

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**

**ÍNDICES ESPECTRAIS E PADRÕES NOS LAGOS COSTEIROS,  
LITORAL NORTE - RS**

**BRUNO PONZONI GELAIN**

**PORTO ALEGRE, MARÇO 2022**

BRUNO PONZONI GELAIN

**ÍNDICES ESPECTRAIS E PADRÕES NOS LAGOS COSTEIROS,  
LITORAL NORTE - RS**

Dissertação de Mestrado apresentada no Programa de Pós-Graduação em Geografia, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Laurindo Antonio Guasselli

BANCA EXAMINADORA

---

ROSANE MARIA LANZER

---

ULISSES FRANZ BREMER

---

JOÃO PAULO DELAPASSE SIMIONI

PORTO ALEGRE, MARÇO 2022

### CIP - Catalogação na Publicação

Gelain, Bruno Ponzoni  
ÍNDICES ESPECTRAIS E PADRÕES NOS LAGOS COSTEIROS,  
LITORAL NORTE - RS / Bruno Ponzoni Gelain. -- 2022.  
105 f.  
Orientador: Laurindo Antônio Guasselli.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa  
de Pós-Graduação em Geografia, Porto Alegre, BR-RS,  
2022.

1. Geografia. 2. Sensoriamento Remoto. 3. Lagos  
Costeiros. 4. Índices Espectrais. 5. Limnologia. I.  
Guasselli, Laurindo Antônio, orient. II. Título.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus familiares

Aos meus amigos

Aos meus professores.

**SUMÁRIO**

<b>RESUMO.....</b>	<b>5</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>6</b>
<b>LISTA DE ABREVIACOES.....</b>	<b>7</b>
<b>LISTA DE FIGURAS E GRÁFICOS.....</b>	<b>8</b>
<b>LISTA DE TABELAS E QUADROS.....</b>	<b>11</b>
<b>LISTA DE GRÁFICOS.....</b>	<b>12</b>
<b>1.INTRODUO.....</b>	<b>15</b>
1.1.OBJETIVOS.....	18
1.2.JUSTIFICATIVA.....	18
1.3.ÁREA DE ESTUDO.....	18
<b>2.REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>22</b>
2.1.LIMNOLOGIA EM LAGOS COSTEIROS.....	22
2.2. LIMNOLOGIA EM LAGOS COSTEIROS DA ÁREA DE ESTUDO.....	28
2.3.SENSORIAMENTO REMOTO.....	31
2.3.1.ÍNDICES ESPECTRAIS.....	35
2.4. SENSORIAMENTO REMOTO EM LAGOS COSTEIROS.....	37
<b>3.METODOLOGIA.....</b>	<b>41</b>
3.1. DADOS DE CAMPO.....	41
3.2. LAGOS, DATAS E PONTOS DE COLETA.....	42
3.3. IMAGENS E CORREOES.....	45
3.4. MORFOMETRIA.....	46
3.5 VARIAO DA COR APARENTE DOS LAGOS.....	46
3.6.CORRELAO ENTRE PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS E DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO.....	47
3.7 PROCESSAMENTOS E ÍNDICES.....	47
<b>4.RESULTADOS.....</b>	<b>48</b>
4.1. DESENVOLVIMENTO DE PERÍMETRO NOS LAGOS COSTEIROS.....	48
4.2. COMPARAO DA COR DA ÁGUA DOS LAGOS COSTEIROS.....	50
4.3. CORRELAO ENTRE ÍNDICES ESPECTRAIS X LIMNOLOGIA.....	58
4.4 SENSORIAMENTO REMOTO E ÍNDICES ESPECTRAIS.....	65
<b>5. DISCUSSÃO.....</b>	<b>84</b>
5.1. CÁLCULO DO DO ÍNDICE DE DESENVOLVIMENTO PERÍMETRO.....	84
5.2. COR E VARIAO SAZONAL.....	85
5.3. CORRELAO ENTRE DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO E PARÂMETROS LIMNOLÓGICOS.....	88
5.4. SENSORIAMENTO REMOTO E ÍNDICES ESPECTRAIS.....	90
<b>6. CONCLUSOES.....</b>	<b>92</b>
<b>7. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>93</b>

## RESUMO

Lagos costeiros estão presentes ao longo de todo o litoral brasileiro, fazendo parte da vida e cotidiano da população, em atividades econômicas e de lazer. Lagos costeiros tem como característica principal serem extremamente dinâmicos, exibindo mudanças em suas características físico-químicas e índices de trofia, podendo ocorrer mudanças em intervalos de horas ou poucos dias. O presente trabalho tem como objetivo analisar os lagos costeiros de Itapeva, Quadros, Palmital, Tramandaí, Fortaleza, Bacopari, Rincão das Éguas e Figueira, presentes no litoral norte do Rio Grande do Sul, na Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí. Identificando suas variações espaço-temporais, mudanças e comportamentos individuais. Para atingir os objetivos foram analisados o Desenvolvimento de Perímetro (F); análise da cor aparente dos lagos; correlação entre dados limnológicos e sensoriamento remoto; e análise de índices espectrais (NDVI, NDTI, NDPI e NDWI). A análise da cor aparente apresenta variação espacial – cores mais escuras para os lagos da porção norte e mais clara para a porção sul, não detectando diferenças sazonais na cor superficial entre inverno e verão. O resultado do desenvolvimento de perímetro mostra que dos 8 lagos, apenas 3 apresentam valores de F acima de 2, o que remonta a formato irregular do lago. Os outros lagos apresentaram valores próximos a 1, dando a eles características mais regulares e circulares. As correlações positivas (< 0.3) entre índice espectral e dados limnológicos foram observadas para diferentes variáveis. O mapeamento do comportamento espectral dos lagos a partir de índices espectrais identificou zonas nos lagos mais propensas a acúmulo de vegetação (NDVI) e sedimentos (NDTI). O trabalho apresenta resultados positivos no uso de índices espectrais para o mapeamento e sensoriamento remoto de lagos costeiros. As correlações positivas reforçam o valor de uso de sensoriamento remoto para análises de mudanças limnológicas em lagos costeiros.

Palavras-Chave: Sensoriamento Remoto, lagos, Limnologia, Índices espectrais, Morfometria.

## ABSTRACT

Coastal lakes are present along the entire Brazilian coast, being part of the population's daily life, in economic and leisure activities. Coastal lakes have the main characteristic of being extremely dynamic, exhibiting changes in their physicochemical characteristics and trophic indices, and changes may occur at intervals of hours or a few days. The present work aims to analyze the coastal lakes of Itapeva, Quadros, Palmital, Tramandaí, Fortaleza, Bacopari, Rincão das Éguas and Figueira, present on the northern coast of Rio Grande do Sul, in the Tramandaí River Basin. Identifying their spatio-temporal variations, changes and individual behaviors. To achieve the objectives, the Perimeter Development (F); analysis of the apparent color of the lakes; correlation between limnological data and remote sensing; and analysis of spectral indices (NDVI, NDTI, NDPI and NDWI). The apparent color analysis shows spatial variation – darker colors for the lakes in the northern portion and lighter colors for the southern portion, not detecting seasonal differences in surface color between winter and summer. The result of the perimeter development shows that of the 8 lakes, only 3 have F values above 2, which goes back to the irregular shape of the lake. The other lakes presented values close to 1, giving them more regular and circular characteristics. Positive correlations ( $< 0.3$ ) between spectral index and limnological data were observed for different variables. The mapping of the spectral behavior of lakes from spectral indices identified zones in the lakes most prone to accumulation of vegetation (NDVI) and sediments (NDTI). The work presents positive results in the use of spectral indices for mapping and remote sensing of coastal lakes. The positive correlations reinforce the value of using remote sensing to analyze limnological changes in coastal lakes.

Keywords: Remote Sensing, Lagoons, Limnology, spectral indices, morphometry.

## LISTA DE ABREVIações

**BHRT** – Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí

**CONAMA**- Conselho Nacional do Meio Ambiente

**ESA** – European Space Agency

**USGS** – United States Geological Survey

**FEPAM** - Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luís Roessler

**NDPI** – Normalized Difference Poud Index

**NDTI** – Normalized Difference Turbity Index

**NDVI** – Normalized Difference Vegetation Index

**NDWI** – Normalized Difference Water Index

**SDT** – Sólidos Dissolvidos Totais

**SST** – Sólidos Suspensos Totais

## LISTA DE FIGURAS E MAPAS

<b>Figura 1</b>	– Mapa de Localização da área de estudos.....	19
<b>Figura 2</b>	– Reflexão Espectral de Alvos.....	32
<b>Figura 3</b>	– Comportamento Espectral da Água.....	32
<b>Figura 4</b>	– Pontos de Coleta na BHRT.....	35
<b>Figura 5</b>	– Lagos Costeiros. Verão 2019, Litoral Norte – RS.....	51
<b>Figura 6</b>	– Lagos Costeiros. Verão 2019, Litoral Norte – RS.....	52
<b>Figura 7</b>	– Lagos Costeiros. Inverno 2019, Litoral Norte – RS.....	53
<b>Figura 8</b>	– Lagos Costeiros. Inverno 2019, Litoral Norte – RS.....	54
<b>Figura 9</b>	.....	55
<b>Figura 10</b>	.....	55
<b>Figura 11</b>	.....	55
<b>Figura 12</b>	.....	55
<b>Figura 13</b>	.....	55
<b>Figura 14</b>	.....	55
<b>Figura 15</b>	.....	56
<b>Mapa 1</b>	.....	49
<b>Mapa 2</b>	.....	49
<b>Mapa 3</b>	.....	49
<b>Mapa 4</b>	.....	49
<b>Mapa 5</b>	.....	49
<b>Mapa 6</b>	.....	49
<b>Mapa 7</b>	.....	49
<b>Mapa 8</b>	.....	49
<b>Mapa 9</b>	.....	66
<b>Mapa 10</b>	.....	66
<b>Mapa 11</b>	.....	66
<b>Mapa 12</b>	.....	66

<b>Mapa 13:</b> .....	<b>67</b>
<b>Mapa 14:</b> .....	<b>67</b>
<b>Mapa 15:</b> .....	<b>67</b>
<b>Mapa 16:</b> .....	<b>67</b>
<b>Mapa 17:</b> .....	<b>71</b>
<b>Mapa 18:</b> .....	<b>71</b>
<b>Mapa 19:</b> .....	<b>71</b>
<b>Mapa 20:</b> .....	<b>71</b>
<b>Mapa 21:</b> .....	<b>71</b>
<b>Mapa 22:</b> .....	<b>71</b>
<b>Mapa 23:</b> .....	<b>72</b>
<b>Mapa 24:</b> .....	<b>72</b>
<b>Mapa 25:</b> .....	<b>72</b>
<b>Mapa 26:</b> .....	<b>72</b>
<b>Mapa 27:</b> .....	<b>72</b>
<b>Mapa 28:</b> .....	<b>72</b>
<b>Mapa 29:</b> .....	<b>74</b>
<b>Mapa 30:</b> .....	<b>74</b>
<b>Mapa 31:</b> .....	<b>74</b>
<b>Mapa 32:</b> .....	<b>74</b>
<b>Mapa 33:</b> .....	<b>74</b>
<b>Mapa 34:</b> .....	<b>74</b>
<b>Mapa 35:</b> .....	<b>74</b>
<b>Mapa 36:</b> .....	<b>74</b>
<b>Mapa 37:</b> .....	<b>74</b>
<b>Mapa 38:</b> .....	<b>75</b>
<b>Mapa 39:</b> .....	<b>75</b>
<b>Mapa 40:</b> .....	<b>75</b>
<b>Mapa 41:</b> .....	<b>75</b>
<b>Mapa 42:</b> .....	<b>75</b>
<b>Mapa 43:</b> .....	<b>75</b>
<b>Mapa 44:</b> .....	<b>75</b>
<b>Mapa 45:</b> .....	<b>75</b>
<b>Mapa 46:</b> .....	<b>75</b>

<b>Mapa 47:</b> .....	<b>78</b>
<b>Mapa 48:</b> .....	<b>78</b>
<b>Mapa 49:</b> .....	<b>78</b>
<b>Mapa 50:</b> .....	<b>78</b>
<b>Mapa 51:</b> .....	<b>78</b>
<b>Mapa 52:</b> .....	<b>78</b>
<b>Mapa 53:</b> .....	<b>78</b>
<b>Mapa 54:</b> .....	<b>78</b>
<b>Mapa 55:</b> .....	<b>78</b>
<b>Mapa 56:</b> .....	<b>79</b>
<b>Mapa 57:</b> .....	<b>82</b>
<b>Mapa 58:</b> .....	<b>82</b>
<b>Mapa 59:</b> .....	<b>82</b>
<b>Mapa 60:</b> .....	<b>82</b>
<b>Mapa 61:</b> .....	<b>82</b>
<b>Mapa 62:</b> .....	<b>82</b>

**LISTA DE TABELAS E QUADROS**

<b>Tabela 1 – Pontos de Coleta.....</b>	<b>42</b>
<b>Tabela 2 – Coletas realizadas pela FEPAM.....</b>	<b>43</b>
<b>Tabela 3 – Características das imagens Sentinel.....</b>	<b>46</b>
<b>Tabela 4 - Índice de Desenvolvimento de Perímetro (F).....</b>	<b>55</b>
<b>Tabela 5 – .....</b>	<b>57</b>
<b>Tabela 6 - .....</b>	<b>57</b>
<b>Quadro 1.....</b>	<b>42</b>
<b>Quadro 2.....</b>	<b>44</b>
<b>Quadro 3.....</b>	<b>49</b>
<b>Quadro 4.....</b>	<b>55</b>
<b>Quadro 5.....</b>	<b>58</b>
<b>Quadro 6.....</b>	<b>62</b>
<b>Quadro 7.....</b>	<b>66</b>
<b>Quadro 8.....</b>	<b>70</b>
<b>Quadro 9.....</b>	<b>71</b>
<b>Quadro 10.....</b>	<b>73</b>
<b>Quadro 11.....</b>	<b>74</b>
<b>Quadro 12.....</b>	<b>76</b>
<b>Quadro 13.....</b>	<b>78</b>
<b>Quadro 14.....</b>	<b>80</b>
<b>Quadro 15.....</b>	<b>82</b>

**LISTA DE GRÁFICOS**

<b>Gráfico 1.....</b>	<b>58</b>
<b>Gráfico 2.....</b>	<b>58</b>
<b>Gráfico 3.....</b>	<b>58</b>
<b>Gráfico 4.....</b>	<b>59</b>
<b>Gráfico 5.....</b>	<b>59</b>
<b>Gráfico 6.....</b>	<b>59</b>
<b>Gráfico 7.....</b>	<b>59</b>
<b>Gráfico 8.....</b>	<b>59</b>
<b>Gráfico 9.....</b>	<b>59</b>
<b>Gráfico 10.....</b>	<b>59</b>
<b>Gráfico 11.....</b>	<b>59</b>
<b>Gráfico 12.....</b>	<b>59</b>
<b>Gráfico 13.....</b>	<b>59</b>
<b>Gráfico 14.....</b>	<b>59</b>
<b>Gráfico 15.....</b>	<b>59</b>
<b>Gráfico 16.....</b>	<b>60</b>
<b>Gráfico 17.....</b>	<b>60</b>
<b>Gráfico 18.....</b>	<b>60</b>
<b>Gráfico 19.....</b>	<b>60</b>
<b>Gráfico 20.....</b>	<b>60</b>
<b>Gráfico 21.....</b>	<b>60</b>
<b>Gráfico 22.....</b>	<b>60</b>
<b>Gráfico 23.....</b>	<b>60</b>
<b>Gráfico 24.....</b>	<b>60</b>
<b>Gráfico 25.....</b>	<b>62</b>
<b>Gráfico 26.....</b>	<b>62</b>
<b>Gráfico 27.....</b>	<b>62</b>
<b>Gráfico 28.....</b>	<b>62</b>
<b>Gráfico 29.....</b>	<b>62</b>
<b>Gráfico 30.....</b>	<b>62</b>
<b>Gráfico 31.....</b>	<b>62</b>
<b>Gráfico 32.....</b>	<b>62</b>

<b>Gráfico 33.....</b>	<b>62</b>
<b>Gráfico 34.....</b>	<b>62</b>
<b>Gráfico 35.....</b>	<b>62</b>
<b>Gráfico 36.....</b>	<b>62</b>
<b>Gráfico 37.....</b>	<b>63</b>
<b>Gráfico 38.....</b>	<b>63</b>
<b>Gráfico 39.....</b>	<b>63</b>
<b>Gráfico 40.....</b>	<b>63</b>
<b>Gráfico 41.....</b>	<b>63</b>
<b>Gráfico 42.....</b>	<b>63</b>
<b>Gráfico 43.....</b>	<b>63</b>
<b>Gráfico 44.....</b>	<b>63</b>
<b>Gráfico 45.....</b>	<b>70</b>
<b>Gráfico 46.....</b>	<b>70</b>
<b>Gráfico 47.....</b>	<b>70</b>
<b>Gráfico 48.....</b>	<b>70</b>
<b>Gráfico 49.....</b>	<b>70</b>
<b>Gráfico 50.....</b>	<b>70</b>
<b>Gráfico 51.....</b>	<b>71</b>
<b>Gráfico 52.....</b>	<b>71</b>
<b>Gráfico 53.....</b>	<b>73</b>
<b>Gráfico 54.....</b>	<b>73</b>
<b>Gráfico 55.....</b>	<b>73</b>
<b>Gráfico 56.....</b>	<b>73</b>
<b>Gráfico 57.....</b>	<b>73</b>
<b>Gráfico 58.....</b>	<b>73</b>
<b>Gráfico 59.....</b>	<b>73</b>
<b>Gráfico 60.....</b>	<b>73</b>
<b>Gráfico 61.....</b>	<b>76</b>
<b>Gráfico 62.....</b>	<b>76</b>
<b>Gráfico 63.....</b>	<b>76</b>
<b>Gráfico 64.....</b>	<b>76</b>
<b>Gráfico 65.....</b>	<b>76</b>

<b>Gráfico 66.....</b>	<b>76</b>
<b>Gráfico 67.....</b>	<b>77</b>
<b>Gráfico 68.....</b>	<b>77</b>
<b>Gráfico 69.....</b>	<b>80</b>
<b>Gráfico 70.....</b>	<b>80</b>
<b>Gráfico 71.....</b>	<b>80</b>
<b>Gráfico 72.....</b>	<b>80</b>
<b>Gráfico 73.....</b>	<b>80</b>
<b>Gráfico 74.....</b>	<b>80</b>
<b>Gráfico 75.....</b>	<b>81</b>
<b>Gráfico 76.....</b>	<b>81</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Ecosistemas de lagos costeiros ocorrem em diversas regiões do mundo, com variáveis comuns compartilhadas entre si, como baixa profundidade, águas turvas e ambientes de alta energia. O Brasil possui uma extensa área costeira, com lagos e lagoas em toda sua extensão (SCHAFER, 1986).

O Rio Grande do Sul é o estado brasileiro que possui a maior quantidade de lagos costeiros (RELATÓRIO BACIA A, 2005; CASTRO, 2016). Os lagos e lagoas costeiras formaram-se durante os períodos de transgressão e regressão do nível do mar, nos períodos do Pleistoceno e Holoceno. Formando um ambiente de “rosários de lagos” altamente dinâmico que recebe carga de sedimentos dos afluentes com origem no interior do continente e nas variações da linha de costeira (VILLWOCK, 1984). Esses ecossistemas dependem de um balanço energético e de interações naturais para sua manutenção. Alterações nesse balanço podem elevar a níveis de trofia e ao assoreamento precoce (SCHAFER, 1986; LANZER, 2005).

A identificação de padrões comuns em lagos costeiros sempre foi melhor definida individualmente do que conjunto, uma vez que, mesmo quando próximas, são identificadas variações em suas morfologias, padrões de ventos e precipitação (CALIMAN *et al.*, 2010). A dinâmica do regime dos ventos e de ressuspensão de sedimentos são os fatores mais importantes para o entendimento dos lagos costeiros (CARDOSO & MARQUES, 2006).

A velocidade e a direção dos ventos são influenciadas pela geomorfologia da planície costeira, como a proximidade com a encosta da Serra Geral nos municípios do Litoral Norte da planície costeira. Com o afastamento progressivo da Serra Geral, modificam-se essas influências da geomorfologia. Conforme a faixa da planície costeira adquire maior extensão os corredores de vento sofrem alterações em suas intensidades e direções predominantes (ROCKETT, 2017).

O entendimento da morfometria ajuda a entender a espacialização dos parâmetros fisiológicos – parâmetros como turbidez, fitoplâncton dentre outros (SCHAFER 1985, WETZEL, 2001). Hakanson (1981); Cardoso (2010); Souza *et al.* (2017) identificaram que o desenvolvimento do perímetro possui relação com o potencial de eutrofização. Segundo Hakanson (1981) quanto mais irregular o perímetro do lago, mais irregular tende a ser o fundo. De acordo com Wetzel (2001) a morfologia é um dos parâmetros mais importante para o entendimento das variáveis físico-químicas e biológicas presente em um corpo hídrico.

Schafer (1988) analisou a correlação da morfologia e morfometria de lagos na planície

costeira do Rio Grande do Sul, e indicou correlação positiva entre a área e a sua profundidade média. Schaffer *et al.* (2014) aplicaram sensoriamento remoto, SIG e parâmetros morfométricos como área, perímetro, desenvolvimento de perímetro, volume, *fetch* relativo, profundidade máxima, profundidade média, profundidade relativa, profundidade mediana do volume, largura e comprimento, para caracterizar a morfologia de 18 lagoas costeiras no Litoral Norte e Médio do Rio Grande do Sul.

Técnicas de Sensoriamento Remoto permitem analisar o estado pretérito e atual dos lagos, sem a necessidade de monitoramento frequente de campo. Martini *et al.* (2006) analisaram a concentração de clorofila-a e suas implicações à cor da água, a partir de imagens de satélite. Teixeira & Souza Filho (2009) utilizaram processamento digital de imagens ópticas Landsat-4 TM e SPOT-2 HRV, de imagens SAR (*Synthetic Aperture Radar*) do RADARSAT-1, e dados de elevação da SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) no reconhecimento e mapeamento dos ambientes costeiros.

Diferenciar a resposta espectral dos lagos a partir de índices espectrais permite estabelecer relações como, por exemplo, entre períodos com maior turbidez ou maior presença de vegetação. Essas relações aliadas ao entendimento da morfometria e dos parâmetros físico-químicos podem permitir estabelecer padrões e correlações.

A aplicação dos índices *Normalized Difference Water Index (NDWI)*, *Normalized Difference Turbidity Index (NDTI)*, *Normalized Difference Pond Index (NDPI)* e *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)* têm sido utilizadas para entender a variação de padrões espaciais, sua sazonalidade e relação com a morfométrica de lagos costeiros. Lissner & Guasselli (2013) analisaram os padrões de comportamento espaço-temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) no lago Itapeva-RS, por meio de imagens Landsat TM5 e ETM+7, no período entre 1985 e 2010.

O monitoramento frequente dos lagos costeiros é uma necessidade, visto que a demanda hídrica da região para o abastecimento da população em geral e para atividades econômicas - agricultura, pecuária, pesca e turismo - característicos do Litoral Norte dependem da manutenção ecológica desses lagos costeiros (Relatório Bacia, Etapa A, 2005).

Os lagos do Litoral Norte vêm sendo estudados (PADILHA, 2001; HAASE *et al.*, 2002; HERZER, 2013) em relação aos seus impactos ambientais decorrentes de ocupação humana e de processos naturais, como processos de eutrofização e assoreamento. A Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler (FEPAM) e organizações não governamentais como a Ação Nascente Maquiné (ANAMA) monitoram alguns lagos do

Litoral Norte. O monitoramento da FEPAM ocorre desde o ano de 1993, foi interrompido em 2013 e retomado no ano de 2016 com uma nova metodologia.

Em nosso estudo, os lagos costeiros de interesse foram: lago de Itapeva, lagos dos quadros, lago do Palmital (subdividida em lago das Malvas, lago do Palmital e lago da Pinguela), lago de Tramandaí (subdividido em Lago do Armazém elago de Tramandaí) , lago da Fortaleza, lago do Rincão das Éguas, lago de Bacopari e lago da Figueira. Em todos esses lagos têm ao menos um ponto de coleta de água, no monitoramento realizado pela FEPAM, a partir de 2016.

## 1.1 Objetivos

### Objetivo geral

Identificar padrões nos lagos costeiros a partir de diferenças na morfometria, variações na cor aparente e de índices espectrais, entre 2017 e 2020, no Litoral Norte - RS.

### Objetivos específicos

- Calcular o índice de desenvolvimento de Perímetro (F);
- Analisar a variação da cor aparente dos lagos costeiros;
- Correlacionar parâmetros físico-químicos e sensoriamento remoto;
- Analisar séries temporais de variação de índices espectrais (NDVI, NDWI, NDPI, NDTI).

## 1.2. Justificativa

Freqüentemente grande parte dos estudos voltados aos lagos costeiros têm uma abordagem ecológica - análise de parâmetros físicos e químicos, eutrofização e IQA, biodiversidade e afins. Abordagens geográficas mais comuns estão relacionadas a áreas de proteção, análise de impactos, delimitações de área e a sua relação com a população inserida. Entretanto, mesmo com essas abordagens, ainda são poucos os estudos sobre a dinâmica dos lagos da planície costeira do Rio Grande do Sul.

Propostas para definição de padrões espaço temporais de lagos costeiros utilizando sensoriamento remoto ainda são menos exploradas. Assim, analisar padrões em ambientes altamente dinâmicos e complexos, como os lagos costeiros, pode contribuir para entendimento de sua estrutura. Utilizar índices espectrais a partir de imagens de satélite pode auxiliar no monitoramento da qualidade hídrica e ambiental da região da planície costeira.

## 1.3. Área de Estudo

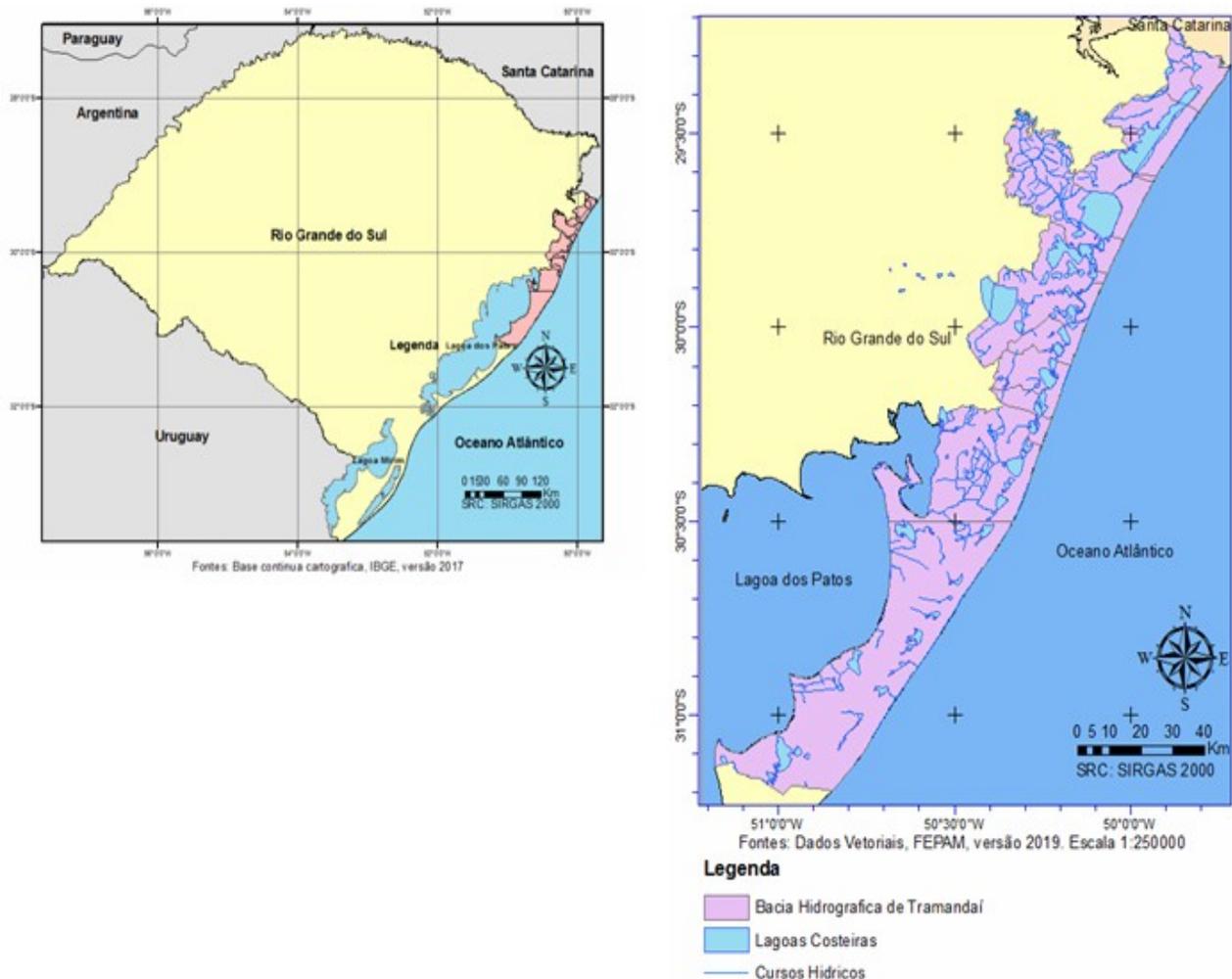
A área de estudo está inserida na região do litoral norte e médio do Rio Grande do Sul. Nessa área estão inseridos cerca de 18 lagos entre as coordenadas geográficas de 29°17' a

30°18' de latitude Sul e 49°44' a 50°24' de longitude Oeste (FEPAM, 2019). A Figura 1 ilustra a localização da área de estudo.

Os principais afluentes que deságuam na planície costeira no Litoral Norte são: o rio Três Forquilhas que deságua no lago de Itapeva; e o rio Maquiné no lago dos Quadros. As águas da bacia hidrográfica de Tramandaí escoam através de um "rosário de lagos" - rios de ligação entre os lagos (lagos ao norte) - como também escoamento de subsuperfície (lagos ao sul), tendo como ponto exutório o lago de Tramandaí, numa saída para o oceano Atlântico (Relatório Temático A1, 2004; CASTRO, 2016).

A planície costeira do Rio Grande do Sul foi formada nos períodos de regressão e transgressão marinha durante o Pleistoceno e o Holoceno, nos últimos 20 mil anos, as formações derivadas dessas regressões foram denominadas de laguna-barreira. No Litoral Norte há registros das formações I, II e III barreira durante o período do Pleistoceno, e da IV barreira durante o Holoceno (VILLWOCK, 1984)

**Figura 1 - Mapa de Localização da área de estudos**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020

Cada lago possui suas peculiaridades devido as pequenas variações geomorfológicas em que estão inseridos (SCHAFER, 1986). Algumas características são compartilhadas entre esses lagos costeiros: baixa profundidade, forte atuação dos ventos e alta turbidez (CARDOSO, 2006; LISSNER, 2011). A profundidade média varia entre 3 e 5 m, e a turbidez alta é decorrente dos sedimentos em suspensão devido à atividade eólica (SCHAFER, 1988; 2014). Em cada lago ocorre diferentes interações com a pluviosidades, com o aporte de sedimentos de descarga e com o uso e ocupação de seu entorno. A relação das comunidades aquáticas que se desenvolvem é influenciada por essas variações, incluindo diferentes níveis tróficos, de turbidez e de morfometria dentre outros parâmetros (SCHAFER, 1986; WETZEL, 2001).

Schafer (1988) classifica os lagos costeiros do litoral do Rio Grande do Sul em: grande superfície e média profundidade; pequena e média superfície com pequena ou média profundidade; pequena a média superfície com média ou grande profundidade; e lagos muito grandes, alargados e com grande profundidade. Os lagos costeiros pequenos possuem menos de 10 km<sup>2</sup> e os grandes acima de 20 km<sup>2</sup>.

Uma das principais características da planície costeira é a ocorrência de ventos constantes, o que influencia diretamente na dinâmica lagunar. A direção predominante dos ventos é nordeste. Direções secundárias sofrem influência da topografia da região de acordo com o afastamento da Serra Geral e do aumento da faixa costeira, sendo as mais frequentes as direções sul e oeste. A intensidade do vento costuma ser maior durante o inverno quando atinge as maiores velocidades registradas (SCHAFER, 1985; TOMAZELLI, 1993; ROCKETT *et al.*, 2017).

Quinze municípios fazem parte da região do Litoral Norte, com uma população aproximada de 200 mil habitantes (IBGE, 2010). Os municípios inseridos na litoral norte e médio: Torres, Dom Pedro de Alcântara, Arroio do Sal, Três Cachoeiras, Capão da Canoa, Terra de Areia, Xangri-Lá, Maquiné, Osório, Imbé, Tramandaí, Cidreira, Balneário Pinhal, Palmares do Sul e Mostardas.

Os lagos costeiros são utilizados pela população para atividades como agricultura, pesca, turismo, etc.... Devido ao incremento da população no período do verão (ZANAZZI & BARTELS, 2016) os impactos antrópicos são intensificados (Relatório Temático A2, 2005). Nas áreas urbanas, que se concentram próximas aos lagos, a falta de saneamento apropriado é um problema abordado no Relatório Temático A.1 (2005), trazendo impactos para a população local e para os recursos hídricos.

Nos relatórios sobre a situação hídrica da região, elaborados pelo Comitê da BHRT no ano de 2003, há três etapas de planejamento para a região da bacia hidrográfica. As duas primeiras etapas chegaram a ser publicadas nos anos de 2004 e 2005, e a terceira ainda não entrou em execução. A primeira e a segunda etapa são referentes as condições atuais da BHRT, impactos ambientais gerados a partir da urbanização e de práticas agrícolas e pecuárias, prognósticos e diagnósticos para o desenvolvimento sustentável da região. A terceira etapa abordaria ações e execuções realizadas para a BHRT (Relatório Temático A.1, 2004; Relatório Temático A.2, 2005; CASTRO, 2016).

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

A base teórica para a elaboração do presente trabalho utiliza estudos e publicações acadêmicas envolvendo os seguintes temas:

### 2.1. Limnologia em lagos costeiros

Lagos costeiros podem ser definidos como corpos d'água estacionários inseridos nas depressões existentes na topografia, sem contato com o oceano, e que possuem zonas fóticas e afóticas (WETZEL, 2001; TUNDISI & MATSUMURA-TUNDISI, 2008). Schafer (1986) caracteriza o ambiente de lagos como altamente dinâmico. O equilíbrio energético entre entrada (*input*) e saída (*output*) deve ter poucas variações ao longo do ano. Um balanço de sedimentos elevado ocasiona *input* maior do que o ambiente seria capaz de absorver e manter, acarretando níveis mais altos de eutrofização, levando ao assoreamento precoce. Um *output* acima do normal levaria a perda de nutrientes tornando-o incapaz de manter a vida biótica, podendo ser considerado um lago morto (SCHAFER, 1986; WETZEL, 2001).

As terminologias existentes para corpos hídricos no litoral são: Lagos, lagunas e lagoas. O corpo hídrico chamado de Lago é caracterizado pela falta de conexão com o mar e características de água doce (TOMAZELLI; VILLWOCK, 1991). Lagunas são, genericamente, corpos aquosos litorâneos de diversas dimensões e que podem ou não ter conexão com o mar. Lagunas são caracterizadas por seu regime estuário e sua conexão com o mar, possuindo características de água doce e salobra. (TOMAZELLI; VILLWOCK, 1991)

Segundo Wetzel (2001) o estudo da limnologia busca caracterizar os constituintes orgânicos e inorgânicos presentes em um corpo d'água, as concentrações de elementos dissolvidos, o regime de ventos e a morfologia.

Constituintes inorgânicos, de maneira geral, dizem respeito ao aporte de sedimentos que escoam até os lagos costeiros. Constituintes orgânicos são caracterizados pela vegetação aquática que se desenvolve no corpo hídrico costeiro, oriundos da vegetação marginal. Os constituintes químicos caracterizam-se pela concentração encontrada em uma parcela de água, como fósforo, nitrogênio, oxigênio entre outros. Fatores físicos são identificados como parte do sistema, mas não dissolvidos diretamente na água, como temperatura, condutividade, ventos e profundidade (WETZEL, 2001; MARCIONILIO *et al.*,

2016).

De acordo com Caliman *et al.* (2010) os lagos costeiros possuem padrões diferentes de acordo com o meio ao qual estão inseridos, mesmo fazendo parte da mesma bacia hidrográfica. Variações na geomorfologia, no regime climático e na intensidade de ventos alteram o comportamento de um lago para a outro. Schafer (1988) também descreve as relações únicas que cada lago costeiro possui de acordo com o contexto em que está relacionado. Segundos dados obtidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) a precipitação média mensal entre os anos de 2016 e 2021, para a estação de monitoramento de Torres, foi de 123 mm. A direção predominante dos ventos no litoral norte e médio do RS é da direção Nordeste, segundo dados do INMET.

Segundo Schafer (1986) lagos costeiros são ambientes altamente energéticos e dinâmicos. Por isso, o entendimento das dinâmicas relacionadas aos teores de materiais orgânicos e inorgânicos e as concentrações das variáveis físico-químicas tornam-se necessários para estabelecer o balanço energético, correspondente à quantidade de energia que é adicionada e perdida pelo sistema. Um balanço positivo corresponde a uma grande entrada de sedimentos e substâncias químicas, que levam um lago costeiro a elevar os níveis de eutrofização, e eventualmente a um assoreamento precoce (SCHAFER, 1986; LANZER, 2005). Um balanço negativo prejudica a comunidade orgânica, podendo levar a níveis baixos da lâmina d'água e ao desaparecimento do corpo hídrico (SCHAFER, 1986; LANZER, 2005). O balanço energético deve estar em equilíbrio para a manutenção do lago costeiro. Segundo Smith *et al.* (1999) e Jeppesen *et al.* (2000) os problemas decorrentes da eutrofização são mundiais, e levam a deterioração dos lagos.

Wetzel (2001) caracteriza os lagos costeiros e rasos como ambientes que possuem nutrientes proporcionalmente maiores que outros corpos hídricos. Isso ocorre devido ao aporte de sedimentos que flui de áreas de entorno, a proporção de volume d'água, a área total e a carga sedimentar. A ciclagem de nutrientes é equiparável a zonas de ressurgência e estuários. Alterações na pluviosidade que possam aumentar o contato de um lago costeiro com água salinas ajudam na ciclagem de nutrientes e na biodiversidade (ESTEVES & PETRY, 2010).

Atividades agropastoris podem influenciar na limnologia dos lagos devido a descarga de pesticidas utilizado em plantações. Pesticidas possuem bases de componentes nitrogenados e fósforos, que influenciam na quebra do equilíbrio natural dos nutrientes de um lago costeiro (ESTEVES, 2011). Segundo Schafer (1986) o aumento dos níveis de fósforo e nitrogênio são os principais componentes na modificação dos níveis tróficos nos lagos

costeiros.

O processo de eutrofização decorrente de influência antrópica é um dos maiores problemas ambientais em relação aos lagos. A eutrofização é um processo natural que ocorre ao longo do tempo, mas que tem sido acelerado devido a atividades humanas (SCHAFER, 1986; WETZEL, 2001; FRUMIN *et al.*, 2017).

A clorofila-a é um pigmento presente nas plantas aquáticas, e é o principal indicador das modificações nos níveis de trofia em um lago. Lagos com altos níveis de trofia tem um aspecto visual da água diferenciado (WETZEL, 2001). A concentração de clorofila-a em um lago se relaciona diretamente com alterações em seu estado trófico, pois indica um aumento na biomassa de algas, fitoplâncton e macrófitas. O aumento das concentrações de clorofila-a está relacionado ao aumento de nutrientes oriundos de atividades e modificações no uso e cobertura da terra das atividades humanas (FRUMIN *et al.*, 2017). Segundo Søndergaard *et al.* (2015) o aumento nas concentrações de fósforo pode ser utilizado como alerta para aumentos da biomassa e de clorofila-a.

De acordo com Søndergaard *et al.* (2015), é necessário um monitoramento adequado para a detecção de alterações nos níveis tróficos de lagos rasos e detecção de aumento nos níveis de clorofila-a. Segundo Frumin *et al.* (2017), o cálculo utilizado para definir a biomassa que aumenta a quantidade de clorofila-a deve ser de lago para lago, devido a peculiaridades regionais e de formação.

A falta de monitoramento, ou poucos pontos de coleta no corpo do lago, podem levar a erros de correlação e incertezas entre os aumentos de produtores primários (nitrogênio e fósforo) e alterações nos níveis tróficos. Uma escala de 4 a 5 anos de dados possui resultados cerca de 50% melhores em suas correlações do que os estudos que usam somente os dados de um ano de estudo. Em lagos com uma maior temporalidade de dados, correlações entre os níveis de clorofila-a e outras variáveis (tamanho, nitrogênio, fósforo, etc...) foram mais significantes e positivas do que em lagos com menor número de dados (SØNDERGAARD *et al.*, 2015).

Para Søndergaard *et al.* (2015), entretanto, é necessária uma análise temporal que considere mais do que só a análise espacial dos lagos. Essa abordagem, decorre devido a que lagos costeiros, principalmente aqueles expostos a regimes de ventos mais intensos, apresentarem modificações em poucas horas, relacionadas ao aumento de ressuspensão e ao arranjo espacial de sedimentos associados a ação eólica. Para variações tróficas, a análise temporal é mais eficiente para detectar aumentos nos níveis de clorofila-a, diminuindo assim incertezas decorrentes de influências humanas em lagos rasos.

García-Rodrigues & Tavera (2002) identificaram que a quantidade de nutrientes dispostos em um lago costeiro varia sazonalmente de acordo com a temperatura, a disponibilidade de luz e a turbidez, o que influencia diretamente na quantidade de clorofila-a. Segundo Cardoso & Marques (2006) o vento é o principal agente que mantém os sólidos em suspensão, aumentando a turbidez da água e promovendo uma separação na comunidade fitoplanctônica através do aumento da competitividade.

Marcionilio *et al.* (2016), correlacionaram lagos tropicais e níveis de eutrofização considerando fatores externos (uso e ocupação do entorno) e internos (área do lago, profundidade e quantidade de nutrientes). Concluíram que lagos costeiros são frágeis e suscetíveis a eutrofização. Além disso, que as mudanças no regime climático e de precipitação alteram as quantidades de nitrogênio e nutrientes disponíveis, e alteram a morfometria do lago, de maneira a favorecer o aumento de clorofila-a. A quantidade de nutrientes (nitrogênio e fósforo) e a área do lago, foram mais importantes para explicar níveis de trofia.

Breunig *et al.* (2015), correlacionaram o crescimento de macrófitas e o aumento de clorofila-a com a precipitação. Concluíram que a ausência de chuvas no período do verão cria condições favoráveis a alterações de níveis de trofia, e que o inverso ocorre nos períodos mais chuvosos.

Para Schaffer (1986); Wetzel (2001); Jansen *et al.* (2014) isso ocorre devido a um maior tempo de subsidência da água no período seco, e alteração da profundidade média que altera a zona fótica de um corpo d'água. Essas alterações favorecem o surgimento e estabilização de comunidades de vegetação aquática, com maior disponibilidade de luz e nutrientes para o crescimento. Em períodos de maior precipitação, a renovação de água e nutrientes ocorre mais rapidamente devido ao escoamento da água para outras localidades e maior dinamização dos processos, que são desfavoráveis para a vegetação que precisa de um tempo de subsidência.

Em alguns lagos ocorre a influência de um “*spray*” marinho, afetando os níveis de salinidade. A quantidade de salinidade derivante do *spray* marinho está relacionada com a proximidade geográfica dos lagos ao oceano (SOFFIATI, 1998).

Haase (2003) analisou os parâmetros físico-químicos dos lagos costeiros monitorados pela FEPAM e relacionou com a resolução do CONAMA 20/1986. Os parâmetros analisados encontravam-se dentro dos limites aceitáveis pela resolução do CONAMA, com algumas exceções devido a características específicas entre lagos costeiros (CALIMAN *et al.*, 2010).

O regime de ventos é o principal responsável pelas interações da turbidez, florações

da vegetação aquática e suspensão de sedimentos (SCHAFER, 1986). Estudos definem a existência de um “*fetch*” de vento em lagos costeiros. *Fetchs* são definidos como: “[...] a distância entre qualquer ponto e a margem em um lago na direção na direção do vento[...]” (*distance between any point in a lake and the shore in the wind direction*) (JANSEN *et al.*, 2008; 2010)

Becker (2002) estabeleceu uma relação indireta entre o vento e a quantidade de clorofila-a e de fitoplâncton, relacionando a suspensão de sedimentos e de nutrientes exercidas pela ação eólica e a criação de um ambiente estável para a floração de macrófitas. Essa relação faz os lagos tornarem-se dinâmicos na criação e subsistência de comunidades aquáticas (SCHAFER, 1986)

Segundo Wetzel (2001); Marcionilio *et al.* (2016) a morfometria de um lago costeiro se relaciona com os parâmetros físico-químicos e aos nutrientes disponíveis, sendo proporcionalmente maiores em lagos rasos do que em lagos de grande profundidade. Schafer (1988) analisou padrões morfométricos de lagos costeiros e caracterizou a relação entre área e profundidade, identificando que os lagos que possuem maiores áreas também apresentam maiores profundidades médias e máximas.

Wetzel (2001) estabeleceu uma correlação inversa entre a profundidade de um lago e sua produtividade e níveis de trofia, uma vez que lagos mais rasos têm uma interface maior na proporção de água e sedimentos, o que leva a um incremento de produtividade. Hakanson (1981) estabeleceu que lagos com fundo irregular tendem a ter uma margem irregular.

Palma-Silva (2007) analisou os impactos de uma abertura artificial na barra de um lago costeiro. Mudanças decorrentes da alteração da morfologia relacionada a abertura incluem: mudança da profundidade média, aumento da salinidade e alteração na dinâmica de nutrientes. Como consequência, há uma redistribuição nas comunidades de macrófitas no corpo lagunar também como uma diferenciação nas espécies. Segundo Marinho (2016) aberturas de lagos artificiais ou naturais influenciam no balanço de nutrientes e na morfometria.

Cardoso (2009) identificou a correlação entre a forma do perímetro com a quantidade de comunidades fitoplanctônicas. Em formatos irregulares se formam ilhas para o desenvolvimento de diferentes comunidades, reduzindo a competitividade entre os organismos e diminuindo a tendência a eutrofização. De acordo com Herzer (2013) a forma do lago influencia os níveis de trofia.

Fatin-Cruz *et al.* (2008) analisaram o aumento da profundidade e da área em lagos de

acordo com a influência da precipitação. Modificações na sua morfometria alteram a profundidade e as comunidades aquáticas. Souza *et al.* (2017) analisaram as modificações antrópicas ao longo do tempo em lagos costeiros. Conforme a forma dos lagos é alterada para formatos mais regulares, impede-se a instalação de comunidades fitoplanctônicas em ilhas isoladas, favorecendo a eutrofização e o assoreamento precoce (CARDOSO, 2009).

Janssen *et al.* (2014) estabeleceram relação entre o tamanho do lago, a heterogeneidade espacial e interconectividade e a existência de diferentes estados de trofia. O tamanho do lago tem relação com os nutrientes disponíveis, criando maior diluição e competitividade entre as espécies para a sua fixação. Heterogeneidade espacial implica que nem todo o corpo lacustre recebe o mesmo aporte de nutrientes sazonais, e de acordo com sua interconectividade (correntes e fluxos d'água dentro do próprio lago) distribuem os suprimentos necessários.

Desta forma, lagos podem criar pontos com níveis de trofia variados de acordo com seu tamanho e morfometria, especialmente nas margens onde pode ocorrer acumulação de nutrientes e proteção contra os ventos de maior intensidade. Wetzel (2001) caracteriza que nessas regiões as margens formam uma proteção natural, que favorece a estabilização de comunidades vegetais devido a pouca interferência externa, tornando-se um ponto de calmaria na água onde pode haver uma maior subsidência e tempo de ciclagem.

A noção de estados de trofia diferentes para um mesmo corpo d'água é importante, pois a eutrofização não acontece do centro para as bordas (SCHAFFER *et al.*, 1993). É comum o aparecimento de zonas nas margens que criam condições favoráveis para a eutrofização (JANSSEN *et al.*, 2014). Apenas a noção do tamanho e área de um lago costeiro é insuficiente para explicar as modificações nos níveis de trofia, sendo necessário mais dados e correlações para explicar a totalidade do fenômeno em diferentes lagos (JANSSEN *et al.*, 2014).

O cálculo do Desenvolvimento do Perímetro (F) desenvolvido por Hakanson (1981) é considerado o melhor índice para o entendimento do desenvolvimento de espécies fitoplanctônicas (CARDOSO, 2009). O Desenvolvimento do perímetro estabelece a correlação com a área da superfície e o perímetro da margem de um lago. Segundo Wetzel (2001) valores próximos de  $F = 1$ , indicam um lago regularmente perfeito, enquanto valores próximos ou superiores a  $F = 3$  demonstram um lago muito irregular.

O Desenvolvimento do perímetro foi utilizado por Fatin-Souza *et al.* (2008); Herzer (2013) para identificar as alterações que ocorrem nos lagos, conforme suas margens sofrem alterações por interferência antrópica. Fatin-Souza *et al.* (2008) identificam que quanto maior

a regularidade de um lago, maior é a sua tendência a eutrofização. Para Herzer (2013) a forma regular auxilia na suspensão de sedimentos e nutrientes pela ação eólica, aumentando a suscetibilidade a eutrofização.

O índice F foi utilizado para categorizar lagos de acordo com sua morfometria por Costa *et al.* (2016), que concluíram que lagos de menor área e extensão têm tendência de valor de F mais baixo, enquanto lagos de maior extensão tem tendência de valores de F mais elevados. Isso se deve porque o fundo regular dos lagos propicia um formato mais regular da margem, encontrado com mais facilidade em lagos de pequena extensão e área de superfície d'água (HAKANSON, 1981; COSTA *et al.*, 2016).

## 2.2. Limnologia dos lagos da Área de estudo

O acompanhamento da qualidade da água e dos padrões limnológicos dos lagos costeiros analisados neste trabalho vem sendo executado pela FEPAM desde o ano de 1993.

Haase *et al.* (2003) elaboraram o Relatório da Bacia Hidrográfica de Tramandaí A e B (2004; 2005); Castro & Mello (2013), o Atlas Ambiental da Bacia Hidrográfica; Castro & Rocha (2016) analisaram a Qualidade das Águas da Bacia Hidrográfica de Tramandaí no relatório da ONG Anama; e FEPAM (2020) elaborou o Relatório da Qualidade das águas superficiais do RS.

Haase *et al.* (2003) analisaram os parâmetros físico-químicos dos lagos costeiros monitorados pela FEPAM e relacionaram com a resolução do CONAMA 20/1986. Os parâmetros analisados encontravam-se dentro dos limites aceitáveis pela resolução do CONAMA, com algumas exceções devido a características específicas entre lagos costeiros (CALIMAN *et al.*, 2010).

O comitê da bacia hidrográfica do rio Tramandaí utilizou dados coletados pela FEPAM, entre 1993 e 2003, para estabelecer as três fases do plano de gestão dos recursos hídricos da bacia. O Relatório Temático A3 de 2005 dispõe sobre o diagnóstico e prognóstico para a gestão hídrica da bacia, de acordo com as dinâmicas sociais e de uso e ocupação do solo. Ressalta a importância do monitoramento frequente dos constituintes físico-químicos, da delimitação de área de proteção nas margens e implementação de saneamento para a redução de despejos orgânicos nos lagos.

Castro (2016) da ONG ANAMA estudou os lagos da BHRT, entre 2014 e 2015, e analisou os parâmetros físico-químicos e a qualidade da água de acordo com a resolução 357/2005 do CONAMA. Ressaltou que em alguns pontos a qualidade da água está se deteriorando devido ao incremento do uso e ocupação da terra. Ramos *et al.* (2012)

analisaram os impactos negativos na qualidade das águas dos lagos de Fortaleza, Rondinha e Cipó, relacionados ao incremento de atividades turísticas no litoral no período do verão.

Padilha (2001) identificou gradiente nas concentrações físico-químicas (Fósforo e Nitrogênio) que impactam a comunidade fitoplânctônica, nos lagos do litoral norte do Rio Grande do Sul. Os lagos ao sul apresentam maiores concentrações que os lagos ao norte devido ao escoamento em direção ao estuário de Tramandaí. Essa diferença de nutrientes se relacionada com a floração das comunidades fitoplanctônicas e a clorofila-a

Em relação aos ventos atuantes no Litoral Norte, Tomazelli (1993) mapeou a frequência dos ventos de acordo com suas intensidades e direções, e verificou que a direção mais comum ocorre nos quadrantes NE-SW. Segundo Rockett (2017) a sazonalidade da velocidade dos ventos e suas interações com a morfologia da região, tem influência da formação Serra Geral nas direções de vento predominantes nos lagos. E identificou o aumento da velocidade média dos ventos nos municípios de Torres, Tramandaí e Cidreira durante o período do inverno.

Cardoso & Marques (2006) atribuem a existência de um “*fetch*” específico para a lagoa de Tramandaí que mantêm constantemente o material sedimentar em suspensão. O “*fetch*” é maior nos períodos de inverno onde os ventos adquirem maiores velocidades e intensidades. Para Schafer (1986; 2014) a turbidez dos lagos costeiros tem relação com o vento constante presente na Planície Costeira, mantendo os sedimentos em ressuspensão.

Becker (2002) ao analisar o regime de ventos no lago de Itapeva, estabeleceu que o *fetch* criado pela dinâmica eólica tem impacto na biomassa fitoplânctônica. Diminuições na velocidade do vento criam ambientes mais estáveis para a floração de biomassa e comunidades fitoplanctônicas, proporcionando uma maior homogeneidade de espécies. As variações causadas pelo vento também possuem relações com a sazonalidade da região, pois períodos do inverno registram as maiores intensidades de vento do que durante o verão. Lopardo (2002) ao também analisar a influência do vento no lago de Itapeva, relaciona a existência do *fetch* sazonal às variações de sedimentos em suspensão e turbidez, e utiliza regressões lineares para identificar a correlação entre as alterações de sedimentos em suspensão e turbidez com o vento, com 49% e 68% de correlação.

Haase *et al.* (2003) analisaram dados dos primeiros 10 anos de monitoramento dos lagos costeiros realizados pela FEPAM. Os parâmetros físico-químicos foram analisados de acordo com CONAMA 20/86. O estuário de Tramandaí apresentou a maior concentração de salinidade e condutividade elétrica, cujos valores relacionados a abertura natural com o oceano, e ao grande aporte de sedimentos que recebe da bacia hidrográfica. Os lagos

Itapeva e Figueira apresentaram os maiores valores médios para as concentrações de fósforo, um dos elementos responsáveis por variações nos níveis de trofia dos lagos costeiros (SCHAFER, 1986; WETZEL, 2001). O lago de Itapeva apresentou os valores mais elevados para concentrações de metais pesados (ferro, cromo e chumbo).

Os relatórios do Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí A e B (2004, 2005) trataram de prognósticos e diagnósticos da disponibilidade e qualidade das águas no Litoral Norte, de acordo com suas demandas. Elucidaram os problemas decorrentes a despejos agroindustriais nos lagos costeiros, e propondo manejos para reduzir os impactos. Estabeleceu-se um plano de redução de efluentes orgânicos nos lagos costeiros para diminuir o número de nutrientes que podem levar a impactos e aumentos de níveis de trofia. Embora nenhum dado esteja acima dos limites proposto em legislação, o entendimento que esse balanço frágil pode ser alterado levou a criação de planos e medidas para evitá-los.

Santos & Firmino (2018) analisaram 3 lagos costeiros no litoral norte (Marcelino Ramos, Peixoto e Pinguela) visando identificar alterações nos padrões limnológicos em um período de 20 anos de análise. O lago de Marcelino Ramos foi utilizado como parâmetro para identificar a influência da conectividade entre os lagos. O lago Marcelino recebeu até 2015 carga de efluentes domésticos, o que prejudica a qualidade da água e altera os padrões tróficos e de nutrientes (em especial o Nitrogênio e Fósforo). Concluíram que as maiores variações limnológicas estão relacionadas as variações entre inverno e verão, que altera a temperatura média da água e modifica os parâmetros físico-químicos.

Castro & Mello (2013) analisaram os lagos do Litoral Norte no período entre 2010 e 2012. Os lagos de Itapeva, Tramandaí, Quadros, Bacopari e Fortaleza apresentaram a média proposta pela resolução 357/2005 do CONAMA para os parâmetros de oxigênio dissolvido, nitrogênio e fósforo total. Quando comparados com outros dados de série histórica, porém, todos os lagos apresentaram valores maiores do que o determinado pela legislação em ao menos um dos parâmetros analisados.

Castro & Rocha (2016) monitoraram as águas do litoral norte e médio entre 2012 e 2016. O lago de Itapeva apresentou elevado número de coliformes fecais no verão, e embora os limites de fósforo e nitrogênio não tenham superado os limites estabelecidos, verificou-se floração de algas durante alguns meses. No lago dos Quadros ocorreu floração de algas em novembro de 2014 em uma de suas margens, com valores de coliformes fecais elevados e elevada demanda de oxigênio. No lago Tramandaí, os valores de salinidade influenciaram as florações de algas de maneira temporal, embora os valores de fósforo e nitrogênio não fossem elevados. O lago Fortaleza, apresentou comprometimento na qualidade da água,

com valores médios superiores aos recomendados pela legislação. No lago Bacopari, alguns meses apresentaram valores de clorofila-a superior ao definido pelo CONAMA, evidenciando que o lago no período analisado não estava sofrendo deterioração.

O relatório da FEPAM de 2020 publicou o monitoramento das águas dos lagos costeiros. Ao avaliar a qualidade das águas e suas respectivas classes de acordo com a 357/2005, enquadrou os lagos em sua maioria na Classe 1, para os parâmetros de oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio, fósforo total, *escherichia coli* e nitrogênio amoniacal. Desses parâmetros, o fósforo total foi o que mais apresentou valores que superavam a legislação, em 25% das amostras. O fósforo é um nutriente que pode alterar o estado trófico de um lago costeiro (SCHAFER, 1986; WETZEL, 2001; SONDERGAARDA *et al.*, 2015).

Embora os estudos tenham se mostrado favoráveis em relação a qualidade das águas dos lagos costeiros, é importante citar o estudo de Søndergaard *et al.* (2015) em que aborda os lagos costeiros e rasos como ambientes extremamente dinâmicos, que podem sofrer alterações diárias e mesmo no intervalo de poucas horas. Argumentam ainda que a necessidade de um monitoramento efetivo demanda acompanhamento temporal e espacial, pois nem todo o lago é afetado da mesma maneira e na mesma intensidade.

### 2.3. Sensoriamento Remoto

A radiação emitida pelo Sol, em diversos comprimentos de onda, interage com a superfície da Terra. As análises de sensoriamento remoto consistem na captação da radiação refletida ou emitida pelos alvos na superfície terrestre por um sensor em órbita. Essa radiação é traduzida posteriormente em informação que pode ser utilizada na análise e identificação de diferentes alvos na superfície terrestre de acordo com os comprimentos de onda (MORAES, 2002).

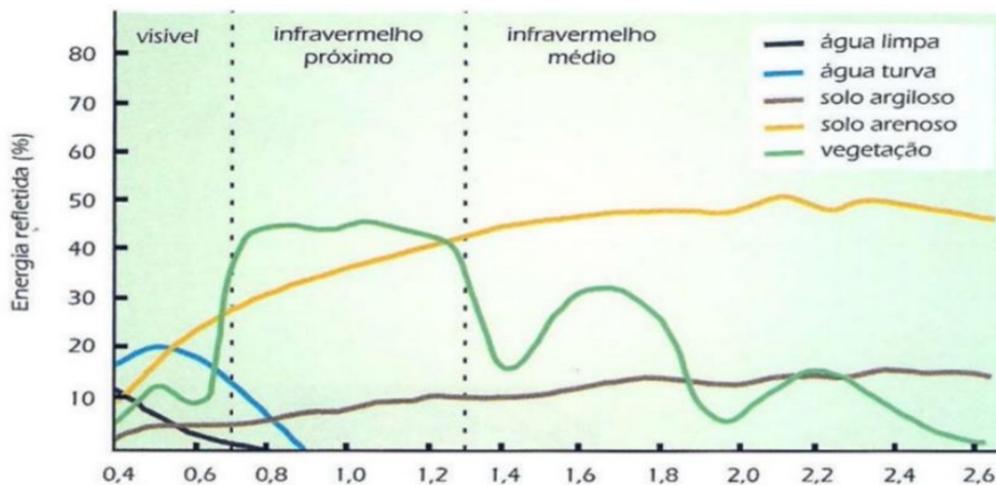
A reflexão do espectro eletromagnético captada pelo sensor é denominada reflexão de Topo de Atmosfera (TOA), sendo diferente da reflexão da superfície terrestre (BOA) (LOUIS *et al.*, 2016; ESA, 2019). A TOA possui influências dos gases presentes na atmosfera, que absorvem, refletem e retroespalham a radiação que é captada pelo sensor, atribuindo valores mais elevados para a reflectância da superfície. Essa interação com as partículas presentes na atmosfera causa desvios nos valores verdadeiros do que se pretende analisar, e necessita de correções para transformar os valores de TOA em BOA (MORAES, 2002; LOUIS *et al.*, 2016; NOVO, 2019).

Diferentes sensores possuem propriedades diferentes em relação as características de suas resoluções. Três tipos de resoluções são importantes para a decisão de qual sensor utilizar para aquisição de imagens: resolução espacial, resolução espectral e resolução temporal. A resolução espacial diz respeito ao quanto um pixel da imagem representa uma área em metros da superfície terrestre. A resolução espectral especifica quais comprimentos de onda do espectro eletromagnético captados pelo sensor. A resolução temporal é o tempo que um satélite-sensor leva para passar sobre a mesma área na superfície terrestre (MORAES, 2002).

Os alvos da superfície terrestre interagem com a radiação de maneira diferente, absorvendo ou refletindo conforme o comprimento de onda e as características dos alvos.

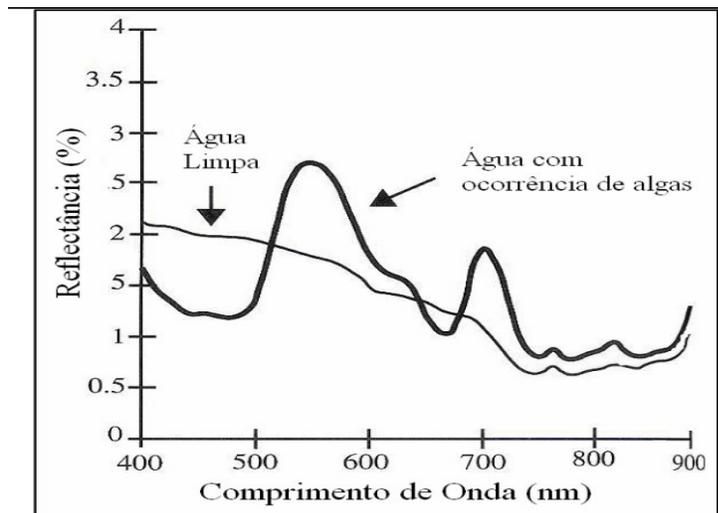
O alvo água tem sua maior quantidade de energia refletida nos comprimentos de onda do visível, com maior pico de reflexão na faixa do Azul. Apresenta forte absorção nos comprimentos de onda do infravermelho. Áreas vegetadas possuem no visível um pico de reflexão no verde e a maior reflexão na faixa do infravermelho próximo. Solos possuem reflexões e absorções variadas dependendo do tipo constituinte do solo (solos argilosos, solos arenosos, etc...), mas tendendo a um incremento na sua reflexão em maiores comprimentos de onda. (MOREIRA, 2012). A Figura 2 ilustra os níveis de reflexão dos alvos da superfície em diferentes comprimentos de onda. A Figura 3 ilustra o comportamento espectral da água.

**Figura 2 - Reflexão Espectral de Alvos**



Fonte: Moreira, 2012

**Figura 3 - Comportamento espectral da água**



Fonte: Jensen, 2007

Devido a água pura possuir um comportamento espectral de alta absorção da radiação eletromagnética, estudos envolvendo recursos hídricos utilizam as propriedades opticamente ativas presentes na água para determinar alterações e identificar alterações. São propriedades opticamente ativas aquelas que alteram as propriedades de reflexão natural da água (MORAES, 2002; MOREIRA, 2012; TONIOLO, 2016; NOVO *et al.*, 2019).

As substâncias presentes nas águas naturais que interagem com radiação solar e, portanto, são responsáveis pelos processos de absorção e de espalhamento da luz são denominadas de componentes ou constituintes opticamente ativos (COAs). Os COAs são: a água pura; a matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM), e o particulado total (fitoplâncton e sedimentos minerais e orgânicos). Cada um desses componentes tem propriedades ópticas específicas de absorção e de espalhamento da radiação solar, ou seja, têm propriedades ópticas que lhes são inerentes (BARBOSA; NOVO; & MARTINS, 2019, pág. 44).

De acordo com Barbosa; Novo; & Martins (2019) a matéria orgânica dissolvida (MOD) presente nos ecossistemas aquáticos é proveniente tanto da decomposição da fauna e flora terrestres, carregada para os corpos d'água (origem alóctone), quanto da atividade biológica existente na coluna d'água (degradação do fitoplâncton, zooplâncton e da excreção da biota aquática) (origem autóctone). Em com base em Kirk (2011), do ponto de vista da ecologia aquática, a significância dessas substâncias está relacionada ao seu impacto considerável no processo de absorção da luz na coluna d'água.

A absorção é frequentemente dominada por CDOM (Colour Dissolved Organic Matter)

(GEGE, 2017), e é de extrema importância para a estrutura e funcionamento dos ecossistemas aquáticos, uma vez que absorve de maneira eficiente nos comprimentos de onda mais curtos da radiação solar, principalmente na faixa espectral compreendida entre 390 e 550 nm (LOBO, 2009; BARBOSA; NOVO; & MARTINS, 2019).

O particulado total é o que tem de maior peso no comportamento óptico da água (MOBLEY, 1994). Ele é composto de microalgas (fitoplâncton) e de partículas inorgânicas e orgânicas não algais em suspensão. É denominado de total de sólidos suspensos (TSS), e para sua caracterização óptica é fracionado em organismos clorofilados microscópicos (Fitoplâncton) e partículas não algais (BARBOSA; NOVO; & MARTINS, 2019).

A presença de Sólidos Inorgânicos em Suspensão é responsável pelo aumento da reflectância na região do visível e do IVPróximo. A porcentagem de energia refletida na região entre 570 e 700 nm aumenta com o aumento da concentração de Sólidos Inorgânicos em Suspensão na água e apresenta também uma elevação pronunciada em 810 nm pelo espalhamento por SIS E sua concentração está relacionada com ocorrência de picos de reflectância em imagens obtidas por sensores orbitais multiespectrais (LOBO, 2009).

Em corpos d'água naturais, como no caso dos lagos, os níveis de pigmentos relacionados a clorofila-a e ao fitoplâncton presentes no corpo d'água e os níveis de sedimentos em suspensão (turbidez) são as variáveis comumente mais estudadas para entender suas dinâmicas temporais e espaciais (RUDORFF, 2006; MOREIRA, 2012; NOVO *et al.*, 2019).

De acordo com Gianasi *et al.* (2011) em águas calmas, rasas e com baixa turbidez a parte da reflexão predominante é da vegetação aquática submersa. Em áreas onde a turbidez é maior, a reflexão está relacionada a quantidade de sedimentos inorgânicos em suspensão na superfície da lâmina d'água.

Segundo Kumar (2014) uma das limitações do sensoriamento remoto é a baixa capacidade de mapear recursos hídricos devido a coberturas vegetais presentes na água, relacionados aos processos de eutrofização. Para Liu *et al.* (2003) concentrações de clorofila-a num corpo d'água causam a diminuição da reflexão espectral nas faixas do azul e o aumento no verde.

De acordo com Kumar (2014) as bandas espectrais nos comprimentos de onda 700 e 800 nm são recomendadas para estudos envolvendo sedimentos em suspensão em corpos d'água. E para Toniolo (2016) o aumento de reflexão espectral da água nos comprimentos de onda entre 700 e 850 nm está diretamente relacionado com as concentrações de sólidos em suspensão.

Para Huang (1986) mesmo que o sensoriamento remoto não consiga estimar os constituintes individuais ao fundo da lâmina d'água, sua utilização para detectar variações espaço-temporais de sedimentos em suspensão é efetiva. Segundo Forster *et al.* (1992) a turbidez no corpo hídrico faz a luz ser espalhada e absorvida em vez de transmitida, sendo linearmente correlacionada com os níveis de sedimentos em suspensão. Segundo Schwarzbald & Schafer (1984) a reflectância dos lagos costeiros é influenciada principalmente pelas suas concentrações de turbidez.

Estudos mostram que a cor perceptível de um lago costeiro pode ser alterada de acordo com variações limnológicas (WETZEL, 2001). Os principais componentes que podem influenciar em alterações na cor da água são: sedimentos inorgânicos em suspensão, matéria orgânica dissolvida e quantidades variáveis de macrófitas e fitoplâncton ( ). A profundidade e a transparência de um lago costeiro podem influenciar na sua cor. A transparência da água influencia na sua capacidade de transmissão da luz (ZHANG *et al.*, 2021), corpos hídricos com baixa profundidade e alta transparência podem refletir a cor do fundo, que varia com a sua composição (CALIMAN, 2010; FRUMIN *et al.*, 2017).

### 2.3.1. Índices Espectrais

Índices espectrais obtidos a partir de imagens de sensoriamento remoto podem ser utilizados para caracterizar, identificar ou mapear diferenças nos alvos na superfície terrestre.

O *Normalized Difference Water Index* (NDWI) (McFEETERS, 1996), o *Normalized Difference Turbidity Index* (NDTI) e o *Normalized Difference Pond Index* (NDPI) (LACAUX *et al.*, 2006), são índices de análise de água. O NDWI caracteriza os pixels que podem ser identificados como água, o NDTI analisa a quantidade de turbidez presente no corpo d'água e o NDPI é mais adequado para identificar áreas úmidas. O *Normalized Difference Vegetations Index* (NDVI) analisa a quantidade de pigmentação verde no pixel, utilizado para caracterizar vegetação.

A utilização dos índices de NDVI e NDTI pode auxiliar a identificar variações em um lago e sua dinâmica utilizando séries temporais, possibilitando a análise da vegetação e da turbidez. A turbidez em lagos costeiros, normalmente de baixa profundidade, está relacionada com a presença constante de vento que cria um mecanismo de ressuspensão dos sedimentos, tornando o ambiente rico em nutrientes para floração de macrófitas aquáticas e fitoplâncton. Em períodos de subsidência relacionados à menor intensidade de ventos, cria-se um ambiente que permite o aumento e estabelecimento de comunidades em

regiões específicas do lago, e que estão relacionados ao aumento dos níveis de eutrofização (HUANG, 1986).

De acordo com McFeeters (1996) o NDWI diferencia os pixels identificados como água dos demais pixels a partir da equação da diferença entre o infravermelho próximo e o infravermelho médio, Eq. 1. Os valores de cada pixel na imagem após a aplicação do índice variam entre -1 e 1, sendo acima de 0 considerados como área onde existe água. El-Asmar *et al.* (2013) atribuíram à água valores de NDWI superiores a 0,3.

$$\text{NDWI} = \text{pIVp} - \text{pIVm} / \text{pIVp} + \text{pIVm} \quad \text{Eq. 1}$$

O Índice de Diferença Normalizada de Turbidez (NDTI) varia entre -1 e 1, e é calculado a partir da equação da diferença entre a banda do visível do vermelho e do verde, Eq. 2. É utilizado para estimar a turbidez presente em um corpo hídrico (LACAUX *et al.*, 2006).

$$\text{NDTI} = \text{Red} - \text{Green} / \text{Red} + \text{Green} \quad \text{Eq. 2}$$

A turbidez em lagos costeiros está relacionada com a constante presença do vento (LOPARDO, 2002; CARDOSO & MARQUES, 2016). Becker (2002) relaciona a presença de ventos constantes em lagos com o aumento ou diminuição de comunidades orgânicas, presentes de acordo com a variação de nutrientes caracterizados pelo nível de turbidez.

Somvamshi (2011) utilizou o índice NDTI para analisar a qualidade das águas e sua relação com a turbidez, e avalia que o NDTI é um indicador capaz de relacionar com a qualidade da água comparando com dados obtidos *in situ*.

Elaborado por Lacaux *et al.* (2006), o índice de Normalized Difference Pound Index (NDPI), calcula a diferença da reflexão do infravermelho médio e o verde, Eq. 3. Estima valores que variam de -1 até 1 para identificar áreas com água. Os valores abaixo de 0 identificam a ausência de água no pixel analisado enquanto valores superiores a 0 evidenciam a presença de lâmina d'água.

$$\text{NDPI} = \text{pIVm} - \text{Green} / \text{pIVm} + \text{Green} \quad \text{Eq. 3}$$

O índice *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) (ROUSE *et al.*, 1974) pode ser utilizado para identificar a vegetação presente em um lago e auxiliar na detecção do nível

de eutrofização (LISSNER, 2011). A clorofila-a possui picos no infravermelho que são diferentes dos outros componentes que podem estar presente na imagem. O índice de NDVI, Eq. 4, permite diferenciar o pixel de vegetação dos demais pixels da imagem. Através da correlação inversa entre a reflectância do infravermelho de ondas curtas e a banda visível do vermelho, atribuindo valores ao pixel que variam de -1 até 1. Valores inferiores a 0 caracterizam uma área onde não possui vegetação, valores superiores a 0 classificam a área do pixel como contendo vegetação.

$$\text{NDVI} = \frac{\text{pIVp} - \text{Red}}{\text{pIVp} + \text{Red}} \quad \text{Eq. 4}$$

Com base no NDVI pode-se estimar a quantidade de clorofila-a e fitoplâncton presente no lago, estabelecer as áreas de maior predominância e a variação ao longo do tempo da vegetação sobre a lâmina d'água.

Lissner (2011) utilizou NDVI para identificar a presença de vegetação no lago Itapeva em uma escala espaço-temporal, utilizando o índice para estimar a biomassa fitoplanctônica. Variações na população de clorofila-a, fitoplâncton e macrófitas em um lago estão associadas a processos de eutrofização (SCHAFER, 1986). Wetzel (2001) aborda a ocupação de macrófitas subaquáticas como fator de alteração do balanço ecológico em um lago, criando uma maior competitividade e, em alguns momentos, impedindo a floração de fitoplâncton pela maior predominância de macrófitas.

#### 2.4. Sensoriamento remoto de lagos costeiros

O sensoriamento remoto de recursos hídricos possui variações de acordo como as formas naturais que a água pode assumir (NOVO *et al.*, 2019). Diferentes técnicas devem ser implementadas para o estudo de rios, deltas ou lagos. Cada recurso hídrico tem sua dinâmica própria, e apresenta variações no tempo de subsidência da água, nas variações do nível de turbidez, e nos tamanhos e profundidades que alteram a resposta obtida pelo sensor (KUMAR *et al.*, 2013).

Klemas (2011) salienta o avanço de estudos envolvendo sensoriamento remoto em áreas úmidas, e a importância de estudos que envolvem recursos hídricos de terem uma validação dos resultados obtidos por sensoriamento através de medidas coletadas em campo.

Para Liu *et al.* (2003) técnicas de sensoriamento remoto podem ser aplicadas para estudos de lagos costeiros em relação as variações de fitoplâncton, sedimentos inorgânicos,

matéria orgânica dissolvida e profundidade do disco de Secchi. Ressaltam que os dados de sensoriamento remoto e amostras de campos podem ter correlação linear e não linear, dependendo do tempo de subsidência da água na lagoa e os tempos entre coletas de amostras.

El-Asmar & Hereher (2011) utilizaram dados de sensoriamento remoto para identificar mudanças na zona costeira. Detectaram o aumento da carga sedimentar devido ao incremento da erosão causada pela ocupação humana e usos agropastoris. Essas atividades aumentaram os níveis de erosão, aumentando a quantidade de sedimentos, promovendo processos de assoreamento e diminuição das áreas úmidas.

El-Asmar *et al.* (2013) utilizaram índices espectrais NDWI e *Modified Normalized Difference Water Index* (MNDWI) para identificar as mudanças em lago costeiro. O estudo se mostrou eficiente para identificar as alterações, como a diminuição das áreas de água, substituídas por ilhas de vegetação conforme processos de assoreamento foram se intensificando.

Hereher *et al.* (2010) analisaram as variações nos níveis de materiais em suspensão, clorofila, fósforo e nitrogênio, temperatura, salinidade e variações na profundidade, para identificar níveis de poluição. O mapeamento das áreas impactadas foi eficiente em detectar áreas que recebem maior descarga de efluentes de origem antrópica.

Donia & Farag (2019) utilizaram técnicas de sensoriamento remoto para monitorar lagos costeiros. Utilizam índices NDVI e NDWI para identificar mudanças, como a perda de área devido a processos de urbanização e assoreamento, e aumento da erosão e aterramentos para expansão de área urbana. Identificaram o aumento de ilhas de vegetação ao longo do tempo a partir do índice de NDVI e a redução da área de água utilizando o índice de NDWI. Donia & Farag (2019) atribuem as mudanças que os lagos vêm sofrendo ao incremento de ocupação da área, e alterações dos padrões de qualidade devido a descarga de efluentes no corpo dos lagos, que aumenta o nível trófico.

Volpe *et al.* (2011) analisaram a variação de partículas em suspensão em lago, utilizando técnicas de sensoriamento remoto para estimar as propriedades opticamente ativas, da quantidade de matéria em suspensão, com base em padrões estatísticos e análises de incertezas. Consideraram 3 variáveis: a influência da reflexão de fundo em lagos rasos, o entendimento da resposta espectral das partículas em suspensão e o entendimento do balanço entre processos biológicos e físicos.

Santini *et al.* (2010) utilizaram sensoriamento remoto e modelos estatísticos lineares e não lineares para analisar a quantidade dos constituintes em um lago com foco no

entendimento dos níveis de turbidez. Para validar o método foram obtidos dados *in situ* para comparar os níveis de turbidez obtidos pelo modelo e os encontrados nas amostras de campo. O modelo se mostrou eficiente em mapear as áreas com maiores concentrações de turbidez.

Li *et al.* (2019) utilizaram índices espectrais (NDVI, NDWI e MNDWI) para estudar um complexo de lagos, e caracterizaram a variação interanual das águas em três grupos: água permanente, água não permanente, e ausência de água. As águas permanentes do complexo de lagos se mantiveram estáveis ao longo dos anos sem grandes variações. As águas não permanentes apresentaram uma variação maior de acordo com as variações na dinâmica antrópica para o uso de irrigação na agricultura. As águas permanentes são derivadas da área natural do lago, enquanto as não permanentes apresentaram variações em diferentes localidades de acordo com a necessidade de uso e variação das dunas pela ação eólica.

Ayeni & Adesalu (2018) utilizaram imagens Landsat 7 e 8 para estimar clorofila-a, e espécies de fitoplâncton, e definiram níveis tróficos de lagos. Concluíram que a principal fonte da produção primária de um lago é o incremento de fitoplâncton. O mapeamento através de sensoriamento remoto foi efetivo para calcular a biomassa fitoplanctônica.

Fritz *et al.* (2018) utilizaram imagens Sentinel-2 para identificar a vegetação aquática submersa num lago e diferenciar sua composição do fundo como contendo vegetação submersa e sem vegetação submersa. Além da diferenciação de área vegetada e não vegetada, o estudo também conseguiu identificar que tipo de vegetação fazia parte de um banhado nas margens.

Quang *et al.* (2017) utilizam imagens Landsat 8 para identificar variação de turbidez. Correlacionaram a produção primária com os níveis de turbidez, que influenciam diretamente na penetração de luz. Os níveis de turbidez estão relacionados a quantidade de vento no período seco, que mantêm os materiais orgânicos e inorgânicos em constante ressuspensão, enquanto no período chuvoso o aumento da turbidez está relacionado com o incremento de materiais no corpo d'água. Os níveis de turbidez no período seco foram maiores nas áreas mais rasas do lago e menores no centro, enquanto no período do inverno o índice de turbidez se mantém estável em todo o lago.

Machado & Baptista (2016) utilizam dados de sensoriamento remoto e imagens Landsat 5, para mapear um lago e identificar variações nos níveis de eutrofização, e demonstraram que áreas com um aumento dos níveis tróficos relacionados com a descarga de esgoto doméstico.

Martini *et al.* (2006) utilizando imagens Landsat 5, para validar parâmetros de qualidade da água no lago. Identificaram variações na clorofila-a e clorofila-b, e analisaram as áreas mais suscetíveis a processos de eutrofização. Os níveis de trofia mostraram-se razoáveis para todo o lago com alguns pontos em estado mesotrófico. O lago foi caracterizado como de baixa produção primária, devido aos baixos valores de fitoplâncton. Entretanto, tiveram dificuldades em diferenciar a resposta espectral da água com fitoplâncton e com reflexão espectral de fundo.

Silva & Hartmann (1990) analisaram lagos de planície, para entender quais parâmetros influenciam as mudanças na cor da água. Identificaram que os parâmetros responsáveis pela cor da água envolvem a granulometria e a concentração dos sedimentos em suspensão. Os sedimentos em suspensão têm origens diferentes de acordo com as declividades e geomorfologia associada ao entorno de cada lago.

Toniolo *et al.* (2018) estudaram componentes opticamente ativos que podem ser identificados através de dados obtidos através do uso de sensoriamento remoto. Utilizando técnicas de primeira e segunda derivadas dos dados de satélite para identificar quais comprimentos são mais representativos estatisticamente dos componentes opticamente ativos. 23% da reflectância em 708 nm são representados pelos sólidos suspensos. A primeira derivada em 722 nm apresenta 44% da variação devido aos sólidos em suspensão, e em 690 nm 32% na variação da concentração de clorofila-a.

Lissner & Guasselli (2013) analisaram séries temporais utilizando o índice de NDVI em lago, explorando a variação espaço-temporal de parâmetros como clorofila-a e sólidos em suspensão. Os valores obtidos em dados de campo e os obtidos através de NDVI foram utilizados para mapear as florações de fitoplâncton, concentrações de sedimentos, níveis de clorofila-a, entre outros. De acordo com as variações de profundidade na lagoa, descarga de sedimentos e aumentos de pluviosidade. Identificando as estações onde há incremento dos parâmetros de qualidade da água, compartimentando a lagoa para o mapeamento a fim de identificar os locais mais propensos a variações espaço-temporais.

### 3. METODOLOGIA

Para atingir os objetivos propostos, as seguintes técnicas e métodos foram aplicadas, utilizando os dados disponíveis de qualidade de água obtidos *in situ*, imagens de satélites do Sensor Sentinel e processamento de imagens em software SIG.

Corpos hídricos presentes no litoral norte e médio do Rio Grande do Sul variam em nomenclaturas – lagos, lagoas, lagoas, estuários, etc.... A terminologia adotada neste trabalho refere-se como Lagos para todos os corpos hídricos lagunares presentes na área de estudo.

Os lagos do Estuário de Tramandaí (Lago de Tramandaí e Lago do Armazém) são referidos apenas como “Lago de Tramandaí”. Os lagos de Malvas, Palmital e Pinguela são referidos como “Lago de Palmital”. O lago dos Barros Sul é referenciado como “Lago do Bacopari”, nome adotado pela população local.

#### 3.1 DADOS DE CAMPO

O monitoramento dos componentes físico-químicos dos lagos do Litoral Norte do Rio Grande do Sul é efetuado pela FEPAM. Um primeiro período de monitoramento ocorreu entre os anos de 1993 e 2013, interrompido por motivos técnicos. Os dados de monitoramento utilizados iniciou em 2016, e continua em funcionamento com coletas trimestrais. Sendo esse monitoramento o de interesse nesse estudo.

Os dados obtidos a partir das medições *in situ* e disponibilizados pela FEPAM incluem diversos índices de qualidade da água, detecção de metais pesados e outros dados limnológicos. Ao todo são 35 parâmetros monitorados pela FEPAM. Mas em nosso estudo foram utilizados apenas os parâmetros: clorofila-a, condutividade elétrica, demanda bioquímica de oxigênio, demanda química de oxigênio, *escherichia coli*, fitoplâncton (cianobactérias), fósforo total, nitrogênio amoniacal, oxigênio dissolvido, sólidos dissolvidos totais, sólidos suspensos totais, turbidez e temperatura da água.

Entretanto, alguns pontos de coleta da FEPAM estão muito próximos das margens dos lagos. Essa localização, considerando a resolução espacial das imagens, pode produzir uma mistura da resposta espectral entre a água e a borda dos lagos. Essa localização, não permite que sejam coletados os valores dos pixels somente de água, e a sua identificação via sensoriamento remoto pode levar a erros de análise a partir de correlação com parâmetros obtidos *in situ* devido a mistura espectral.

Os lagos da porção sul do litoral norte e médio (Bacopari, Fortaleza, Rincão das Éguas e Figueira) possuem um ponto de coleta cada. O lago de Palmital possui dois pontos de coleta - definidos como Pinguela e Palmital, o lago dos Quadros possui dois pontos de coleta definidos como Margem Norte e Centro. Os lagos de Itapeva e Tramandaí não foram correlacionados devido à localização dos pontos de coleta próximos a margem.

Foram elaborados gráficos utilizando o software Microsoft Office. A Tabela 1 descreve os parâmetros físico-químicos utilizados para a correlação, com base na equação linear de Pearson ( $r^2$ ), com os dados de sensoriamento remoto obtidos do pixel nas coordenadas de coleta.

**Quadro 1 - Parâmetros Físico-Químicos**

Parâmetros Físico-Químicos	Descrição
Clorofila-a	Pigmento presente em organismos vegetais presentes na água
Condutividade	Indicador de materiais em suspensão na água
Demanda bioquímica oxigênio	Quantidade de oxigênio necessária para dissolver matéria orgânica
Demanda química de oxigênio	Quantidade necessária de oxigênio para manutenção da vida aquática
Escherichia coli	Bactéria presente em dejetos humanos
Fitoplâncton-cianobactérias	Macrófitas aquáticas
Fósforo total	Medida física de fósforo dissolvido na água
Nitrogênio amoniacal	Medida de nitrogênio originado da oxidação da amônia
Oxigênio dissolvido	Oxigênio presentes na água
Sólidos dissolvidos totais	Total de sólidos em suspensão no corpo d'água
Sólidos suspensos totais	Total de sólidos em suspensão no corpo d'água. Incluindo orgânicos e inorgânicos
Turbidez	Medida de materiais orgânicos e inorgânicos em suspensão na água, em NTU
Temperatura da água	Medida física de temperatura da água

Fonte: MARQUES, 1993. Tabela elaborada pelo autor.

### 3.2. LAGOS, DATAS E PONTOS DE COLETA

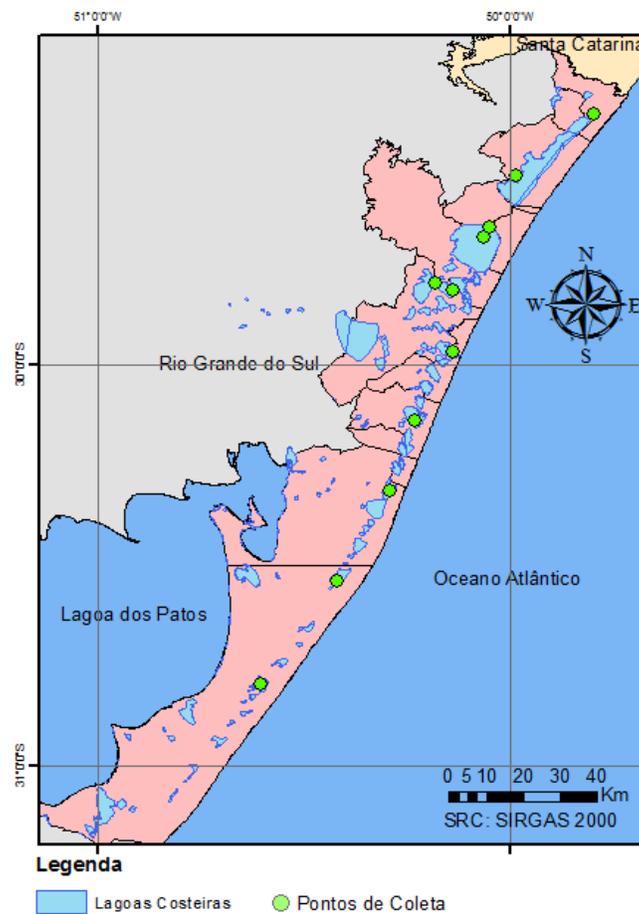
Os lagos monitorados pela FEPAM localizados na área de estudo são: Lagoa de Itapeva, Quadros, Palmital, Peixoto, Tramandaí, Fortaleza, Rincão das Éguas, Bacopari e Figueira.

A Tabela 1 compila os pontos de coleta e a localização dos lagos. A Tabela 2 as datas de coleta da FEPAM e a Quadro 2 as datas de imagens utilizadas para cada imagem tanto de Sentinel 2A como 2B. A Figura 3 ilustra a localização dos pontos de coleta realizados nos lagos do litoral norte e médio monitorados.

**Tabela 1 - Pontos de Coleta**

Lagos	Pontos de Coleta	Localização Ponto de Coleta (Lat/Long)
Itapeva	Margem Norte	-29,5293600, -49,9823090
Itapeva	Foz do Rio Três Forquilhas	-29,3752600, -49,7948500
Quadros	Margem Norte	-29,6566360, -50,0484180
Quadros	Centro	-29,6840850, -50,0614860
Palmital	Entre Lagoa Palmital e Passo	-29,8155300, -50,1366100
Palmital	Entre Lagoa Passo e Pinguela	-29,7962330, -50,1794350
Tramandaí	Foz do Rio Tramandaí	-29,9689210, -50,1386960
Fortaleza	Centro	-30,1381850, -50,2287320
Rincão das Éguas	Centro	-30,3129950, -50,2919280
Bacopari	Centro	-30,5383410, -50,4190620
Figueira	Centro	-30,7949900, -50,6042880

Fonte: FEPAM, 2019

**Figura 4 - Pontos de Coleta**

Fonte: Elaborado pelo Autor

**Tabela 2 - Coletas realizadas pela FEPAM**

Lagoa	Ano	Datas
Itapeva – Margem Norte	2016	17/05, 22/08, 21/11
	2017	20/02, 22/05, 21/08, 20/11
	2018	19/02, 21/05, 21/08, 20/11
	2019	19/02, 21/05, 08/20, 19/11
	2020	18/02
Itapeva – Foz Três Forquilhas	2016	17/05, 22/08, 21/11
	2017	20/02, 22/05, 21/08, 20/11
	2018	19/02, 21/05, 21/08, 20/11
	2019	19/02, 21/05, 20/08, 19/11
	2020	18/02
Quadros – Margem Norte	2016	17/05, 23/08, 22/11
	2017	21/02, 23/05, 22/08, 21/11
	2018	20/02, 21/05, 21/08, 20/11
	2019	19/02, 23/05, 20/08, 11/19
	2020	18/02
Quadros - Centro	2016	17/05, 23/08, 22/11
	2017	21/02, 23/05, 22/08, 21/11
	2018	20/02, 21/05, 21/08, 20/11
	2019	19/02, 23/05, 20/08, 11/19
	2020	18/02
Palmital	2016	18/05, 24/08, 23/11
	2017	22/02, 24/05, 23/08, 22/11
	2018	21/02, 22/05, 20/08, 19/11
	2019	20/02, 23/05, 19/08, 18/11
	2020	17/02
Palmital - Entre Palmital e Pinguela	2016	18/05, 24/08, 23/11
	2017	22/02, 24/05, 23/08, 22/11
	2018	21/02, 22/05, 20/08, 19/11
	2019	20/02, 23/05, 19/08, 18/11
	2020	17/02
Tramandaí	2016	18/05, 23/08, 22/11
	2017	22/02, 23/05, 22/08, 21/11
	2018	20/02, 22/05, 20/08, 19/11
	2019	20/02, 21/05, 19/08, 18/11
	2020	17/02
Fortaleza	2016	18/05, 24/08, 23/11
	2017	22/02, 23/05, 23/08, 22/11
	2018	21/02, 23/05, 22/08, 21/11
	2019	20/02
Rincão Das Éguas	2016	19/05, 25/08, 24/11
	2017	23/02, 25/05, 24/08, 23/11
	2018	22/02, 23/05, 22/08, 21/11
	2019	20/02
Bacopari	2016	19/05, 26/09, 14/12
	2017	27/03, 26/06, 25/09, 26/12
	2018	26/03, 25/06, 24/09, 26/12
	2019	25/03
Figueira	2016	
	2017	27/06, 26/09, 27/12
	2018	27/03, 26/06, 25/09, 27/12
	2019	26/03

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2020

**Quadro 2 - Datas de imagens Sentinel 2A e 2B**

Sentinel-2A	Sentinel-2B
15/01/2017	17/10/2017
24/06/2017	16/12/2017
23/08/2017	26/12/2017
22/10/2017	05/01/2018
11/11/2017	24/02/2018
21/12/2017	16/03/2018
09/02/2018	05/04/2018
09/06/2018	25/05/2018
19/07/2018	04/06/2018
29/07/2018	14/07/2018
08/08/2018	13/08/2018
18/08/2018	23/08/2018
28/08/2018	22/10/2018
07/09/2018	21/11/2018
17/10/2018	11/12/2018
26/11/2018	09/02/2019
26/03/2019	01/03/2019
	10/04/2019

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020

### 3.3. IMAGENS E CORREÇÕES

Foram utilizadas imagens do sensor Sentinel 2A-MSI e Sentinel 2B-MSI. Esses satélites foram lançados em junho de 2015 e março de 2017, pela European Space Agency como parte do programa Copernicus. Ambos os satélites possuem resolução temporal de 10 dias com uma diferença de 5 dias entre si, diminuindo o tempo necessário para aquisição de imagens da mesma área (ESA, 2019). O sensor dos satélites Sentinel capta imagens em 13 bandas espectrais com resoluções de 10, 20 e 60 m, sendo as bandas, respectivamente da primeira a décima terceira: Coastal Aerosol, Azul, Verde, vermelho, *vegetation red edge* (bandas 5 à 8a), infravermelho próximo, vapor d'água, infravermelho de ondas curtas (bandas 10 a 12), Tabela 3.

As imagens foram adquiridas da plataforma Earth Explorer da United States Geological Survey (USGS), entre as datas de 01 de janeiro de 2017 e 31 de dezembro de 2020, com cobertura máxima de nuvens de 20%, nas coordenadas 29°17' a 30°18' de latitude Sul e 49°44' a 50°24' de longitude Oeste, referentes à região do litoral norte da planície costeira do Rio Grande do Sul.

As imagens disponibilizadas pela ESA apresentam correções a nível 1C - ortorretificadas e georreferenciadas (datum WGS84 e sistemas de coordenadas UTM). Os valores de reflexão no topo de atmosfera (TOA), sendo necessário executar correções atmosféricas para recalcular a reflectância de superfície terrestre (BOA) de nível 2A (ESA,

2019). As correções nas imagens foram realizadas no software Sen2Cor, uma aplicação do software SNAP em modo *stand-alone* produzido para correções de imagens de Sentinel. A partir de um algoritmo de detecção para três classes para nuvens e seis para sombras efetua uma reclassificação dos níveis de reflexão transformando as imagens Sentinel do nível 1C para nível 2A que representa os valores de reflectância de superfície terrestre (LOUIS *et al.*, 2017; ESA, 2019). A Tabela 3 apresenta as características de cada sensor

**Tabela 3 - Características das imagens Sentinel**

Banda	Sentinel 2A		Sentinel 2B		Resolução Espacial (m)
	Comprimento de onda Central (nm)	Largura da Banda (nm)	Comprimento de onda Central (nm)	Largura da Banda (nm)	
1	442,7	44	442,3	45	60
2	492,4	94	492,1	94	10
3	559,8	45	559	46	10
4	664,6	38	665	39	10
5	704,1	19	700,3	20	20
6	740,5	18	739,1	18	20
7	782,8	28	779,7	28	20
8	832,8	147	833	133	10
8a	864,7	44	864	32	20
9	945,1	26	943,2	27	60
10	1373,5	75	1376,9	76	60
11	1613,7	143	1610,4	141	20
12	2202,4	242	2185,7	238	20

Fonte: ESA, 2019

### 3.4 MORFOMETRIA

Para o cálculo de Desenvolvimento de perímetro foi utilizada a Eq. 5 (F) desenvolvida por Hakanson (1981):

$$F = l_o / 2 \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad \text{Eq. 5}$$

Em que: F = Desenvolvimento de Perímetro;  $l_o$  = Perímetro; a = Área.

Lagos de menor dimensão tendem a valores de F próximos de 1, enquanto lagos de maior dimensão tendem a valores de F superiores a 2.

### 3.5 VARIAÇÃO DA COR APARENTE DOS LAGOS

Para analisar as diferenças na cor aparente dos lagos de estudo, foi elaborada uma composição RGB utilizando imagens de Sentinel-2. Em conjunto com as imagens de Sentinel-2, foram selecionados dados de coleta *in situ* próximos da data da imagem. As imagens foram geradas utilizando o programa Arcgis 10.5.

O período selecionado para análise foi o Verão de 2019 e o Inverno de 2019. Para a seleção das imagens foi definido um filtro para nebulosidade de até 20%, para não ter influência das nuvens na análise da cor perceptível.

As datas de coleta utilizadas foram de 19/02/19 e 20/02/19 – com exceção dos lagos de Bacopari e Figueira que a data da coleta foi de 25/03/19 e 26/03/19. Abrangendo o período do verão no RS. Para as datas de inverno, a coleta ocorreu em 19/08/19 e 20/08/19.

### 3.6 CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS E DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO

Os parâmetros físico-químicos foram obtidos a partir dos dados coletados pelo órgão FEPAM entre os anos de 2017 e 2020. Esses dados foram posteriormente correlacionados com os dados dos índices espectrais (NDVI, NDTI, NDWI e NDPI) e gerados gráficos de correlação linear de Pearson utilizando o *software* Microsoft Excel. Para realizar a correlação foi utilizado o valor pixel da imagem do índice, mesmo pixel onde foi efetuada a coleta.

### 3.7 PROCESSAMENTOS E ÍNDICES

Os índices espectrais NDWI (*Normalized Difference Water Index*), NDTI (*Normalized Difference Turbidity Index*) e NDPI (*Normalized Difference Pond Index*) foram gerados no software SNAP da ESA. O índice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) foi gerado no ArcGis 10.5.1. Cada índice gera imagens que variam entre -1 e 1, seguindo as regras das Eq. 1, 2, 3 e 4, indicando as características no momento da captura.

Foram utilizados os limites vetoriais dos lagos costeiros, disponíveis no site da FEPAM, para recorte e elaboração de mapas temáticos de cada índice, utilizando o software ArcGis 10.5.1.

## 4. RESULTADOS

Os resultados do presente trabalho foram estruturados a partir dos seguintes itens: Desenvolvimento de Perímetro; análise da cor aparente dos lagos; correlação entre dados limnológicos e sensoriamento remoto; e análise de índices espectrais. Os resultados culminam no entendimento dos lagos a partir da discussão teórica e dos dados obtidos.

### 4.1 - Desenvolvimento de Perímetro nos lagos costeiros

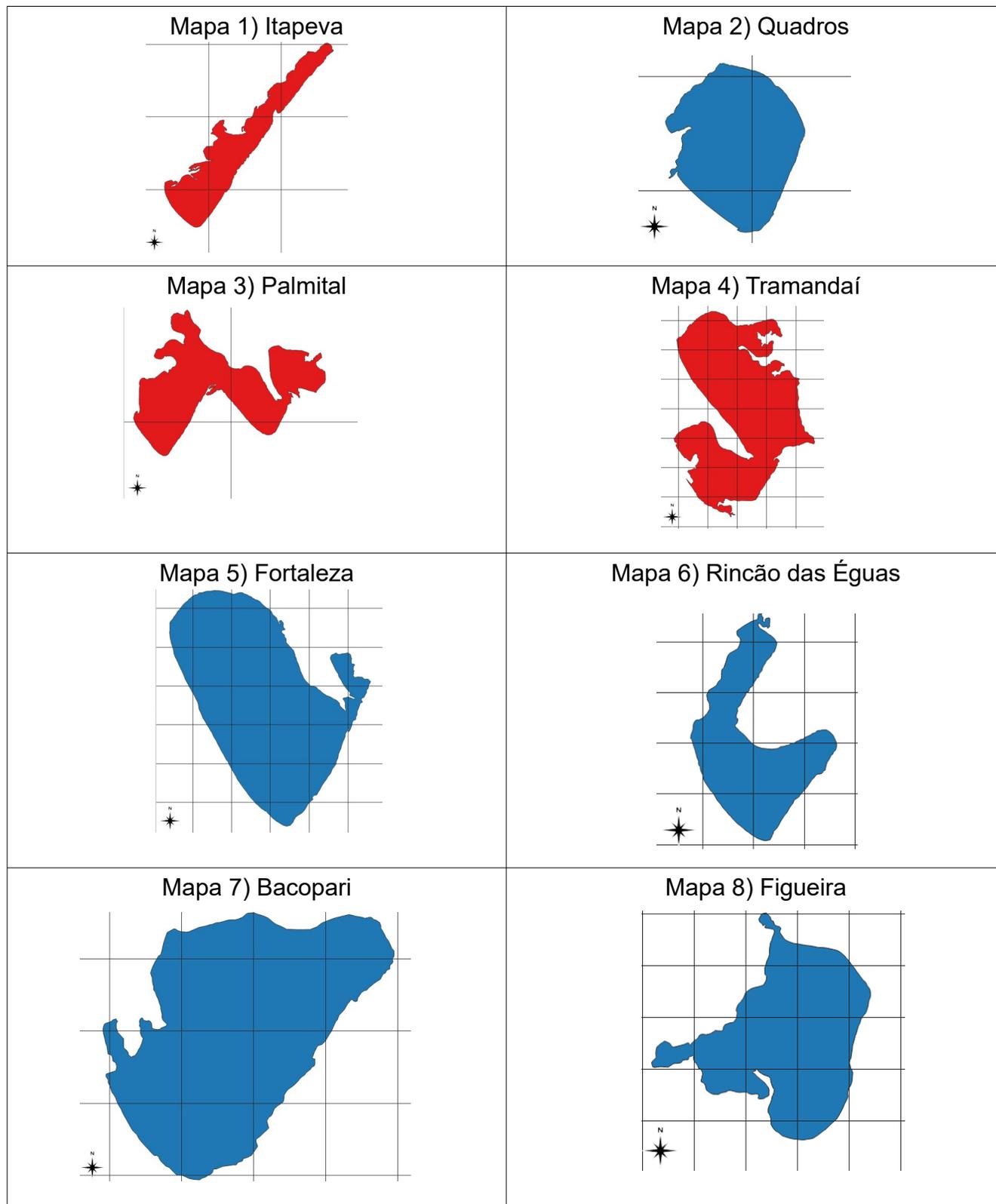
A partir do cálculo de Desenvolvimento de Perímetro (F) identificamos os lagos costeiros que apresentam formas mais regulares ou irregulares. A definição dos valores de F auxilia na análise de efeito de borda e pode servir no entendimento da variação do acúmulo de nutrientes nos lagos, que propiciam a sua eutrofização. De maneira geral, os lagos costeiros do litoral norte do Rio Grande do Sul apresentam tamanhos de pequenos a médios, o que propicia formatos mais regulares. Os lagos maiores, como Itapeva, Quadros, Palmital e Tramandaí, por serem de maiores proporções tendem a formatos mais irregulares. O índice de F estabelece que valores mais próximos a 1 representam formatos mais regulares enquanto valores superiores a 2 e mais próximos a 3, formatos mais irregulares.

Os valores do Índice de Desenvolvimento de Perímetro (F), apresentam valores entre 1 e 2 para os seguintes lagos: Quadros, Bacopari, Fortaleza, Figueira e Rincão das Éguas. Apresentam resultados acima de 2 apenas para os lagos de Itapeva, Palmital e Tramandaí. A Tabela 4 ilustra os valores de F e o Quadro 3 o formato dos lagos.

**Tabela 4** - Índice de Desenvolvimento de Perímetro (F)

Lagos	Índice de Desenvolvimento de Perímetro (F)
Itapeva	2,82
Quadros	1,25
Palmital	2,48
Tramandaí	2,37
Fortaleza	1,49
Rincão das Éguas	1,76
Bacopari	1,39
Figueira	1,65

Fonte: Elaborado pelo Autor

**Quadro 3 - Lagos Costeiros e Valores de F**

Legenda: Em azul, lagos com valores de F próximos a 1. Em Vermelho, lagos com valores de F superiores a 2.

Fonte: Elaborado pelo Autor

Esses valores significam que a maioria dos lagos têm uma relação entre sua área e perímetro que tende à um formato mais circular. A análise das diferenças de F dos lagos, que apresentam formato mais regular ou mais irregular, busca entender possíveis relações entre a morfometria dos lagos e as respostas dos índices espectrais. Relacionando o efeito de borda com o aumento de valores de trofia e maior acúmulo de sedimentos.

Os valores do Índice de Desenvolvimento de Perímetro mostram que os lagos menores apresentam formatos mais regulares, com valor de F mais próximo de 1. Os lagos maiores, na parte norte do litoral, apresentam valores maiores de F, superiores a 2.

#### 4.2 Comparação da cor da água dos lagos costeiros

A identificação de mudanças na aparência superficial do corpo de um lago pode servir como indicador de alterações no seu estado trófico e de variações de nutrientes na lâmina d'água. A partir de imagens Sentinel-2, em composição RGB, analisamos a ocorrência de sazonalidade na cor aparente dos lagos costeiros considerando períodos de inverno e verão.

As Tabelas **5 e 6** correspondem aos dados coletados pela FEPAM. Os dados em conjunto com as imagens, foram usados na comparação com as imagens dos lagos e nas discussões sobre a sua cor e as influências na sua limnologia. As Figuras **4 e 5** mostram a cor aparente dos lagos costeiros no período do verão, e as Figuras **6 e 7** no período do inverno, do ano de 2019.

Figura 5 - Lagos costeiros, verão 2019, Litoral Norte - RS



Fonte: Composição RGB de Imagem Sentinel-2.

Elaborado pelo autor

Os lagos maiores, na parte norte, têm uma cor aparente diferente dos lagos menores e dos demais lagos ao sul. As cores mais claras denotam maior quantidade de energia refletida pelo corpo d'água, e estão relacionadas a maior quantidade de sedimentos inorgânicos em suspensão. Cores mais esverdeadas estão associadas a maiores concentrações de clorofila-a. Os lagos menores têm cor azul escuro (WANG, 2021). Essas diferenças corroboram a individualidade dos lagos entre si, denotando que fatores individuais influem em sua cor tanto no verão quanto no inverno.

Figura 6 - Lagos costeiros, verão 2019, Litoral Norte - RS



Fonte: Composição RGB de Imagem Sentinel-2.

Elaborado pelo autor

Figura 7 - Lagos costeiros, inverno 2019, Litoral Norte - RS



Fonte: Composição RGB de Imagem Sentinel-2; Elaborado pelo autor

Figura 8 - Lagos costeiros, inverno 2019, Litoral Norte - RS



Fonte: Composição RGB de Imagem Sentinel-2.

Elaborado pelo autor

As imagens mostram que a cor dos lagos altera pouco entre os períodos de inverno e verão. As diferenças ocorrem mais visivelmente nos lagos ao norte do que nos lagos mais ao sul. Isso se deve em parte pelos lagos costeiros terem diferenças em seus sistemas individuais. Em lagos mais ao norte, como o Itapeva e Quadros, deságua um maior aporte de sedimentos a partir dos afluentes. As Figuras 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, presentes no quadro 4, ilustram a variação de cores da água nos lagos do litoral gaúcho.

## Quadro 4 – Fotos dos lagos costeiros

Figura 9: Foz do lago Itapeva



Figura 10 – Lago dos Quadros



Figura 11 – Lago dos Barros



Figura 12 – Lago dos Barros



Figura 13 – Lago Tramandaí



Figura 14 – Lago Tramandaí



Figura 15: Lago da Fortaleza



Fonte: Google

Os dados nas Tabelas 5 e 6, mostram variações significativas para a variável limnológica Fitoplâncton-Cianobactérias entre os lagos. Os valores variaram entre 1 ug/L para o lago de Fortaleza e 265286 ug/L para o lago da Figueira, ambos no período do verão.

Os valores de turbidez também são maiores no inverno. O máximo de 102.94 NTU foi registrado para o lago dos Quadros, e o mínimo de 0.61 NTU para o lago Bacopari. Os maiores valores são acompanhados por uma redução na transparência da água. A transparência variou de 1.7 m para o lago de Itapeva, e 0.2 m para os lagos Quadros e Palmital. No inverno, o aumento da pluviosidade eleva os valores de turbidez e de sólidos suspensos e dissolvidos.

No verão ocorrem condições que favorecem a floração de algas e fitoplâncton. Entretanto, os dados obtidos *in situ* não refletiram um aumento da clorofila-a nos meses de coleta em todos os lagos. O lago da Figueira, por exemplo, apresentou 22.77 ug/L no verão e 22.42 ug/L no inverno.

Tabela 5 - Dados limnológicos, verão 2019, lagos do Litoral Norte - RS

	Itapeva	Quadros	Palmital	Tramandaí	Fortaleza	Bacopari	Rincão d. Éguas	Figueira
Clorofila A	2,94	6,13	37,42	1,27	1,52	0	5,94	22,77
Fitoplancton Cianobactérias	-136	47	13298	951	1	330	3034	265286
Sólidos dissolvidos totais	0,13	64	65	84	101	7	95	102
Sólidos suspensos totais	122	7	20	7	7	74	7	7
Transparência da água (m)	2	0,9	0,5	0,5	1,6	0,4	0,6	0,9
Turbidez	6,75	15,58	22,37	12,27	3,87	0,29	12,45	5,49

Fonte: Dados obtidos pela FEPAM; Tabela elaborada Pelo Autor

Tabela 6 - Dados limnológicos, inverno 2019, lagos do Litoral Norte - RS

	Itapeva	Quadros	Palmital	Tramandaí	Fortaleza	Bacopari	Rincão d. Éguas	Figueira
Clorofila A	0,29	0,08	5,35	3,45	6,99	1,55	0,61	22,42
Fitoplancton Cianobactérias	-196	57	6486	550	20	171	235	46424
Sólidos dissolvidos totais	24	74	133	167	143	12	166	46
Sólidos suspensos totais	7	54	26	12	7	7	7	7
Transparência da água (m)	1,7	0,2	0,2	0,4	0,9	0,7	0,8	1,5
Turbidez	7,5	102,94	81,26	52,8	9,24	0,64	12,75	3,1

Fonte: Dados obtidos pela FEPAM; Tabela elaborada Pelo Autor

Os dados mostram maiores concentrações de clorofila-a e de Fitoplancton-Cianobacterias nos lagos da porção sul, tabelas **5 e 6**, tanto para o inverno como para o verão. Os níveis mais elevados das concentrações, porém não refletem na alteração de cor, nas imagens Sentinel-2. Um dos motivos que explica esse fenômeno é a natureza dinâmica do lago costeiro (SCHAFFER 1986).

O tempo entre a data de coleta e a aquisição da imagem causam diferenças na análise de cor superficial. Mesmo que o lago apresente níveis elevados que tendem a alterações na cor superficial, eles não foram detectados nas imagens, por se tratar de datas diferentes.

Lagos costeiros possuem características semelhantes entre si. Porém a dinâmica de lagos costeiros exige a análise como entidades individuais. Devendo ser estudados em separado para o entendimento de dinâmicas que afetem a cor aparente, que podem ser de origem local.

### 4.3 Correlação entre Índices espectrais x Limnologia

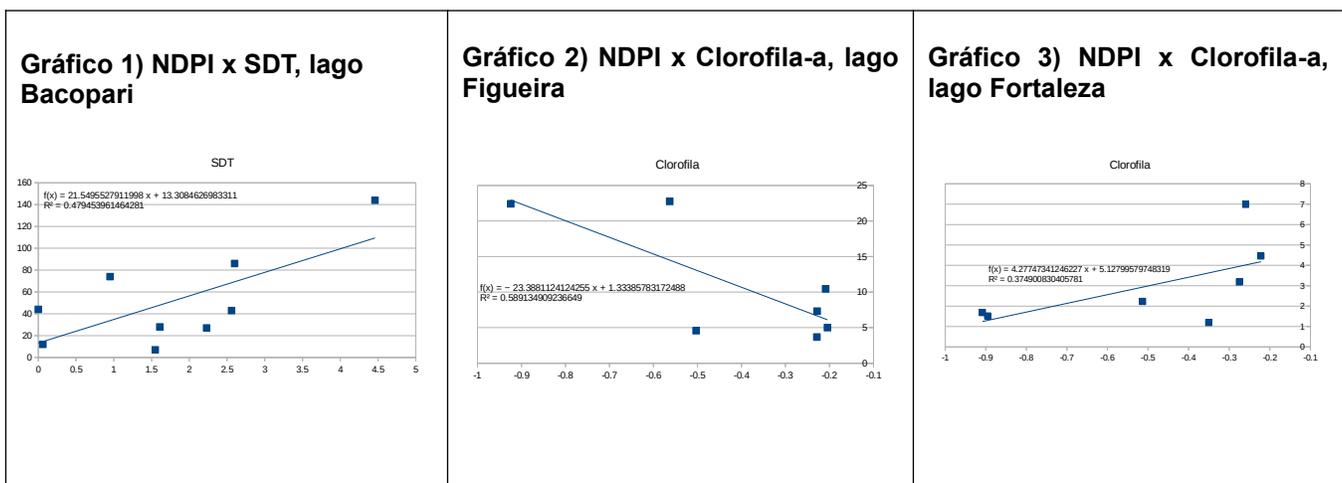
A correlação entre dados de índices espectrais e os dados limnológicos, pode auxiliar no entendimento de quais variáveis alteram a resposta espectral dos lagos e qual a sua relação com o cálculo de índice espectral.

A análise da correlação ( $r^2$ ) entre os valores obtidos nas coletas *in situ*, realizadas nos lagos pela FEPAM, e os dados obtidos a partir das imagens de satélite Sentinel-2A e 2B, busca entender a variação de seu comportamento ao longo do tempo, caracterizando a variação dos valores espectrais e os parâmetros limnológicos. Os valores dos pixels foram extraídos utilizando imagens em datas o mais próximo possível das datas de coleta.

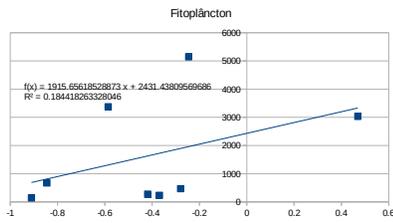
As correlações entre os dados obtidos *in situ* e o valores dos pixels de NDVI apresentaram baixa correlação linear de Pearson (R). Os parâmetros que obtiveram maiores correlações foram os Sólidos Suspensos Totais, com R (0,74) para o lago da Figueira, e Clorofila-a para os lagos Fortaleza (0,62) e Rincão das Éguas (0,61). As correlações positivas encontradas encontram-se nos quadros **5 e 6**.

O lago Bacopari mostrou as melhores correlações para Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) e NDPI - 0,47, (Quadro 4, Gráfico 1). Os outros dados apresentaram valores baixos de correlação. O lago Figueira apresentou correlação para NDPI com Clorofila-a de 0.58 (Quadro 4, Gráfico 2).

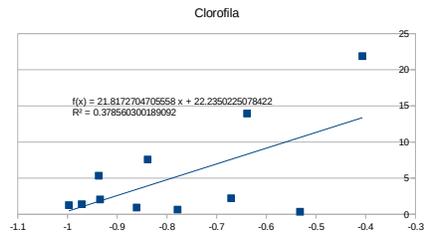
**Quadro 5** - Gráficos de Correlação entre Índices espectrais x Limnologia



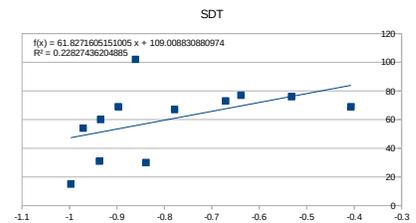
**Gráfico 4) NDPI x Fitoplâncton, lago Rincão das Éguas**



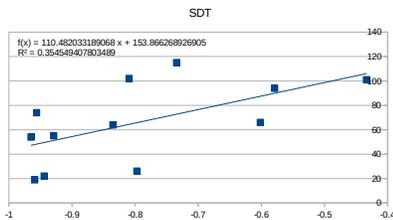
**Gráfico 5) NDPI x Clorofila-a, lago Quadros, Margem Norte**



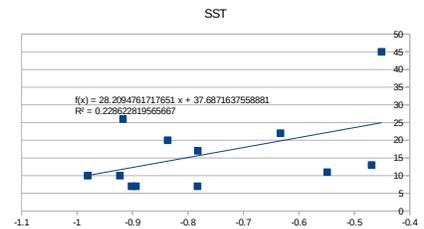
**Gráfico 6) NDPI x SDT, lago Quadros, Margem Norte**



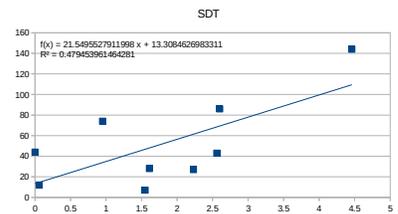
**Gráfico 7) NDPI x SDT, lago Quadros, centro**



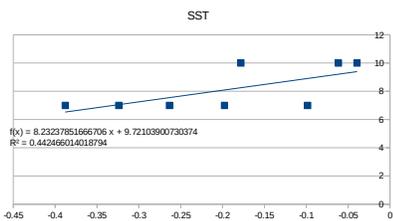
**Gráfico 8) NDPI x SST, lago Palmital**



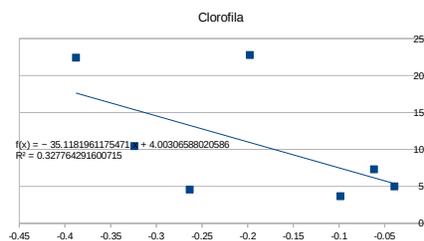
**Gráfico 9) NDTI x SDT, lago Bacopari**



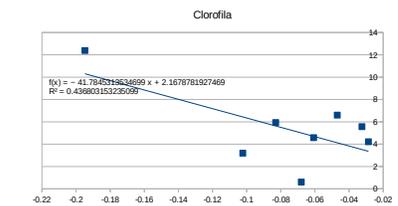
**Gráfico 10) NDTI x SST, lago Figueira**



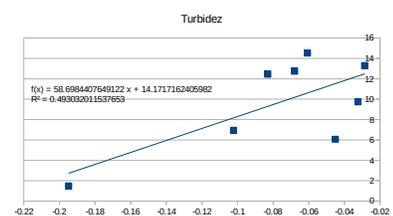
**Gráfico 11) NDTI x Clorofila-a, lago Figueira**



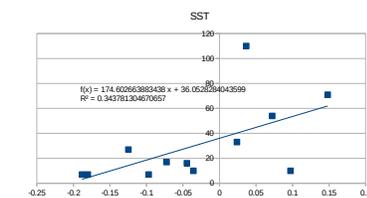
**Gráfico 12) NDTI x Clorofila-a, Lago Rincão das Éguas**



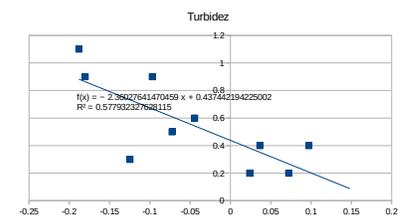
**Gráfico 13) NDTI x Turbidez, lago Rincão das Éguas**

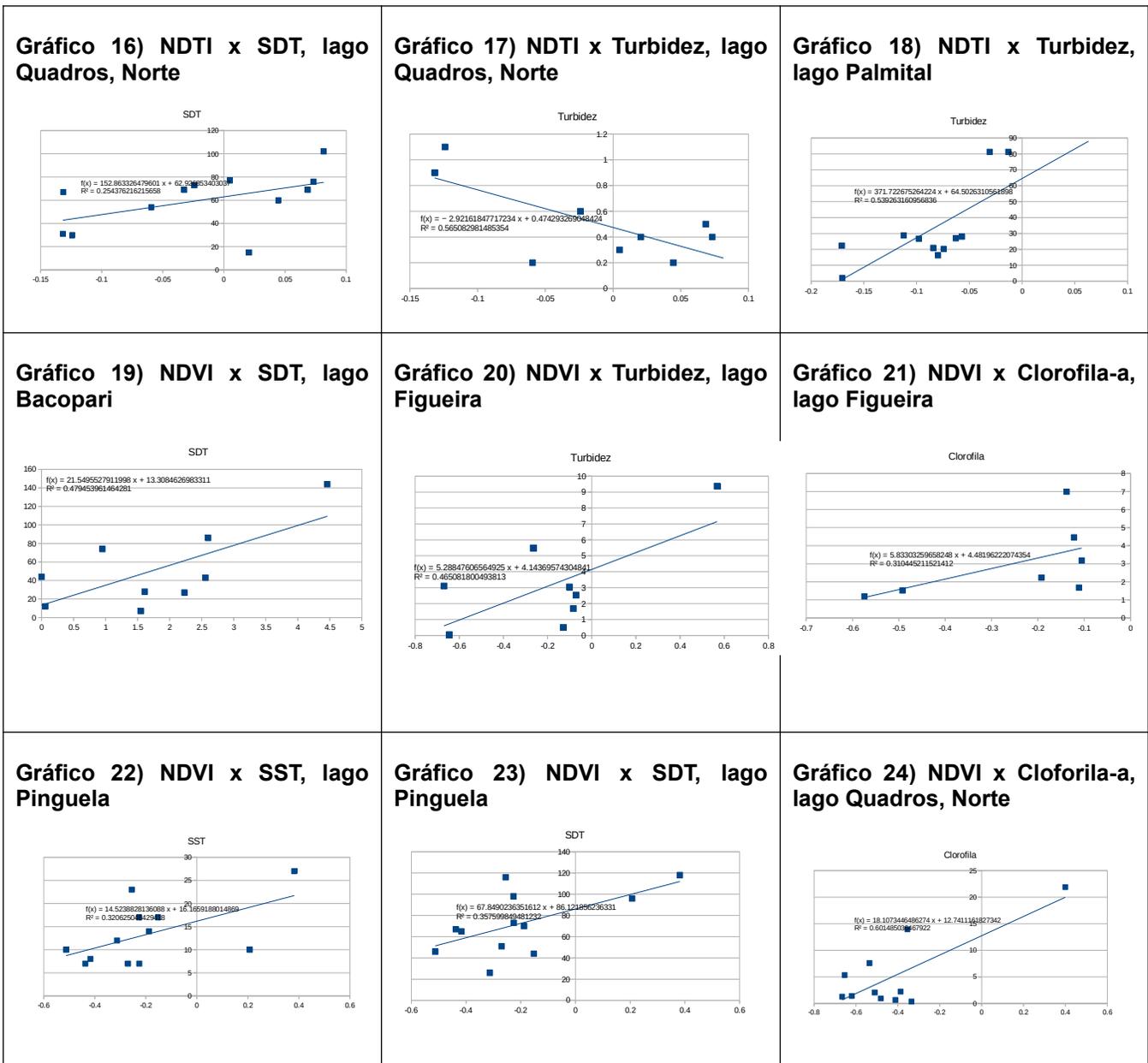


**Gráfico 14) NDTI x SST, lago Quadros, Centro**



**Gráfico 15) NDTI x Turbidez, lago Quadros, Centro**





Fonte: Elaborado pelo autor

O ponto da Margem Norte do lago dos Quadros apresentou correlação de 0.37 com o parâmetro de Clorofila-a (Quadro 5, Gráfico 5) para NDPI, o que não se repetiu para o segundo ponto de coleta Quadros Centro. O ponto de coleta Quadros Centro apresentou correlação de 0.22 com o valor de SDT (Quadro 5, Gráfico 6), a correlação (0.35) para a Margem Norte de SDT foi mais baixa (Quadro 5, Gráfico 7), ambos para NDPI.

O ponto de coleta do lago de Palmital apresentou uma baixa correlação (0.22) para NDPI com Sólidos Suspensos Totais (SST) (Quadro 5, Gráfico 8).

Para o índice de NDTI, o lago de Bacopari apresentou correlação de 0.47 para SDT (Quadro 5, Gráfico 9), o lago da Figueira para SST e Clorofila-a, com os valores de 0.44 e

0.32 (Quadro 5, Gráficos **10 e 11**) o lago do Rincão das Éguas para Clorofila-a e Turbidez com os valores de 0.43 e 0.49 (Quadro 5, Gráficos **12 e 13**).

O ponto de coleta Quadros Centro apresentou correlação de 0.34 e 0.57 para SST e Turbidez (Quadro 5, Gráficos **14 e 15**), a Margem Norte para SDT e para Turbidez, com 0.25 e 0.56 (Quadro 5, Gráficos **16 e 17**)

O lago costeiro de Palmital obteve correlação com Turbidez para o índice de NDTI, valor de 0.53 (Quadro 5, Gráfico **18**), o ponto de coleta do lago da Pinguela não apresentou correlações significativas.

A correlação para o índice de NDVI para o lago de Bacopari apresentou correlação de 0.47 com o parâmetro de SDT (Quadro 5, Gráfico **19**). O lago da Figueira correlação de 0.46 para turbidez (Quadro 5, Gráfico **20**). O lago de Fortaleza foi o único a apresentar correlação em NDVI com Clorofila-a, no valor de 0.31 (Quadro 5, Gráfico **21**). Para NDVI, o lago costeiro de Rincão das Éguas não apresentou correlações.

Para os lagos costeiros na porção norte, as correlações para NDVI foram: O ponto de coleta no lago da Pinguela correlacionou-se com os parâmetros de SST e SDT nos valores de 0.32 e 0.35 (Quadro 5, Gráficos **22 e 23**). Os pontos de coleta no lago dos Quadros mostram correlação de 0.6 com clorofila-a para o ponto de Quadros Margem (Quadro 5, Gráfico **24**).

O ponto Quadros Centro tem pequena correlação com fitoplâncton, no valor de 0.22 (Quadro 6, Gráfico **25**) e correlação com SDT de 0.55 (Quadro 6, Gráfico **26**). O ponto de coleta no lago de Palmital não apresentou nenhuma correlação para NDVI.

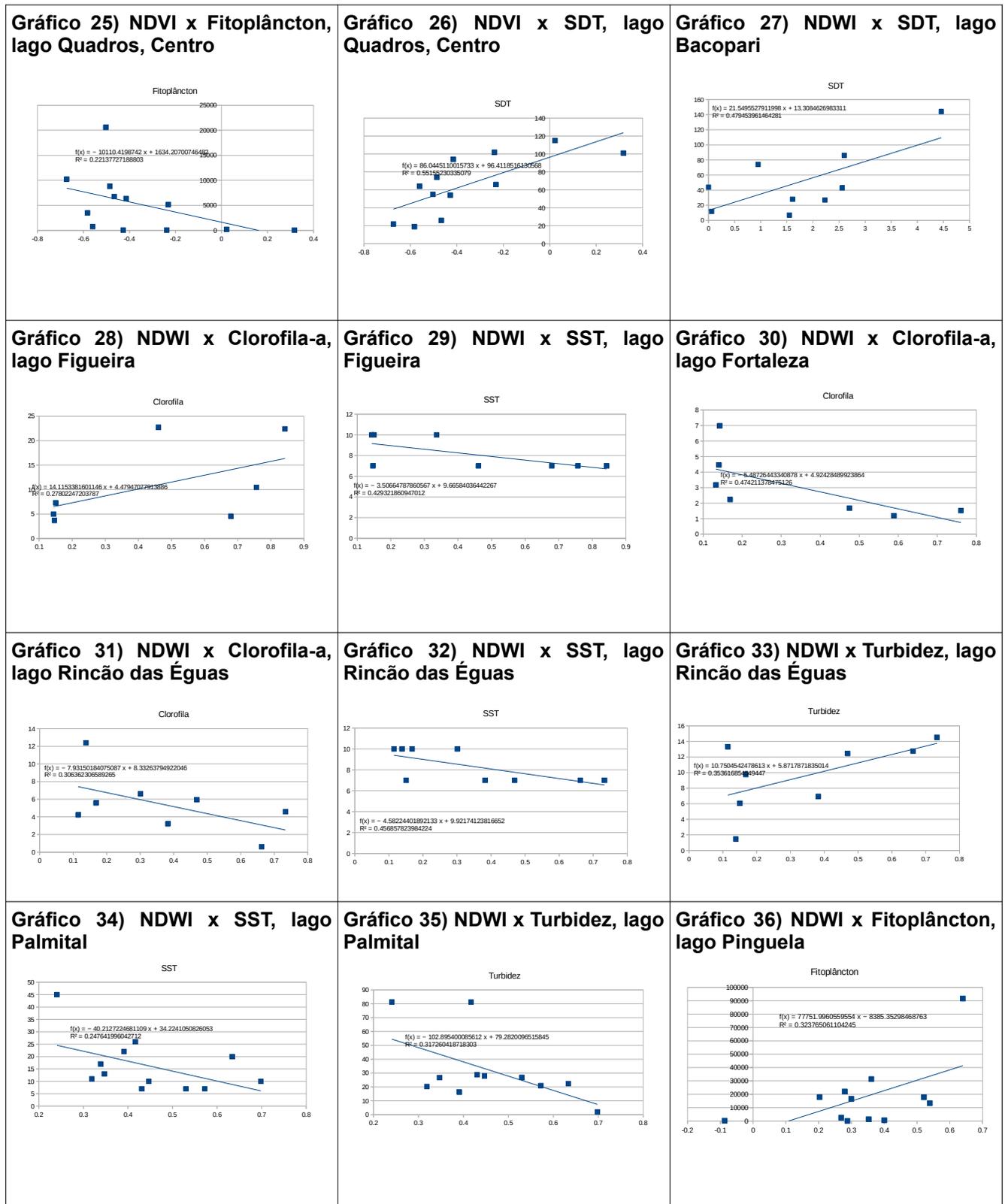
Os parâmetros foram também correlacionados com o índice de NDWI nos lagos do litoral norte e médio. O Quadro 6, gráfico **27** apresenta a correlação de 0.47 do lago Bacopari com SDT.

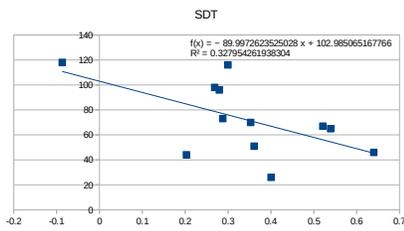
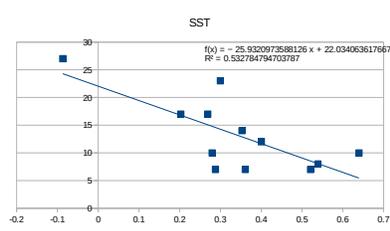
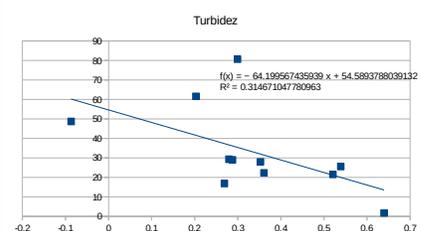
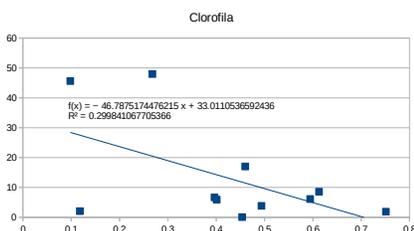
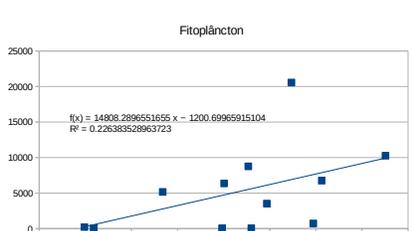
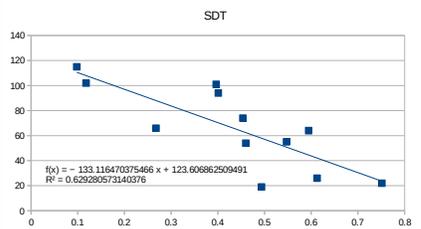
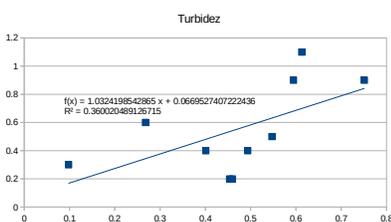
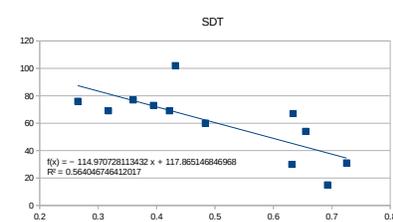
O lago da Figueira teve correlação em NDWI com clorofila-a e SST, nos valores de 0.27 e 0.42 (Quadro 6, Gráficos **28 e 29**), e o lago de Fortaleza para clorofila-a, valor de 0.47 (Quadro 6, Gráfico **30**). O ponto de coleta no lago do Rincão das éguas correlacionou-se para NDWI com clorofila-a, SST e Turbidez, respectivamente nos valores 0.3, 0.45 e 0.35 (Quadro 5, Gráficos **31, 32 e 33**)

Os últimos parâmetros a serem correlacionados são dos lagos costeiros da porção mais ao norte com o índice de NDWI. O ponto de coleta de Palmital apresentou correlações de 0.24 para SST (Quadro 6, Gráfico **34**) e Turbidez de 0.31 (Quadro 6, Gráfico **35**). O ponto no lago da Pinguela teve correlações para Fitoplâncton de 0.32 (Quadro 6, Gráfico **36**), SDT de 0.32 (Quadro 6, Gráfico **37**), SST de 0.53 (Quadro 6, Gráfico **38**) e Turbidez de 0.31

(Quadro 6, Gráfico 39).

## Quadro 6 - Gráficos de Correlação



**Gráfico 37) NDWI x SDT, lago Pinguela****Gráfico 38) NDWI x SST, lago Pinguela****Gráfico 39) NDWI x Clorofila-a, lago Quadros, Centro****Gráfico 40) NDWI x Turbidez, lago Palmital****Gráfico 41) NDWI x Fitoplâncton, lago Quadros, centro****Gráfico 42) NDWI x SDT, lago Quadros, centro****Gráfico 43) NDWI x Turbidez, lago Quadros, centro****Gráfico 44) NDWI x SDT, lago Quadros, norte**

Fonte: Elaborado pelo autor

O ponto de coleta Quadros Centro apresentou correlações de NDWI para Clorofila-a, Fitoplâncton, SDT e Turbidez, respectivamente nos valores 0.29, 0.22, 0.62, 0.36 (Quadro 6, Gráficos 40, 41, 42 e 43). A margem norte do lago dos Quadros (Quadros Margem) correlacionou-se apenas com SDT, no valor de 0.56 (Quadro 6, Gráfico 44).

Dos índices correlacionados com os parâmetros limnológicos coletados, o índice de NDWI apresentou o maior número de correlações dentre os quatro índices, outros índices (NDVI, NDTI e NDPI) apresentaram quantidade similar de correlações totais (entre 10 e 14 correlações positivas com os dados físico-químicos)

Os lagos costeiros da litoral norte e médio apresentam mudanças ao longo do tempo para cada parâmetro limnológico a ponto de serem detectados em suas respectivas correlações via uso de sensoriamento remoto. Desta forma o entendimento de evolução e dinamismo de cada lago costeiro pode ser detectado via análise de índices espectrais.

#### 4.4 Sensoriamento Remoto e Índices espectrais

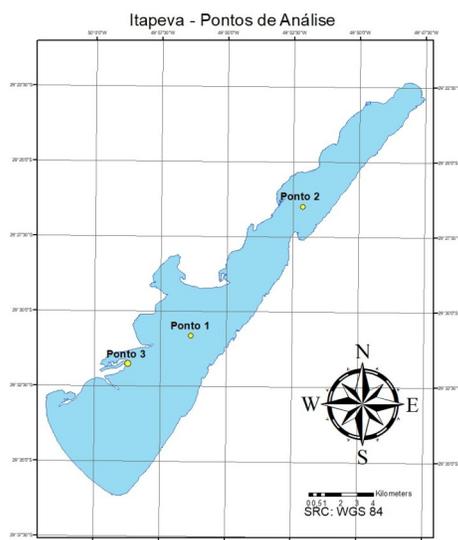
Utilizando os índices espectrais NDVI, NDWI, NDTI e NDPI, gerados a partir das imagens Sentinel 2A e 2B, analisamos a variação sazonal em cada lago costeiro e a influência da sazonalidade, considerando as estações de primavera, verão, outono e inverno. Para tanto, coletamos, nas imagens, o valor do pixel em 3 pontos para cada lago, ilustrados no **Quadro 7**. Os pontos foram determinados de forma a contemplar: (a) toda a área lagunar; (b) localização próxima a foz de rios que deságuam nos lagos; (c) na sua porção central; e (d) áreas com efeito de borda.

Os 3 pontos de análise dos índices em cada lago apresentaram variação temporal. A localização dos pontos ilustra a diferença espacial em cada lago costeiro. Cada índice possui sua particularidade, NDVI detecta variações na faixa espectral do vermelho, tornando melhor para detecções que envolvem clorofila-a, enquanto NDTI para alterações na quantidade de sedimentos em suspensão. Cada índice de análise contribui para um melhor entendimento espacial e temporal dos lagos do litoral, detectando diferentes variações nas quantidades clorofila-a ou sedimentos

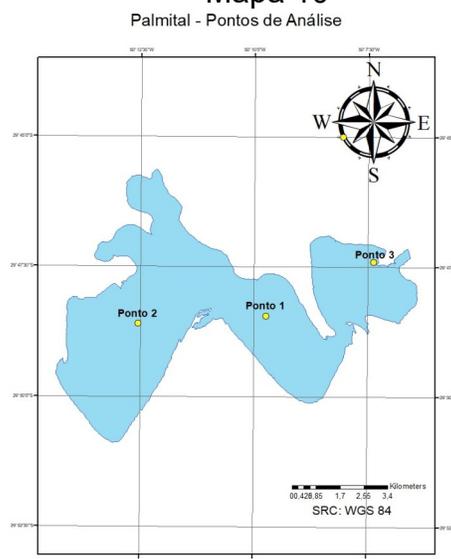
Os pixels mais escuros em cada mapa representam valores dos índices espectrais mais próximos a -1, e os pixels mais claros representam os valores mais próximos a 1

### Quadro 7 - Pontos de coleta para análise dos índices espectrais

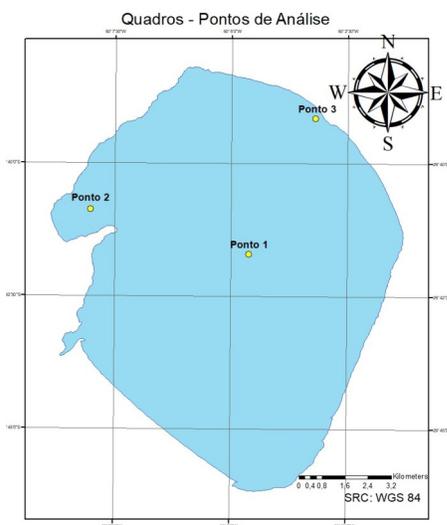
#### Mapa 9



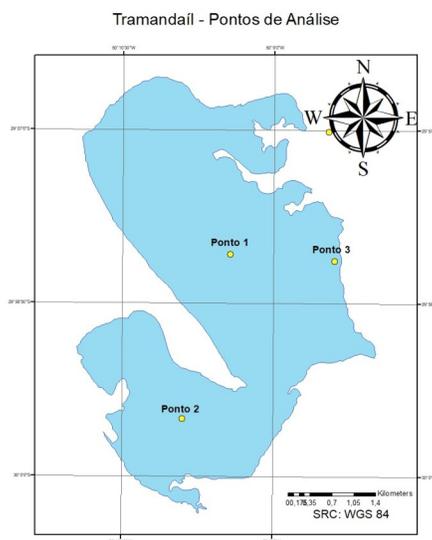
#### Mapa 10



#### Mapa 11

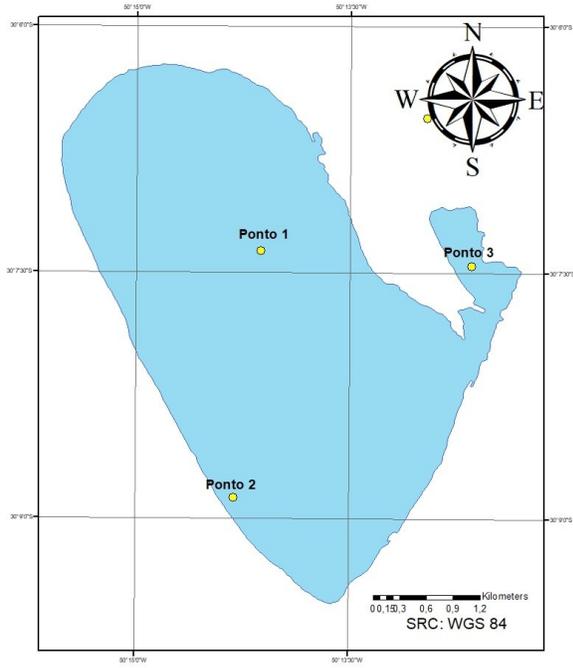


#### Mapa 12



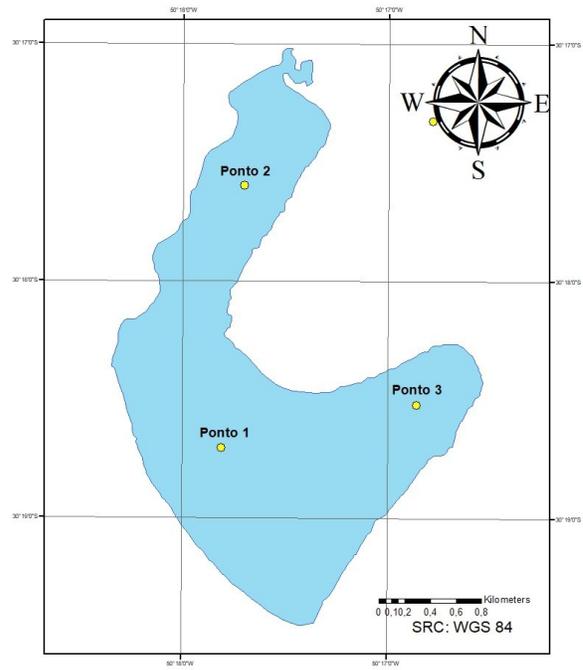
Mapa 13

Fortaleza - Pontos de Análise



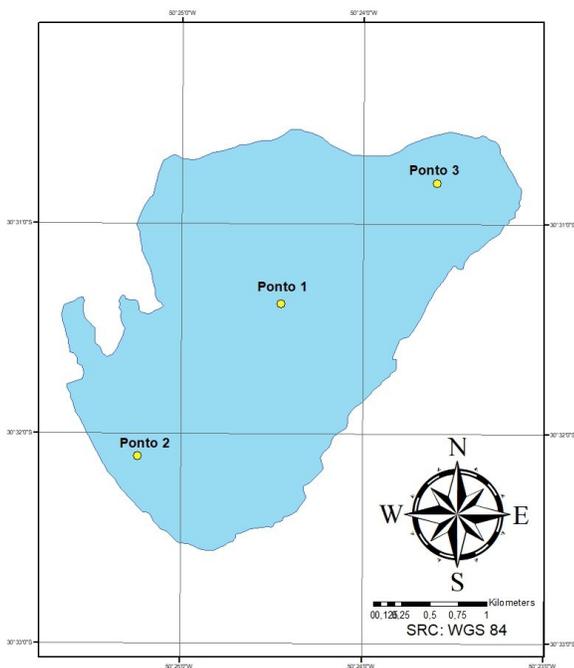
Mapa 14

Rincão das Éguas - Pontos de Análise



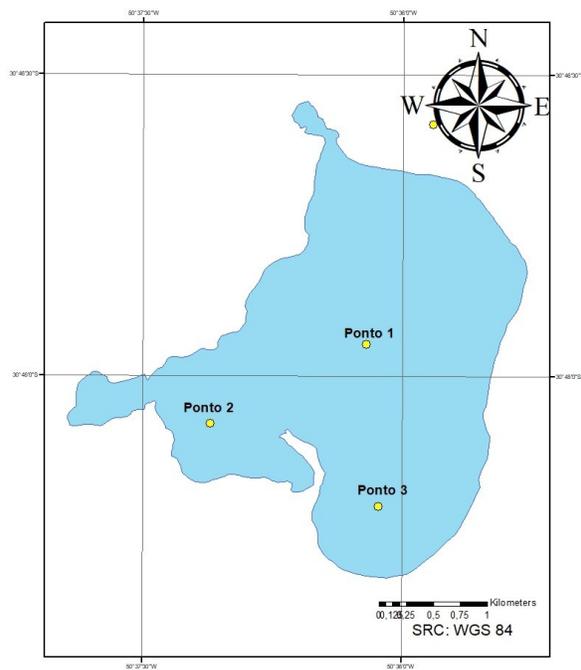
Mapa 15

Bacopari - Pontos de Análise



Mapa 16

Figueira - Pontos de Análise



As análises a partir do índice de NDVI mostraram que os lagos apresentam variação sazonal. As menores variações sazonais ocorreram no lago Itapeva (Quadro 8, Gráficos 45 e 46). O mês de novembro (primavera) apresentou os maiores valores em média (-0,2) para os lagos costeiros, nas imagens de NDVI. Em média o comportamento dos 3 pontos de cada lago costeiro apresentou comportamento similar de aumentos e reduções intercalados para cada lago em todas as estações. As imagens para os índices de NDVI de cada lago costeiro estão apresentadas no Quadro 8.

O lago de Itapeva apresentou máximo de NDVI de -0.32 em 05/01/18 e mínimo de -0.65 em 09/05/20. O lago dos quadros máxima de -0.09 em 22/09/19, mínimo de -0.62 em 25/05/18 e 09/05/20. Palmital teve o máximo de NDVI em 25/05/18 de 0.8 e mínimo de -0.6 em 09/05/20.

O lago de Tramandaí apresentou o valor mais elevado de NDVI em 23/08/17 de 0 e o menor em 09/05/20 de -0.8. O lago de Fortaleza valores de -0.15 em 11/10/20 e -0.9 em 09/05/20.

O lago de Rincão das Éguas valores de -0.1 em 11/10/20 e o menor em 21/09/20 de -0.95. O lago de Bacopari teve o maior valor em 11/10/20 de -0.1 e valores próximos a -1 em 3 datas: 25/05/18, 09/02/19 e 29/02/20.

Os dados de NDVI, mostram valores mais baixos para o mês de maio para diversos lagos. O valor de 0.8 no lago de Palmital se mostra como uma anomalia perante a média dos outros meses analisados.

A análise dos gráficos de NDTI (Quadro 9) mostrou pouca variação sazonal para os lagos costeiros da porção ao norte (Itapeva, Palmital, Quadros e Tramandaí). Os lagos ao sul apresentaram maior variação sazonal - com exceção do lago de Rincão das Éguas que apresentou um comportamento com menor variação.

O lago de Itapeva apresentou média de 0.01, com valor máximo de 0.18 em 23/08/17 e menor de -0.2 em 29/02/20. O lago dos Quadros apresentou uma média de -0.05, com máximo de NDTI em 23/08/17 de 0.2 e mínimo de -0.22 em 09/05/20.

O lago de Palmital apresentou valor máximo para 23/08/17 de 0.19 e mínimo de -0.4 em 25/05/19, com média de -0.1. Tramandaí teve o valor mínimo para NDTI em 09/05/20 de -0.39 e valor máximo de 0.15 em 23/08/17.

Nota-se que para os lagos da porção norte os valores mais baixos de NDTI ocorreram em maio, mesmo assim os lagos mantiveram uma constante e pouca variação no índice de Turbidez.

Nos lagos da porção sul, o lago da Fortaleza teve o maior valor de NDTI em 05/01/18,

de 0, e o menor em 29/02/20 de -0.34. O lago de Rincão das Éguas se manteve em constante na média de -0.05 em grande parte das datas, com o menor valor apresentado em -0.25 em 09/05/20. Bacopari apresentou em 11/11/17 o valor de -0.06, seu maior no período analisado, e o menor em 25/05/18, de -0.5. O último lago, da Figueira, teve valor máximo de -0.05 em 11/10/20 e o mínimo valor de -0.5 em 09/05/20. Os lagos da porção sul apresentaram, também, os menores valores do índice de turbidez para maior.

O Quadro 10 apresenta a aparência dos lagos costeiros a partir do índice NDTI. O índice de turbidez destaca diferenças nos lagos costeiros ao longo do tempo do aporte de sedimentos recebidos. Os gráficos de NDPI apresentaram variações sazonais nos pontos de análise para todos os lagos (Quadro 11, Gráficos 61 a 68). O Quadro 12 apresenta imagens dos lagos para o índice de NDPI. Para o lago de Itapeva, o valor máximo e mínimo de NDPI foram identificados na mesma data: 25/05/2018. Sendo o maior valor para o ponto 3 e o menor para os pontos 1 e 2.

O ponto 3 do lago de Itapeva fica na foz do rio Três Forquilhas. Para o lago dos Quadros os maiores valores foram identificados na data de 11/10/20, com valor de -0.42, o menor valor foi de -0.9 em 09/05/20. O lago de Palmital apresentou valores máximos de -0.08 e valores mínimos aproximados de -1. O lago de Tramandaí apresentou os valores mais elevados próximos a -0.3 e mínimos próximos a -1. O lago da Fortaleza apresentou valores máximos de -0.2 e mínimos próximos de -0.9. O lago de Rincão das Éguas apresenta valores máximos próximos a -0.25 e mínimos próximos a -1. Os dois lagos da porção mais sul do litoral norte – Bacopari e Figueira, apresentaram valores máximos de -0.18 e -0.16, e mínimos de -0.9 e -1, respectivamente.

Os valores para o índice de NDWI apresentaram valores com variações sazonais na maior parte dos lagos. As únicas exceções foram os lagos de Itapeva e Palmital que apresentaram pouca variação nos pontos analisados.

Os gráficos do quadro 13, ilustram o comportamento ao longo das estações para o índice. O lago de Itapeva apresentou pouca variação no índice de NDWI e uma média de 0.45 entre as datas de análise.

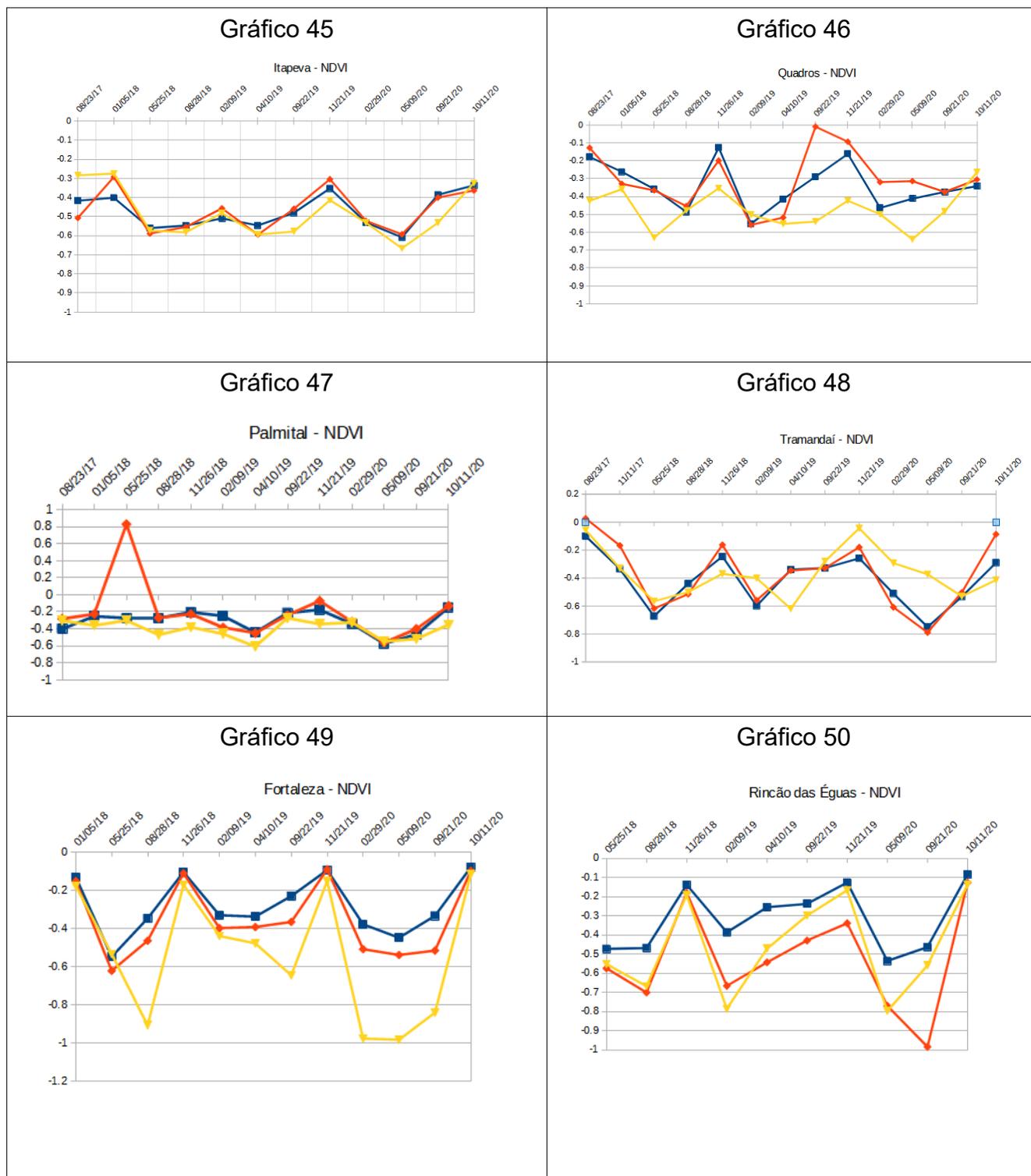
O lago dos Quadros, por sua vez, apresenta um pouco mais de variação, em uma média de 0.4. O lago de Palmital apresentou valor mínimo de -0.6 em 25/05/18 no ponto 1. Os outros valores foram mais constantes com média de 0.4. O lago de Tramandaí apresenta variações ao longo da análise, com valor máximo para NDWI de 0.8 em 25/05/18 e 09/05/20.

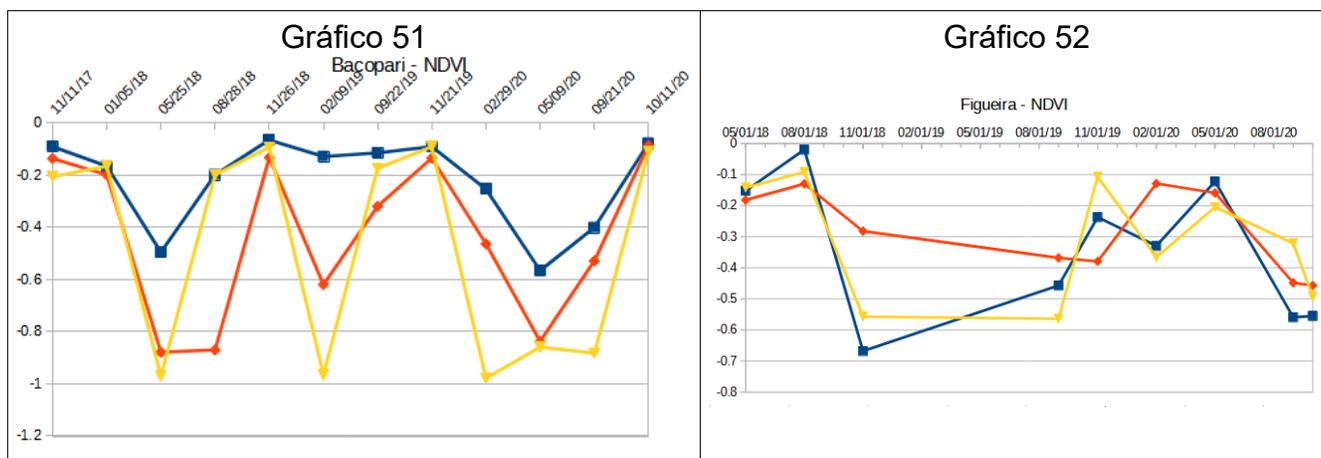
Os menores valores de NDWI para o lago de Tramandaí foi de -0.02 em 23/08/17. O lago da Fortaleza apresenta valores próximos a 1, e valor mínimo de 0.2. Rincão das Éguas

apresenta valor próximo a 1 em 21/09/20 e menor valor de 0.15. Para os últimos dois lagos da porção sul, no litoral médio – Bacopari apresentou valor máximo de 1 e mínimo de 0.2, enquanto o lago da Figueira apresentou valor máximo de 1 e mínimo de 0.02

O Quadro 14 apresenta mapas que ilustram o comportamento dos lagos para o índice de NDWI.

### Quadro 8. Variações NDVI

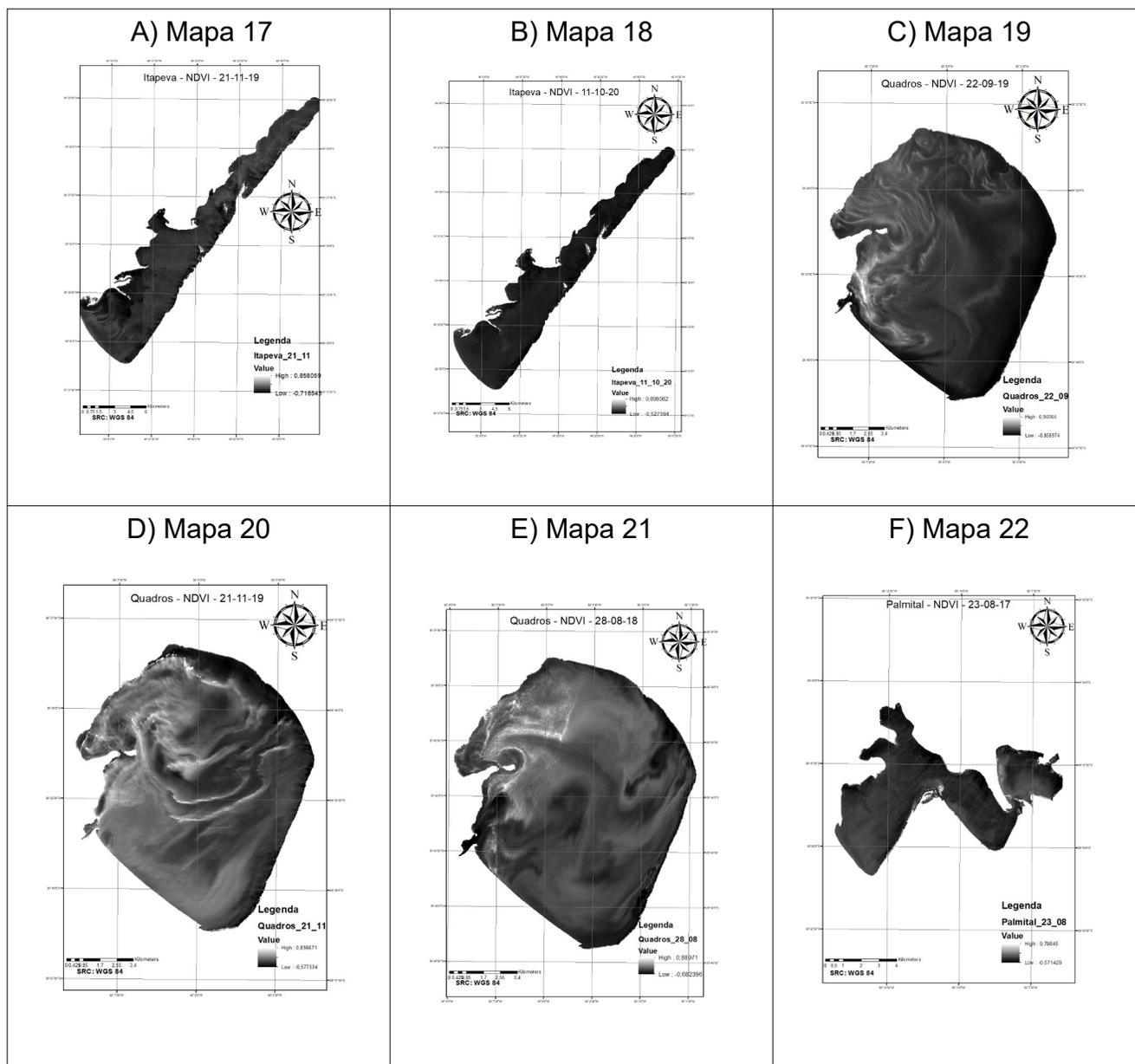




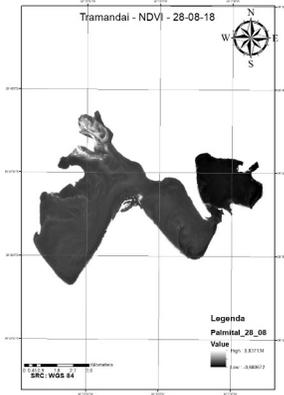
Legenda: Linha Azul – Ponto 1. Linha Vermelha – Ponto 2. Linha Amarela – Ponto 3 Fonte:

Elaborado pelo autor, 2021

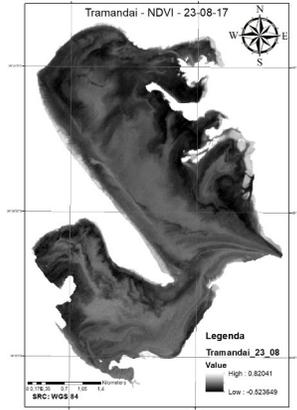
### Quadro 9. Mapas de NDVI



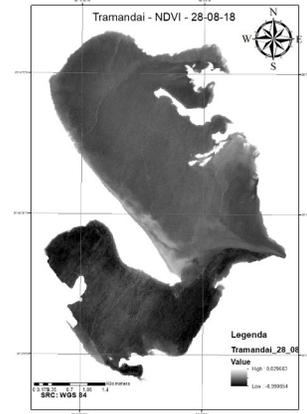
G) Mapa 23



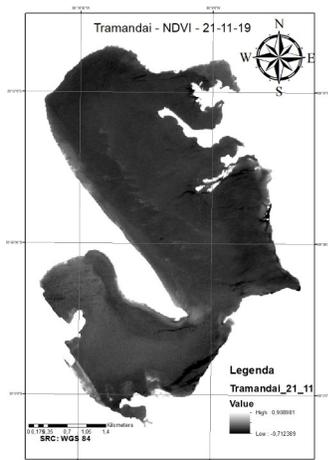
H) Mapa 24



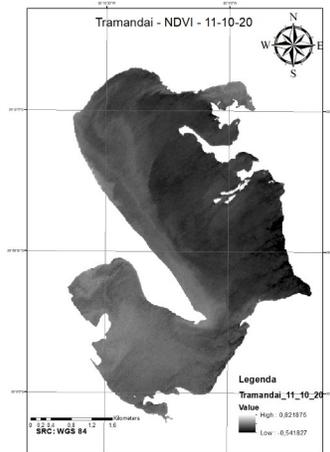
I) Mapa 25



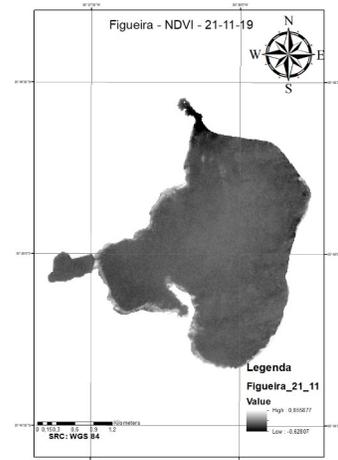
J) Mapa 26



K) Mapa 27

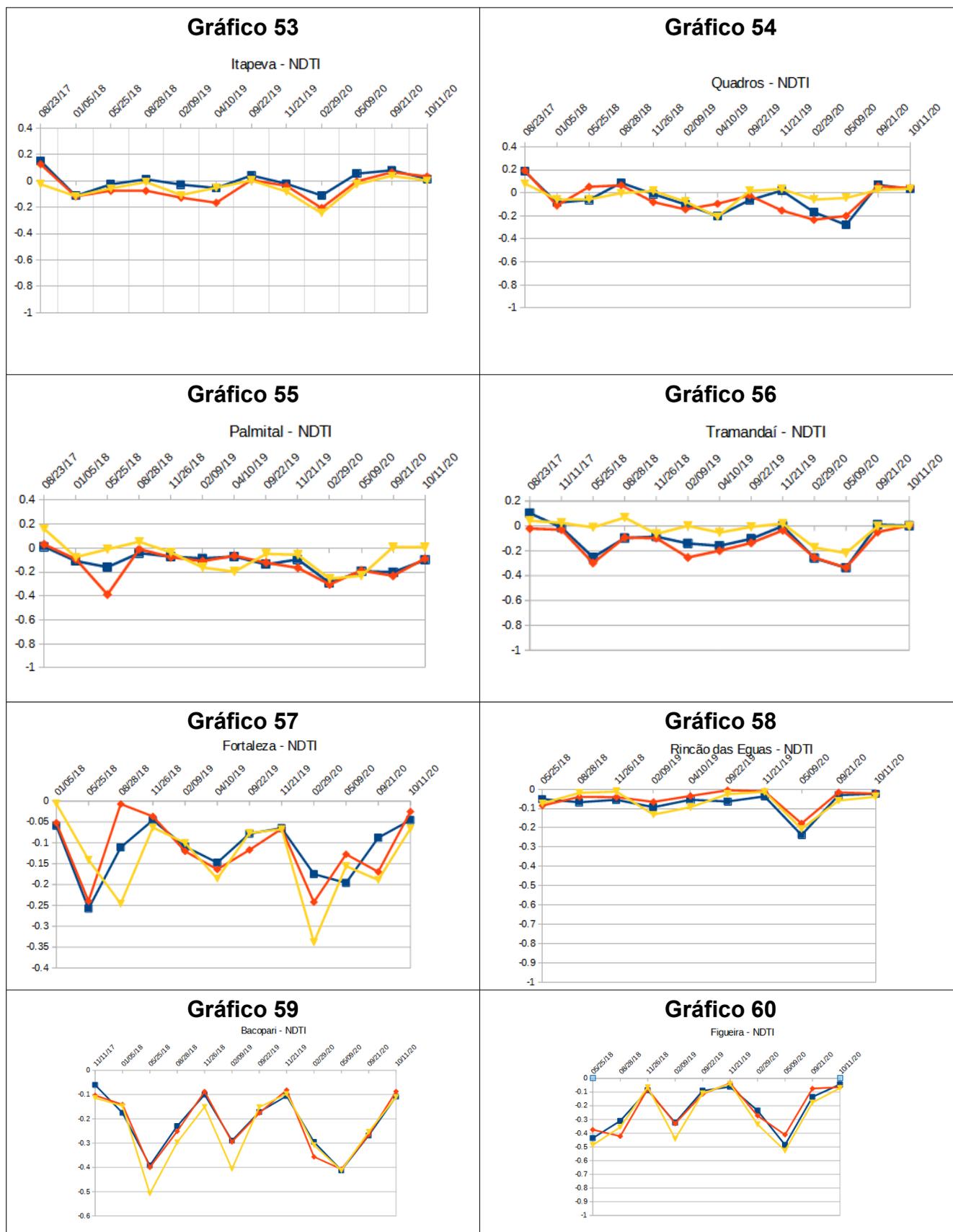


L) Mapa 28



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

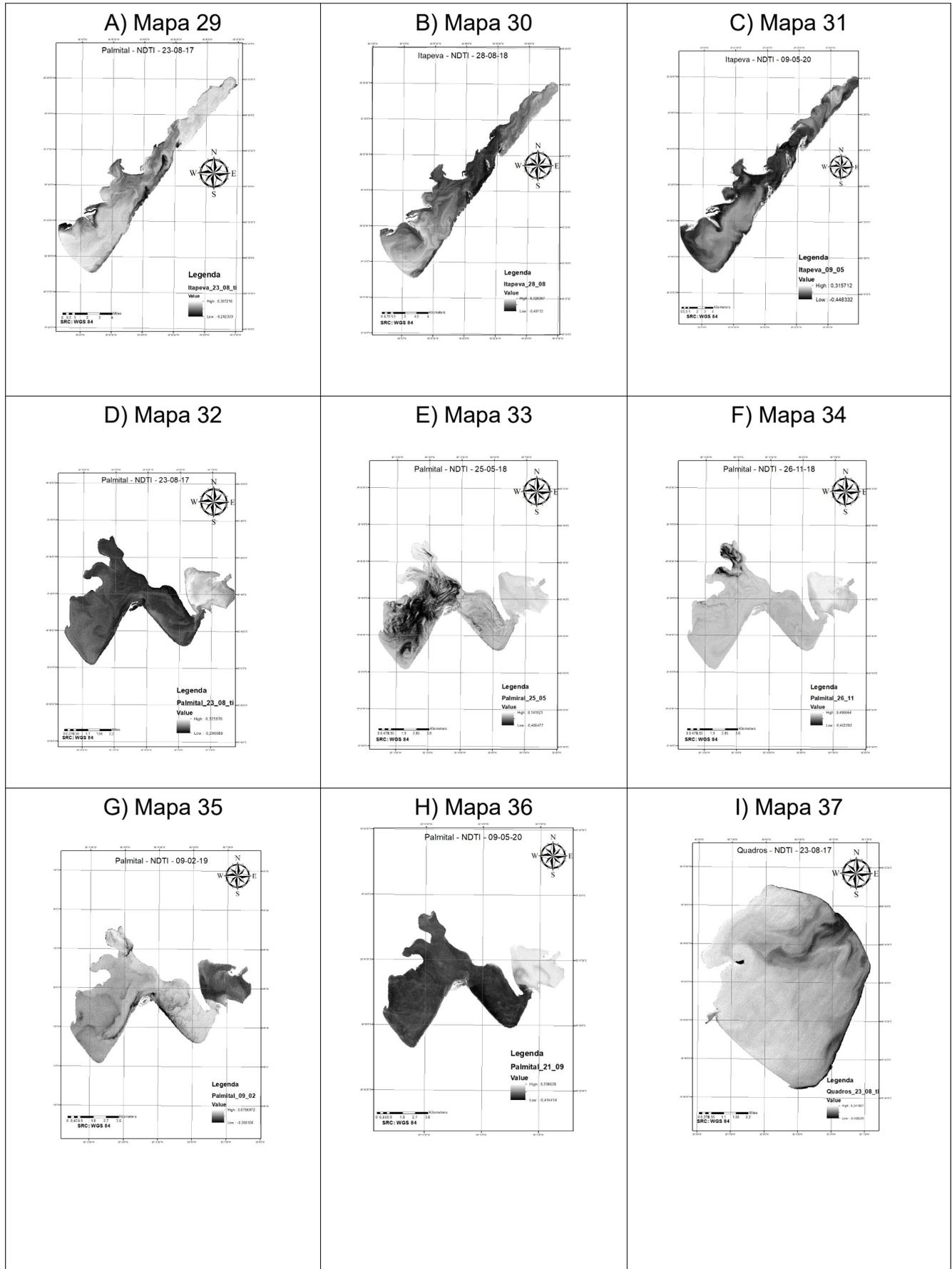
## Quadro 10. Variações NDTI



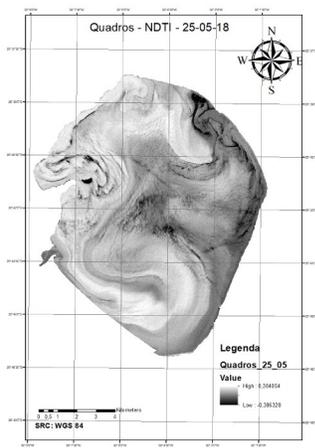
Legenda: Linha Azul – Ponto 1. Linha Vermelha – Ponto 2. Linha Amarela – Ponto 3 Fonte:

Elaborado pelo autor, 2021

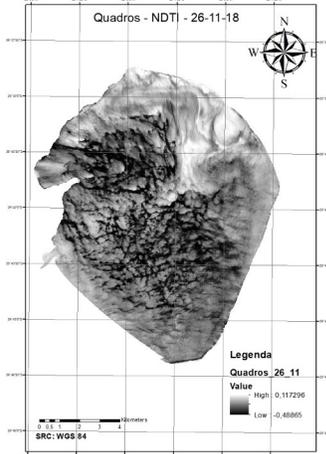
**Quadro 11. Mapas – NDTI**



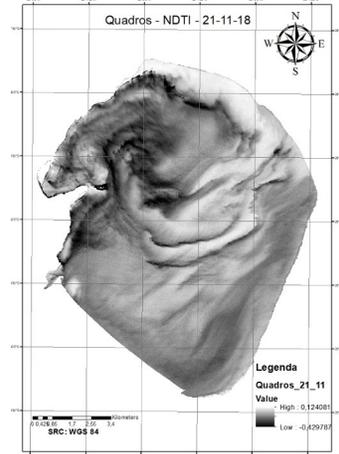
J) Mapa 38



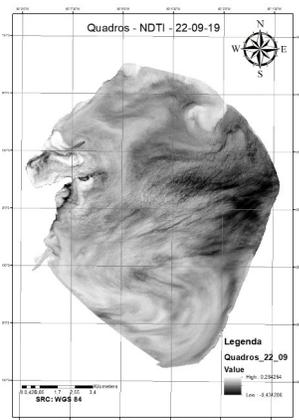
K) Mapa 39



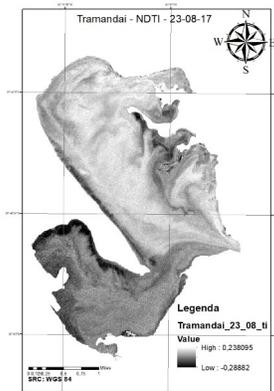
L) Mapa 40



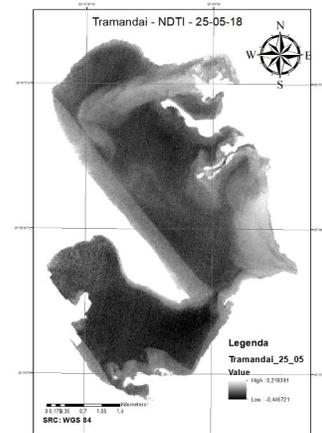
M) Mapa 41



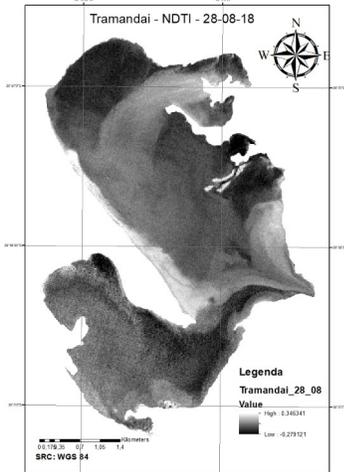
N) Mapa 42



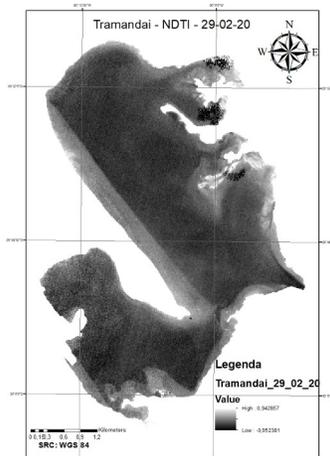
O) Mapa 43



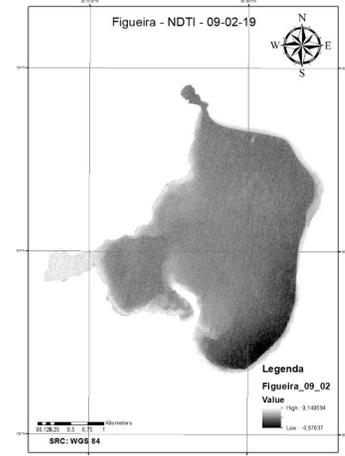
P) Mapa 44



Q) Mapa 45



R) Mapa 46



Fonte: Elaborado pelo autor. 2021

## Quadro 12. Variações NDPI

Gráfico 61

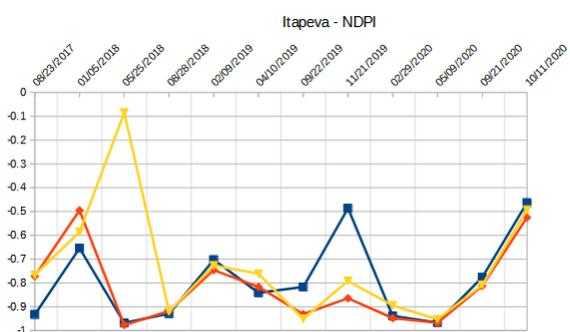


Gráfico 62

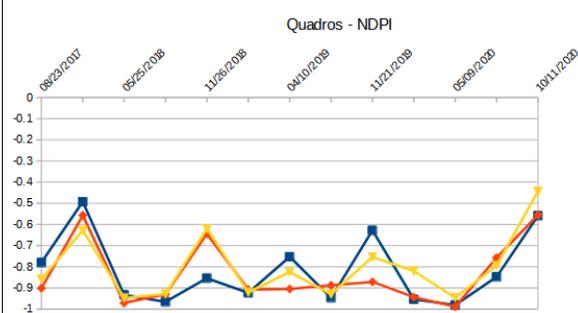


Gráfico 63

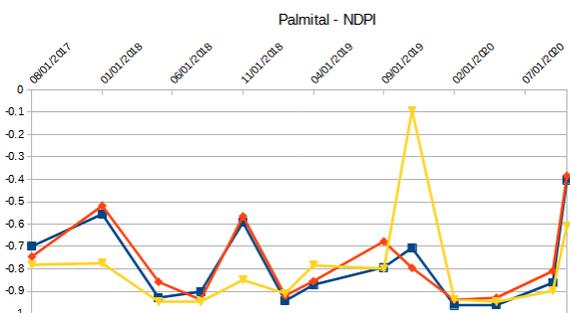


Gráfico 64

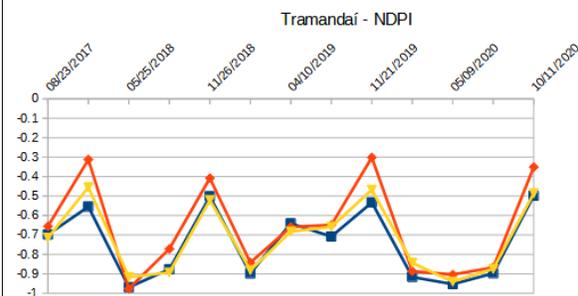


Gráfico 65

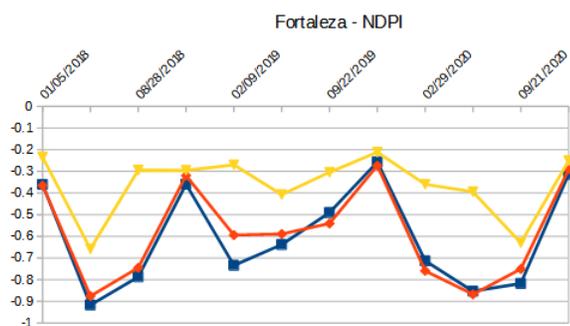
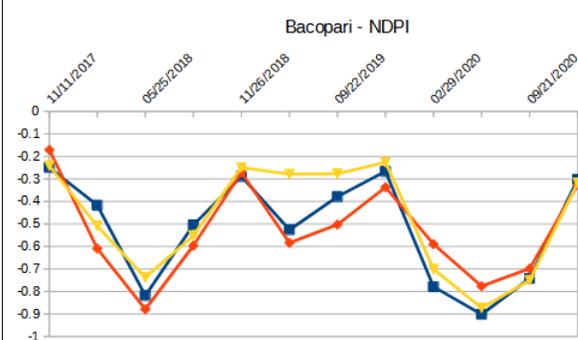
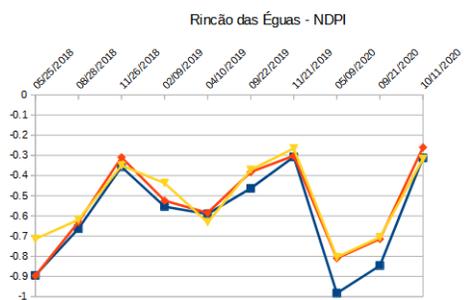
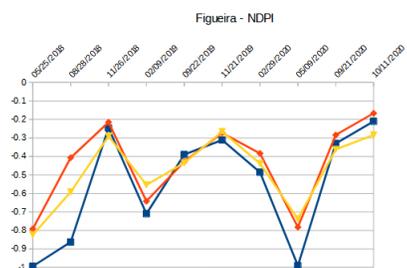


Gráfico 66

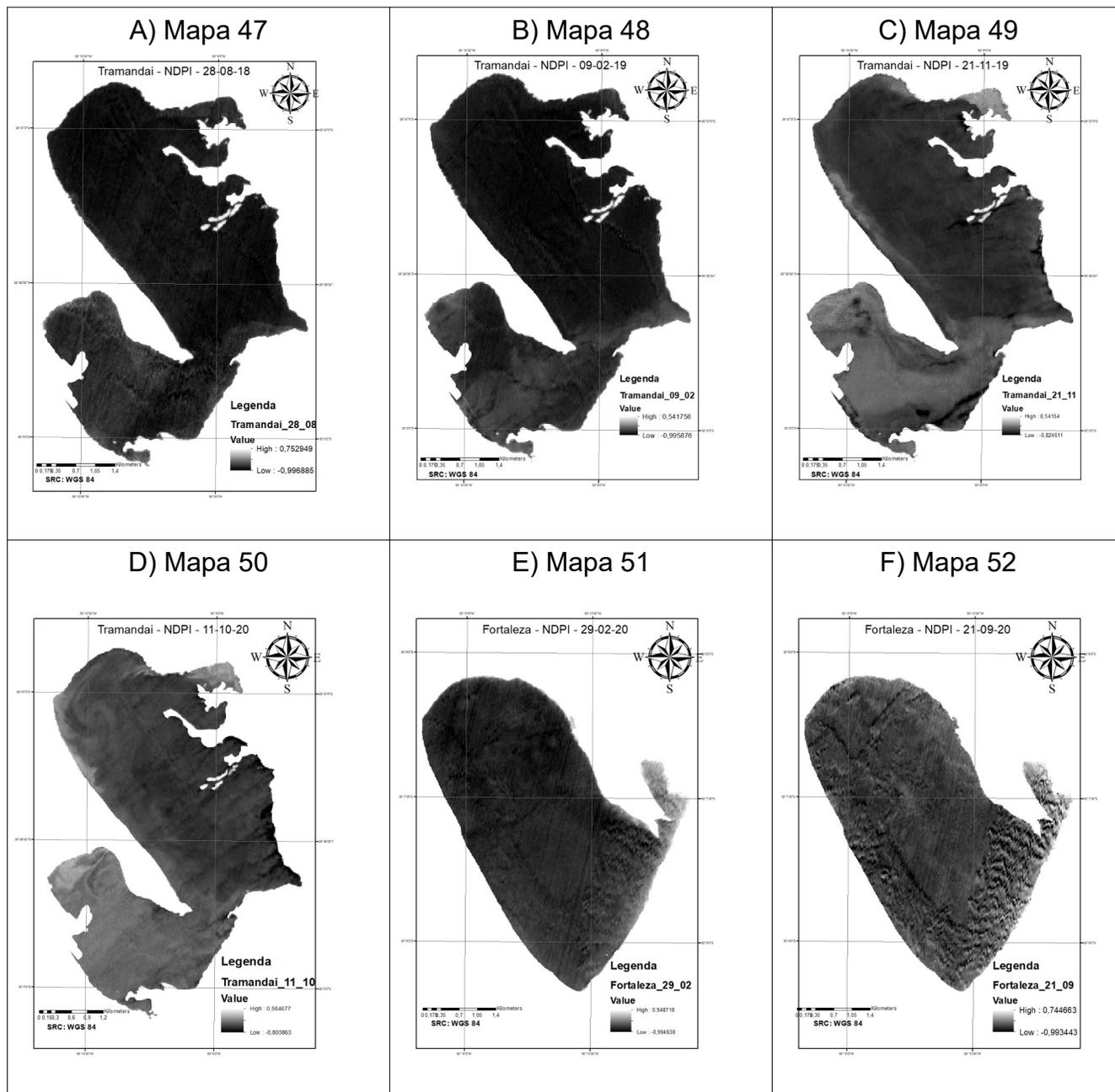


**Gráfico 67****Gráfico 68**

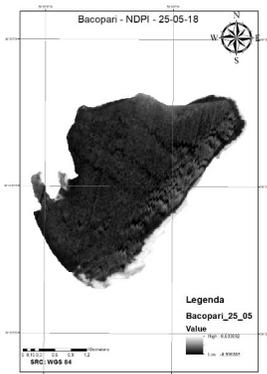
**Legenda: Linha Azul – Ponto 1. Linha Vermelha – Ponto 2. Linha Amarela – Ponto 3**

**Fonte: Elaborado pelo autor, 2021**

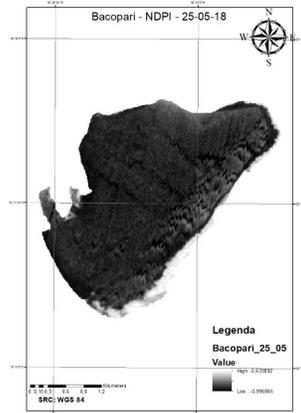
### Quadro 13 – Mapas NDPI



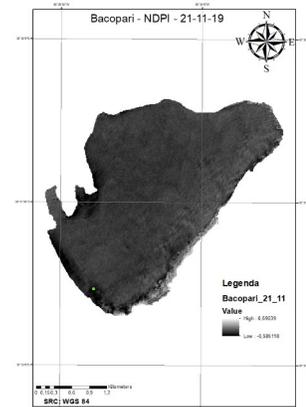
G) Mapa 53



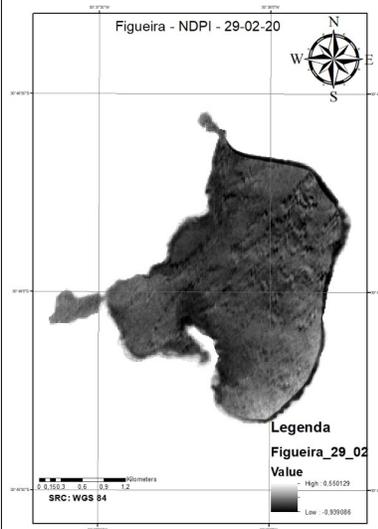
H) Mapa 54



I) Mapa 55



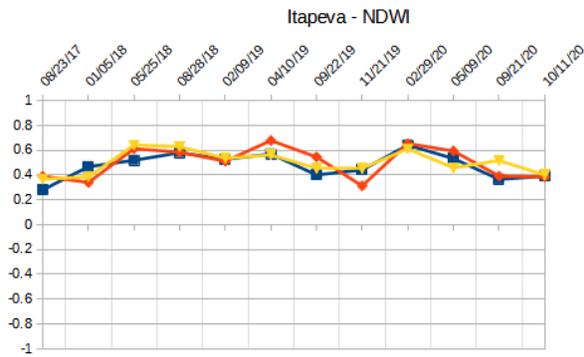
J) Mapa 56



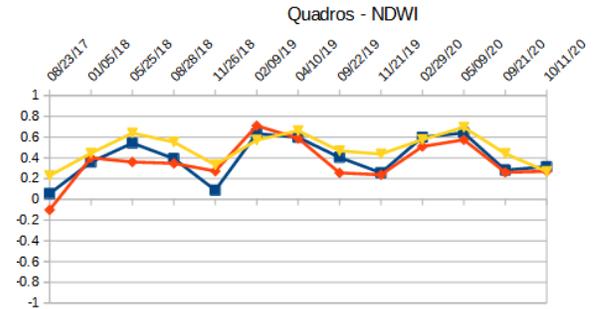
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

**Quadro 14. Variações NDWI**

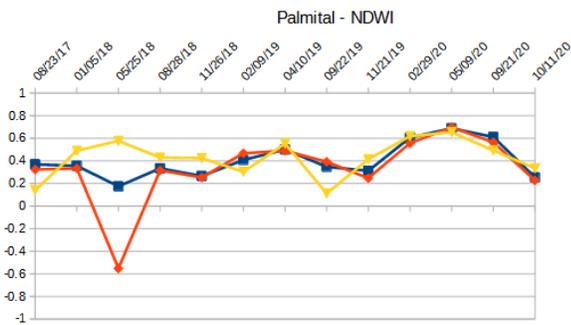
**Gráfico 69**



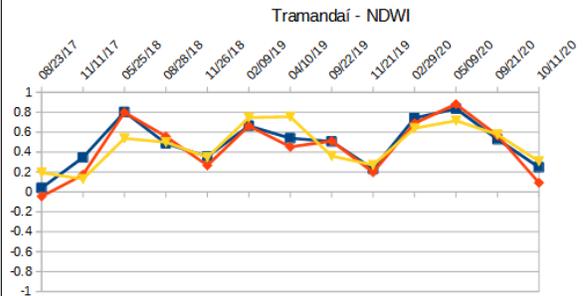
**Gráfico 70**



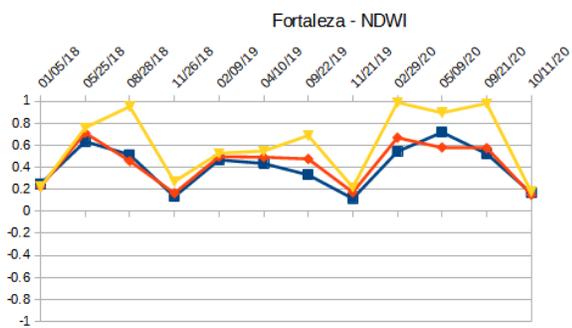
**Gráfico 71**



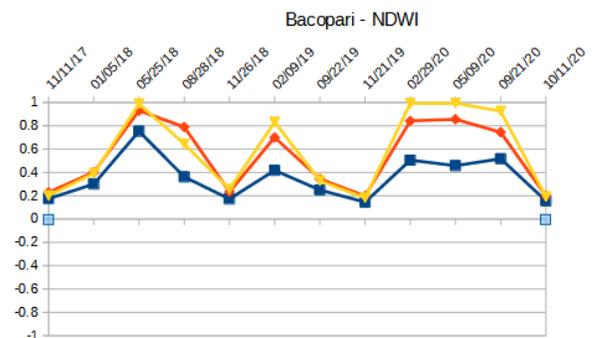
**Gráfico 72**

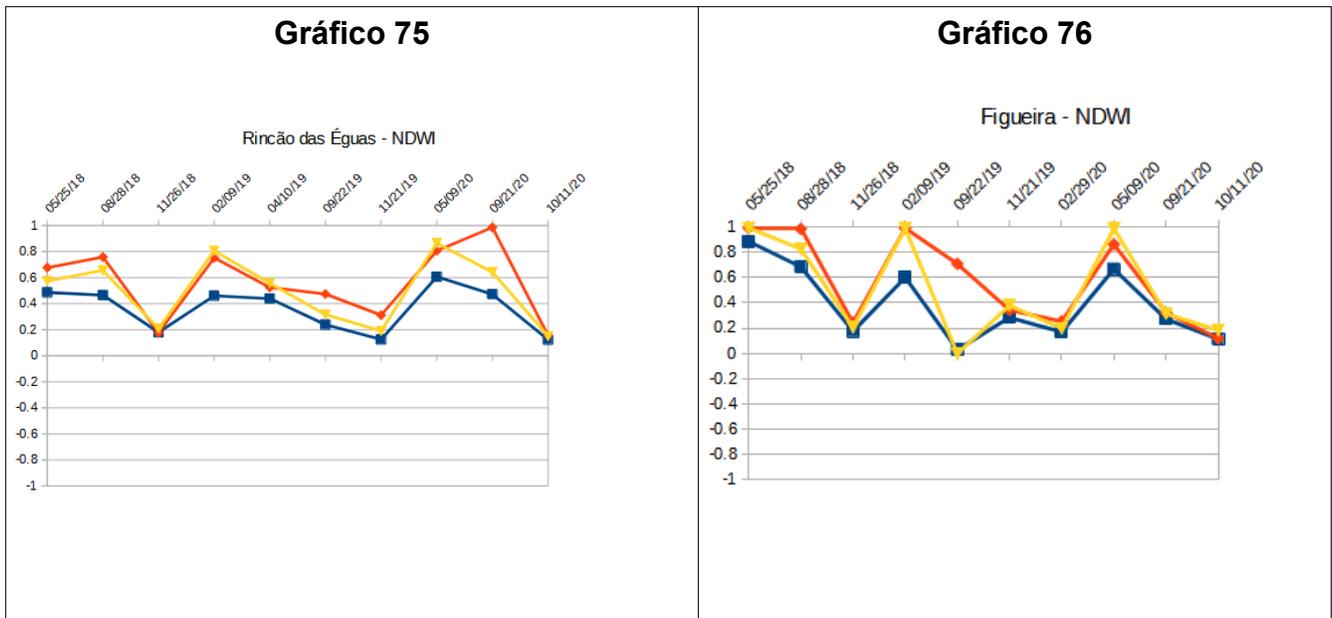


**Gráfico 73**



**Gráfico 74**

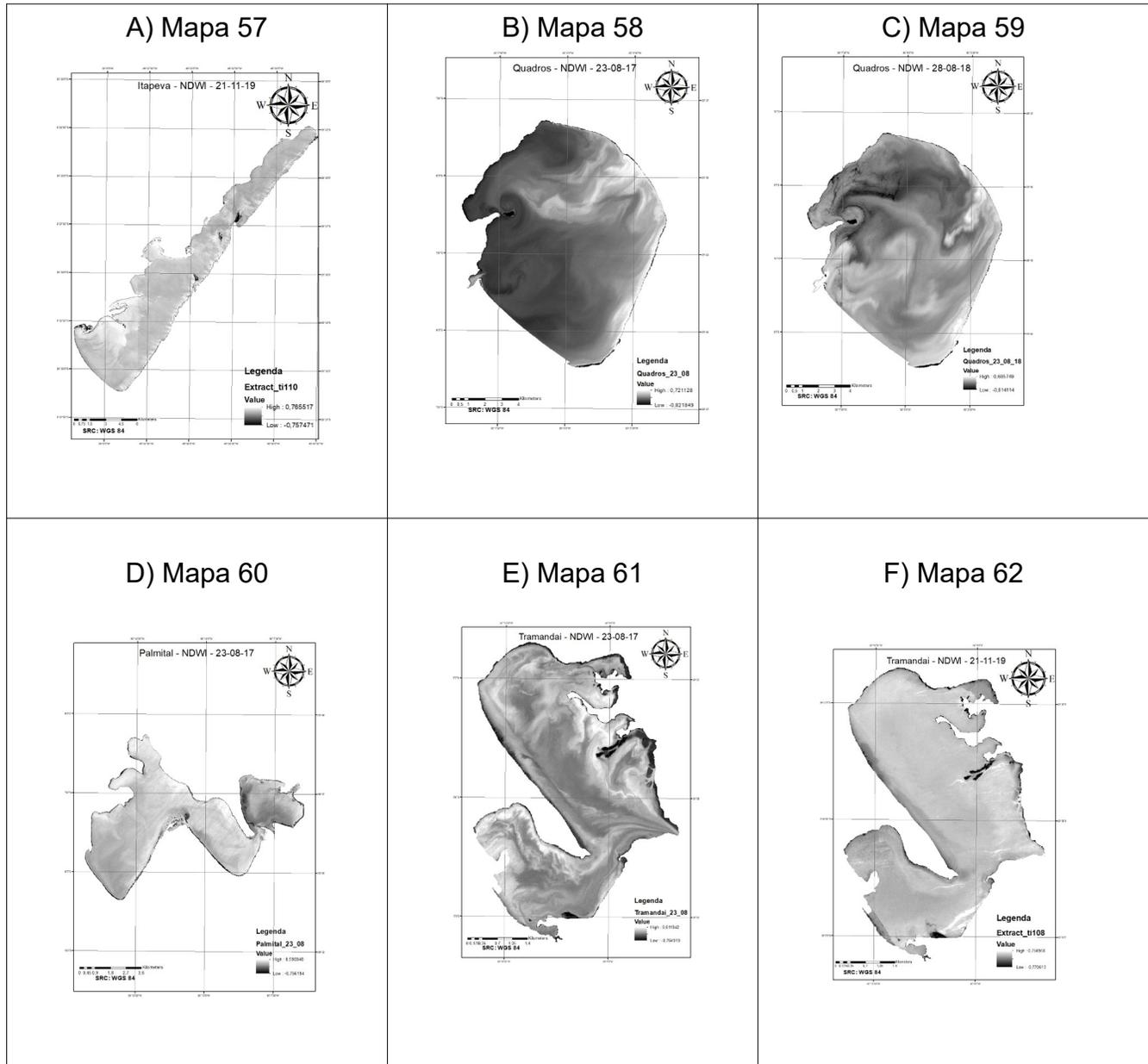




**Legenda: Linha Azul – Ponto 1. Linha Vermelha – Ponto 2. Linha Amarela –Ponto 3**

**Fonte: Elaborado pelo autor, 2021**

### Quadro 15: Mapas – NDWI



**Fonte: Elaborado pelo autor**

Os mapas elaborados apresentam as variações da resposta espectral nos lagos considerando os índices espectrais. Quanto mais próximos os valores forem de 1, mais claro/branco são os pixels, e quanto mais próximo de -1, os pixels apresentam tom mais escuro/preto. Devido ao comportamento espectral da água, a utilização de índices apresenta, na maioria dos casos, valores inferiores a 0. Com exceção do índice de NDWI - desenvolvido justamente para a detecção de água - espera-se valores mais elevados e pixels mais claros/brancos envolvendo NDWI em lagos.

O índice de NDTI identifica as variações nos valores de turbidez da água, identificados

por pixels mais claros como incremento na turbidez do corpo hídrico.

O índice de NDVI identifica a relação entre o comprimento de onda do vermelho e do infravermelho, utilizado mais comumente para caracterizar a vegetação. Apresenta pixels mais claros/brancos para as parcelas do corpo hídrico com maiores concentrações de clorofila-a.

-O índice de NDPI calcula a variação entre o comprimento de onda do verde e do infravermelho médio, e permite distinguir a áreas dos lagos que apresentam maior conteúdo de clorofila.

## 5. DISCUSSÕES

Os dados obtidos a partir de sensoriamento remoto e os coletados *in situ* ajudaram no entendimento da dinâmicas individuais dos lagos costeiros do litoral norte e médio, já que grande parte deles apresenta características individuais entre si. Alguns dos padrões observados dessa pesquisa estão de acordo com o apresentado nas referências bibliográficas, outros são distintos e estão relacionados as suas características locais.

### 5.1. Cálculo do Índice de Desenvolvimento Perímetro

Em relação ao cálculo do Índice de Desenvolvimento de Perímetro dos lagos costeiros, os resultados mostraram que os lagos do litoral tendem a ter um formato mais regular e arredondado. Segundo Hakanson (1981) lagos de menor dimensão tendem a valores de F próximos de 1, enquanto lagos de maior dimensão tendem a valores de F superiores a 2.

Uma exceção foi o lago dos Quadros, que mesmo sendo um lago de grande porte apresentou valor de F baixo (1,25). Em comparação com outros lagos de porte similar com valores de F superiores a 2: Itapeva (2,82), Palmital (2,48) e Tramandaí (2,37). Os lagos costeiros com F próximo de 1 foram Quadros, Fortaleza, Bacopari, Rincão das Éguas e Figueira.

De acordo com Wetzel (2001) os valores de F influenciam na tendência a eutrofização de lagos costeiros. Valores de F elevados, formam áreas isoladas nos lagos que permitem ambientes mais calmos e de acumulação de nutrientes, e favorecem a floração de macrófitas e algas. Os formatos irregulares favorecem o acúmulo de sedimentos e a floração de organismos aquáticos nas partes mais isoladas e calmas dos lagos costeiros. O formato irregular criam um efeito de borda, formando áreas isoladas que favorecem o acúmulo de nutrientes e floração de fitoplâncton (HAKANSON, 1981).

Segundo Cardoso (2009) as irregularidades das margens criam um efeito de borda, tornando os ambientes propícios para a biodiversidade tanto animal quanto vegetal. Herzer (2013) ao analisar a morfometria do lago do Peixoto e suas implicações para a qualidade da água, conclui que o formato pouco regular, a presença de ventos constantes (que causam a ressuspensão de nutrientes) e a baixa profundidade criam condições propícias para o aumento dos níveis tróficos.

Para Souza *et al.* (2017) as alterações decorrentes de atividades humanas nas

margens dos lagos, geram formatos mais regulares e impedem a formação de pontos isolados no corpo hídrico, o que favorece a eutrofização. Fatin-Souza *et al.* (2008) descreveram a interação entre o formato e a suscetibilidade a eutrofização dos corpos hídricos. Para Souza *et al.* (2017) e Fatin-Souza *et al.* (2008), os formatos dos lagos estão correlacionados com a disponibilidade hídrica. Quando ocorrem períodos de estiagem, o formato regular e a baixa profundidade facilitam a ação eólica e a ressuspensão de sedimentos e nutrientes, criando ambientes propícios para a floração de macrófitas e a eutrofização do lago.

Nossos dados mostram que os resultados do Índice de Desenvolvimento de Perímetro estão de acordo com Hakanson (1981); Schafer (1988); COSTA *et al.* (2016), em que os lagos costeiros que possuem o fundo regular e menor profundidade também apresentam formatos regulares, e reforçam a ideia de que lagos mais rasos tendem a possuir o perímetro circular. Lagos com menor área de lâmina d'água apresentam valores de F mais baixos e, portanto, tendem a serem mais regulares e circulares. Os lagos de maior extensão em área apresentam valores de F mais elevados, sendo mais irregulares devido a sua extensão.

## 5.2 Cor e Variação Sazonal

O sensoriamento remoto ótico por satélite representa uma oportunidade de integrar métodos tradicionais para avaliar a cor da água de lagos (ZHANG; GIARDINO; LI, 2017; LEHMANN *et al.*, 2018). Apresenta boa cobertura espacial e temporal, e a possibilidade de monitorar muitos lagos simultaneamente e com custos reduzidos (GIARDINO *et al.*, 2014).

A análise da cor dos lagos costeiros, utilizando imagens de Sentinel-2, mostrou diferenças pouco significativas entre as estações, considerando o período do inverno-verão 2019 e inverno-verão 2020. As diferenças mais evidentes são espaciais, se considerarmos a sua localização, os lagos maiores na porção norte e lagos menores na porção sul.

Os lagos ao norte (Itapeva, Quadros, Palmital e Tramandaí) apresentam maior variação de cor entre as estações de inverno e verão do que os lagos mais ao sul (Fortaleza, Bacopari, Figueira e Rincão das Éguas). Essa maior variação está relacionada, em grande parte, a descarga fluvial proveniente dos rios e que deságuam nos lagos Itapeva e Quadros, transportando maior carga de sedimentos e nutrientes para o sistema (BECKER, 2002; LOPARDO, 2002; FRANKENBERG, 2004; LISSNER, 2011). De acordo com Wetzel (2001) a cor de um corpo d'água se relaciona com o seu conteúdo e nutrientes presentes.

Nos lagos ao sul, a principal fonte de aporte de água é proveniente da precipitação, e

o transporte entre lagos ocorre via escoamento em subsuperfície (SCHAFER, 1986). O escoamento transporta uma grande quantidade de metros cúbicos de água, e o tempo de subsidência varia de acordo com as características geológicas de cada lago. Em lagos sem escoamento de afluentes, os períodos de grandes precipitações são importantes para a sua manutenção pois introduzem ao sistema uma grande quantidade hídrica a partir de água subterrânea (Relatório Bacia a e b, 2005; ROCHA; ANDRADE; NIENCHESKI; 2015).

As diferenças locais e individuais de cada lago costeiro tornam o sistema único entre si. Cada lago pode apresentar diferenças substanciais em sua composição, o que afeta a cor da lâmina d'água. Essas diferenças podem estar relacionadas a variações na sua composição (VARGAS CUERVO, 2016; ZHANG; GIARDINO; LI, 2017), ao uso e ocupação nas áreas próximas a margem (WETZEL, 2001), e em como o sistema escoar a água para os corpos hídricos (SCHAFER, 1986). Essa dinâmica resulta na quantidade de nutrientes e sedimentos disponíveis, e afeta os níveis tróficos do lago e modificando sua cor.

O lago de Tramandaí possui características e cor diferentes do lago dos Barros, em Osório. Apesar de fazerem parte da mesma bacia hidrográfica a dinâmica e interação que regem a cor dos lagos é diferente. O lago de Tramandaí recebe água dos rios que deságuam nos lagos costeiros, e percorrem até o estuário de Tramandaí (SCHAFER, 1986; CASTRO, 2016). Com valores de turbidez de 12,27 no verão e de 52,7 no inverno de 2019. O lago dos Barros é um lago isolado e não recebe contribuintes de rios ou de outros lagos. Fazendo sua dinâmica estar mais relacionada ao regime de ventos da região e ao escoamento subterrâneo (AGOSTINI, 2019).

Além disso, pode haver relação entre a concentração de TSS e a salinidade, a partir da entrada de águas costeiras marinhas no lago de Tramandaí, e que pode influenciar a dinâmica de deposição de sedimentos e a sua resposta espectral como observado em Rodrigues (2014).

Essa diferença do aporte de águas, e conseqüentemente de carga sedimentar, propicia os lagos mais ao sul uma cor mais escura (Figueira, Fortaleza, Bacopari, Rincão das Águas) do que nos lagos mais ao norte (Itapeva, Quadros, Palmital, Tramandaí) (SCHAFFER, 1986; WETZEL, 2001; LISSNER, 2011).

A cor da água pode ser caracterizada com relação ao conteúdo de sedimentos inorgânicos (WETZEL, 2001; WANG *et al.*, 2021), de matéria orgânica dissolvida (WETZEL, 2001; NOVO, 2019), de macrófitas aquáticas (LEHMANN *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2021), e clorofila-a (LONDE; NOVO; CALIJURI, 2005).

Um lago com alta taxa de sedimentos em suspensão apresenta cor aparente como

amarelo, enquanto um lago com grande quantidade de matéria orgânica dissolvida para o marrom (WANG *et al.*, 2021; NOVO, 2019). Quantidades variáveis de macrófitas e de níveis de clorofila-a em um lago mudam a sua cor para tons mais próximos a percepção de verde. Os constituintes presentes em um lago mudam as suas propriedades opticamente ativas – refletindo diferentes comprimentos de ondas. Fazendo a nossa percepção mudar de acordo com diferentes concentrações (LEHMANN *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2021).

A profundidade do lago também pode influenciar na sua variação da cor. Lagos rasos e com alta transparência da lâmina d'água (PILLA *et al.*, 2020), podem ser influenciados pelas suas características de fundo, refletindo na sua coloração (HAKANSON, 1981; SCHAFER, 1986; WETZEL, 2001; CALIMAN, 2010; FRUMIN *et al.*, 2017). A transparência da água reflete a capacidade de transmissão de luz de um corpo d'água (ZHANG *et al.*, 2021).

Os dados obtidos *in situ* mostram uma maior quantidade de fitoplâncton e clorofila-a nos lagos durante o período do verão. As maiores quantidades ocorreram nos lagos de Palmital (37.42 ug/L) e (13298 cels/mL) e Figueira (22.77 ug/L) e (265286 cels/mL). O lago de Palmital apresentou valores altos também para fitoplâncton para o período do inverno (6486 cels/mL), o lago da Figueira manteve um valor equivalente de clorofila-a (22.42 cels/mL) e uma diminuição de fitoplâncton (46424 ug/L), embora ainda alto se comparado com os outros lagos.

Para SDT os lagos da porção sul apresentam valores mais elevados no período do verão. Nos lagos de Fortaleza e Figueira ocorreram os maiores valores (101 e 102 mgSDT/L). No período do inverno, ocorreu um incremento de SDT em todos os lagos, uma exceção foi o lago da Figueira em que correu diminuição (46 mgSDT/L).

Em relação a SST os lagos Fortaleza, Rincão das Éguas e Figueira apresentaram valores semelhantes tanto no inverno quanto no verão (7 mg SST/L). O lago Rincão das Éguas apresentou valores (7 mg SST/L) no inverno e (74 mg SST/L) no verão. Nos lagos da porção norte ocorreu aumento de SST no período de inverno, com exceção do lago de Itapeva que apresentou diminuição no verão (122 mg SST/L) e no inverno (7 mg SST/L).

A transparência da lâmina d'água foi maior em todos os lagos analisados no período do verão. O ponto de coleta no lago de Itapeva apresentou os valores mais elevados de transparência, tanto no inverno quanto no verão (2 m e 1.7 m). A variação da Turbidez foi maior nos lagos da porção norte. Os lagos Palmital, Quadros e Tramandaí, apresentaram os maiores valores no inverno (102,94 NTU, 81.26 NTU e 52.8 NTU).

É importante destacar, de acordo com Schafer (1986) e Søndegaarda *et al.* (2015) que, de maneira geral, análises temporais mais longas podem apresentar resultados mais

precisos. Lagos costeiros são ambientes dinâmicos, e podem ocorrer mudanças significativas em sua aparência e concentrações em poucas horas ou dias.

### 5.3 Correlação entre dados de Sensoriamento Remoto e Parâmetros Limnológicos

A análise da correlação entre os dados obtidos a partir de sensoriamento remoto e os parâmetros limnológicos obtidos *in situ*, pode auxiliar no entendimento da dinâmica dos lagos costeiros (MORAES, 2002; LOUIS *et al.*, 2016; NOVO, 2019).

Dados obtidos de sensoriamento remoto podem ser correlacionados com os dados obtidos de coleta *in situ*, embora com algumas limitações devido à dificuldade de obtenção de imagens em datas concomitantes ou próximas as de obtenção de dados limnológicos. Lagos costeiros mudam rapidamente sua composição e aparência em decorrência de mudanças rápidas no ambiente lagunar (SCHAFFER, 1986; SØNDEGAARDA *et al.*, 2015).

Martini *et al.* (2006) utilizaram imagens LANDSAT-TM 5 para estimar mudanças na aparência superficial de um lago de acordo com as variações de clorofila. Identificaram alterações de acordo com variações na população de macrófitas aquáticas, e as áreas mais suscetíveis a alterações tróficas.

Machado & Baptista (2015) utilizaram dados do sensor LANDSAT-TM-5 para analisar e mapear as alterações tróficas num lago causadas pela maior descarga de efluentes domésticos. As alterações ao longo do tempo foram correlacionadas com o incremento das atividades que ocorreram no entorno do lago. O lago apresentou estágios tróficos que puderam ser mapeados e identificados utilizando dados de sensoriamento remoto.

De acordo com Ronghua *et al.* (2009); Mouw *et al.* (2015); Barbosa, Novo, Martins (2019), o uso de sensoriamento remoto para análise de corpos hídricos costeiros também pode incorrer em limitações. Isso ocorre porque parte das técnicas utilizadas são focadas na identificação da alteração da cor de águas oceânicas e não de águas continentais. A complexidade presente na análise de corpos hídricos dinâmicos cria limitações entre a demanda pela análise e capacidade de análise. Mudanças ocorrem em espaços temporais curtos devido a ação eólica que mantêm os sedimentos e nutrientes em suspensão (SCHAFFER, 1986; CARDOSO & MARQUES, 2006).

Os resultados de correlação para os índices espectrais (NDVI, NDTI, NDWI e NDPI) variaram entre valores inferiores a zero e não mais alto que 0,70. Os os resultados acima de 0,2, valores baixos de correlação podem estar relacionados a dificuldade de obtenção de imagens nos períodos de coleta (SØNDEGAARDA *et al.*, 2015). Os índices NDTI, NDPI e

NDVI tiveram um total de correlações equivalente – entre 10 e 12 correlações positivas. O índice de NDWI é para a detecção de água. Foi o índice que melhor apresentou correlações – acima de 18 correlações positivas - com os parâmetros que modificam a resposta espectral da água.

Pereira (2008) utilizou dados de sensoriamento remoto para correlacionar com variáveis limnológicas em um reservatório. Apesar da defasagem de 49 dias entre a coleta de dados e a aquisição da imagem, os resultados para turbidez e transparência de secchi foram considerados adequados. Campos (2009) utilizou o sensor MODIS e obteve correlação de 0,69 entre dados *in situ* e os obtidos por imagens orbitais para estimar concentrações de clorofila-a em reservatórios. Valério; Kampel; Stech (2010) utilizaram o sensor MODIS com correlações de 0,73 no comprimento de onda do verde, 0,83 no vermelho e 0,35 no azul. A banda do vermelho foi especialmente útil na identificação e correlação com a clorofila-a. A banda espectral do azul obteve correlações mais baixas devido ao maior espalhamento atmosférico.

Arraut *et al.* (2005) utilizaram espectrorradiometria de campo para estimar as faixas espectrais que melhor se correlacionam com dados obtidos em um lago. As faixas 600-700 nm e 750-850 nm obtiveram correlações positivas, especialmente no comprimento de onda 676 nm para a correlação com a clorofila-a. Watanabe *et al.* (2010) obtiveram correlações positivas entre turbidez e dados orbitais, e identificaram as áreas mais afetadas por incrementos de turbidez decorrentes de sedimentos. Paula *et al.* (2011) avaliaram a resposta espectral de um lago de acordo com diferentes concentrações de sólidos em suspensão, com  $r^2$  de 0,82 na faixa de 741 nm.

Almeida (2009) utilizou sensoriamento remoto para estimar as concentrações de macrófitas e fitoplâncton em lagos salinos. A correlação entre o Infravermelho Próximo no comprimento de 556 nm foi positiva devido a quantidade de pigmentos existentes na vegetação aquática, e em 807 nm devido as concentrações de matéria orgânica dissolvida.

Toniolo *et al.* (2018) identifica as propriedades opticamente ativas em lagos, que alteram a resposta espectral do sensor LISS-III/ResourceSat-2. A regressão linear explicou alterações nas faixas espectrais de 690, 708 e 772 nm devido as concentrações de clorofila-a e de sólidos em suspensão. As correlações positivas ajudam a entender as alterações provocadas por diferentes concentrações de sedimentos e clorofila-a de um lago.

Caballero *et al.* (2019) utilizaram um modelo empírico para correlacionar dados Sentinel-2 com clorofila-a, utilizando 15 pontos de amostragem. Os dados das bandas espectrais do sensor apresentaram correlações significativas (0,5) e positivas (0,8) para o

modelo proposto. A espacialização permitida pelo modelo identificou incrementos de clorofila-a nas partes mais rasas do lago.

Nas correlações entre dados de sensoriamento remoto e dados limnológicos obtidos *in situ* podem ocorrer variações de acordo com o modelo estatístico adotado (MORAES, 2002) e sensores utilizados (NOVO, 2019). Uma das maiores dificuldades é a obtenção de dados orbitais que coincidam com as datas de coletas.

#### 5.4. Sensoriamento Remoto e Índices Espectrais

Utilizar índices espectrais derivados de dados obtidos de sensoriamento remoto pode auxiliar no entendimento, manejo e gestão de lagos costeiros (NOVO, 2019). Os dados obtidos *in situ* mostraram que os índices espectrais foram capazes de detectar alterações sazonais nos lagos costeiros. A variação da resposta espectral de cada índice pode estar relacionada as variações limnológicas individuais do lago.

El-Asmar *et al.* (2013) utilizaram NDWI e MNDWI para estimar alterações temporais em um lago. O índice foi capaz de detectar alterações causadas por assoreamento das margens, permitindo mapear as áreas do lago que não mais faziam parte do corpo hídrico de acordo com o aumento da margem. Li *et al.* (2019) analisaram a variação interanual utilizando NDWI, MNDWI e NDVI, para diferenciar águas permanentes de águas sazonais. Os índices NDWI e MNDWI detectaram as variações que os corpos hídricos sofreram, de aumento, diminuição ou não presença de pixels que denotem a presença de água. O valor de NDVI foi capaz de detectar as áreas de águas sazonais que eram substituídas por vegetação ao longo do tempo.

A clorofila-a possui picos na região do infravermelho que pode ser detectada com o índice NDVI em lagos (ROUSE *et al.*, 1974). Lissner & Guasselli (2013) utilizaram o NDVI, e mapearam as variações sazonais de biomassa fitoplanctônica e as áreas suscetíveis a incrementos de sedimentos e de vegetação, possibilitando a correlação com aumento de pluviosidades e diferenças na profundidade média do lago Itapeva.

A variação da turbidez está relacionada com o aumento da reflexão causada por sedimentos em suspensão que alteram as propriedades opticamente ativas do corpo hídrico (LACAUX *et al.*, 2006). A diferença da reflexão espectral entre as bandas do vermelho e do verde permite detectar as variações na quantidade de turbidez em corpos hídricos. O índice NDTI permite detectar essas variações.

Algumas mudanças nos lagos podem ser causadas por atividades antrópicas

relacionadas ao uso e ocupação do solo. Doneia & Farag (2019) utilizaram uma combinação de NDWI e NDVI, para detectar mudanças nas margens de um lago de acordo com o incremento da atividade humana. O aumento da descarga de efluentes resultaram no aumento de nitrogênio e fósforo relacionadas as atividades agropastoris. Como resultado uma maior quantidade de macrófitas e plantas aquáticas levaram ao assoreamento precoce do corpo hídrico.

Watanabe *et al.* (2018) utilizaram o índice de Normalized Difference Chlorophyll Index (NDCI). Esse índice, similarmente ao índice de NDVI, utiliza a variação da banda espectral do vermelho para detectar alterações de origem orgânica na água. O resultado é positivo para análises que envolvem clorofila-a, pois a banda espectral do vermelho e do infravermelho próximo são as mais suscetíveis para detectar alterações nos níveis tróficos.

Somvanshi (2011) utilizou do índice de NDTI para espacializar a turbidez e detectar os pontos mais suscetíveis a incrementos de acordo com o uso e ocupação do solo do entorno. O mapeamento espacializou áreas mais suscetíveis a diminuição da qualidade da água, possibilitando uma melhor gestão hídrica. A utilização do índice de NDPI, segundo Lacaux *et al.* (2006), possibilita também a identificação de áreas úmidas, e identificar corpos hídricos sazonais em meio a vegetação que pudessem se tornar foco de vetores para enfermidades nas populações locais.

Em nosso estudo, a maioria dos lagos apresentou variações sazonais nos valores dos índices, para os três pontos de análise. Para o índice de NDTI os lagos Itapeva, Quadros, Palmital, Tramandaí e Rincão das Águas apresentam variações sazonais pequenas.

O índice de NDPI apresentou picos e baixas expressivas em todos os lagos analisados. O índice de NDVI foi o que também apresentou maiores variações de acordo com os pontos de análise. Os gráficos de NDWI apresentaram valores com poucas variações para os lagos de Itapeva e Palmital.

## 6. CONCLUSÕES

A partir dos objetivos propostos, os resultados obtidos permitiram as seguintes conclusões:

- O desenvolvimento de perímetro dos lagos do litoral norte e médio apresentou em sua maioria formato regular com valores de F mais próximos de 1. O valor de F é indicativo de formatos regulares de acordo com a profundidade do lago e o seu tamanho. Lagos menores resultaram em valores de F menor. A exceção foi o lago dos Quadros que possui tamanho expressivo e profundidade média em relação ao seu valor de F;

- A variação da cor dos lagos costeiros está relacionada com sua localização. Os lagos ao norte têm cor aparente diferente dos lagos ao sul. Essa diferença de cor está relacionada ao aporte de água e sedimentos recebidos pelos lagos. Os lagos da porção norte estão próximos de grandes afluentes que descarregam maior quantidade de água e sedimentos para o sistema, enquanto os lagos mais ao sul não possuem a descarga das mesmas fontes. A diferença na cor não apresentou diferenças sazonais entre inverno e verão, porém, só foram analisados a diferença entre um ano de análise entre inverno e verão. Uma maior variação temporal de dados pode aprofundar melhor a ideia de variação sazonal da coloração;

- A correlação entre os índices espectrais e os dados limnológicos apesar de baixa, foi observada. É possível estabelecer uma correlação entre a resposta espectral do índice e o dado obtido *in situ*. É possível utilizar a análises de índices espectrais para lagos costeiros de maneira a detectar alterações em sua composição físico-química.

- Os valores de índices espectrais mostram variação sazonal. Foram detectadas diferenças entre inverno e verão nos lagos nos índices NDVI, NDTI, NDWI e NDPI. Combinados as correlações observadas, torna-se o uso de índices espectrais para a detecção de variações limnológicas nos lagos costeiros viável para estudos de qualidade hídrica.

## 7.REFERÊNCIAS

- DE ALMEIDA ; LONGHITANO, G.A; DO AMARAL, C.H; T.I.R Isnard Ribeiro. **Detecção da biodiversidade de coberturas vegetais secundárias pela resposta espectral de pigmentos e água foliar em imagens do sensor hiperespectral CASI-1500**. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, v. 14, p. 1135-1142, 2009.
- Arraut, E. M., Rudorff, C. D. M., Barbosa, C. C. F., Carvalho, J. C., Pereira Filho, W., & Novo, E. M. L. M.. **Estudo do comportamento espectral da clorofila e dos sólidos em suspensão nas águas do lago grande de Curuai (Pará), na época da seca, através de técnicas de espectroscopia de campo**. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12, 2447-2456. (2005)
- BARBOSA, C. C. F.; NOVO E. M. L. M.; MARTINS, V. S. **Introdução ao Sensoriamento Remoto de Sistemas Aquáticos: Princípios e aplicações**. 1º Edição. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos. 2019, 161p.
- BECKER, V. **Variação da estrutura e da biomassa fitoplanctônica na Lagoa Itapeva (litoral norte do Rio Grande do Sul) em função da hidrodinâmica**. 2002. 125. Dissertação (Mestrado em Ecologia – Instituto de Biociências), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- BREUNIG, FÁBIO & PEREIRA FILHO, WATERLOO & GALVÃO, WELLISON & WACHHOLZ, L. **AValiação da concentração de sólidos em suspensão e clorofila no Reservatório de Passo Real, RS -BRASIL**. (2016)
- CALIMAN, A. *et al.* **Temporal coherence among tropical coastal lagoons: a search for patterns and mechanisms**. *Brazilian Journal of Biology.*, v. 70, n. 3, p. 803-814, 2010.
- CARDOSO, L. S.; MARQUES, D. M. L. M. **Relações do Índice de Qualidade de Água (IQA) com a Variação Temporal e Espacial da Comunidade Zooplanctônica do Sistema Lagunar de Tramandaí (Litoral Norte do Rio Grande do Sul - RS Brasil)**. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.11, n. 2, p. 123-134, 2006.
- CABALLERO, CASSIA & GUEDES, HUGO & FRAGA, ROSIMÉRI & MENDES, KAREN & FASSONI-ANDRADE, ALICE & MARTINS, VITOR. **Sensoriamento remoto aplicado ao estudo de águas interiores: monitoramento de clorofila-a em uma lagoa subtropical**. 2019
- CARDOSO, S. J. **Influência Da Morfometria De Lagos Na Diversidade Fitoplanctônica**. 104p. Dissertação (Ecologia). Programa de Pós-Graduação em Ecologia. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2009.
- CASTRO, D. **Qualidade das águas na bacia hidrográfica do rio Tramandaí/Dilton de**

Castro, Cacinele Mariana da Rocha. Porto Alegre: Via Sapiens, 2016. 172 p.

CASTRO, D ; MELLO, R.P. **Atlas Ambiental Da Bacia Hidrográfica Do Rio Tramandaí**. Porto Alegre: Via Sapiens, 2013. 179 p.

COSTA, D. F. S.; GUEDES, D. R. C.; MOREIRA DA SILVA, D. E. **Identificação dos padrões morfométricos dos sistemas lacustres e flúvio-lagunares no litoral setentrional do Rio Grande do Norte**. **Boletim Paulista de Geografia**, v. 94, p. 65-83, 2016.

VARGAS CUERVO, G. "Determination of the Relative Sediment Concentration in Water Bodies Using Remote Sensing Methodology." **Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía**, 26 (1), p. 11-24, 2016. doi: 10.15446/rcdg.v26n1.56021

DONIA, N. S.; FARAG, H. Monitoring of Egyptian Coastal Lakes Using Remote Sensing Techniques. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. XLII-2/W13, p.693-699, 2019.

EL-ASMAR, H. M.; HEREHER, M. E. **Change detection of the coastal zone east of the Nile Delta using remote sensing**. *Environ Earth Sci*, v. 62, p.769-777,2011.

EL-ASMAR, H. M.; HEREHER, M. E.; EL KAFRAWY, S. B. **Surface area change detection of the Burullus Lagoon, North of the Nile delta, Egypt, using water indices: a remote sensing approach**. *Egypt. J. Rem. Sens. Space Sci.*, v.16 p. 119-123, 2013.

ESA – European Space Agency <<https://www.esa.int/>>. Acesso em: 15 de abril de 2020

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

ESTEVES, F. A.; PETRY, A. C. **Limnologia em pesquisas ecológicas de longa duração: a experiência nos lagos costeiros do norte fluminense (PELD-SÍTIO 5)**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Coordenação do Sítio-Peld 5. 201-

FANTIN-CRUZ, I.; LOVERDE, O. S.; GIRAR, P. **Caracterização morfométrica e suas implicações na limnologia de lagos do Pantanal Norte**. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*. v. 30, 2008.

FERMINO, F. **Análise de vinte anos de dados limnológicos e bacteriológicos nas lagoas costeiras do litoral norte do Rio Grande do Sul - Marcelino Ramos, Peixoto e Pinguela (Osório/RS)**. *Revista Eletrônica Científica da UERGS*. 5. 57-74. 10.21674/2448-0479.51.57-74. 2019

FEPAM – Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler <<http://www.fepam.rs.gov.br/>>. Acesso em: 15 de abril de 2020

FORSTER, I. D. L.; MILLINGTON, R.; GREW, R. G. **The impact of particle size controls**

**onstream turbidity measurements: some implications for suspended sediment yield estimation.** In Bogen, J.; Walling, D. E.; Day, T.J., editors, **Erosion and sediment transport monitoring programmes in river basins.** Proceedings of the Oslo Symposium, August 1992. IAHS Publication No. 210, 51–

FRITZ, C.; KUHWARD, K.; SCHNEIDER, T.; GEIST, J.; OPPELT, N. **Sentinel-2 for mapping the spatio-temporal development of submerged aquatic vegetation at Lake Starnberg (Germany).** *Journal of Limnology*. v. 78, 2019. Doi 10.4081/jlimnol.2019.1824.

FRUMIN, G.T., HALDNA, M. & TAMMEORG, O. **Trophic Status of Peipus Lake.** *Russ J Gen Chem* **87**, 3266–3271 (2017). F

GARCIA-RODRIGUEZ, J.; TAVERA, R. **Phytoplankton composition and biomass in a shallow monomictic tropical lake.** *Hydrobiologia*, 467, p. 91-98, 2002.

GIANASI, B. L.; OLIVEIRA, A. O.; PEREIRA FILHO, W.; COPERTINO, M. S. **Caracterização Espectral da Água e da Vegetação Aquática Submersa no Estuário da Lagoa dos Patos (RS, Brasil).** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. (SBSR)., 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011.

GIARDINO, C.; BRESCIANI, M.; STROPPIANA, D.; OGGIONI, A.; MORABITO, G. **Optical remote sensing of lakes: an overview on Lake Maggiore.** *J. Limnol.*, 73(s1), p. 201-214, 2014. DOI: 10.4081/jlimnol.2014.817

GEGE, P. **Radiative transfer theory for inland waters.** In: **Bio-optical Modeling and Remote Sensing of Inland Waters.** Elsevier, 2017. p. 25-67.

HAASE, J.; STRINGUINI, M. H.; SILVA, M. L. B. C.; RODRIGUES, M. L. K.; KOCH, S. M. V. **QUALIDADE DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS DO LITORAL NORTE EMÉDIO DO RIO GRANDE DO SUL.** 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2002.

HAKANSON, L. **A manual of lake morphometry.** Springer-Verlag. Berlin. 1981

HERZER, Letícia Araujo. **ASPECTOS MORFOMÉTRICOS E DIAGNÓSTICO DA QUALIDADE DA ÁGUA DA LAGOA PEIXOTO, LITORAL NORTE DO RIO GRANDE DO SUL, BRASIL.** 60p. Trabalho de Conclusão de Curso (Ciências Biológicas). Departamento de Biologia. Universidade Estadual do Rio Grande do Sul. Imbé, 2013

HEREHER, M.; SALEM, M.; & DARWISH, D. **Mapping water quality of Brullus Lagoon using remote sensing and geographic information system.** *Journal of American Science*. v. 7, p.138-143, 2010.

HUANG, K.; LULLA, K. **Modelling waterquality using Thematic Mapper data: Case of**

**Lake Michigan.** Geocarto International 2, 3–1. 1986

JENSEN, J.R. **Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective.** 2nd Edition, Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River. (2007)

JENSEN, J. R. **Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective.** 2. ed. Essex: Pearson Education Limited, 2014

JEPPENSEN, E., J. P. JENSEN, M. SØNDERGAARD, T. LAURIDSEN & F. LANDKILDEHUS, 2000. **Trophic structure, species richness and biodiversity in Danish lakes: changes along a phosphorus gradient.** Freshwater Biology 45: 201–213.

KLEMAS, Victor. **Remote Sensing Techniques for Studying Coastal Ecosystems: An Overview.** Journal of Coastal Research. 27. 2-17. 2011.

KUMAR, D Nagesh, TV, Reshmidevi. **Remote Sensing Applications in Water Resources.** Journal of the Indian Institute of Science. 93. 163-188. 2013.

LANZER, R. M. **Lagos costeiros: Patriômomo Abiental do Rio Grande do Sul.Seminário Internacional Turismo e Arqueologia: Patrimônio Cultural e Ambiental.** v.2, n 3. Pelotas, RS: Editora da UFPEL. p.103-110, 2005.

LISSNER, J. B. **Varição do índice de vegetação por diferença normalizada na lagoa Itapeva, litoral norte do Rio Grande do Sul, Brasil, a partir de análise de séries temporais.** 120 p. Dissertação (Mestrado em Geografia). Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

LISSNER, J. B.; GUASSELLI, L. A. **Varição do índice de vegetação por diferença normalizada na lagoa Itapeva, litoral norte do Rio Grande do Sul, Brasil, a partir de análise de séries temporais.** Soc. & Nat., Uberlândia, 25 (2), p. 427-440, 2013.

LOPARDO, N. **Estudo hidrodinâmico e correlação com sólidos suspensos e turbidez na lagoa Itapeva do litoral norte do Estado do Rio Grande do Sul.** Unpublished MSc. Dissertation. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 168p. 2002

LACAU, J.P. Y. M. TOURRE, C. VIGNOLLE, J-A. NDIONE, AND M. LAFAYE. **Classification of Ponds from High-Spatial Resolution Remote Sensing: Application to Rift Valley Fever Epidemics in Senegal.** Remote Sensing of Environment, v. 106, p. 66-74, Elsevier Publishers: 2007

LEHMANN, M.K.; NGUYEN, U.; ALLAN, M.; van der WOERD, H.J. **Colour Classification of 1486 Lakes across a Wide Range of Optical Water Types.** Remote Sens. 2018, 10, 1273; doi:10.3390/rs10081273

- LONDE, L. R., NOVO, E. M. L. M., BARBOSA, C., & ARAUJO, C. A. S. (2016). **Water residence time affecting phytoplankton blooms: study case in Ibitinga Reservoir (São Paulo, Brazil) using Landsat/TM images.** *Brazilian Journal of Biology*, 76, 664-672.
- LI, Z.; FENG, Y.; DESSAY, N.; DELAITRE, E.; GURGEL, H.; GONG, P. **Continuous Monitoring of the Spatio-Temporal Patterns of Surface Water in Response to Land Use and Land Cover Types in a Mediterranean Lagoon Complex.** *Remote Sensing*. 11. 2019
- LIU, Y.; ISLAM, M. A.; & GAO, J. **Quantification of shallow water quality parameters by means of remote sensing.** *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 27(1), p. 24-43, 2003
- LOBO, F. L et al. **Propriedades da reflectância de Microcystis aeruginosa (Cyanobacteria) manipulada em altas concentrações de pigmentos.** 2009.
- KIRK, J. T. O. **Light and photosynthesis in aquatic systems (3rd ed.).** Cambridge: Cambridge University. Press. 2011
- MARTINI, L.C.P.; MATTOS, D.S.; BARBOSA, D.F.P.; RECH, A.I.B. **Uso de sensoriamento remoto orbital para avaliação da distribuição espacial de Clorofila\_a na Lagoa da Conceição - Florianópolis, SC.** *Engenharia Sanitária e ambiental*, v.11, n. 4, p. 318-324; 2006
- MACIOLINO, Oliveira, S.M.L.; Machado, K.B.; Carneiro, F.M.; Ferreira, M.E.; Carvalho, P.; Vieira, L.C.G.; de Moraes Huszar, V.L.; Nabout, J.C. **Environmental factors affecting chlorophyll-a concentration in tropical floodplain lakes, Central Brazil.** *Environ. Monit. Assess.* 2016, 188, 611.
- M. MAIN-KNORN, B. PFLUG, J. LOUIS, V. DEBAECKER, U. MÜLLER-WILM, F. GASCON, **Sen2Cor for Sentinel-2**, Proc. SPIE 10427, Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIII, 1042704, 2017.
- MACHADO, M. T. S.; BAPTISTA, G, M. M. **Sensoriamento remoto como ferramenta de monitoramento da qualidade da água do Lago Paranoá (DF).** *Engenharia Sanitária Ambiental*, v. 21, n.2, 2016.
- MARINHO, C. C.; FONSECA, A. I. S.; ESTEVES, F. A. **Impactos antrópicos nos lagos costeiros do norte do estado do Rio de Janeiro: uma revisão sobre a eutrofização artificial e gases de efeito estufa.** *Revista Brasileira de Pós-Graduação*. v. 13, p.703-728, 2016.
- MARQUES, P. P. **Programa de Qualidade de Águas.** *Ciência e Tecnologia* 1 (1). 1993.

MCFEETERS, S. K. **The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features.** *International Journal of Remote Sensing*, v.17, p.1425-1432.1996.

MORAES, E. C.; **Capítulo 1: Fundamentos de Sensoriamento Remoto.** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 2002.

MOREIRA, M. A.; **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologia de Aplicação** 3 edição. Viçosa: UFV, Editora Federal de Viçosa, 2007, 315p.

MOREIRA FILHO, J. C. C.. **Análise espectro-temporal de índices físicos e classificadores de imagens de sensoriamento remoto** (Master's thesis, Universidade Federal de Pernambuco). 2012

MOBLEY, C. **Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters.** (1994)

MOUW, C. B., Greb, S., Aurin, D., DiGiacomo, P. M., Lee, Z., Twardowski, M., ... & Craig, S. E. (2015). **Aquatic color radiometry remote sensing of coastal and inland waters: Challenges and recommendations for future satellite missions.** *Remote sensing of environment*, 160, 15-30.

DE MATOS VALÉRIO, Aline; KAMPEL, Milton; STECH, José Luiz. **Aplicação da técnica SAM (Spectral Angle Mapper) para dados hiperespectrais do corpo de água do reservatório de Manso, MT.** 2008

OWOLABI, A. A.; ADESALU, T. A. **Validating Chlorophyll-a concentrations in the Lagos Lagoon using Remote Sensing extraction and laboratory fluorometric methods.** *MethodsX*. v. 5., 2018. Doi 10.1016/j.mex.2018.09.014.

DE OLIVEIRA MARCIONILIO, S.M.L., MACHADO, K.B., CARNEIRO, F.M. *ET AL.* **ENVIRONMENTAL FACTORS AFFECTING CHLOROPHYLL-A CONCENTRATION IN TROPICAL FLOODPLAIN LAKES, CENTRAL BRAZIL.** *ENVIRON MONIT ASSESS* 188, 611 (2016). [HTTPS://DOI.ORG/10.1007/S10661-016-5622-7](https://doi.org/10.1007/S10661-016-5622-7)

PILLA, RACHEL & WILLIAMSON, CRAIG & ADAMOVICH, BORIS & ADRIAN, RITA & ANNEVILLE, ORLANE & CHANDRA, SUDEEP & COLOM-MONTERO, WILLIAM & DEVLIN, SHAWN & DIX, MARGARET & DOKULIL, MARTIN & GAISER, EVELYN & GIRDNER, SCOTT & HAMBRIGHT, KARL & HAMILTON, DAVID & HAVENS, KARL & HESSEN, DAG & HIGGINS, SCOTT & HUTTULA, TIMO & HUUSKONEN, HANNU & THIERY, WIM. **Deeper waters are changing less consistently than surface waters in a global analysis of 102 lakes.** *Scientific Reports*. 10. 10.1038/s41598-020-76873-x. 2020

RAMOS, B. V. C.; LANZER, R.; SCHAFFER, A. **Determinação da qualidade ambiental da**

- Lagoa da Fortaleza, Lagoa da Rodrinha e Lagoa do Cipó – Litoral Norte do Rio Grande do Sul.** IN: Turimos e Paisagem: Uma relação complexa, 2012, Caxias do Sul – RS. Anais do VII Seminário de Pesquisa em Turismo Ambiental do Mercosul, 2012
- RODRIGUES, J. P. 2014. **Caracterização bio-óptica das águas do estuário da Lagoa dos Patos, RS – Brasil. 2014**, 116 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física, Química e Geológica) – Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.
- ROUSE J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. **Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS.** Third ERTS Symposium, NASA SP-351. 1973
- DA ROCHA, C.M; DE ANDRADE, C.F.F; NIENCHESKI, L.F.H. **Descarga de água subterrânea para as lagoas costeiras do litoral norte do RS, Brasil. Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, v. 19, n. 2, p. 76-84, 2015.
- RONGHUA MA, DELU PAN, HONGTAO DUAN, QINGJUN SONG. **Absorption and scattering properties of water body in Taihu Lake, China: backscattering. International Journal of Remote Sensing**, 2009, 30(9): 2321-2335
- PAULA, SC DE et al. **Avaliação de índices espectrais aplicados a série multitemporal TM/Landsat-5 para o mapeamento de fitofisionomias e pastagem em ambiente de cerrado.** In: **Embrapa Territorial-Artigo em anais de congresso (ALICE).** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. Anais... São José dos Campos: INPE, 2011., 2011.
- PADILHA, R.S. 2001. **Contribuição á tipologia de lagos costeiros do litoral Norte do Rio Grande do Sul, com ênfase na comunidade fitoplanctônica.** Dissertação de Mestrado, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre
- PALMA-SILVA, C.; ALBERTONI, E. F.; ESTEVES, F. A. **Efeito de perturbações antrópicas sobre as comunidades de macrófitas e de macroinvertebrados associados (Lagoa Imboassica, RJ).** Brazilian Journal of Ecology, v. 11, p. 26-32, 2007.
- PEREIRA, Adriana Castreghini de Freitas. **Desenvolvimento de método para inferência de características físicas da água associadas às variações espectrais. Caso de Estudo: Reservatório de Itupararanga/SP.** 2008. 206 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2008.
- PILLA, R.M., WILLIAMSON, C.E., ADAMOVICH, B.V. *et al.* **Deeper waters are changing less consistently than surface waters in a global analysis of 102 lakes. Sci Rep** 10, 20514 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76873-x>
- SMITH, N.J.H., 1999. **The Amazon River forest: a natural history of plants,**

**animals, and people.** Oxford University Press, New York.

SØNDERGAARD, M DAVIDSON, T.A., AUDET, J., SVENNING, J.-C., LAURIDSEN, T.L., LANDKILDEHUS, F., LARSEN, S.E. AND JEPPESEN, E. (2015), **Eutrophication effects on greenhouse gas fluxes from shallow-lake mesocosms override those of climate warming.** *Glob Change Biol*, 21

QUANG, N. H.; JUN, S.; HIROTO, H.; NGUYEN, H. H. **Spatiotemporal Variation of Turbidity Based on Landsat 8 OLI in Cam Ranh Bay and Thuy Trieu Lagoon, Vietnam.** *Water*. 570. 2017.

ROCKETT, Gabriela C. et al. **Análise espaço-temporal dos ventos no extremo norte da Planície Costeira do Rio Grande do Sul, Brasil.** *Pesquisas em Geociências*, Porto Alegre, v. 44, n. 2, p. 203-219, 2017.

RUDORFF, Bernardo F. T; SHIMABUKURO, Yosio Edemir; CEBALLOS, Juan C. (Org.). **O sensor modis e suas aplicações ambientais no Brasil.** São José dos Campos, SP: Parêntese, 2007 423 p.

SANTINI, F.; ALBEROTANZA, L.; Cavalli, R.; PIGNATTI, S. **A two-step optimization procedure for assessing water constituent concentrations by hyperspectral remote sensing techniques: An application to the highly turbid Venice lagoon waters.** *Remote Sensing of Environment.*, 114, p. 887-898. 2010.

SCHAFFER, A. **Fundamentos de Ecologia e Biogeografia das Águas Continentais.** Porto Alegre: Editora da Universidade, UFRGS, 1985, 532p.

SCHAFFER, A. **Tipificação Ecológica dos lagos costeiros do Rio Grande do Sul, Brasil.** *Acta Limnológica Brasileira*, v. 2, p. 29-55,1988.

SCHAFFER, A.; MARCHETT, C. A.; SCHUH, S. M.; AHLERT, S.; LANZER, R. M. **Morphological characterization of eighteen lakes of the north and middle coast of Rio Grande do Sul, Brazil.** *Acta Limnologica Brasiliensia*, v. 26, n. 2, p.199-214, 2014.

SECRETARIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE: DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS. **Relatório Temático A.1.: Diagnóstico da dinâmica social da bacia.** Rio Grande do Sul. 2005.vol.1

SECRETARIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE: DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS. **Relatório Temático A.2.: Diagnóstico das disponibilidades Hídricas.** Rio Grande do Sul. 2005.vol.1

SECRETARIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE: DEPARTAMENTO DE RECURSOS

- HÍDRICOS. **Relatório Temático A.3.: Diagnóstico e Prognósticos das demandas Hídricas**. Rio Grande do Sul. 2005.vol.1
- SCHWARZBOLD, A.; SCHAFFER, A. **Gênese e Morfologia dos lagos costeiros do Rio Grande do Sul – Brasil**. Amazoniana, 9: 87-104, 1984
- Silva, O. F.; Hartmann, C. **Estudo da resposta espectral de lagos costeiros do Rio Grande do Sul, Brasil**. VI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR. Manaus - AM. 1990
- SOFFIATI, A. **Aspectos históricos dos lagos do Norte do Estado do Rio de Janeiro**. In: ESTEVES, F. A. (Ed.). **Ecologia dos lagos costeiros do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba e do Município de Macaé (RJ)**. Rio de Janeiro: NUPEM; UFRJ, 1998. cap. 1, p. 1-35.
- SOMVANSHI, S.; KUNWAR, P.; SINGH, N. B.; KACHHWAHA, T. S. **Water turbidity assessment in part of Gomti River using high resolution Google Earth's Quickbird satellite data**. *Geospatial World Forum*, 2011, Paper Reference No.: PN-60.
- SOUZA, A. S.; SILVA, L. L.; JESUS, T. B.; RODRIGUES, D. P.; *et al.* **Análise Morfométrica dos lagos de Feira de Santana-BA como Base para a Avaliação da Qualidade da Água**. In: Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2017.
- TEIXEIRA, S. G.; **Mapeamento de ambientes costeiros tropicais (Golfão Maranhense, Brasil) utilizando imagens de sensores remotos orbitais**. *Rev. Bras. Geof.* v. 27, n.1, p. 69-82, 2009. doi.org/10.1590/S0102-261X2009000500006.
- TOMAZELLI, L.J. **O Regime de ventos e a taxa de migração das dunas eólicas costeiras do Rio Grande do Sul, Brasil**. *Pesquisas*, 20(1), p. 18-26, 1993.
- TOMAZELLI, L.J.; VILLWOCK, J.A. **Geologia do sistema lagunar holocênico do Litoral Norte do Rio Grande do Sul**. *Pesquisas* (18). Porto Alegre: UFRGS. 1991. p.13-24
- TONIOLO, G. R. **Identificação de constituintes opticamente ativos na água do Lago Guaíba, a partir de dados de sensores orbitais e espectrorradiometria de campo**. 2016. p.104. Dissertação (Mestrado) -Curso de Sensoriamento Remoto, Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016
- TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, t. *limnologia*. são Paulo: oficina de textos, 2008. 631p.
- USGS – **United States Geological Survey** <<https://www.usgs.gov/>>. Acesso em: 12 de abril

de 2020

VARGAS CUERVO, Germán. **Determination of the relative sediment concentration in water bodies using remote sensing methodology. Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía**, v. 26, n. 1, p. 11-24, 2017.

VILLWOCK, J. A. 1984. **Geology of the Coastal Province of Rio Grande do Sul, Southern Brazil**. A Synthesis. *Pesquisas*, 16:5-49.

Watanabe, F. S., Miyoshi, G. T., Rodrigues, T. W., Bernardo, N. M., Rotta, L. H., Alcântara, E., & Imai, N. N.. **Inland water's trophic status classification based on machine learning and remote sensing data. Remote Sensing Applications: Society and Environment**, 19, 100326. 2020

Wetzel, R G. **Limnology - lake and river ecosystems**. 3ed. San Diego: Academic Press, 2001. 1006p

VOLPE, V.; SILVESTRI, S.; MARANI, M. **Remote sensing retrieval of suspended sediment concentration in shallow waters. Remote Sensing of Environment.**, v. 115, p. 44-54. 2011.

ZHANG, Y.; GIARDINO, C.; LI, L. **Water Optics and Water Colour Remote Sensing. Remote Sens.**, v. 9, 818; 2017. doi:10.3390/rs9080818

ZHANG, Y.; ZHANG, Y.; ZHOU, Y.; LI, N. **Remote sensing estimation of water clarity for various lakes in China. Water Research**, v. 192, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.116844>.

ZUANAZZI, P. T.; BARTELS, M. **Estimativas para a população flutuante do Litoral Norte do RS. Porto Alegre: FEE, 2016**