 0,05 com a Concentração de Material Orgânico em Suspensão.

Diferente de Corazza (2010), ao analisar o reservatório de Dona Francisca - RS, os resultados obtidos no Guaíba são mais dinâmicos e possuem uma influência direta e de maior intensidade em decorrência da sazonalidade, da intensidade e direção do vento, da temperatura, da quantidade de solo exposto a montante dos rios contribuintes e demais fatores naturais. A autora encontrou predomínio de Chl-a como principal componente opticamente ativo (COA), devido às características do reservatório Dona Francisca. O que favorece a deposição de sólidos suspensos na água pelos sucessivos barramentos no rio Jacuí, e as características das bacias de contribuição com áreas florestais preservadas e menores índices de solo exposto e a diminuição da velocidade da água em direção ao dique, oferecendo condições favoráveis ao desenvolvimento fitoplanctônico.

O trabalho de Corazza (2013), sobre o Guaíba, aponta que altos valores de transparência remetem ao desenvolvimento de algas, entretanto, demais condições como temperatura, insolação e disponibilidade de nutrientes possivelmente não favoreceram a floração de algas. As condições presentes no Guaíba são bastante distintas de um reservatório ocasionando uma maior dificuldade na previsibilidade e na detecção de determinados fenômenos ou mesmo na sua classificação.

O teste estatístico de correlação e de significância comprovou uma alta relação entre as variáveis. O Gráfico apresentado na **figura 27** mostra a relação linear entre elas, em que o coeficiente Pearson teve o melhor

resultado. A transparência possui uma relação inversamente proporcional à concentração de sedimentos em suspensão (CSS), resultando em um R<sup>2</sup> significativo de 0,617 em equação de ajuste linear. Já a equação de ajuste exponencial o R<sup>2</sup> atingiu um valor de significância de 0,644 permitindo assim afirmar estatisticamente a correlação entre transparência e CSS.

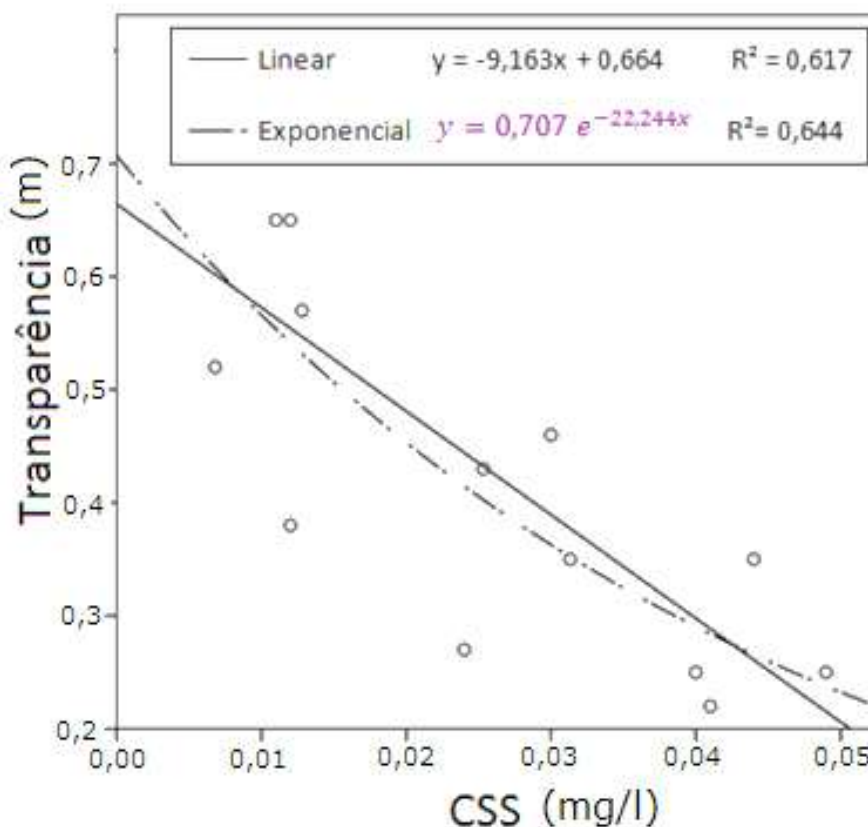


Figura 27 - Correlação linear e exponencial entre transparência e CSS, 20 de dezembro de 2013, no Guaíba - RS.

A **tabela 8** mostra as correlações entre os dados limnológicos (CSS e CMO) e a reflectância nas bandas do visível (b2, b3 e b4), aplicado método de correção por pixel escuro (DP). O número de amostras “N” para CSS e CMO total é de 21 - nos 3 pontos (K, L e M) nas 7 datas de campo vide **tabela 3**. Podemos observar que os valores de correlação não se mostraram significativos, com exceção a correlação entre CSS e a banda 2 que apesar de baixo (0,443) apresentou correlação ao nível de significância de 5%.

**Tabela 8** – Valores de correlação entre os dados limnológicos (CSS e CMO) e a reflectância (bandas do visível b2, b3 e b4) nos pontos K, L e M nas 7 amostragens do Guaíba-RS.

	N	b2	b3	b4
CSS	21	0,443*	0,054	-0,041
CMO	21	0,344	-0,21	0,011

Um asterisco (\*) representa que as correlações foram significativas a 95%; Dois asteriscos (\*\*) representam que as correlações foram 99% significativa; “N” mostra o número de amostras.

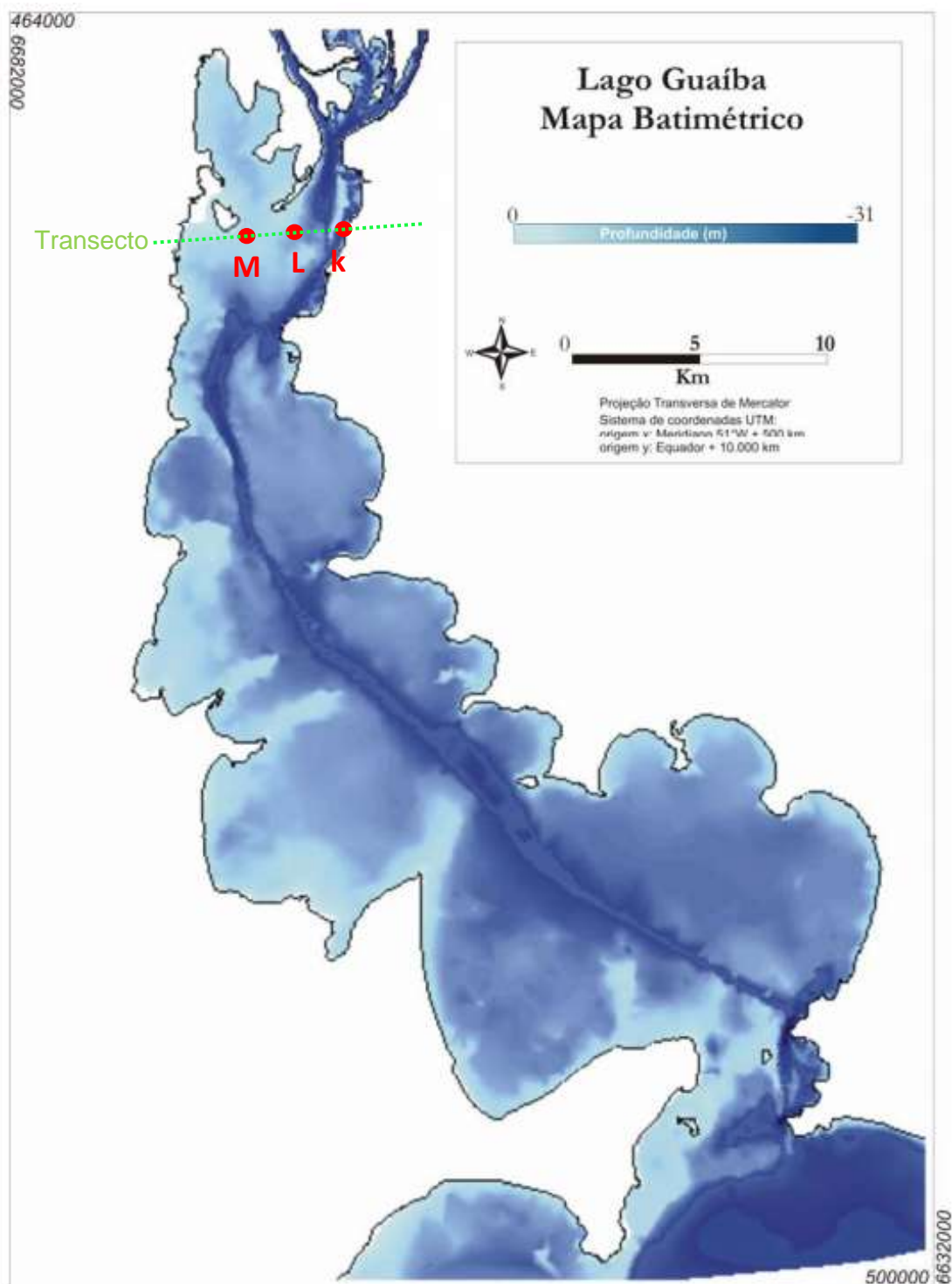
## 5.2 Transecto no Guaíba

Devido à impossibilidade de execução da metodologia original, optou-se por continuar com as coletas de campo, porém foi selecionado apenas um transecto, próximo a foz do Arroio Dilúvio, **figura 28**. Isso possibilitou a sua execução independente de outrem, em uma embarcação sem motor e, portanto sem custo. Optou-se dessa forma em viabilizar uma análise temporal utilizando a maior quantidade de datas de imagens e coleta de dados em campo.

A previsão inicial de um total de 14 pontos, ao longo do Guaíba, em cada estação do ano, foi alterada para apenas 3 pontos (K, L e M), mas em 7 datas. O número de datas poderia ter sido maior não fosse à baixa frequência de revisita do satélite Landsat-8 (16 dias) e a impossibilidade frente ao céu coberto por nuvens. As saídas de campo se deram durante todo ano de 2014 em todas as datas de passagem de satélite Landsat 8 livres de coberturas de nuvens.

A escolha deste transecto se deu, pois: a) o ponto K fica no canal próximo a margem leste, o ponto L está em uma zona intermediária, e o ponto M situar-se mais próximo a margem oeste em uma zona mais rasa (< 2 metros). O que proporcionou dados com características distintas aos pontos escolhidos; b) os mapas de transparência e CSS gerados no campo do dia 20 de dezembro de 2014 alocaram os pontos K, L e M em diferentes classes; e

c) a distância percorrida no transecto era possível de ser realizada dentro do limite de tempo (1,5h antes e após a passagem do satélite) remando a bordo de um caiaque.



**Figura 28** - Mapa Batimétrico e a localização dos pontos K, L e M no transecto do estudo no Guaíba - RS e. Fonte: Adaptado de Nicolodi et al. (2010)

A **figura 28** mostra o mapa batimétrico do Lago Guaíba deixando evidente a diferença de profundidade entre o canal de navegação, com uma profundidade de até 31 metros, e suas margens, com profundidades menores, chegando próximo a zero. Também se pode localizar os pontos K, L e M e a diferença de profundidade existente entre eles.

### **5.2.1 Análise de dados Limnológicos e de Reflectância, no transecto.**

Os dados da **tabela 9** apresentam os dados, oriundos do sensor OLI, Landsat-8, de reflectância (bandas 2, 3 e 4) corrigidas pelo método do pixel escuro (DP), e os dados limnológicos (transparência, CSS e CMO) obtidos em campo em cada uma das 7 datas, nos 3 pontos (K, L e M) do transecto. Os dados foram obtidos concomitantemente, mantendo assim a mesma condição atmosférica e de iluminação da cena.

Na data de 20/12/13 a cobertura de nuvens impediu que a relação entre a reflectância e os dados limnológicos colhidos nos 14 pontos ao longo do Guaíba. Optou-se, no entanto, em adicionar os dados a análise do transecto, visto que os pontos K, L e M estavam contidos. Na metade Norte do Guaíba, junto ao transecto escolhido, havia uma menor quantidade de nuvens que nos pontos A, B, C e D, do transecto mais ao Sul. Além disso, a coleta se deu concomitante a passagem de satélite (assim como nas demais datas), proporcionando uma condição de iluminação da cena igual.

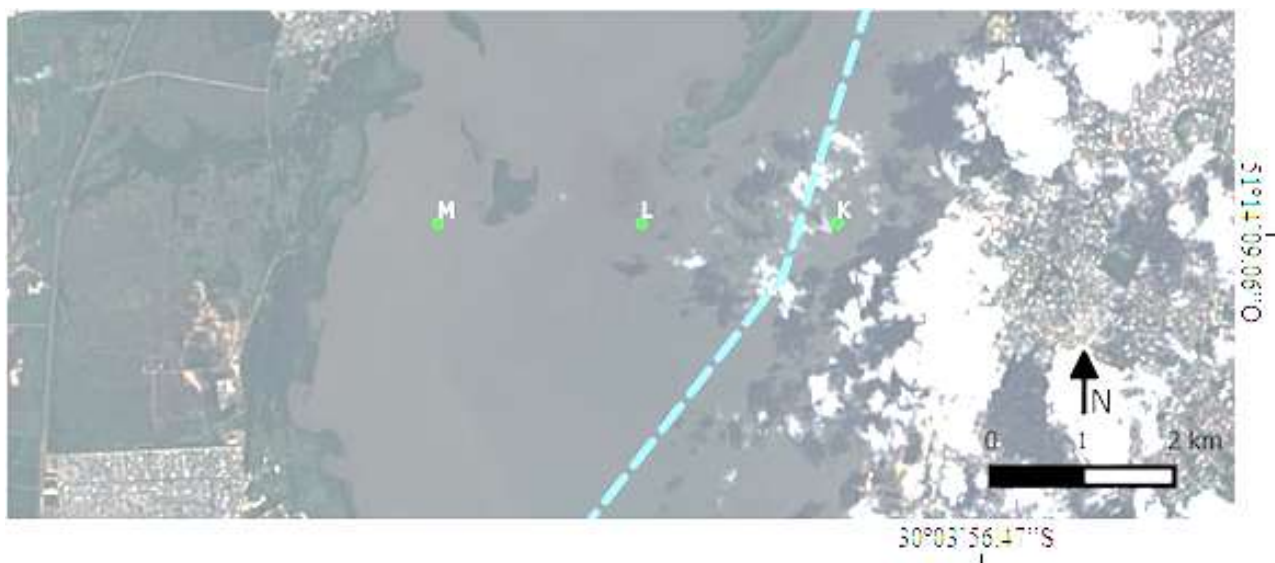
A **figura 29** mostra um recorte da imagem Landsat de 20/12/2013, em uma composição RGB 432, cores verdadeiras. Esta combinação, que utiliza apenas as bandas da porção do visível do espectro eletromagnético, é a que mais se aproxima das cores reais, porém a imagem ficou escurecida, mesmo com realce, impedindo uma classificação visual e sua análise.

**Tabela 9** – Dados nos pontos K, L e M em 7 amostragens, transecto no Guaíba – RS.

Data	Reflectância			Dados Limnológicos		
	(Sensor OLI - Landsat 8)			Transparência	CSS	CMO
	Azul (b2)	Verde (b3)	Vermelho (b4)			
20/12/2013	0,10421	0,11608	0,12506	0,7200	0,0132	0,0032
05/01/2014	0,06024	0,07905	0,09249	0,8700	0,0006	0,0048
06/02/2014	0,06380	0,08590	0,10098	0,7200	0,0102	0,0055
<b>K</b> 29/05/2014	0,11970	0,12361	0,13929	0,4500	0,0210	0,0085
16/07/2014	0,10824	0,10918	0,13227	0,2800	0,0300	0,0247
20/10/2014	0,10059	0,08941	0,09843	0,2000	0,1050	0,0330
07/12/2014	0,10557	0,10893	0,11159	0,4700	0,0187	0,0007
20/12/2013	0,06671	0,08452	0,10623	0,4600	0,0300	0,0060
05/01/2014	0,05895	0,06929	0,09032	-	0,0055	0,0033
06/02/2014	0,07068	0,08595	0,10450	-	0,0138	0,0012
<b>L</b> 29/05/2014	0,12448	0,12806	0,14403	0,3700	0,0273	0,0033
16/07/2014	0,10848	0,10967	0,13161	0,3200	0,0380	0,0190
20/10/2014	0,10946	0,09874	0,10408	0,2300	0,0829	0,0231
07/12/2014	0,08966	0,09852	0,10762	0,6200	0,0200	0,0027
20/12/2013	0,11222	0,11304	0,11876	0,3500	0,0440	0,0035
05/01/2014	0,09300	0,09992	0,10374	0,8500	0,0053	0,0031
06/02/2014	0,08686	0,10193	0,11072	0,7600	0,0088	0,0002
<b>M</b> 29/05/2014	0,09514	0,10673	0,12986	0,4200	0,0190	0,0035
16/07/2014	0,10881	0,10958	0,13210	0,2600	0,0360	0,0127
20/10/2014	0,11108	0,09921	0,10458	0,1800	0,0630	0,0220
07/12/2014	0,10368	0,11136	0,11415	0,7000	0,0187	0,0040

Os maiores valores para transparência das águas do transecto no Guaíba se deram no verão, no dia 05/01/2014 com registro de 0,87 m e 0,85 m nos pontos K e M. Na Estação Menino Deus (código A801), não há registro de precipitação (nos cinco dias anteriores há acúmulo baixo de 20 mm). Como podemos ver na **figura 30**, uma foto da cena mostra um céu limpo, e

com uma ondulação pequena, estimulada pelo vento de fraca intensidade (<2m/s).



**Figura 29** – Imagem do transecto no dia 20/12/13, contendo os pontos K, L e M. A linha achurada representa o canal de navegação. Composição RGB 432, cores verdadeiras. Fonte: sensor OLI, Landsat-8.



**Figura 30** – Fotografia na margem leste, em frente ao transecto, K, L e M em 05/01/2014, do Guaíba – RS.

A **figura 31** mostra a imagem Landsat 8, de composição RGB 432, cores verdadeiras, para o dia 05/01/2014. Esta combinação de bandas é boa

para realçar informações sobre regiões de água rasa, turbidez, correntes e sedimentos em suspensão. As tonalidades de azul mais claro representam águas mais rasas e com sedimentos em suspensão, enquanto os tons de azul mais escuros representam águas mais profundas e com pouco sedimento em suspensão. Distingue-se a coloração próxima ao canal (linha achurada), que passa próximo ao ponto K, com um verde mais escuro sinalizando visualmente uma maior concentração de componentes óticos.

No entanto, nessa data, pelo fato de não ter havido pluviosidade nos dias que antecederam a coleta, o valor de transparência alto corrobora a baixíssima CSS junto ao ponto k (0,0006 mg/L). No ponto L e M os valores de CSS foram mais expressivos, em parte, explicado pela região ser mais rasa (< 1 metro), e o fundo pode estar mascarando a resposta espectral, misturando-se com a resposta espectral. Em parte também pode ser explicada pelo vento, que mesmo com intensidade pequena, provoca perturbações nas colunas d'água nos pontos L e M, por serem rasos e ficarem em área de deposição, conforme apontam Nicolodi *et al.* (2013).

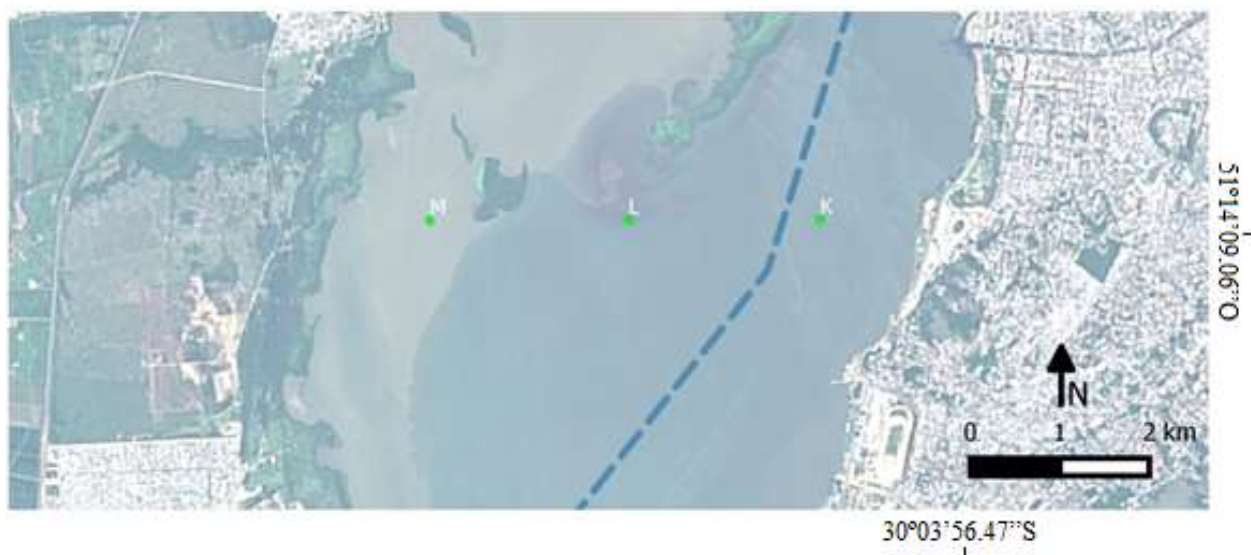
A CMO para esta data foi mais alta no ponto K, sinal de que a poluição oriunda de rios poluídos como Gravataí e Sinos, e a influência maior do arroio Dilúvio, bem próximo a este ponto fornecem material orgânico suficiente para marcar presença na resposta espectral.

O ponto K está situado junto ao canal de navegação e é classificado por Nicolodi *et al.* (2013) como uma região de característica deposicional. O ponto M está em uma área mais rasa, próximo à margem oeste do Guaíba, e possui característica transicional do material em suspensão. Apesar de possuírem hidrodinâmica distintas, o valor de transparência da água foi bastante semelhante. Em parte, como aponta Andrade Neto *et al.* (2012), os meses de verão (Janeiro, Fevereiro e Março) possuem os menores valores de vazão e CSS, corroborando

Nicolodi (2013) aponta que a ação de ondas na camada superficial do leito de lagos e lagoas podem desencadear a ressuspensão de sedimentos e a reintrodução de poluentes na coluna d'água. Entretanto, as ondas acompanham a direção e intensidade do vento, que nesta data apontava para



328 graus com velocidade de 2 m/s, insuficiente portanto em ressuspender sedimentos de fundo, mesmo no raso ponto L. Neste dia inclusive, não foi possível executar a técnica do disco de Secchi neste ponto, devido a sua baixa profundidade, a cota na régua da ilha da Pintada marcava 63 cm, indicando a baixa profundidade do Guaíba.



**Figura 31** – Imagem do transecto no dia 05/01/14, contendo os pontos K, L e M. A linha achurada representa o canal de navegação. Composição RGB 432, cores verdadeiras. Fonte: sensor OLI, Landsat-8.

Os valores de CSS revelam uma relação inversamente proporcional ao de transparência e registraram os menores valores, 0,0006 mg/L para o ponto K e 0,0053 mg/L para o ponto M. Esses foram os menores registros feitos entre as sete datas de coleta em todos os pontos. Os resultados de CSS possuem relação direta com os padrões de sedimentação do Guaíba, e como aponta Nicolodi (2013) constituem-se em um intrincado sistema de causa e efeito que muitas vezes se sobrepõem.

A reflectância, no dia 05/01/2014, após correção atmosférica DP, registrou os menores valores nas bandas 2 (0,06024), 3 (0,07905) e 4 (0,09249) do sensor OLI, no ponto K entre todas as datas de campo. O ponto L, mesmo bastante raso para medir a transparência (disco de Secchi), também possui os menores registros de reflectância entre as demais datas. Já o ponto

M registra os menores valores de reflectância somente nas bandas 3 e 4 entre as datas desse estudo, a banda 2 foi o terceiro menor registro.

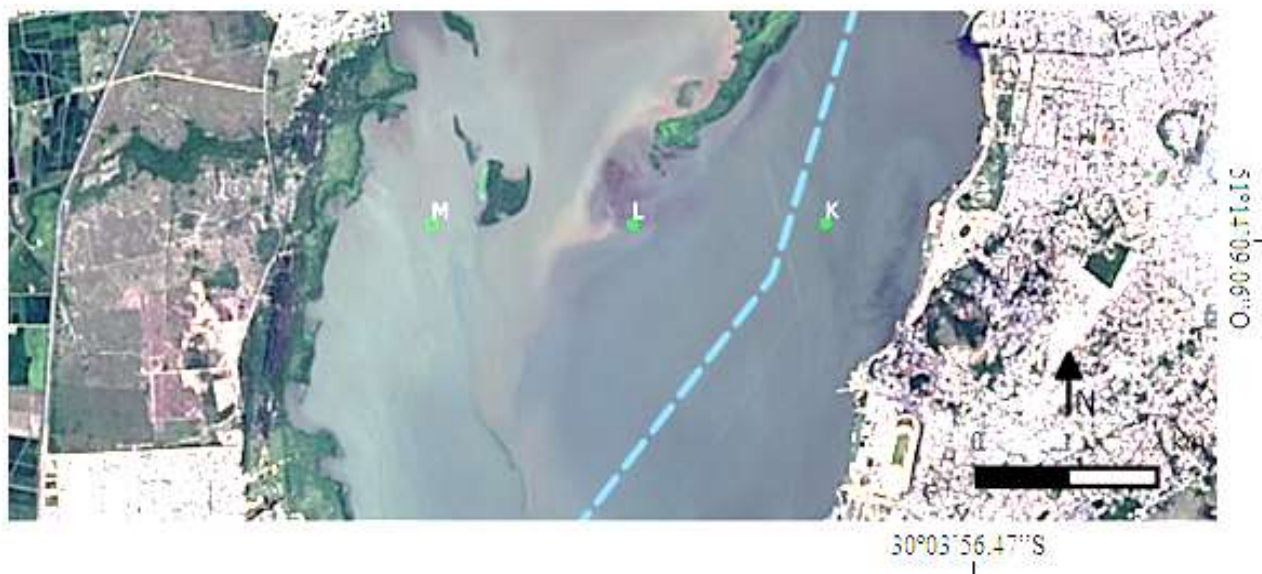
Ainda no período do verão, com o nível do Guaíba bastante raso, conforme **figura 32**, mas agora em fevereiro, o dia 06/02/2014, segundo Metroclima (2014), registrou uma temperatura máxima na estação do Instituto Nacional de Meteorologia, no Jardim Botânico, de 40,6°C, o maior registro dos últimos 71 anos, e a segunda maior após 1910 (data de início dos registros).



**Figura 32** – Fotografia de coleta de amostra, ponto L em 06/02/2014, no Guaíba - RS.

Neste dia na Estação Menino Deus (código A801), não há registro de chuva (e nos cinco dias que antecedem a coleta apenas no dia 03/02/2014 houve um registro de 11,6 mm). A cota na régua da ilha da Pintada marcava 57 cm a segunda menor cota entre as datas de campo. A direção do vento era de 315 graus com velocidade de 2 m/s.

A **figura 33** mostra a composição RGB 432, do Landsat 8 para o dia 06/02/2014. Pode-se distinguir a coloração da parte leste, onde transcorre o canal, com uma coloração de verde mais escura que a parte oeste que possui tons de marrom e verde claro, em uma área mais rasa e com maior possibilidade de ressuspensão ocasionada pelo vento.



**Figura 33**– Imagem do transecto no dia 06/02/14, contendo os pontos K, L e M. A linha achurada representa o canal de navegação. Composição RGB 432, cores verdadeiras. Fonte: sensor OLI, Landsat-8.

A transparência foi alta (0,72 no ponto K e 0,76 no ponto M) e, portanto, os valores de CSS e CMO foram baixos, comparados a outras datas, como apontam Andrade Neto *et al.* (2012). Os meses de verão (Janeiro, Fevereiro e Março) possuem os menores valores de vazão e CSS, indo de encontro ao encontrado nesta data. A reflectância neste dia apontou o menor registro do ponto M na banda 2 (0,08686). Para esta data o ponto L estava raso (menor que 0,3 m), e provavelmente a resposta espectral do fundo pode mascarar os resultados de reflectância da água, apesar de apresentarem valores baixos.

Na coleta de campo de outono, no dia 29/05/2014 na Estação Menino Deus (código A801), a cota na régua da ilha da Pintada medida na régua marcava 85 cm e a direção do vento apontava para 47 graus com velocidade praticamente nula. Com uma transparência média de 0,41 m nos 3 pontos (K, L e M), essa data se caracterizou por deter os mais altos valores de reflectância nas bandas 2, 3 e 4 nos pontos K e L. O mês de maio, como apontam Andrade Neto *et al.* (2012), possui maiores valores de CSS e de vazão do Guaíba comparativamente ao primeiros quatro meses do ano.

Visualmente, conforme a **figura 34**, vê-se uma quantidade de plantas aquáticas na superfície, não observado nas datas anteriores, mesmo sem

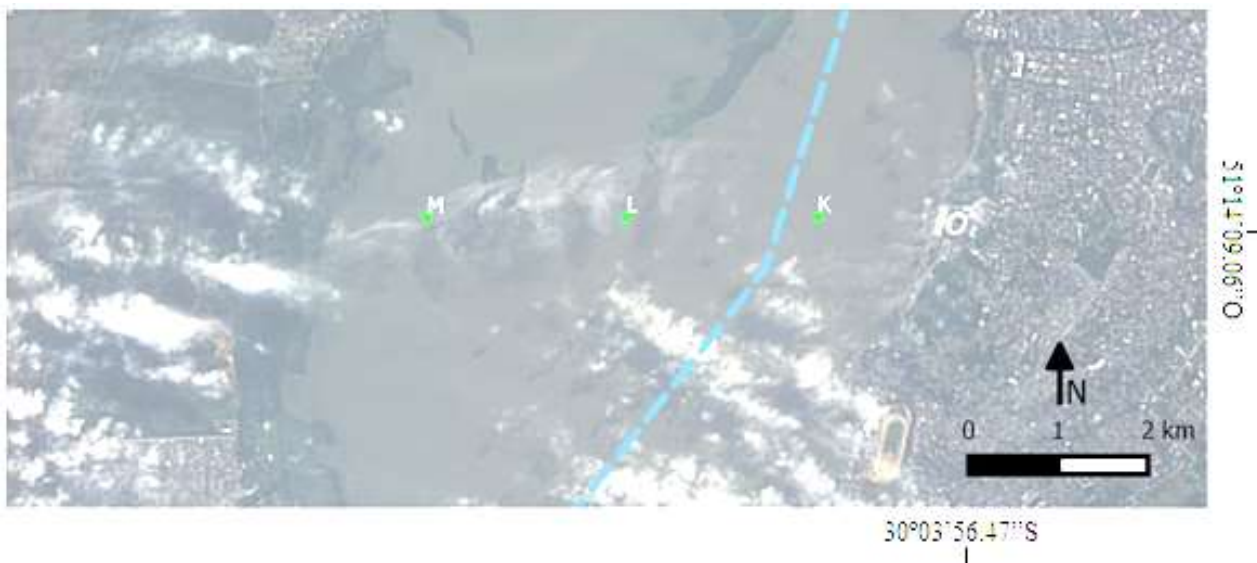
registro de chuva no dia (e nem nos 5 dias que o antecedem). Nessa data não foram observados valores baixos de transparência e nem valores altos valores de CSS e CMO. Não houve chuva e a intensidade do vento foi muito baixa. Não houve relação entre os altos valores de reflectância e apenas valores medianos de CSS, CMO e transparência, comparativamente às outras datas.



**Figura 34** – Fotografia no ponto K em 29/05/2014, no Guaíba - RS.

A **figura 35** mostra que a quantidade de nuvens pode ter influenciado negativamente a relação, e a composição de bandas RGB 432, cores verdadeiras, mesmo com manipulação de brilho se mostrou um pouco escura para identificação ou discriminação de características entre os pontos K, L e M.

Todos os componentes da água possuem resposta óptica significativa na faixa espectral 400-500 nm conforme aponta KIRK (1994 *apud* GITELSON *et al.*, 2000) e mesmo com baixos valores de CSS e CMO, para a data de 29/05/2014 houve uma resposta espectral alta, comparada a outras deste trabalho. Porém a resposta espectral ocorreu em maior quantidade nas bandas do verde(b3) e do vermelho(b4), e não como apontam os autores citados correspondente à faixa da banda 2, do Landsat. Já Witte *et al.* (1981) obtiveram, com presença de sedimentos em concentração menor que 20mg/L, uma reflectância com um pico entre 550 e 600nm, referente as bandas 3 e 4 do Landsat, conforme ocorreu nesta data (29/05/2014).



**Figura 35**– Imagem do transecto no dia 29/05/14, contendo os pontos K, L e M. A linha achurada representa o canal de navegação. Composição RGB 432, cores verdadeiras. Fonte: sensor OLI, Landsat-8.

No inverno, dia 16/07/2014, assim como ocorreu no outono, não há registro de chuva (nem nos 5 dias que o antecederam), mas nota-se uma quantidade expressiva de folhas, galhos e demais materiais orgânicos na superfície da água, conforme a **figura 37**. Neste dia havia formação de serração ou nevoeiro (um formação de nuvens baixas logo ao nascer do sol, muito comum nesta época do ano) e ir a campo foi uma aposta, pois a quantidade de nuvens estava diminuindo, e próximo ao horário da passagem do satélite o céu parecia bastante claro.

A direção do vento era de 159 graus com velocidade praticamente nula, entretanto, a transparência da água estava baixa (0,32 m na média entre os 3 pontos). A cota na régua da ilha da Pintada marcava 131 cm, um valor alto comparado aos meses de verão. Ressalta-se a reflectância no ponto M, com o máximo valor registrado na banda 4 (0,13210), entretanto os valores de CSS não acompanham esse pico, com apenas 0,036 mg/L.

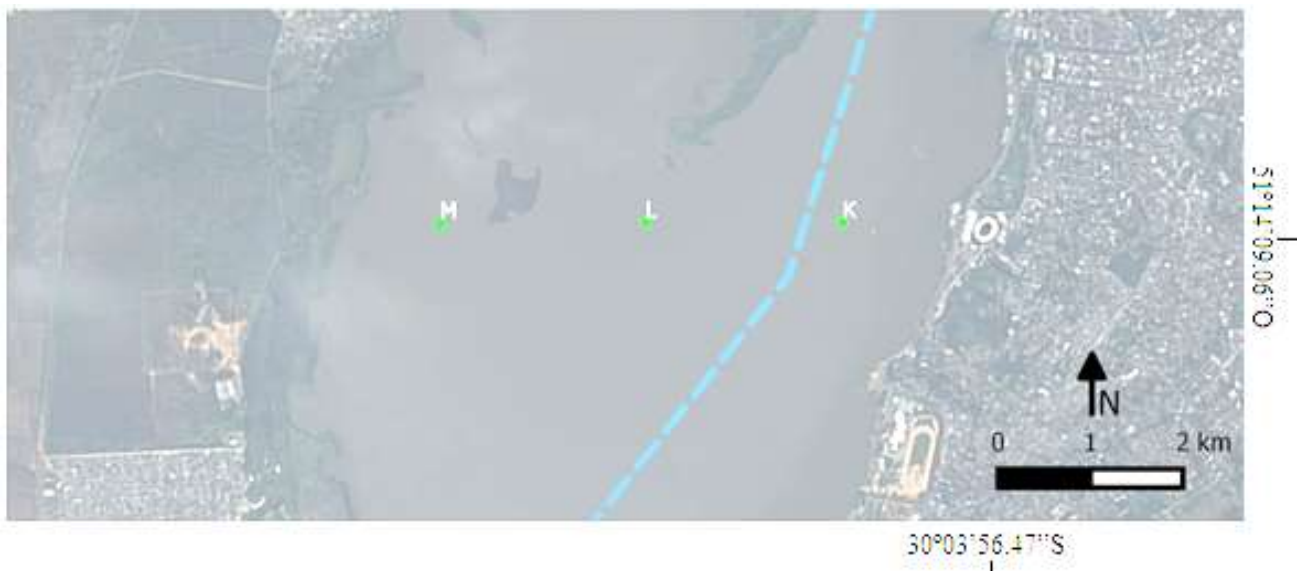




**Figura 36** – Fotografia do ponto K em 16/07/2014, no Guaíba - RS.

A **figura 37**, uma composição RGB 432, do Landsat 8 do dia 16/07/14 apresenta-se, um pouco escura, porém é possível identificar nos pontos K, L e M a coloração não há variação significativa, predominando o mesmo tom. No entanto, a leste do ponto K, até a margem junto ao estádio Beira-Rio vê-se que a coloração da água está mais escura. A explicação para essa diferença pode ser pela presença de nuvens, alterando os valores da resposta espectral ou da presença de matéria orgânica originado na foz do Arroio Dilúvio e do emissor, que lança efluentes de esgoto não tratado, junto à região da Ponta Grossa, distante 1600m da margem

A separação dos COA's não se mostrou muito eficaz na identificação junto a resposta espectral, pois como aponta IOCCG (2000), o material particulado presente na água não representa apenas um tipo de material, mas uma gama de materiais e de suas características intrínsecas dependem de sua origem como areias brancas de uma praia de coral, ou barro vermelho de um rio e até mesmo poeira continental trazida por água (IOCCG, 2000).

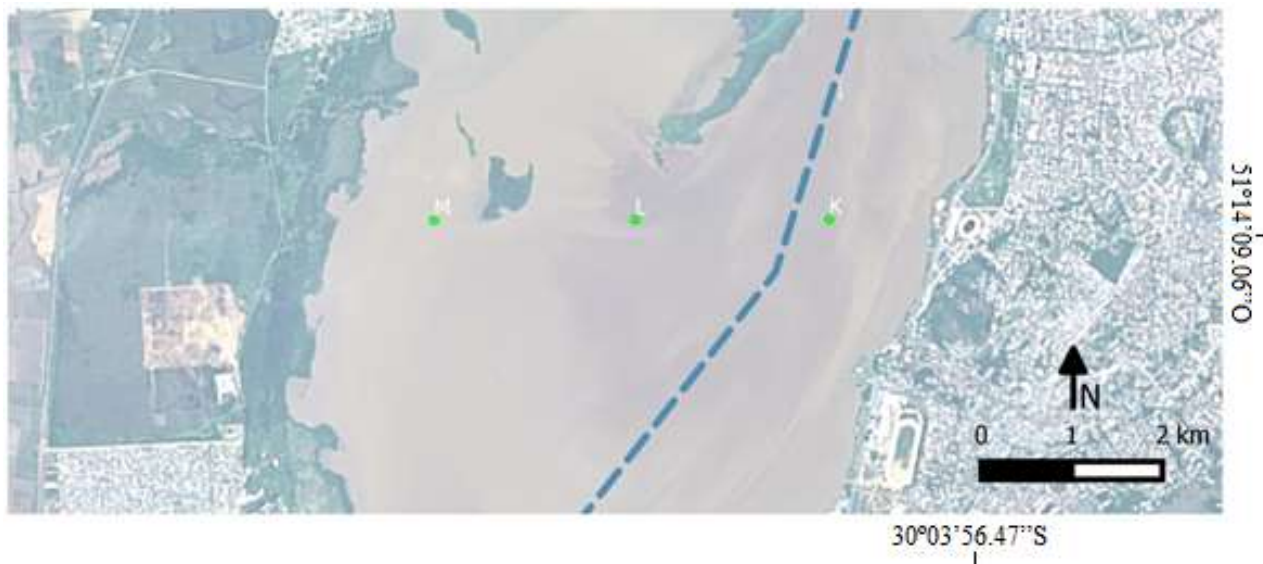


**Figura 37**– Imagem do transecto no dia 16/07/14, contendo os pontos K, L e M. A linha achurada representa o canal de navegação. Composição RGB 432, cores verdadeiras. Fonte: sensor OLI, Landsat-8.

A primavera revelou os mais baixos valores de transparência das águas neste setor do Guaíba, no dia 20/10/2014 obteve-se valores entre 0,26 m e 0,32 m nos pontos M e L respectivamente. Pode-se explicar isso devido a pluviosidade de 35,8 mm na data (e de 74,9 mm no acúmulo dos 5 dias que o antecedem), levando assim sedimentos para dentro do corpo d'água. Isso fica mais evidente ao analisarmos os dados limnológicos, corroborando com os maiores valores registrados de CSS e CMO nos 3 pontos. Contudo, os valores de reflectância, em todas as bandas do visível (b2, b3 e b4) não mostraram valores maiores que em outras datas, podendo possivelmente ser influência do fundo, que acabou por equilibrar os valores nas diferentes datas. Assim como apontam Andrade Neto *et al.* (2012), o mês de outubro registra os maiores valores de CSS e de vazão no Guaíba.

Nesta data, conforme a **figura 38**, também se deu a maior cota registrada entre as datas (160 cm), descartando a hipótese de que a resposta espectral do fundo pudesse estar influenciando nos dados de reflectância. A direção do vento era de 243 graus com velocidade de 1m/s, explicando, em parte, o porquê da maior CSS se dar no ponto K (0,105 mg/L) junto ao canal e próximo a margem leste em detrimento ao ponto M (0,063 mg/L) que se situa junto a margem oeste.

Visualmente nota-se, na **figura 38**, uma coloração mais escura nas proximidades do ponto K, junto ao canal (linha achurada) indicando que há uma presença maior de COA's em relação ao ponto M. Explica-se em função das chuvas que antecederam a coleta, levando sedimentos ao canal, ao leste, com valores mais altos de CCS em K (0,1050 mg/L) do que no ponto M (0,0630 mg/L)

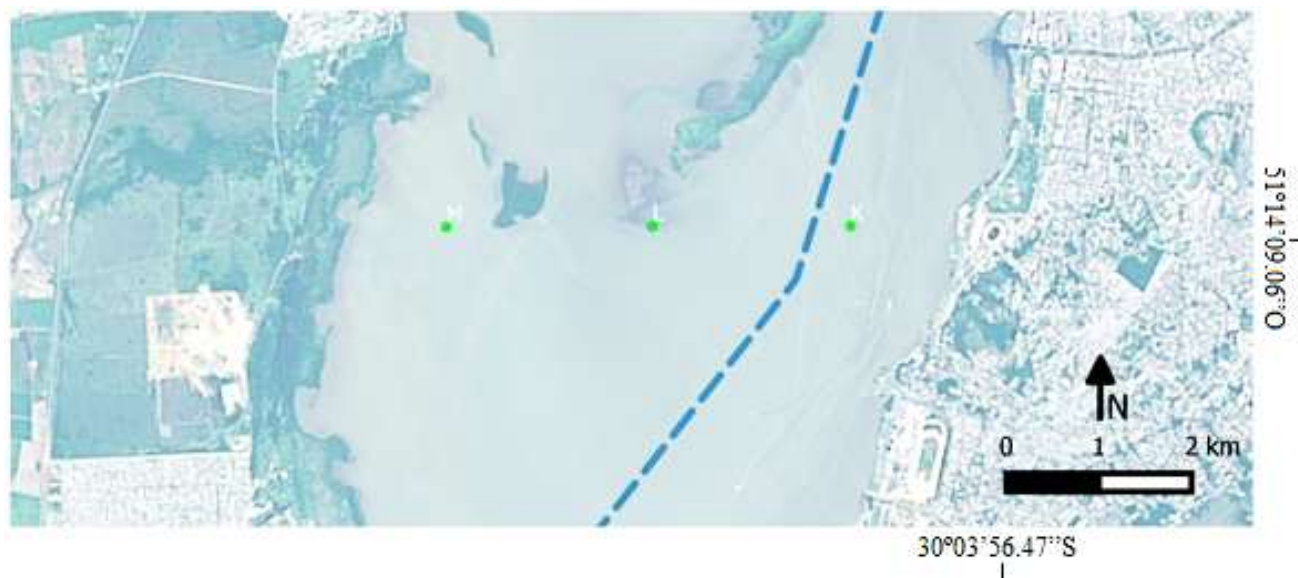


**Figura 38**– Imagem do transecto no dia 20/10/14, contendo os pontos K, L e M. A linha achurada representa o canal de navegação. Composição RGB 432, cores verdadeiras. Fonte: sensor OLI, Landsat-8.

No dia 07/12/2014 na Estação Menino Deus (código A801), não há registro de chuva (e nos 5 dias que o antecedem há um acumulo de 28 mm), a cota na régua da ilha da Pintada marcava 54 cm e a direção do vento era de 348 graus com velocidade de 2 m/s. A **figura 39** mostra um recorte da imagem Landsat, RGB 432 para a data, que visualmente aponta para uma coloração mais clara na margem oeste, junto ao ponto M. O ponto L está próximo a um local com formação de uma ilha. Essa deposição é contrária ao que mostram Nicolodi *et al.* (2013), que apontam essa área como comportamento erosional e transicional de sedimento. Este ponto situa-se, como classificaram Paz *et al.* (2005) em uma região limite entre águas de classe 2 – águas com as maiores velocidades de escoamento em todo Guaíba - e de classe 7 – área com águas praticamente estagnadas –



possibilitando a alteração da dinâmica de deposição apontada por Nicolodi *et al.* (2013) nesta região.



**Figura 39**– Imagem do transecto no dia 07/12/14, contendo os pontos K, L e M. A linha achurada representa o canal de navegação. Composição RGB 432, cores verdadeiras. Fonte: sensor OLI, Landsat-8.

Como a interpretação desses dados é de difícil execução, em função dos pontos terem águas com classes - segundo Paz *et al.* (2005) -, localização, profundidade (características batimétricas) e hidrodinâmicas diferentes, e cada data possuir condições ambientais (vento, vazão, pluviosidade e condição de iluminação) distintas, optaram-se por executar uma correlação por método de Pearson e regressões linear e exponencial nos casos com maiores valores de correlação.

### 5.2.2 Correlação entre a resposta espectral da água e as variáveis limnológicas.

A elaboração da **tabela 10** busca mostrar de forma mais eficiente e assim compreender a influência dos componentes opticamente ativos nos dados de reflectância. Esta tabela mostra a correlação entre os dados limnológicos (transparência, CSS e CMO) e de reflectância nas bandas 2, 3 e 4, aplicado o método de correção atmosférica por pixel escuro (DP). O

número de amostras “N” para CSS e CMO total é de 21 (3 pontos em 7 diferentes datas). Como a aplicação do método de Secchi não possível de ser aplicada em duas datas (no verão devido a baixa profundidade), no ponto L, o número total de amostras para transparência foi de 19.

**Tabela 10** - Correlação entre os dados limnológicos e de reflectância nos pontos K, L e M, transecto no Guaíba-RS.

		b2	b3	b4
Transparência (m)	Correlação	-0,6018**	-0,2452	-0,3388
	p_valor	0,0064	0,3117	0,1560
CMO (mg/l)	Correlação	0,3495	-0,1638	0,0172
	p_valor	0,1204	0,9438	0,9409
CSS (mg/l)	Correlação	0,4423*	0,0572	-0,0381
	p_valor	0,0447	0,8055	0,8697

(\*) mostra que o p-valor do teste, inferior a 0,01, é significativo a nível de 1%; (\*\*) mostram que o p-valor do teste, entre 0,01 e 0,05, é significativo ao nível de 5%.

A correlação entre o espectro de reflectância da banda 2, do sensor OLI, e os dados de transparência apresentaram valores estatisticamente significativos. Foi executado a correlação de p-valor, **tabela 9**, em que a banda 2 ( $\lambda$  entre 0.45  $\mu\text{m}$  e 0.51  $\mu\text{m}$ ) do Landsat 8 e a variável transparência foi de -0,6018, com uma correlação significativa ao nível de 5%.

Houve, como aponta a **tabela 10**, significância com um nível de confiança de 5% em uma relação inversamente proporcional. Pereira *et al.* (2011) utilizaram o método de correlação linear de Pearson em seu trabalho a cerca de um reservatório (Itupararanga/SP) e mesmo com condições de tempo favoráveis, devido ao baixo número de pontos amostrais (apenas 3), não foi possível alcançar uma correlação significativa, mesmo em um ambiente mais estável, como o de um reservatório.

A correlação entre o espectro de reflectância da banda 2, do sensor OLI, e os dados de transparência e CSS apresentaram valores

estatisticamente significativos ao nível de 5%. Assim como apontam Kirk (1994), Dekker (1993), Mobley (1994) e Rundquist (1996) que ao realizarem experimentos laboratoriais demonstraram que os aumentos da CSS e de CMO implicam no acréscimo da reflectância, em função do espalhamento pelas partículas em determinados comprimentos de onda. Como os experimentos demonstrados pelos autores foram executados em ambiente controlado, em laboratório, não estão contemplados os fatores externos como condição de iluminação, rugosidade da água e a geometria no momento da aquisição, que podem inferir uma série de ruídos nos dados espectrais, alterando assim as correlações obtidas nos espectros originais. A correção atmosférica pelo método do pixel escuro foi uma tentativa de atenuar o ruído.

Segundo Corazza (2013), para o total de sedimentos em suspensão, as maiores correlações (porém não significativas) foram encontradas entre 400 e 500 m, demonstrando sua pequena influência nesta faixa. Nesta dissertação, portanto essa afirmativa se confirmou, visto que a correlação entre CSS ocorreu, com maior significância com a banda 2 (0.45 – 0.51  $\mu\text{m}$ ).

Entretanto, para as bandas 3 e 4 os valores de correlação não foram satisfatórios, em função da alta dinâmica hidrológica, eólica, e da oferta de nutrientes e demais condicionantes que atuam neste transecto do Guaíba, mascarando os dados de resposta espectral. Isso torna a correlação entre dados os limnológicos e a reflectância uma missão bastante complexa. Segundo McCoy (2005) em locais onde existe uma concentração de material em suspensão alta, o comportamento da água em determinados partes rasas se modifica de tal forma que é difícil discernir entre o fundo (solo) ou matéria em suspensão na água.

Parte da explicação de somente a banda 2, do Landsat 8, haver apresentado correlação significativa com os dados limnológicos – transparência e CSS - resume-se ao fato de que ela possui uma maior energia. Para imagens Landsat se estima que a profundidade da água máxima que se pode determinar alcança 6,4 m na banda azul, 3 na verde e 2,1 m na vermelha (Ji *et al.*, 1992). Sendo assim a correlação com a banda 2 se mostrou mais eficiente, portanto, devido a sua energia maior capaz de

aprofundar-se na água, interagindo com uma camada maior, em comparação as outras bandas.

Bhargara e Marian (1991) corroboram com Ji (1992) e apontam que a variabilidade da água é mais facilmente detectada em comprimentos de onda mais curtos (azul e verde), e se relaciona com sua profundidade, conteúdo de materiais em suspensão (clorofila, argilas, e nutrientes) e rugosidade da superfície.

Estudos em águas continentais encontraram boas correlações, com 98% significância para clorofila-a e a resposta espectral na faixa de 670 e 705 nm (Mittenzwey *et al.*, 1992). Entretanto, neste trabalho e também no trabalho de (Gianasi *et al.*, 2011) isso não foi observado, provavelmente devido ao baixo N amostral, que não representou o espectro de variação da clorofila no Guaíba, especificamente no transecto estudado. Além das condições desfavoráveis de proliferação de algas, como temperatura, radiação solar e disponibilidade de nutrientes necessários para tal. Com exceção ao dia 20/10/2014, único dia precedido de pluviosidade, o restante obteve concentrações baixas (inferior a 0,0085 mg/L) de CMO. Dessa forma, neste trabalho, a caracterização espectral das águas no transecto do Guaíba e sua correlação com a CMO não foi possível através da metodologia utilizada.

Pode-se concluir que no período estudado, no transecto do Guaíba contendo os pontos K, L e M não houve floração (Chl-a), ou valores altos de CMO e uma proliferação de algas. Também não apresentou uma correlação com a banda 3 (verde) estatisticamente significativa. A reflectância da água muda conforme a concentração de clorofila presente. Com o aumento, essa concentração de clorofila tende a diminuir a reflectância no comprimento de onda do azul e aumentar na do verde. (LILLESAND *et al.*, 2007)

Em um estudo acerca da proliferação de algas em uma de maré verde que ocorreu no estuário Laguna dos Patos, Gianasi *et al.* (2011-b) conseguiram delimitar acúmulos de algas em uma camada superficial, entretanto, foi deficitário no estudo de biomassas submersas, mesmo a poucos centímetros da superfície. Isso mostra a complexidade do estudo de águas interiores utilizando sensoriamento remoto.

Corazza *et al.* (2015), em estudo sobre o Guaíba, afirmam que a utilização de dados de sensoriamento remoto mostrou-se efetiva para o mapeamento de florações, em especial para avaliar a distribuição espacial de Chl-a. Entretanto, as coletas de campo são fundamentais para a compreensão, e a utilização de ambas técnicas podem trazer resultados ainda mais significativos para compreensão dos processos que ocorrem nos corpos hídricos. No caso desta dissertação, a metodologia adaptada a uma menor quantidade de pontos (apenas 3) ficou aquém do esperado, gerando assim valores de correlação parcialmente satisfatório.

A metodologia aplicada, em função da retirada do apoio logístico que contemplava o barco a motor e seu navegador, acabou contemplando apenas 3 pontos amostrais por data de campo, aplicado em 7 datas distintas ao longo dos anos de 2013 e 2014 provavelmente influiu negativamente nos resultados e conseqüentemente em suas correlações.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo principal proposto para esta pesquisa foi parcialmente atingido. Foram gerados mapas de transparência, CSS e CMO para a data onde os 14 pontos amostrados ao longo de todo Guaíba, conforme metodologia original. Os resultados permitiram espacializar a distribuição de transparência, CSS e CMO através de mapas, gerados por interpolação, e com isso caracterizar o Guaíba de maneira satisfatória para esta data (20/12/13).

Foram alcançados os objetivos parciais de obtenção e quantificação das variáveis limnológicas (transparência, CSS e CMO) e o estabelecimento de relações entre elas. Entretanto a modificação ocorrida na metodologia deixou de analisar o Guaíba como um todo, considerando somente um transecto, mantendo, porém a possibilidade de analisar as características deste segmento (transecto) em diferentes datas (nas 4 estações do ano).

As correlações, de uma forma geral, foram baixas e se mostram estatisticamente significativas para um nível de confiança de 1% entre para a banda 2 (0.45 e 0.51  $\mu\text{m}$ ), do sensor OLI e a transparência, e para CSS verificou-se significância ao nível de 5% com a mesma banda 2. O coeficiente de regressão ( $R^2$ ) entre a transparência e CSS encontrou correlação de 87,32%. Também entre CMO e a banda 2 do Landsat 8 foi encontrada uma relação, baixa (0,443), mas significativas a 5%.

A metodologia utilizada inicialmente, com uma quantidade maior de pontos (14) se mostrou mais acertada. No entanto, o plano B, e a nova metodologia aplicada durante este trabalho apesar de apresentar poucas relações significativas e resultados satisfatórios mostrou a complexidade que é trabalhar com dados de sensoriamento remoto utilizando sensor multiespectral no Guaíba. A resolução de 30 metros de um sensor orbital, apontada para um corpo d'água de grande dimensões, de dinâmica muito variável, associada a mudanças da condição de iluminação, da direção do vento, diferentes quantidades de água (vazão dos rios contribuintes) recebida

e junto dela seus constituintes opticamente ativos não se mostraram corretas, ou não obtiveram os resultados esperados.

Não foi possível gerar modelos de inferência para a transparência da água, CSS e CMO a partir de dados espectrais oriundos do sensor OLI, Landsat-8 validados pelos dados de campo, no entanto a relação entre transparência e a banda 2 mostrou-se possível. Isso evidencia a alta complexidade no estudo de corpos d'água naturais onde às condições externas podem definir mudanças nas características da resposta espectral da água, e dos componentes opticamente ativos presentes nela. A previsibilidade destes fatores nem sempre podem ser alcançada, e assim, antevê-los com uma metodologia mais acertada é de difícil execução.

A maior dificuldade encontrada, exceto os dias encobertos que impediram a realização de campo, foi de coletar as amostras no menor tempo possível, mantendo assim a condição da cena para o sensor OLI e a obtenção dos valores de transparência e coleta de amostras. Também se soma a isso a complexidade hidrodinâmica inerente do Guaíba, com vazão que por vezes cessa em função do vento, canal de navegação com profundidade consideravelmente maior que suas margens, e que recebe grande quantidade de sedimentos, material orgânico e demais poluente físico e químico dos rios que nele deságuam. As condições do tempo podem sofrer alterações em curtíssimos períodos de tempo, dificultando as análises e interpretações, mascarando os resultados obtidos.

Ainda assim foi possível a realização de uma regressão linear entre transparência e CSS e a correlação entre a banda 2, do sensor OLI, e a CSS e a CMO também se mostrou significativa.

As recomendações que sugiro são para que o período do estudo seja maior, impossibilitando assim que seja executado durante uma dissertação de mestrado, com apenas 2 anos, mas para uma tese de doutorado, com duração de 4 anos. Além disso, ajudaria também a formação de uma equipe, com um número de componentes maior, executando a coleta de dados ao mesmo tempo em maior número de transectos, mesmo de caiaque. Acredito que um mínimo de 5 transectos forneceriam dados suficientes para gerar

mapas de interpolação de dados limnológicos e uma melhor correlação com dados de reflectância nesta área de estudo contemplada na presente dissertação, o Guaíba, RS.



## 7. REFERÊNCIAS

ANDRADE, R.R *et. al.* Lago Guaíba (RS): índice de qualidade de água - IQA, 2000 a 2009. **Revista Ecos DMAE**. Nº 32. Ano 18. Encarte nº 4. Maio de 2012.

ANDRADE NETO, J.S.; RIGON, L. T.; TOLDO JR, E .E.; CHETTINI, F. Descarga Sólida Em Suspensão Do Sistema Fluvial Do Guaíba, RS, E Sua Variabilidade Temporal. In: **Pesquisa em Geociências** Vol.39.nº2, 2012.p.161-171.

ANDRADE NETO, J.S.; THIESEN, R.L.; TOLDO JR, E.E. JR.; SCHETTINI, C.A.F. **Descarga sólida em suspensão do sistema fluvial do Guaíba, RS, e sua variabilidade temporal** - Versão online publicada em 13/12/2012. [www.pesquisasemgeociencias.ufrgs.br](http://www.pesquisasemgeociencias.ufrgs.br) Acessada em maio de 2015.

BACHI, F.A.; BARBOZA, E.G. & TOLDO JR., E.E. Estudo da Sedimentação do Guaíba. **Revista ECOS**, DMAE.Vol.17, 2000.p.32-35.

BAISCH, P. **Les oligo-elements metalliques du systeme fluvio-lagunaire dos Patos, Flux et devenir** (Brasil). Bordeaux, Tese de Doutorado em Geologia Marinha. Universidade de Bordeaux.1994.p.345.

BARTOLUCCI, L. A.; ROBINSON, B.F.; SILVA, L.F. Field measurements of the spectral response of natural waters. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, West Lafayette**, v. 43, n. 5, p. 595-598, May. 1977.

BELMONTE R.V. Licença para Poluir em **Jornal Extra Classe** Nº 171 Ano 18 Março de 2013. Disponível em: <http://www.extraclasse.org.br/edicoes/2013/03/licenca-para-poluir/>> Acessado em maio de 2015.

BENDATI, M.M.; SCHWARZBACH, M.S.R.; MAIZONAVE, C.R.M.; ALMEIDA, L.B. & BRINGHENTI, M.L. Avaliação da qualidade da água do lago Guaíba. Subsídios para a gestão da bacia hidrográfica. **Ecos Pesquisa**, DMAE, vol.34,2003.

BHARGARA, D.S. e MARIAN, D.W. Spectral reflectance relationships to turbidity generated by different clay materials. In: **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, vol. 56, 1991.p. 225-229.

BUKATA, R. P., JOHN, H. J. e KONDRATYEV, K. Y. **Optical Properties and Remote Sensing of Inland and Coastal Waters**. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 1995. Disponível em : <<http://www.manejocostero.com.ar/multimedia/publicaciones/4-Satellite%20monitoring%20of%20inland%20and%20coastal%20water%20quality.pdf>> Acessado em 30.jan.2015.

CABRAL, J.B.; PEREIRA, L.A.; FERNANDES, V.A.B.; SEBASTIÃO A.da S. Concentração De Sedimentos Em Suspensão: Reservatório de Cachoeira Dourada - GO/MG, Brasil Mercator - **Revista de Geografia da UFC**, Universidade Federal do Ceará. Vol. 8,nº16,2009.p.233-253,

CAMARGO, O.A. E SILVA F.J.L. *et al.*, **Atlas eólico**: Rio Grande do Sul. Editado pela Secretaria de Energia Minas e Comunicações. Porto Alegre: SEMC.. 2002.p.70il. mapas. Disponível em: <<http://www.seinfra.rs.gov.br/index.php?menu=atlaseolico>> Acessado em 26 de janeiro de 2015.

CHAVEZ Jr.,P.S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. In: **Remote Sensing of Environment**, v. 24, 1988.p.459-479.

CORAZZA, R.; PEREIRA FILHO, W.; BASSO, L. A. Identificação das características ópticas da água do lago Guaíba, RS, a partir de dados espectrorradiométricos e limnológicos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16. (SBSR)., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013. p. 5904-5910. DVD, Internet. ISBN 978-85-17-00066-9 (Internet), 978-85-17-00065-2 (DVD). Disponível em: <<http://urlib.net/3ERPFQRTRW34M/3E7GCPJ>>. Acesso em: 05 ago. 2015.

CURRAN, P. J. & NOVO, E. M. M. The relationship between suspended sediment concentration and remotely sensed spectral radiance: a review. In: **Journal of Coastal Research**. vol.4,nº3, 1988.p. 351 – 368.

DALL'OLMO, G.; GITELSON, A.; RUNDQUIST, D. C. Towards a unified approach for remote estimation of chlorophyll-a in both terrestrial vegetation and turbid productive waters. In: **Geophysical Research Letters** v.30n.18, 2003.

DALL'OLMO, G.; GITELSON, A. Effect of bio-optical parameter variability on the remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters: experimental results. **Applied Optics**, v. 44, nº 20, 2005. p. 412-422,

DEKKER, A.G., e S.W.M. PETERS,. The use of the Thematic Mapper for the analysis of eutrophic lakes: A case study in the Netherlands. **International Journal of Remote Sensing**, vol.14, nº5,1993. P.799–820.

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

DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE ÁGUA E ESGOTO. Laudo n. 14/2009. **A melhoria da qualidade da água do Arroio Dilúvio** (sub-bacia D-11, Porto Alegre/RS e sua relação com as ligações de esgoto no sistema separador absoluto do DMAE. Porto Alegre: DMAE, 2009.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUÍS ROESSLER - FEPAM, ARACRUZ Celulose S/A,Guaíba, RS. Licença de Operação LI 687/2008

GIANASI, A.DE O.; LAINETTI, B. PEREIRA FILHO, W.; COPERTINO, M. da S..Caracterização Espectral da Água e da Vegetação Aquática Submersa no Estuário da Lagoa dos Patos (RS, Brasil) In: **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto** - SBSR, INPE, Curitiba, PR, Brasil, 2011a, p.7051.

GIANASI, B. L.; *et al.*, "Utilização de LANDSAT-TM no estudo de uma floração de macroalgas de deriva no Estuário da Lagoa dos Patos (RS, Brasil)." (2011-b). Disponível em: <<http://repositorio.furg.br/handle/1/2130>> Acessado em maio de 2015.

GITELSON, A. A., Y. Z. YACOBI, D. C. RUNDQUIST, J. F. SCHALLES, R. STARK, L. HAN, AND D. ETZION, Remote estimation of chlorophyll concentration in productive waters: Principals algorithm development and validation. **Conference Proceedings, NWQMC National Monitoring Conference**, 2000. p.149-160. Disponível em: <[http://acwi.gov/monitoring/nwqmc.org/2000proceeding/papers/pap\\_gitelson.pdf](http://acwi.gov/monitoring/nwqmc.org/2000proceeding/papers/pap_gitelson.pdf)> acessado em 27.mai.2015.

GITELSON, A.A.; KONDRATYEV, K.YA. Optical models of mesotrophic and eutrophic water bodies. *Int. J. Remote Sens*, vol.12,1991.p.373–385.

GONS, H. J.; RIJKEBOER.; M.; RUDDICK, K. G. A chlorophyll-retrieval algorithm for satellite imagery (Medium Resolution Imaging Spectrometer) of inland and coastal waters **J. Plankton Res.**v.24,n.9, 2002.p.947-951.

GRIMM, A.M. CAVALCANTI, I.F.A *et al.*, Clima da Região Sul do Brasil In: **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.p.259-275.

GUERRA, T.; HASENACK, H.; PEDROZO, C.; ZANCAN FILHO, L. C.; MACHADO, N. <sup>a</sup> F.; ROTH B.; ILGENFRITZ, D. S.; SANTOS, D.; GONÇALVES, D.; PORCIÚNCULA, J.; MOREIRA, L. F.; FAZIO, L.; BORGES, M.; MATOS, M. C.; GIL, R.; TEIXEIRA, R. Diagnóstico Ambiental da bacia hidrográfica do Arroio Passo Fundo, município de Guaíba, RS. **Relatório Técnico**, Porto Alegre, 2002, p.111.

HAN, LUOHENG. Spectral reflectance with varying suspended sediment concentrations in clear and algae-laden waters. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. Vol.63,nº6, 1997, p. 701-705. Disponível em: <[http://info.asprs.org/publications/pers/97journal/june/1997\\_jun\\_701-705.pdf](http://info.asprs.org/publications/pers/97journal/june/1997_jun_701-705.pdf) > acessado em 27.mai.2015.

IOCCG (INTERNATIONAL OCEAN COLOUR COORDINATING GROUP). **Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optically-Complex, Waters**. Sathyendranath, S. (ed.), Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, n. 3, Dartmouth, Canada, 2000.

JENSEN, J.R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos, SP: Parênteses, 2009. p. 411-444.

JI, W.; CIVICO, D.L. E KENNARD, W.C. Satellite remote bathymetry: a new mechanism for modelling. **Photogrammetry Engineering and Remote Sensing**, vol. 58, 1992, p.545-549.

KAMPBEL, M. e NOVO, E.M.L.M. O Sensoriamento Remoto da Cor da Água. In: SOUZA, R.B. (org.). **Oceanografia por Satélites**. 2º ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. p. 199-218.

KIRK, J. T. O. **Light & photosynthesis in aquatic ecosystems**. 2 ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. 509 p.

Li, J., Temperature and water vapor weighting functions from radiative transfer equation with surface emissivity and solar reflectivity. **Adv. Atmos. Sci.** Vol.11. 1994. p.421–426.

LILLESAND, T. M., E KIEFER, R. W. **Remote sensing and image interpretation** (6th ed.). New York: Wiley, 2007.

LOBO, EA., CALLEGARO, VL. e BENDER, P., **Utilização de algas diatomáceas epilíticas como indicadores da qualidade da água em rios e arroios da Região Hidrográfica do Guaíba, RS, Brasil**. Santa Cruz do Sul: EDUNISC. p.127, 2002.

LORENZEN, M.W. Use of chlorophyll-secchi disk relationships. **Limnology and Oceanography**. Vol.25.nº2,1980.p.371-372.

MANTOVANI, J.E.; **Comportamento espectral da água: faixas espectrais de maior sensibilidade ao fitoplâncton na presença de matéria orgânica dissolvida e de matéria inorgânica particulada**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1993. 119p. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1912/2005/07.20.02.09.34> > Acesso em: 15. jan.2015.

MATOS, M.C.; GIL,R.B. ; TEIXEIRA, R. P.; PEDROZO, C.da S. ; HASENACK, H;; MACHADO, N.A. F.; GUERRA,T.Diagnóstico Ambiental da Bacia Hidrográfica do arroio Passo Fundo, Município de Guaíba, RS. In: **Congresso Brasileiro de Limnologia 2003**, Florianópolis, 2003

McCOY, R. M. Water Bodies and Snow Cover. In: **Field Methods in Remote Sensing**. New York: The Guilford Press, 2005. p. 101-129.

MERTES, LEAL AK, MILTON O. SMITH, AND JOHN B. ADAMS. Estimating suspended sediment concentrations in surface waters of the Amazon River wetlands from Landsat images. **Remote Sensing of Environment** vol.43.nº3, 1993.p.281-301. Disponível em: <[http://boto.ocean.washington.edu/lc/RIVERS/60\\_mertes\\_lak\\_43-281-301.pdf](http://boto.ocean.washington.edu/lc/RIVERS/60_mertes_lak_43-281-301.pdf) > acessado em 30.mai.2015

MITTENZWEY, K. H.;ULLRICH, S.; GITELSON, A.A. Determination of chlorophyll-a of inland waters on the basis of spectral reflectance. **Limnology and oceanography**.v.37,1992;p.47-149.

MOBLEY, C. D. **Light and Water: radiative transfer in natural waters**. San Diego: Academic Press, 1994.

NETO, J. S. A. **Descarga Sólida em Suspensão do Sistema Guaíba, RS e Sua Variabilidade Temporal** - Dissertação de Mestrado para Título de Mestre em Geociências Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2011.

NICOLODI, J.L..**O Padrão de Ondas no Lago Guaíba e sua Influência nos Processos de Sedimentação**. Tese Doutorado em Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2007.p.178.

NICOLODI, J.L.; ELIRIO E.; TOLDO JR. e FARINA, L..**Dinâmica de ressuspensão por ondas no Lago Guaíba (RS, Brasil) e implicações nos locais de captação de água para**

**abastecimento humano.** Pesquisas em Geociências, 37 (1): 25-39, jan./abr . 2010. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/igeo/pesquisas/3701/03-3701.pdf>> Acessado em maio de 2015.

NICOLODI, J.L.; ELIRIO E.; TOLDO JR. e FARINA, L.; Dynamic And Resuspension By Waves And Sedimentation Pattern Definition In Low Energy Environments. Guaíba Lake In: **Brazilian Journal Of Oceanography**, Vol. 61, 2013.p.55-64. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/bjoce/v61n1/a06v61n1.pdf>> Acessado em maio de 2015.

NOVO, E. M. L. de M. Comportamento Espectral da Água. In: MENESES, P. R., MADEIRA NETTO, J. da S. (Orgs.). **Sensoriamento remoto**: reflectância de alvos naturais. Brasília: Universidade de Brasília, 2001, p. 203-221.

NOERNBERG, M.A.; CALTABIANO A.C.V.; FERREIRA, E.M.V.; GONÇALVES JÚNIOR, J.D.C.; DORIA, C.R.C. Relação entre profundidade Secchi e fator de reflectância da água de ambientes aquáticos lênticos em Cachoeira Paulista, SP. **Anais do VIII Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, INPE Salvador, Brasil, 14-19 abril, 1996.p.933-939

NOVO, E.M.L.M., J.D. HANSOM, AND P.J. CURRAN., The effect of sediment type on the relationship between reflectance and suspended sediment concentration, In: **International Journal of Remote Sensing**, Vol.10, 1989.p. 1283-1289.

NOVO, E. M. L. M.; STECH, J. L. ; ALCÂNTARA, E. H.; LONDE, L. R.; ASSIREU, A.; BARBOSA, C. C.; and SOUZA, A. F. **Integração de Dados do Sistema de Monitoramento Automático de Variáveis Ambientais (SIMA) e de Imagens Orbitais na Avaliação do Estado Trófico do Reservatório da UHE Funil.** Geografia (Rio Claro. Impresso), vol.35, 2010. p.641-660.

NOVO, E. M. L. M. Aplicação de um índice de estado trófico (IETR TM4TM3) para monitorar a degradação da água do reservatório da UHE Ibitinga. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto** - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE, 2013. p.6556 – 6563.

OLIVEIRA, D. V., CARVALHO, T. S.; ZANIN, J. ; GARBINATO, G. N. ; MEDEIROS, A. W. ; FRAZZON, A. P. G. ; VAN DER SAND, S. . Qualidade da água e identificação de bactérias gram-negativas isoladas do Arroio Dilúvio, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.. **Evidência** (UNOESC), v.12, 2012.p. 51-62.

PAZ, A. R. ; REIS, L. G. M. ; LIMA, H. V. C. Uso de modelagem hidrodinâmica visando a segmentação de corpos d'água rasos para Enquadramento: o caso do Lago Guaíba (RS). In: **XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, João Pessoa. 2005. Disponível em: <[http://www.ct.ufpb.br/~adrianorpaz/artigos/Paz\\_et\\_al\\_SBRH\\_2005a.pdf](http://www.ct.ufpb.br/~adrianorpaz/artigos/Paz_et_al_SBRH_2005a.pdf)>

PEREIRA, M. D. B. **Parâmetros limnológicos passíveis de serem monitorados através de dados espectrais obtidos por sensores remotos orbitais.** Tese de doutorado. Universidade Federal de São Carlos. São Paulo. 1992.

PEREIRA, A. C. F.; GALO, M. L. B. T.; VELINI, E. D. Inferência da transparência da água - reservatório de Itupararanga/SP, a partir de imagens multiespectrais IKONOS e espectrorradiometria de campo. **Revista Brasileira de Cartografia**, nº63/01, 2011. p.179-190.

PREISENDORFER, R.W. Secchi disk science: Visual optics of natural waters. In: **Limnology and Oceanograph**. Washington, v. 31, nº 5, 1986.p.909-926.

\_\_\_\_\_. Hydrologic optics. Vol.1.Introduction. National Technical Information Service, Springfield, Ill. 1976.

PROFIL (2008). **Primeira etapa do Plano de Bacia do rio Caí**: consolidação do conhecimento sobre recursos hídricos e Enquadramentos recursos hídricos superficiais.SEMA/DRH/FEPAM,Porto Alegre.

REBOUÇAS, BRAGA & TUNDISI. **Águas Doces no Brasil**: Capital Ecológico, Uso e Conservação. 3ª ed. São Paulo, Escrituras, 2006.

RIBEIRO, D.C., **Desleixo público no Rio Guaíba**, 2012. Disponível em <<http://www.popa.com.br/2012/CRONICAS/DMAE-PISA/index.htm>> Acessado em maio de 2015.

Ribeiro, C e Laigneau, P. **Enquadramento: processo participativo em bacias hidrográficas. O caso do comitê caí no rio grande do sul**. in Anais do XIX Simpósio

Brasileiro de Recursos Hídricos, Maceió, AL, nov. 2011 Disponível em:

<[https://www.abrh.org.br/sqcv3/UserFiles/Sumarios/8c58d53ac3ab21690992395d17bd22e9\\_05ab8261774efc995bc608b5394ad743.pdf](https://www.abrh.org.br/sqcv3/UserFiles/Sumarios/8c58d53ac3ab21690992395d17bd22e9_05ab8261774efc995bc608b5394ad743.pdf)> Consultado em 20 de setembro de 2015

RIGON, L.T. **O fluxo de carga sólida em suspensão do Rio Guaíba**, Porto Alegre. Monografia de Conclusão de Curso, Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.p.76.

RITCHIE, J.C., J.R. MCHENRY, F.R. SCHIEBE AND R.B. WILSON, The relationship of reflected solar radiation and the concentration of sediment in the surface water of reservoirs.**Remote Sensing of Earth Resources**, Vol. III (F. Shahrokhi, editor), The University of Tennessee Space Institute, Tullahoma, Tennessee, 1974, p.57–72.

RITCHIE, J.C., F.R. SCHIEBE, J.R. MCHENRY, R.B. WILSON, AND J. MAY, Sun angle, reflected solar radiation and suspended sediments in north Mississippi reservoirs. **Remote Sensing of Earth Resources** Vol. IV (F. Shahrokhi, editor), University of Tennessee Space Institute, Tullahoma, Tennessee, 1975. p. 555–564.

RITCHIE, J.C., F.R. SCHIEBE, AND J.R. MCHENRY, 1976. Remote sensing of suspended sediment in surface water. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, V.42,1976. p.1539–1545.

RITCHIE, J.C.; ZIMBA, P.V. ;EVERLTT, J.H. Remote Sensing Techniques to Assess Water Quality. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing** vol 69, nº6, jun-2003. p. 695-704. Disponível em:

<[http://www.asprs.org/a/publications/pers/2003journal/june/2003\\_jun\\_695-704.pdf](http://www.asprs.org/a/publications/pers/2003journal/june/2003_jun_695-704.pdf)> Acessado em 23.Jan.2015.

ROSSATO, M.S. - **Os climas do Rio Grande do Sul**: variabilidade, tendências e tipologia. UFRGS, 2011.

RUNDQUIST, D. C. *et al.*, Remote measurement of algal chlorophyll in surface waters: the case for the first derivative of reflectance near 690 nm. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**.v.62,nº2,1996.p.195-200,

SCHIEBE F.R., HARRINGTON J.A. & RITCHIE C.B.. Remote sensing of suspended sediments: the Lake Chicot, Arkansas project.Int. **J. Remote Sens.** vol.13,1992.p.1487–1509.

SEMA (Secretaria do Estadual do Meio Ambiente) Mapa do Rio Grande do Sul. Disponível em: <[http://www.sema.rs.gov.br/upload/Mapa\\_RS\\_Hidro\\_RH\\_Guaiba\\_final.jpg](http://www.sema.rs.gov.br/upload/Mapa_RS_Hidro_RH_Guaiba_final.jpg)>. Acessado em: 06.nov.2013.

SEPLAG - SECRETARIA DA COORDENAÇÃO E PLANEJAMENTO. **Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: SCP, 2013. Disponível em: <<http://www.atlassocioeconomico.rs.gov.br/>> Acessado em 30.jan.2015.

SRIWONGSITANON, N.; SURAKIT, K.; THIANPOPIRUG, S. Influence of atmospheric correction and number of sampling points on the accuracy of water clarity assessment using remote sensing application. **Journal of Hidrology**. v.401, 2011. p.203-220.

SWAIN, P. H. e DAVIS, S. M. **Remote Sensing**: The Quantitative Approach. New York, NY: McGraw-Hill,1978. p.396.

TOLDO JR, E.E.; ALMEIDA, L.E.S.B. **Rio Guaíba**. Centro de estudos de Geologia Costeira e Oceânica. Disponível em: <[http://proweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/dmae/usu\\_doc/rioguaiba\\_eliriotoldojr.pdf](http://proweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/dmae/usu_doc/rioguaiba_eliriotoldojr.pdf)> acessado em 30.jan.2015

TORRES, R.J. **Uma Análise Preliminar dos Processos de Drenagem do Porto de Rio Grande**, RS. Dissertação de mestrado em Engenharia Oceânica, FURG Rio Grande, RS. 2000.

USGS (U.S. Geological Survey), Imagens Landsat 8. Disponível em <<http://landsat.usgs.gov/landsat8.php>>. Acessado em: 18 nov. 2013.

\_\_\_\_\_.Especificações das bandas e dos sensores. Disponível e <[http://landsat.usgs.gov/band\\_designations\\_landsat\\_satellites.php](http://landsat.usgs.gov/band_designations_landsat_satellites.php)>. Acessado em: 18.nov.2013b



VAZ, A.C. MÜLER, O.O. JR. & ALMEIDA, T. L. Análise quantitativa da descarga dos rios afluentes da Lagoa dos Patos. **Revista Atlântida** Vol.2.nº8, 2006.p.13-23.

VERDUM, R. Releitura do “Sítio Urbano de Porto Alegre. In: **Modenesi-Gauttiere, M.C. et al.**, In: **A Obra de Aziz Nacib Ab'Sáber**.1ªed.São Paulo: Beca-BALL. 2010.p.307-313.

WITTE, W.G. WHITLOCK, C.H., USRY, J.W., MORRIS, W. D., E GURGANIS, E. Laboratory measurements of physical, chemical and optical characteristics of Lake Chicot sediment waters, **NASA Technical Paper** 1941. Langley Research Center, Hampton, VA. 1981.

WOLLMANN, C. A.; ROBAINA, L. E. S. E TRENTIN, R.. Gênese e Tipologias climáticas das enchentes no Rio Grande do Sul in: **Desastres Naturais do Rio Grande do Sul**. Santa Maria: editora UFSM, 2013.p.149-179.

YACOBI, Y. Z. ; MOSES, W. J.; KAGANOVSKY, S. SULIMANI, B.; LEAVITT, B.C.GITELSON, A. A. NIR-red reflectance based algorithms for chlorophyll-a estimation in mesotrophic inland and coastal waters: Lake Kinneret case study, **Water Research**, v.45,nº7, 2011. p.2428-2436.