



**PROGRAMA DE  
PÓS-GRADUAÇÃO  
EM GEOCIÊNCIAS  
E MEIO AMBIENTE**

---

**Aplicação do Sensoriamento Remoto com imagens do satélite  
Sentinel-2 no estudo e validação de recursos hídricos no Brasil**

**PEDRO LUIZ BECARO CRIONI**

---

Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Campus de Rio Claro

Rio Claro - SP  
2024

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
“Júlio de Mesquita Filho”  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Câmpus de Rio Claro

PEDRO LUIZ BECARO CRIONI

**APLICAÇÃO DO SENSORIAMENTO REMOTO COM  
IMAGENS DO SATÉLITE SENTINEL-2 NO ESTUDO E  
VALIDAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL.**

Dissertação de Mestrado apresentada ao  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas do  
Câmpus de Rio Claro, da Universidade  
Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”,  
como parte dos requisitos para obtenção do  
título de Mestre em Geociências e Meio  
Ambiente.

Orientador: Chang Hung Kiang  
Coorientador: Elias Hideo Teramoto

Rio Claro - SP  
2024

C931a

Crioni, Pedro Luiz Becaro

Aplicação do Sensoriamento Remoto com imagens do satélite  
Sentinel-2 no estudo e validação de recursos hídricos no Brasil / Pedro  
Luiz Becaro Crioni. -- Rio Claro, 2024

144 p. : il., tabs., mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: Chang Hung Kiang

Coorientador: Elias Hideo Teramoto

1. Sensoriamento Remoto. 2. Recursos hidrológicos. 3. Sentinel-2.  
4. Qualidade da água. 5. Quantidade de água. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Universidade  
Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados  
fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

## **Impacto potencial desta pesquisa<sup>1</sup>**

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) são uma iniciativa global liderada pela Organização das Nações Unidas (ONU). Composta por 17 objetivos, essa iniciativa visa promover e orientar um desenvolvimento sustentável até 2030, abrangendo questões como erradicação da pobreza, igualdade de gênero, acesso à educação, preservação do meio ambiente e promoção da paz. O presente trabalho contribui para os seguintes objetivos:

- ODS 6 - Água potável e saneamento: Este trabalho, através do estudo, criação e validação de ferramentas de Sensoriamento Remoto utilizando imagens do satélite Sentinel-2, poderá contribuir para o monitoramento da qualidade da água, um aspecto crucial para garantir o acesso à água potável.
- ODS 14 - Vida na água: O foco deste trabalho no estudo dos recursos hídricos e na avaliação da qualidade da água por meio do Sensoriamento Remoto é importante para a proteção e sustentabilidade da vida aquática.
- ODS 15 - Vida terrestre: Ao monitorar a umidade do solo e o volume de reservatórios hídricos, este trabalho contribui para a gestão sustentável dos ecossistemas terrestres.
- ODS 17 - Parcerias e meios de implementação: A utilização de imagens de satélite e técnicas de Sensoriamento Remoto neste trabalho demonstra a importância das parcerias tecnológicas para alcançar os objetivos de desenvolvimento sustentável.

---

<sup>1</sup> De acordo com a Portaria UNESP 117-2022 e Instrução AT-PROPG N°02 (22/12/2022), passa a ser recomendado que todas as dissertações e teses, defendidas a partir dessa data apresentem uma descrição do impacto esperado relacionado aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável

## **Potential impact of this research**

The Sustainable Development Goals (SDGs) are a global initiative led by the United Nations (UN). Comprising 17 goals, this initiative aims to promote and guide sustainable development by 2030, addressing issues such as poverty eradication, gender equality, access to education, environmental preservation, and peace promotion. This work contributes to the following goals:

- **SDG 6 - Clean Water and Sanitation:** This work, through the study, creation, and validation of Remote Sensing tools using Sentinel-2 satellite images, could contribute to the monitoring of water quality, a crucial aspect to ensure access to potable water.
- **SDG 14 - Life Below Water:** The focus of this work on the study of water resources and the assessment of water quality through Remote Sensing is essential for the protection and sustainability of aquatic life.
- **SDG 15 - Life on Land:** By monitoring soil moisture and the volume of water reservoirs, this work contributes to the sustainable management of terrestrial ecosystems.
- **SDG 17 - Partnerships for the Goals:** The use of satellite images and remote sensing techniques in this work demonstrates the importance of technological partnerships in achieving sustainable development goals.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
“Júlio de Mesquita Filho”  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Câmpus de Rio Claro

PEDRO LUIZ BECARO CRIONI

APLICAÇÃO DO SENSORIAMENTO REMOTO COM IMAGENS  
DO SATÉLITE SENTINEL-2 NO ESTUDO E VALIDAÇÃO DE  
RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL.

Dissertação de Mestrado apresentada  
ao Instituto de Geociências e Ciências  
Exatas do Câmpus de Rio Claro, da  
Universidade Estadual Paulista “Júlio  
de Mesquita Filho”, como parte dos  
requisitos para obtenção do título de  
Mestre em Geociências e Meio  
Ambiente.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Chang Hung Kiang - Orientador  
IGCE / UNESP / Rio Claro (SP)

Prof. Dr. Danilo Marques de Magalhães  
IGCE / UNESP / Rio Claro (SP)

Dr. Eduardo Landulfo  
IPEN / São Paulo (SP)

Conceito: Aprovado.

Rio Claro (SP), 07 de maio de 2024.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todas as pessoas que contribuíram para o êxito desta dissertação. Cada um de vocês desempenhou um papel essencial em minha jornada acadêmica, e sou imensamente grato por todo o apoio e incentivo que recebi.

Primeiramente, agradeço ao meu pai, Rogério Crioni, que desde a minha infância me encorajou a explorar a natureza e a compreender o funcionamento do meio ambiente. Suas explicações, embora simples, foram fundamentais para despertar meu interesse. Obrigado por estar sempre ao meu lado e por me inspirar a seguir este caminho.

Também manifesto minha gratidão à minha mãe, Milena Becaro Crioni. Como professora de escola pública, ela sempre foi um exemplo de perseverança e dedicação. Seu amor e empenho na minha educação moldaram quem sou hoje. Sou eternamente grato por tudo que fez por mim.

Aos meus familiares, expresso minha sincera gratidão por estarem presentes em minha jornada. Menciono especialmente minha irmã Giovana, minha avó Sonia, e minhas tias Mirela e Michela, que sempre estiveram ao meu lado nos momentos necessários. Sua presença e apoio significam muito para mim.

Em memória, dedico um agradecimento especial ao meu avô materno, Ailton Becaro, e à minha avó paterna, Diva Arnosti, que nos deixaram durante o meu mestrado. Suas memórias continuarão vivas em mim para sempre.

Com carinho, agradeço à minha companheira, Carolina, por todo o apoio, amor e companheirismo.

Aos meus amigos, cujo apoio foi inestimável ao longo dos anos, deixo aqui meu sincero agradecimento. Embora não mencione todos os nomes com receio de esquecer alguém, saibam que são muito especiais para mim.

Aos colegas do LEBAC, agradeço a amizade e colaboração ao longo destes anos. Em especial, menciono meu orientador, Chang Hung Kiang, que confiou em mim para o desenvolvimento deste trabalho, e meu coorientador Elias Hideo Teramoto, cujos ensinamentos foram uma base sólida para meu crescimento como pesquisador.

Por fim, expresso minha gratidão à CAPES. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

A todos, meu muito obrigado.

## RESUMO

O Sensoriamento Remoto é um conjunto de técnicas amplamente utilizado para obter informações sobre a superfície da Terra, com destaque para o estudo e monitoramento dos recursos hidrológicos. Os métodos convencionais de coleta e monitoramento *in situ* são onerosos e oferecem cobertura insuficiente em todo o mundo, devido às vastas extensões territoriais em diversos países, incluindo o Brasil. Nesse contexto, o Sensoriamento Remoto surgiu na década de 1970 como uma alternativa mais acessível para o monitoramento da qualidade e quantidade dos recursos hídricos. Este estudo tem como objetivo desenvolver e aplicar técnicas de Sensoriamento Remoto multiespectral, por meio da utilização de imagens do satélite Sentinel-2, com o propósito de atender às demandas de qualidade e quantidade do monitoramento hidrológico no Brasil. Foram analisados quatro estudos de caso, dois deles sobre qualidade da água e dois sobre quantidade de água. No monitoramento da qualidade da água, um modelo foi criado para acompanhar o deslocamento da pluma de turbidez no rio Paraopeba após o rompimento da Barragem I da mina do Córrego do Feijão, da mineradora Vale, localizada em Brumadinho, Minas Gerais. Além disso, foi realizado um estudo para avaliar modelos propostos por outros pesquisadores para o monitoramento de clorofila em corpos d'água na Região Metropolitana de São Paulo. Para atender às demandas de quantidade de água, o Sensoriamento Remoto foi utilizado para estimar o volume de armazenamento de água em reservatórios de pequeno e médio porte no semiárido brasileiro, bem como para desenvolver o Modelo Óptico Trapezoidal (OPTRAM) para estimar a umidade do solo nas proximidades da área urbana de Rio Claro, São Paulo. Essas abordagens demonstraram resultados confiáveis e representativos, contribuindo para o monitoramento hidrológico e a gestão adequada dos recursos hídricos. Em síntese, o Sensoriamento Remoto se apresenta como uma ferramenta alternativa acessível para o estudo e monitoramento dos recursos hidrológicos, permitindo estimar a turbidez, avaliar a concentração de clorofila, estimar o volume de armazenamento de água em reservatórios e determinar a umidade do solo. Tais abordagens são fundamentais para a compreensão e gestão dos recursos hídricos, principalmente em regiões com escassez e limitação de água.

Palavras chaves: Sensoriamento Remoto, recursos hidrológicos, Sentinel-2, qualidade da água, quantidade de água.

## **ABSTRACT**

Remote sensing encompasses a set of techniques widely used to obtain information about the Earth's surface, particularly for studying and monitoring hydrological resources. Conventional in situ collection and monitoring methods are costly and provide insufficient coverage worldwide due to the vast territorial extensions in various countries, including Brazil. In this context, remote sensing emerged in the 1970s as a more accessible alternative for monitoring the quality and quantity of water resources. This study aims to develop and apply multispectral remote sensing techniques using Sentinel-2 satellite images to meet the demands of hydrological monitoring in Brazil. Four case studies were analyzed: two focused on water quality and two on water quantity. For water quality monitoring, a model was created to track the displacement of the turbidity plume in the Paraopeba River following the rupture of Dam I at the Córrego do Feijão mine, owned by Vale, in Brumadinho, Minas Gerais. Additionally, a study was conducted to evaluate models proposed by other researchers for monitoring chlorophyll in bodies of water in the Metropolitan Region of São Paulo. To address water quantity demands, remote sensing was used to estimate the water storage volume in small and medium-sized reservoirs in the Brazilian semi-arid region and to develop the Trapezoidal Optical Model (OPTRAM) for estimating soil moisture near the urban area of Rio Claro, São Paulo. These approaches demonstrated reliable and representative results, contributing to effective hydrological monitoring and water resource management. In summary, remote sensing presents itself as an accessible and valuable tool for studying and monitoring hydrological resources, allowing the estimation of turbidity, evaluation of chlorophyll concentration, estimation of water storage volume in reservoirs, and determination of soil moisture. These methods are essential for understanding and managing water resources, particularly in regions with water scarcity and limitations.

Keywords: Remote Sensing, hydrological resources, Sentinel-2, water quality, water quantity.

## LISTA DE FUGURAS

|                                                                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1- Localização da área de estudo e distribuição das 49 estações de monitoramento in situ de turbidez; local do rompimento da barragem e três estações de medição .....                             | 45 |
| Figura 2 - Mapa da área de estudo com os reservatórios.....                                                                                                                                               | 47 |
| Figura 3 - Semiárido brasileiro: limites do semiárido brasileiro e localização dos 48 reservatórios utilizados no presente estudo de caso .....                                                           | 49 |
| Figura 4 - Localização do município de Rio Claro, onde se encontra a área de estudo. Também são apresentados os locais onde as amostras de solo foram coletadas para determinação da umidade do solo..... | 50 |
| Figura 5 - Mapa de caracterização das unidades geológicas de Rio Claro, escala 1:750.000..                                                                                                                | 51 |
| Figura 6 - Fluxograma do roteiro metodológico para o estudo de caso da estimativa de turbidez. ....                                                                                                       | 57 |
| Figura 7 - Gráficos de dispersão dos modelos.....                                                                                                                                                         | 62 |
| Figura 8 - Boxplot para a comparação da dispersão do erro entre modelos.....                                                                                                                              | 64 |
| Figura 9 - Fluxograma do roteiro metodológico para o estudo da estimativa de concentração de clorofila-a.....                                                                                             | 65 |
| Figura 10 - Exemplo de variação de volume ao longo do tempo em um reservatório adquirido do banco de dados do INSA. ....                                                                                  | 66 |
| Figura 11 - Coremas (PB): Composição de cor verdadeira RGB e limite de área inundada para reservatório identificado pelo cálculo do índice NDWI, 2021.....                                                | 69 |
| Figura 12 - Fluxograma do roteiro metodológico para o estudo da estimativa de volume de água armazenada nos pequenos e médio reservatórios da região semiárida brasileira. ....                           | 72 |
| Figura 13 - Curvas de distribuição granulométrica de cinco tipos de solos representativos nos quais a umidade do solo foi medida em laboratório.....                                                      | 75 |
| Figura 14 - Ilustração do Modelo Ótico Trapezoidal conceituado (OPTRAM).....                                                                                                                              | 77 |
| Figura 15 - Mapa de uso e cobertura da terra no município de Rio Claro. ....                                                                                                                              | 79 |
| Figura 16 - Fluxograma do roteiro metodológico para o estudo da estimativa de volume de umidade do solo no município de Rio Claro. ....                                                                   | 84 |
| Figura 17 - Fluxograma do trabalho .....                                                                                                                                                                  | 86 |
| Figura 18 - Boxplot para valores sazonais de turbidez.....                                                                                                                                                | 88 |
| Figura 19 - Boxplot das variações dos valores de turbidez no ano de 2019.....                                                                                                                             | 89 |
| Figura 20 - Hidrograma das três estações de medição observadas.....                                                                                                                                       | 90 |

|                                                                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 21 - Composição cor-verdadeira reservatório Retiro Baixo. ....                                                                                                 | 91  |
| Figura 22 - Gráfico de dispersão da refletância.....                                                                                                                  | 92  |
| Figura 23 - Mapa de distribuição de turbidez.....                                                                                                                     | 94  |
| Figura 24 - Composição RGB cor verdadeira da imagem Sentinel-2 para o dia 28/10/2020. .                                                                               | 99  |
| Figura 25 - Aplicação dos Melhores Modelos de Regressão Não Linear nas Imagens do<br>Sentinel-2.....                                                                  | 101 |
| Figura 26 - Gráfico de dispersão da área inundada estimada por Sensoriamento Remoto e<br>volume medido do reservatório. ....                                          | 106 |
| Figura 27 - Boxplot de erro de estimação do modelo ajustado e modelos alternativos .....                                                                              | 107 |
| Figura 28 - Bacia do Gavião, Bahia, Brasil: Distribuição dos 515 reservatórios identificados<br>na bacia do Gavião.. ....                                             | 108 |
| Figura 29 - Variação do volume de água armazenada no reservatório do Tremedal e total de<br>água armazenada nos pequenos reservatórios da Bacia do Gavião.....        | 109 |
| Figura 30 - Gráfico de dispersão dos valores de pixel STR e NDVI. ....                                                                                                | 114 |
| Figura 31 - Gráfico de dispersão da umidade do solo medida em campo e aquela obtida pelo<br>OPTRAM no local de estudo.. ....                                          | 115 |
| Figura 32 - Mapa de umidade estimada no solo em períodos distintos.....                                                                                               | 116 |
| Figura 33 - Série temporal de precipitação mensal e umidade do solo derivada do OPTRAM<br>nos pontos P03, P07, P09 e P12 entre janeiro de 2020 e janeiro de 2022..... | 117 |

## SUMÁRIO

|                                                                                                                                           |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO.....</b>                                                                                                                 | <b>12</b> |
| <b>1.1. Delineamento do Trabalho .....</b>                                                                                                | <b>15</b> |
| 1.1.2. Pergunta .....                                                                                                                     | 15        |
| 1.1.3. Premissa .....                                                                                                                     | 15        |
| 1.1.4. Hipótese.....                                                                                                                      | 16        |
| <b>1.2. Objetivo e relevância do tema .....</b>                                                                                           | <b>16</b> |
| <b>1.3 Estrutura da dissertação .....</b>                                                                                                 | <b>17</b> |
| <b>2. REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>                                                                                                        | <b>19</b> |
| <b>2.1. Uma revisão sobre o que é “Sensoriamento Remoto” .....</b>                                                                        | <b>19</b> |
| <b>2.2. Breve contextualização da interação física da Radiação Eletromagnética no<br/>Sensoriamento Remoto de recursos hídricos. ....</b> | <b>20</b> |
| <b>2.3. Sensoriamento Remoto nos estudos de recursos hídricos .....</b>                                                                   | <b>22</b> |
| <b>2.4. Sensoriamento Remoto nos estudos de recursos hídricos no contexto brasileiro....</b>                                              | <b>23</b> |
| <b>2.5. O satélite Sentinel-2. ....</b>                                                                                                   | <b>25</b> |
| 2.5.1. Aplicações do Satélite Sentinel-2.....                                                                                             | 27        |
| 2.5.2. Aplicações do satélite Sentinel-2 para estudos e monitoramento de recursos hídricos.<br>.....                                      | 34        |
| <b>2.6. Métodos de validação. ....</b>                                                                                                    | <b>40</b> |
| <b>2.7. Métodos de modelagem dos COAs. ....</b>                                                                                           | <b>41</b> |
| <b>3. MATERIAIS E MÉTODOS. ....</b>                                                                                                       | <b>43</b> |
| <b>3.1 Áreas de estudo.....</b>                                                                                                           | <b>43</b> |
| 3.1.1. Área de Estudos das aplicações para qualidade de água.....                                                                         | 44        |
| 3.1.2 Área de Estudos das aplicações para quantidade de água.....                                                                         | 48        |
| <b>3.2 Aquisição, pré-processamento e correção atmosférica das imagens do satélite<br/>Sentinel-2. ....</b>                               | <b>52</b> |
| <b>3.3. Softwares utilizados. ....</b>                                                                                                    | <b>54</b> |
| <b>3.4. Roteiro metodológico dos estudos de caso. ....</b>                                                                                | <b>54</b> |
| 3.4.1. Estudo de caso sobre qualidade da água: estimativa de turbidez. ....                                                               | 55        |
| 3.4.1.1 Aquisição dos dados de turbidez medidos in situ. ....                                                                             | 55        |
| 3.4.1.2. Desenvolvimento de um modelo empírico para Turbidez. ....                                                                        | 55        |

|                                                                                                                                   |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.4.1.3. Fluxograma do roteiro metodológico para o estudo de caso da estimativa de turbidez. ....                                 | 57        |
| 3.4.2. <i>Estudo de caso sobre qualidade da água: estimativa de Clorofila-a.</i> .....                                            | 58        |
| 3.4.2.1. Aquisição da concentração de clorofila-a medida in situ. ....                                                            | 58        |
| 3.4.2.2. Avaliação dos modelos de estimativa de clorofila-a. ....                                                                 | 58        |
| 3.4.2.3. Identificação do modelo com melhor ajuste. ....                                                                          | 61        |
| 3.4.2.4 Teste de hipótese nula. ....                                                                                              | 63        |
| 3.4.2.5. Fluxograma do roteiro metodológico para o estudo de caso da estimativa de concentração de clorofila-a .....              | 65        |
| 3.4.3. <i>Estudo de caso sobre quantidade da água: estimativa de volume de água armazenada em reservatório.</i> .....             | 66        |
| 3.4.3.1. Registro do volume de água armazenada nos reservatórios. ....                                                            | 66        |
| 3.4.3.2. Aquisição de imagens e cálculo NDWI. ....                                                                                | 67        |
| 3.4.3.3. Estimativa das áreas dos reservatórios a partir do NDWI. ....                                                            | 69        |
| 3.4.3.4. Avaliação do modelo área x volume para o semiárido brasileiro .....                                                      | 70        |
| 3.4.3.5. Fluxograma do roteiro metodológico para o estudo de caso de estimativa de volume de água armazenada. ....                | 72        |
| 3.4.4. <i>Estudo de caso sobre quantidade da água: umidade do solo.</i> .....                                                     | 73        |
| 3.4.4.1 Mensuração da umidade in situ .....                                                                                       | 73        |
| 3.4.4.2 Granulometria da área de estudo .....                                                                                     | 74        |
| 3.4.4.2. Modelos trapezoidais TOTRAM e OPTRAM. ....                                                                               | 75        |
| 3.4.4.3. Uso e cobertura da terra no município de Rio Claro. ....                                                                 | 78        |
| 3.4.4.4. Processamento e estimativa da umidade. ....                                                                              | 82        |
| 3.4.4.5. Fluxograma do roteiro metodológico para o estudo de caso da estimativa de umidade do solo. ....                          | 84        |
| <b>3.5. Fluxograma do trabalho.</b> .....                                                                                         | <b>85</b> |
| <b>4. ESTUDOS DE CASO DE QUALIDADE DA ÁGUA.</b> .....                                                                             | <b>87</b> |
| <b>4.1. Estimativa de Turbidez: Estudo de Caso do Rio Paraopeba Após o Rompimento da Barragem de Rejeitos de Mineração.</b> ..... | <b>87</b> |
| 4.1.1. <i>Variação natural dos níveis de turbidez do rio Paraopeba.</i> .....                                                     | 87        |
| 4.1.2. <i>Variação da turbidez do rio Paraopeba após o rompimento da barragem de rejeitos de mineração.</i> .....                 | 89        |

|                                                                                                                                                                                 |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.1.3. Modelo empírico desenvolvido. ....                                                                                                                                       | 92         |
| 4.1.4.. Aplicação do modelo empírico desenvolvido para estimar a turbidez. ....                                                                                                 | 93         |
| 4.1.5. Considerações acerca do estudo. ....                                                                                                                                     | 95         |
| <b>4.2. Estimativa de Clorofila-a: Estudo de Caso dos reservatórios de abastecimento público da Região Metropolitana de São Paulo. ....</b>                                     | <b>98</b>  |
| 4.2.1. Aplicação das equações derivadas dos modelos com melhores ajustes .....                                                                                                  | 100        |
| 4.2.2. Considerações acerca do estudo. ....                                                                                                                                     | 102        |
| <b>5. ESTUDOS DE CASO DE QUANTIDADE DE ÁGUA .....</b>                                                                                                                           | <b>104</b> |
| <b>5.1. Estimativa de volume de água armazenada: Estudo de Caso do volume de água armazenada nos reservatórios de pequeno e médio porte na região semiárida do Brasil. ....</b> | <b>104</b> |
| 5.1.1. Modelo Área Volume obtido empiricamente. ....                                                                                                                            | 105        |
| 5.1.2. Comparação entre modelos. ....                                                                                                                                           | 105        |
| 5.1.3. Aplicação do modelo empírico obtido. ....                                                                                                                                | 107        |
| 5.1.4. Considerações acerca do estudo. ....                                                                                                                                     | 109        |
| <b>5.2. Estimativa de umidade do solo: Estudo de Caso da umidade do solo nas periferias urbanas do município de Rio Claro, São Paulo. ....</b>                                  | <b>112</b> |
| 5.2.1. Modelo OPTRAM empírico encontrado. ....                                                                                                                                  | 114        |
| 5.2.2. Comparação entre os dados de umidade coletados in situ e os derivados do OPTRAM .....                                                                                    | 114        |
| 5.2.3. Série temporal da umidade do solo. ....                                                                                                                                  | 115        |
| 5.2.4. Considerações acerca do estudo. ....                                                                                                                                     | 118        |
| <b>6. CONSIDERAIS FINAIS. ....</b>                                                                                                                                              | <b>121</b> |
| <b>6.1. Conclusão. ....</b>                                                                                                                                                     | <b>122</b> |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                                                                                                                                        | <b>124</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

A interdependência entre a sobrevivência e o desenvolvimento da sociedade humana e os recursos hídricos naturais ressalta a grande importância do monitoramento e gerenciamento eficazes das questões hidrológicas. A gestão da água, um recurso essencial, enfrenta desafios crescentes devido ao rápido aumento populacional, desenvolvimento econômico acelerado e mudanças climáticas acentuadas (Clark; Wu, 2016; Gleick, 1993). A demanda por água em constante ascensão, combinada à degradação da qualidade da água devido à poluição industrial, desmatamento e práticas agrícolas intensivas, ampliam a escassez hídrica em várias regiões, como o Nordeste do Brasil (Augusto *et al.*, 2012).

Desde o século XX, houve um notável aumento no consumo de recursos hídricos impulsionado pelo crescimento populacional, intensificação da produção agrícola e desenvolvimento industrial. Paralelamente ao crescimento demográfico, ocorreu uma clara tendência de concentração populacional em áreas urbanas. Como resultado desse consumo desenfreado de água, que se refere ao uso excessivo e muitas vezes desnecessário de água, enfrentamos atualmente uma escassez relativa de recursos hídricos, impactando tanto o abastecimento humano quanto o equilíbrio dos ecossistemas (Tundisi, 2003).

A escassez mundial de água apresenta um desafio de suma importância para promover o desenvolvimento sustentável em várias regiões do planeta, como o Oriente Médio e o Norte da África. A relevância deste estudo torna-se ainda mais evidente no contexto global, onde a insuficiência de recursos hídricos emerge como um obstáculo ao progresso sustentável em várias partes do globo. Conforme destacado no relatório da UNESCO (2018), as atuais tendências na disponibilidade de água potável indicam uma deterioração na segurança hídrica. Projeções futuras sinalizam um acentuado declínio na oferta de água, acompanhado por perda quantitativa e degradação qualitativa. Esses problemas impactam diretamente a capacidade das populações de obter quantidades sustentáveis de água com níveis aceitáveis de qualidade. Preveem-se que essas circunstâncias se agravem até 2050, à medida que a população global está estimada a alcançar entre 9,4 e 10,2 bilhões de indivíduos (Burek *et al.*, 2016).

No Brasil, um país notório por sua riqueza em recursos hídricos, enfrenta desafios significativos no abastecimento de água. Apesar da vasta rede de drenagem, que se refere ao sistema de rios e córregos que cobre mais de 90% de seu território, é crucial enfatizar que essa ampla cobertura pode criar uma falsa percepção de abundância hídrica. Isso ocorre porque, apesar da grande quantidade de água disponível, a distribuição desigual dessa água e a

variabilidade climática podem levar a escassez de água em algumas regiões, mascarando as complexidades enfrentadas na realidade (Rebouças, 2003).

O Brasil é o detentor de aproximadamente 12% da água doce superficial do mundo. No entanto, essa água não está distribuída de maneira homogênea em todo o território nacional. A maior parte dessa água doce, cerca de 80%, está localizada na Região Norte. Em contraste, as regiões próximas ao Oceano Atlântico possuem menos de 3% dos recursos hídricos do país. (Brasil, 2018)

Ao longo do século XX, o Brasil passou por transformações demográficas e urbanas significativas, resultando em um aumento populacional e uma maior concentração de pessoas nas áreas urbanas (Carmo *et al.*, 2014). A região Sudeste é a mais populosa do país, com 84,8 milhões de habitantes, e o estado de São Paulo sozinho concentra cerca de um quinto da população brasileira, representando 21,8% do total, de acordo com os dados do Censo 2022 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Essa concentração populacional, principalmente nas áreas urbanas, combinada com a distribuição desigual da água, intensifica a demanda por água e coloca pressão sobre os recursos hídricos do país, gerando desafios para sua gestão. (Carmo *et al.*, 2014)

A água está se tornando gradualmente um recurso cada vez mais escasso e limitado, levantando preocupações fundamentais para garantir a segurança alimentar e a sustentabilidade ambiental. A Agência Nacional de Águas (ANA), uma agência governamental brasileira, é responsável por monitorar a qualidade da água. No entanto, a utilização de métodos convencionais para coleta e análise de amostras de água implica em custos elevados e proporciona uma cobertura insuficiente, considerando a vastidão territorial do país e o tempo substancial necessário para disponibilizar os dados após a coleta (Brasil, 2023; Gomes *et al.*, 2004).

Para enfrentar esses desafios complexos, o Sensoriamento Remoto, que é a prática de observar, medir e interpretar informações sobre o ambiente e a superfície da Terra à distância, geralmente por meio de satélites ou aeronaves, emergiu como uma ferramenta inestimável. Ele permite a observação e avaliação das mudanças nos sistemas aquáticos em ampla escala e ao longo do tempo. Além disso, o Sensoriamento Remoto surge como uma alternativa viável para monitorar a qualidade dos recursos hídricos, integrando-se de maneira coesa às abordagens convencionais (Novo, 2007).

A tecnologia de Sensoriamento Remoto, que tem ampla aplicação em diversos campos, desde a gestão da produção agrícola até a previsão meteorológica, alertas de incêndios e

monitoramento do desmatamento (Novo, 2007), vem superando barreiras e se tornando cada vez mais usual na gestão dos recursos hídricos. Anteriormente, Novo (2007) mencionava as restrições do emprego do Sensoriamento Remoto para essa finalidade, sendo uma das principais a ausência de um sistema de observação terrestre especialmente configurado para monitorar as propriedades das águas doces. Isso resultava em dados que não atendiam completamente às demandas dos usuários em termos de frequência, resolução e precisão. No entanto, desde então, houve avanços significativos na área. Estudos mais recentes sugerem a existência e aplicação de sistemas de observação terrestre e dados de alta resolução espacial e espectral para o monitoramento de recursos hídricos em larga escala. Por exemplo, pesquisas recentes demonstraram o uso de imagens de satélite de alta resolução e sistemas aéreos não tripulados para detectar entradas de água fria em córregos temperados (Mishra *et al.*, 2023). Outros estudos forneceram uma visão geral do progresso feito na utilização do Sensoriamento Remoto para avaliar os impactos das mudanças no uso da terra e cobertura do solo nos recursos hídricos (Mashala *et al.*, 2023). Além disso, foram empregadas imagens de Sensoriamento Remoto hiperespectral aéreo para explorar métodos de estimativa de Sensoriamento Remoto para concentrações de nitrogênio total (TN) e fósforo total (TP) no Lago Dianshan (Dong *et al.*, 2024). Portanto, embora as limitações mencionadas por Novo (2007) fossem relevantes na época, os avanços recentes na tecnologia de Sensoriamento Remoto têm permitido um monitoramento mais eficaz dos recursos hídricos.

Neste contexto, o presente estudo aborda desafios hidrológicos por meio da aplicação de um conjunto de técnicas de Sensoriamento Remoto, com um foco especial nas imagens fornecidas pelo satélite Sentinel-2. As imagens adquiridas por intermédio deste satélite desempenham um papel relevante, capazes de fornecer informações oportunas acerca das características intrínsecas à qualidade e quantidade das massas de água. A literatura prévia já destacou a contribuição dessas imagens para a compreensão desses aspectos (Ambrosone *et al.*, 2020; Caballero *et al.*, 2019; Ruz-Verdú *et al.*, 2016), enfatizando sua importância no monitoramento dos ecossistemas aquáticos e na gestão dos recursos hídricos. É importante ressaltar que a maioria dos estudos relacionados ao Sentinel-2 não foi originalmente desenvolvida para o Brasil, carecendo, assim, de uma verificação e adaptação específica para as condições brasileiras.

Portanto, foi assumido o desafio de abordar uma ampla gama de assuntos, estando consciente da impossibilidade de aprofundar a discussão em todos os temas tratados. Espera-se que esta dissertação possa indicar o potencial do uso das imagens Sentinel-2 como uma

ferramenta para a análise e gestão dos recursos hídricos no Brasil. Além disso, estudos futuros poderão ser desenvolvidos visando aprofundar aspectos específicos que não são concluídos aqui.

## **1.1. Delineamento do Trabalho**

Este trabalho propõe a calibração de modelos empíricos para avaliar a utilização do satélite Sentinel-2 no estudo dos recursos hídricos no Brasil. Mais especificamente, foram investigadas a sua aplicabilidade em questões relacionadas à qualidade da água e à quantidade de água no território nacional. Os métodos de avaliação basear-se-ão na correlação empírica entre a Radiação Eletromagnética registrada pelo satélite e os dados coletados *in situ*, com o objetivo de estabelecer uma correlação significativa entre os objetos de estudo.

### *1.1.2. Pergunta*

É possível calibrar modelos empíricos para a estimativa confiável de parâmetros acerca da qualidade e da quantidade de água disponível no Brasil, utilizando como ferramenta para isso os dados de Sensoriamento Remoto provenientes do satélite Sentinel-2?

### *1.1.3. Premissa*

- Apesar de o satélite Sentinel-2 não ter sido desenvolvido especificamente para investigar águas continentais, estudos anteriores têm demonstrado sua eficácia nesse contexto;
- As características do satélite, como sua média resolução espacial (10 m) e tempo de revisita reduzido (5 dias), tornam-no adequado para o estudo de recursos hídricos continentais;
- As medidas de dados *in situ* são suficientes para a calibração de modelos empíricos e estimativas relacionadas aos alvos dos recursos hídricos;
- As imagens disponíveis do Sentinel-2 são adequadas para calibrar os modelos, considerando suas bandas espectrais.

#### *1.1.4. Hipótese*

As propriedades ópticas da água podem ser monitoradas por meio do Sensoriamento Remoto.

### **1.2. Objetivo e relevância do tema**

Este trabalho visa adaptar e validar as técnicas de análise de dados do satélite Sentinel-2 para o estudo dos recursos hídricos superficiais no Brasil. O objetivo é explorar as possibilidades de adaptação das metodologias de análise de dados do Sentinel-2 para pesquisas hídricas no Brasil, validar a eficácia dessas técnicas no contexto brasileiro e desenvolver métodos empíricos para monitorar a quantidade e qualidade da água.

A importância deste trabalho reside na contribuição científica que trará para o campo do Sensoriamento Remoto no Brasil. Espera-se uma melhor compreensão da aplicabilidade das tecnologias do Sentinel-2 no contexto brasileiro e avanços no monitoramento ambiental dos recursos hídricos. Isso reflete um foco estratégico em aplicações relevantes para o cenário nacional, gerando conhecimento útil para futuros estudos em áreas específicas não abordadas neste trabalho.

Para atingir o objetivo deste estudo, foram selecionadas quatro áreas de foco, dentre várias possibilidades, que são particularmente relevantes para o contexto nacional. Estas incluem a avaliação da qualidade dos recursos hídricos superficiais, como a medição da turbidez após o rompimento de barragens, e a análise de métodos para monitorar a concentração de clorofila em reservatórios. Além disso, o estudo visa atender às necessidades de monitoramento da quantidade de água, incluindo a medição da umidade do solo, e a estimativa do volume de pequenos e médios reservatórios hídricos superficiais na região semiárida do Brasil. Essas áreas foram escolhidas por sua relevância e aplicabilidade no cenário brasileiro.

### 1.3 Estrutura da dissertação

A pesquisa foi conduzida com base em estudos de caso, focados na avaliação da qualidade dos dados gerados pelo satélite Sentinel-2. Esses estudos se concentraram na adaptação da técnica de coleta de dados ao contexto brasileiro, com o objetivo de estabelecer uma base sólida para futuras investigações. A questão central era se o uso desses dados poderia contribuir para uma melhor gestão hídrica e envolver diferentes atores nos processos de gestão hídrica e na pesquisa de Sensoriamento Remoto. Portanto, o objetivo era gerar conhecimento sobre a técnica de Sensoriamento Remoto para apoiar a avaliação da aplicabilidade dos produtos de qualidade e quantidade de água gerados.

Além disso, havia um interesse em avaliar o uso do satélite Sentinel-2 em diferentes escalas e contextos geográficos, com variados objetivos de análise. Isso implicava a realização de uma ampla gama de análises para estabelecer um panorama dos usos dos dados do satélite Sentinel-2 para o estudo de recursos hídricos no Brasil. Os estudos abordaram diferentes escalas de interesse, incluindo a escala local para o monitoramento da periferia urbana de um município, a escala para o monitoramento de grandes reservatórios, a escala para o monitoramento de um rio e a escala para uma região semiárida inteira.

É importante ressaltar que a pesquisa explorou áreas com diferentes graus de representatividade, abordando necessidades específicas de recursos hídricos em diversas regiões do Brasil, a fim de atender a diferentes contextos físicos. Portanto, os estudos não estão interligados entre si, sendo cada um objeto de um estudo de caso distinto, buscando compreender exclusivamente a possibilidade de análise dos dados do Sentinel-2 para cada caso.

Assim, a pesquisa foi realizada considerando quatro estudos de caso distintos, sendo dois deles aplicados a dados pertinentes à qualidade da água, e dois deles a dados pertinentes à quantidade de água.

A premissa das investigações sobre qualidade da água:

1 – Turbidez: Os resultados gerados demonstram a aplicabilidade do modelo empírico criado para estimar a pluma de turbidez do rio Paraopeba, em Minas Gerais, após o rompimento da barragem de rejeitos da Vale, em janeiro de 2019.

2 – Clorofila-a: Os resultados indicaram que alguns modelos já existentes na literatura, que não foram originalmente produzidos nem para o Brasil nem para o Sentinel-2, se adequaram bem para a estimativa de concentração de clorofila-a em reservatórios da Região Metropolitana

de São Paulo. No entanto, alguns outros modelos não produziram ajustes adequados, possuindo pouca correlação.

A premissa das investigações sobre quantidade da água:

3- Volume de água em reservatórios: Os resultados gerados demonstraram a possibilidade de estimar o volume de água armazenado em reservatórios de pequeno e médio porte na região semiárida do Brasil, a partir da criação de um modelo empírico de relação área-volume.

4- Umidade do solo: Os resultados gerados demonstraram a possibilidade de estimar a umidade presente no solo urbano e periurbano no contexto do município de Rio Claro, São Paulo, a partir da aplicação do método OPTRAM.

As experiências e os resultados alcançados com esses estudos de caso são condensados nos dois capítulos que antecedem as conclusões desta tese e, para dar suporte teórico e metodológico para a realização destes estudos, foram desenvolvidos, ainda, os capítulos iniciais que apresentam o referencial teórico e os materiais e métodos utilizados.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, é apresentado o referencial teórico que sustentará as aplicações práticas discutidas nos estudos de caso. Serão abordados temas, desde as definições de Sensoriamento Remoto até uma breve revisão sobre a interação da Radiação Eletromagnética com a água. Além disso, serão explorados o satélite Sentinel-2 e suas aplicações em pesquisas recentes, bem como métodos analíticos para a validação dos dados.

### 2.1. Uma revisão sobre o que é “Sensoriamento Remoto”

Ao se questionar o que pode ser definido como “Sensoriamento Remoto”, diferentes termos podem ser encontrados, havendo divergências e convergências sobre a sua definição (Novo, 2010). Elachi (1987), por exemplo, define o Sensoriamento Remoto como “a aquisição de informações sobre um objeto sem que haja contato físico com ele”.

Simonnetti e Ulaby (1983) também definem o Sensoriamento Remoto como a aquisição de informações sobre alguma propriedade de um objeto ou fenômeno sem contato físico. Para estes autores, a informação sobre o alvo seria obtida pela detecção e medição da mudança que o objeto impõe sobre o meio circundante, seja ele eletromagnético, acústico ou potencial.

No entanto, embora essa seja a definição mais literal de Sensoriamento Remoto, pode ser considerada um pouco vaga e ampla. Por exemplo, segundo essa perspectiva, a transmissão de uma partida de futebol via ondas de rádio também poderia ser interpretada como Sensoriamento Remoto, uma vez que informações estão sendo adquiridas sem contato físico com o objeto ou evento observado (Novo, 2010).

Schowendrgt (2007) e Slater (1980) consideram o Sensoriamento Remoto como “a medida das propriedades de um objeto na superfície da Terra usando dados adquiridos por meio de aeronaves e satélites”.

Lorenzetti (2015) sugere que, dentre as diversas definições de “o que é Sensoriamento Remoto”, de qualquer forma, quando nos referimos ao termo, estamos tentando nos referir à obtenção de informação à distância, em contraste às medidas in situ. Segundo o autor, na grande maioria das aplicações, as aplicações serão restritas aos dados coletados por meio de satélites orbitais.

Em busca de uma compreensão ampla da definição de “Sensoriamento Remoto”, Novo (2010) interpreta a definição de Sensoriamento Remoto como sendo a utilização conjunta de

sensores, equipamentos para processamento de dados, equipamentos de transmissão de dados colocados a bordo de aeronaves, espaçonaves, ou outras plataformas, com o objetivo de estudar eventos, fenômenos e processos que ocorrem na superfície do planeta Terra a partir do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias que a compõem em suas mais diversas manifestações.

Portanto, é possível assumir que o Sensoriamento Remoto é um método científico que utiliza sensores para coletar informações sobre a superfície da Terra sem entrar em contato físico direto com ela. Esses sensores, geralmente localizados em satélites ou aeronaves, capturam dados na forma de imagens que podem ser analisadas para obter informações sobre o ambiente terrestre. O funcionamento do Sensoriamento Remoto baseia-se na detecção e medição da radiação eletromagnética refletida ou emitida pela superfície da Terra. Diferentes superfícies e materiais refletem e emitem radiação de maneiras distintas, permitindo a identificação e classificação de diferentes objetos e fenômenos na superfície terrestre (Lorenzetti, 2015; Novo, 2010).

## **2.2. Breve contextualização da interação física da Radiação Eletromagnética no Sensoriamento Remoto de recursos hídricos.**

O Sensoriamento Remoto aplicado ao estudo de ambientes aquáticos baseia-se nos processos de absorção e espalhamento seletivo da radiação solar pela água e seus constituintes (Mobley, 1994; Novo *et al.*, 2019). Sensores orbitais, componentes essenciais do sistema de Sensoriamento Remoto, capturam e registram os efeitos da interação da radiação solar com os elementos físicos e químicos presentes na água. As informações espectrais obtidas a partir de imagens de satélite são importantes para o desenvolvimento de modelos bio-ópticos, que descrevem a interação entre a luz e os componentes orgânicos e inorgânicos dos sistemas aquáticos, conforme destacado por Mobley (1994).

A coloração natural da água é uma propriedade óptica resultante da interação da luz solar com a água e seus componentes, gerando informações espectrais sobre a composição da coluna de água. Alterações na coloração da água são influenciadas pela concentração e composição das partículas e substâncias dissolvidas, que absorvem e dispersam a radiação solar direta e difusa do céu que penetra na água (Barbosa *et al.*, 2019).

Constituintes Opticamente Ativos (COAs), como sólidos em suspensão, pigmentos fotossintetizantes (como a clorofila) e matéria orgânica dissolvida, são frequentemente usados

como indicadores de qualidade da água na caracterização do meio aquático (Barbosa *et al.*, 2019; Novo *et al.*, 2019). A intensidade da radiancia espectral capturada pelos sensores é influenciada pelas propriedades ópticas dos COAs, permitindo inferências sobre a composição da água (Lee *et al.*, 1999).

O monitoramento remoto de corpos d'água depende principalmente de sensores passivos que utilizam a luz solar como fonte de radiação, operando na faixa do espectro eletromagnético entre o visível e o infravermelho próximo (400 a 900 nm), considerada a mais adequada para essas aplicações. Contudo, há desafios na interpretação das cores da água, incluindo a identificação e extração da radiação emergente da coluna de água, pois o sinal captado pelos sensores orbitais é fortemente influenciado pela atmosfera. A atmosfera afeta a propagação da luz até a água e sua captação pelos sensores, e a reflexão especular na superfície da água também interfere na aquisição dos dados de radiação (Barbosa *et al.*, 2019).

A modelagem dos componentes da água com base nas informações radiométricas é complexa, especialmente em ambientes com alta complexidade óptica, como as águas interiores. Enquanto a radiação refletida por alvos terrestres pode ser considerada um evento bidimensional de espalhamento simples, no qual a luz é refletida diretamente da superfície sem penetrar profundamente, para alvos aquáticos, onde a radiação penetra e se propaga na coluna de água, o evento é tridimensional, envolvendo espalhamento múltiplo em todas as direções dentro do corpo de água (Barbosa *et al.*, 2019).

Ao interagir com a interface ar/água, a radiação eletromagnética está sujeita a dois processos fundamentais no sistema aquático: espalhamento e absorção. O espalhamento ocorre quando a radiação é redirecionada em múltiplas direções após o contato com partículas no sistema aquático. A absorção é o processo pelo qual a energia da radiação é capturada pelo meio aquático e convertida em outras formas de energia. Esses processos são quantitativamente descritos pelas propriedades ópticas inerentes do sistema aquático, especificamente os coeficientes de espalhamento e absorção, influenciados por fatores como a composição química da água (presença de sais ou outros minerais), temperatura da água e quantidade de partículas em suspensão (Novo *et al.*, 2019).

A radiação emergente do corpo de água, resultante da interação da luz com o ambiente aquático, carrega dados sobre a composição das massas de água. Essa radiação permite, por meio de técnicas de Sensoriamento Remoto, estabelecer uma ligação entre os componentes da água e o sinal captado por um sensor remoto, seja ele orbital, aerotransportado ou de campo (Barbosa *et al.*, 2019).

Um desafio significativo no Sensoriamento Remoto de recursos hídricos envolve os fenômenos de atenuação que ocorrem na atmosfera, como a absorção e dispersão da radiação eletromagnética, tanto antes quanto depois da interação com a água. Esses fenômenos podem distorcer as informações obtidas, dificultando a interpretação precisa sobre as massas de água. Portanto, correções atmosféricas e radiométricas nas imagens são essenciais (Barbosa *et al.*, 2019).

O processamento digital de imagens é amplamente utilizado para extrair informações espectrais de dados orbitais. Diversos algoritmos foram desenvolvidos para apoiar aplicações relacionadas à água, incluindo métodos de correção atmosférica, algoritmos de classificação de nuvens e técnicas para corrigir o efeito especular e a adjacência. As incertezas no processamento das imagens impactam diretamente a precisão das estimativas de reflectância da água e, conseqüentemente, das concentrações de COAs. Por exemplo, o espalhamento atmosférico pode representar até 90% da radiância medida pelo sensor na região visível em pixels de água, tornando essa correção essencial para estudos quantitativos em ambientes aquáticos (Barbosa *et al.*, 2019). As técnicas de correção serão abordadas nos materiais e métodos desta dissertação.

### **2.3. Sensoriamento Remoto nos estudos de recursos hídricos**

O Sensoriamento Remoto vem desempenhando um papel cada vez mais relevante nos estudos e na gestão de recursos hídricos, pois permite a observação e o monitoramento de grandes áreas de forma sistemática e consistente. Com o uso de diferentes sensores e técnicas, é possível obter informações sobre a quantidade e a qualidade da água, a dinâmica dos sistemas hídricos e os impactos das atividades humanas e das mudanças climáticas (Barbosa, 2019; Jensen, 2007).

A qualidade da água é um aspecto crítico dos recursos hídricos e pode ser avaliada utilizando uma variedade de parâmetros, incluindo turbidez, temperatura, pH, condutividade elétrica e concentrações de nutrientes e contaminantes (Khan; Butt 2023). O Sensoriamento Remoto pode fornecer estimativas desses parâmetros em grandes áreas e ao longo do tempo, permitindo o monitoramento contínuo da qualidade da água (Lakshmi *et al.*, 2023).

A quantidade de água disponível também é uma preocupação importante na gestão de recursos hídricos. O Sensoriamento Remoto pode ser usado para estimar a precipitação, o escoamento superficial, a evapotranspiração e o armazenamento de água no solo e em

reservatórios (Mccabe *et al.*, 2017). Essas estimativas podem ser utilizadas para prever a disponibilidade de água e gerenciar seu uso de maneira sustentável (Rodell *et al.*, 2018).

No entanto, existem desafios no uso do Sensoriamento Remoto para estudos de recursos hídricos. A precisão das estimativas depende da qualidade dos dados do Sensoriamento Remoto e dos modelos usados para interpretá-los (Schumann *et al.*, 2016). Além disso, a variabilidade espacial e temporal dos recursos hídricos pode ser difícil de capturar com o Sensoriamento Remoto, especialmente em escalas menores (Liu *et al.*, 2023).

Apesar desses desafios, as oportunidades para o uso do Sensoriamento Remoto em estudos de recursos hídricos são vastas. Com o avanço das tecnologias de Sensoriamento Remoto e a crescente disponibilidade de dados, espera-se que o papel dessa tecnologia na gestão de recursos hídricos continue a crescer no futuro (Dube *et al.*, 2023).

Nas últimas décadas, o Sensoriamento Remoto orbital tem sido amplamente utilizado para monitorar recursos naturais, ganhando reconhecimento significativo na comunidade científica. No campo dos recursos hídricos, a primeira missão espacial dedicada às águas oceânicas foi o Coastal Zone Color Scanner (CZCS), operando de 1978 a 1986 (Gordon *et al.*, 1983, apud Barbosa *et al.*, 2019). Desde então, esforços internacionais têm impulsionado avanços nos estudos aquáticos, com o desenvolvimento de novos sensores orbitais, incluindo o Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS), o MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), o Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) e, mais recentemente, o Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS). No entanto, a resolução espacial moderada desses sensores limita sua aplicação em estudos de corpos d'água menores, como rios estreitos e pequenos lagos. Para superar essas limitações, pesquisadores que focam em águas interiores começaram a utilizar dados de sensores com resolução espacial média, como os do programa Landsat (NASA) e, mais recentemente, do programa Copernicus Sentinel-2 (ESA) (Barbosa *et al.*, 2019).

#### **2.4. Sensoriamento Remoto nos estudos de recursos hídricos no contexto brasileiro.**

O Brasil abriga uma grande parte da riqueza de água doce do mundo, o que torna os estudos aquáticos ainda mais relevantes para a gestão desses ecossistemas. Com sua vasta extensão territorial e diversidade de biomas, o país apresenta uma complexidade única em termos de recursos hídricos (Paiva *et al.*, 2020). Possuindo uma das maiores reservas de água doce do mundo, distribuídas em grandes bacias hidrográficas como a Amazônica e a do Prata

(ANA, 2018), o Brasil enfrenta, no entanto, uma distribuição desigual desses recursos, com regiões semiáridas, como o Nordeste, enfrentando desafios significativos de escassez de água (Marengo *et al.*, 2016).

Dada a vasta extensão do território brasileiro e as limitações dos métodos convencionais, é necessário recorrer a fontes alternativas de dados, como o Sensoriamento Remoto, para monitorar esses ecossistemas em escala nacional (Barbosa *et al.*, 2019). O Sensoriamento Remoto ampliou a capacidade de monitorar e entender a composição e a dinâmica de grandes rios e lagos. Sensores orbitais registram os efeitos da interação da radiação solar com os constituintes na água, e as informações espectrais contidas nas imagens de satélite são úteis no desenvolvimento de modelos bio-ópticos (Novo *et al.*, 2020).

O Sensoriamento Remoto tem se mostrado uma ferramenta importante para o estudo e a gestão de recursos hídricos no Brasil. Diversas pesquisas utilizam dados de satélites, como o Sentinel-2, para monitorar a qualidade da água (Watanabe *et al.*, 2019), estimar a precipitação (Pereira *et al.*, 2013) e avaliar a disponibilidade de água subterrânea (Magnoni, 2020). No entanto, existem desafios na aplicação do Sensoriamento Remoto para a gestão de recursos hídricos no Brasil, como a necessidade de validação em campo dos dados, que pode ser difícil devido à extensão territorial do país e à inacessibilidade de algumas áreas (Barbosa *et al.*, 2019). Além disso, a variabilidade climática e geográfica do Brasil requer a adaptação e a calibração de modelos de Sensoriamento Remoto para diferentes regiões (Araújo *et al.*, 2021).

O pioneirismo do Sensoriamento Remoto no Brasil remonta à década de 1970, quando o projeto RADAMBRASIL, liderado pelo Ministério das Minas e Energia e pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), marcou o início do monitoramento remoto de recursos naturais no país. Utilizando radar de abertura sintética, o projeto tinha como objetivo mapear diversos recursos naturais, incluindo corpos d'água (Brasil, 1973).

Outra importante contribuição para o Sensoriamento Remoto de recursos hídricos no país veio do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que iniciou suas atividades na década de 1970. A primeira pesquisa de pós-graduação em Sensoriamento Remoto no INPE, voltada ao estudo de sistemas aquáticos continentais, teve como objetivo identificar as fontes responsáveis pelo aumento da turbidez da água do Reservatório da Usina de Três Marias. Nesta dissertação, Sausen (1980) desenvolveu um método para a aplicação de imagens MSS/Landsat, permitindo relacionar os padrões de dispersão de sedimentos no Reservatório Hidrelétrico de Três Marias às características de sua bacia hidrográfica (Barbosa *et al.*, 2019).

Na década de 1990, os estudos se expandiram com a utilização de dados do satélite Landsat. Entre muitos exemplos, Abdon e Meyer (1990) desenvolveram metodologia para o mapeamento de plantas aquáticas; também, Novo *et al.* (1995) realizaram pesquisas aplicando índices de vegetação e modelos espectrais para monitorar a qualidade da água em grandes reservatórios, destacando a importância do Sensoriamento Remoto na identificação de processos de eutrofização. Nos anos 2000, a introdução dos satélites MODIS e MERIS permitiu a obtenção de dados mais frequentes, facilitando o monitoramento dinâmico das variações sazonais. Alcântara *et al.* (2008), por exemplo, desenvolveram modelos para estimar a turbidez na planície de inundação usando dados derivados dos satélites MODIS e Terra.

Com o lançamento do Sentinel-2 na última década, houve um avanço significativo nas capacidades de monitoramento de pequenos corpos d'água (Cardoso *et al.*, 2020). Pesquisas recentes, como as de Dos Santos *et al.* (2023) e Sadeck *et al.* (2023), exploram o uso de modelos bio-ópticos e algoritmos de aprendizado de máquina para analisar a qualidade da água, destacando a evolução das tecnologias e metodologias, e promovendo uma gestão mais eficaz dos recursos hídricos no Brasil.

## 2.5. O satélite Sentinel-2.

O Sensoriamento Remoto configura-se como uma ferramenta poderosa amplamente utilizada em diversas áreas, como a agricultura, o monitoramento ambiental e de recursos estratégicos (Smith, 2013). A série de satélites Sentinel-2 tem como propósito dar continuidade e aprimorar algumas missões antigas gerenciadas pela Agência Espacial Europeia (ESA). Estas incluem o European Remote-Sensing Satellite (ERS), o Environmental Satellite (ENVISAT) e o Satellite Pour l'Observation de la Terre (SPOT), prosseguindo com o monitoramento de recursos naturais terrestres, uso e ocupação das terras, ambientes marinhos, clima e desastres naturais (Drusch *et al.*, 2012).

O satélite Sentinel-2 pertence ao Programa de Monitoramento Global para o Meio Ambiente e Segurança (GMES), uma colaboração entre a Comunidade Europeia e a Agência Espacial Europeia (ESA). Por meio de sua plataforma de observação terrestre, fornece imagens ópticas de média resolução espacial e espectral. Isso permite a obtenção de informações abrangentes sobre superfícies terrestres, incluindo corpos d'água continentais, como rios, lagos, reservatórios e áreas úmidas (Du *et al.*, 2016).

Como parte do programa Copernicus da ESA, pares de satélites Sentinel-2 foram desenvolvidos, garantindo uma observação a cada 5 dias em áreas terrestres e costeiras. Essa frequência é mantida por duas unidades do Instrumento Multiespectral (MSI) a bordo das missões Sentinel-2A e Sentinel-2B. Com um ciclo de vida previsto inicialmente para sete anos, os satélites gêmeos em operação serão gradualmente substituídos por missões idênticas a partir de 2024, ampliando o período de coleta de dados. O propósito central é permitir um monitoramento sistemático das mudanças no uso e cobertura da terra, abrangendo escalas locais, regionais, nacionais e globais (ESA, 2023).

A missão do Sentinel-2 conta com o MSI, que capta radiação do Sol refletida em 13 bandas espectrais que variam de 443 a 2190 nm, abrangendo desde o espectro visível até o infravermelho de onda curta (SWIR). O satélite apresenta uma resolução espacial de 10m para as bandas do visível, 20m para o infravermelho e 60m para as bandas de correção atmosférica (ESA, 2023).

Em comparação com o Sensor de Imagem Operacional (OLI), que faz parte da renomada família de satélites Landsat, o Instrumento Multiespectral (MSI) do Sentinel-2 oferece uma gama ainda mais ampla e abrangente de recursos espectrais na região do infravermelho próximo (NIR) (Pahlevan *et al.*, 2017). No contexto dos estudos hídricos, foco desta dissertação, essas adições espectrais são particularmente vantajosas em ambientes de águas costeiras e interiores, que são caracterizados por sua complexidade óptica intrínseca (Ioccg, 2000).

Além disso, essa diversificação espectral amplia significativamente as possibilidades de obter inferências precisas sobre as concentrações de sólidos suspensos totais (TSS) e clorofila-a (Chl) em ambientes aquáticos caracterizados por hipertrofia e presença abundante de matéria orgânica dissolvida (Kutser *et al.*, 2016; Toming *et al.*, 2016). Além disso, essa capacidade se estende a águas notavelmente turvas, ampliando ainda mais as possibilidades de investigação nesse contexto (Lee *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2017; Nechad *et al.*, 2010).

O MSI apresenta resoluções de amostragem no solo de 10 e 20 metros na maioria das faixas visíveis e em todas as faixas do infravermelho próximo. Isso proporciona duas vantagens fundamentais em relação aos satélites da família Landsat, que possuem características semelhantes, mas com resolução espacial de 30 metros: a) permite a obtenção de observações mais precisas e b) viabiliza a avaliação das condições de qualidade da água em corpos d'água menores e internos, como rios e riachos estreitos (Pahlevan *et al.*, 2017). A média resolução espacial do satélite Sentinel-2 (10 metros) permite uma melhor discriminação de espelho

d'água, quando comparado à baixa resolução do satélite Landsat-8 (30 metros) (Vanhellemont; Rueda, 2016).

A capacidade do Sentinel-2 de realizar observações de média resolução permite um monitoramento amplo e contínuo dos recursos, fornecendo dados essenciais para avaliar mudanças, identificar tendências e avaliar os impactos (ESA, 2023; Kwong *et al.*, 2022). No entanto, apesar dos avanços significativos, persistem desafios técnicos e metodológicos a serem superados. Estes incluem a correção atmosférica das imagens, a integração de dados provenientes de diferentes sensores, a validação rigorosa dos resultados e a eficaz incorporação das informações nas estratégias de gestão (Felegari *et al.*, 2021; Gargiulo *et al.*, 2020; Kwong *et al.*, 2022; Wei *et al.*, 2018). Superar esses desafios demanda investimento contínuo em pesquisa e desenvolvimento.

Além disso, as características das imagens fornecidas pelo satélite Sentinel-2 possuem suas próprias limitações. Por exemplo, devido ao período de revisita não ser imediato, há probabilidade de que o momento do sobrevoo do satélite não coincida com o momento exato de um evento específico em estudo, como uma inundação. Além disso, a presença de nuvens pode interferir nos resultados. Esses fatores devem ser levados em consideração ao utilizar dados do Sentinel-2.

#### 2.5.1. Aplicações do Satélite Sentinel-2.

O Sentinel-2 desempenha um papel crucial em uma vasta gama de aplicações relacionadas à terra e águas, fornecendo informações essenciais para práticas agrícolas, florestais e para o gerenciamento da segurança alimentar, incluindo a determinação de índices de plantas, como área foliar, clorofila e índices de conteúdo de água (Faizal *et al.*, 2023; Jędrejek *et al.*, 2023; Rakuasa e Sihasale, 2023). A capacidade do Sentinel-2 em detectar alterações no solo e nos cursos de água ao longo do tempo contribui para a gestão sustentável dos recursos naturais. Além disso, a missão busca monitorar a qualidade da água, conforme afirmado por Dimitry Van der Zande, do Instituto Real de Ciências Naturais Belga (ESA, 2015).

A missão Sentinel-2 é amplamente empregada em estudos abrangentes, envolvendo análises do uso do solo, monitoramento da vegetação, investigações de desastres naturais e monitoramento de ambientes aquáticos. A notável versatilidade dessa missão é evidenciada no Quadro 1, que compila uma pesquisa abrangente dos estudos mais recentes conduzidos com o satélite Sentinel-2 em diversas frentes de pesquisa. Essa abordagem multifacetada destaca a

significativa contribuição do Sentinel-2 para a compreensão e monitoramento de diversos fenômenos terrestres e aquáticos.

Quadro 1: Estudos Recentes que utilizam imagens Sentinel-2 em Diversas Frentes de Pesquisa.

| Aplicação                                 | Parâmetro estimado                                                                         | Autores                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Local do estudo |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Detecção da Cobertura Vegetal             | Fenologia florestal                                                                        | THEOCHARIDIS, Christos <i>et al.</i> <b>Satellite times-series analysis and assessment of the BFAST algorithm to detect possible abrupt changes in forest seasonality utilising Sentinel-1 and Sentinel-2 data. Case study: Paphos forest, Cyprus.</b> Copernicus Meetings, 2023.                                                | Chipre          |
|                                           | Quantidade e saúde da vegetação                                                            | RAKUASA, Heinrich; SIHASALE, Daniel Anthoni. Analysis of Vegetation Index in Ambon City Using Sentinel-2 Satellite Image Data with Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Method based on Google Earth Engine. <b>Journal of Innovation Information Technology and Application (JINITA)</b> , v. 5, n. 1, p. 74-82, 2023. | Indonésia       |
|                                           | Porcentagem de cobertura e a densidade dos manguezais.                                     | FAIZAL, Ahmad <i>et al.</i> Application of NDVI Transformation on Sentinel 2A Imagery for mapping mangrove conditions in Makassar City. <b>Akuatikisile: Jurnal Akuakultur, Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil</b> , v. 7, n. 1, p. 59-66, 2023.                                                                                      | Indonésia       |
| Mapeamento de Usos do Solo e Uso da Terra | Potencial do uso do satélite Sentinel-2 para mapeamento do uso e cobertura do solo.        | ZIKIOU, Nadia; RUSHMEIER, Holly. Sentinel-2 data classification for land use land cover mapping in Northern Algeria. In: <b>Algorithms, Technologies, and Applications for Multispectral and Hyperspectral Imaging XXIX. SPIE</b> , 2023. P. 147-161.                                                                            | Argélia         |
|                                           | Uso de imagens ópticas para o reconhecimento de objetos na análise de imagens geográficas. | CUYPERS, Suzanna; NASCETTI, Andrea; VERGAUWEN, Maarten. Land Use and Land Cover Mapping with VHR and Multi-Temporal Sentinel-2 Imagery. <b>Remote Sensing</b> , v. 15, n. 10, p. 2501, 2023.                                                                                                                                     | França          |
|                                           | Detecção de mudanças na cobertura da terra.                                                | ALONSO, Laura <i>et al.</i> Comparison of a Sentinel-2 land cover map obtained through multi-temporal analysis with the official forest cartography. the case of Galicia (Spain). <b>Geocarto International</b> , v. 38, n. 1, p. 2181986, 2023.                                                                                 | Espanha         |
| Monitoramento de Secas e Desertificação   | Avaliação quantitativa da desertificação.                                                  | LAMAAMRI, Mohamed <i>et al.</i> Evaluation of desertification in the middle Moulouya basin (north-east morocco) using sentinel-2 images and spectral index techniques. <b>Earth Systems and Environment</b> , v. 7, n. 2, p. 473-492, 2023.                                                                                      | Marrocos        |
|                                           | Intensidade da desertificação.                                                             | ZOLFAGHARI, Farhad; ABDOLLAHI, Vahideh. Determining the desertification intensity based on spectral indices using Sentinel-2 images (Case study: Sistan and Baluchestan province). <b>Journal of RS and GIS for Natural Resources</b> , v. 13, n. 1, p. 108-126, 2022.                                                           | Irã             |
|                                           |                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                 |

|                                   |                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                             |                   |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
|                                   | Desertificação.                                                                         | RAYNE, Louise <i>et al.</i> Detecting desertification in the ancient oases of southern Morocco. <b>Scientific Reports</b> , v. 13, n. 1, p. 19424, 2023.                                                                                                                    | Marrocos          |
| Monitoramento da Agricultura.     | Qualidade do solo agrícola                                                              | JĘDREJEK, Anna; JADCZYSZYN, Jan; PUDEŁKO, Rafał. Increasing Accuracy of the Soil-Agricultural Map by Sentinel-2 Images Analysis—Case Study of Maize Cultivation under Drought Conditions. <b>Remote Sensing</b> , v. 15, n. 5, p. 1281, 2023                                | Polônia           |
|                                   | Monitoramento de propriedades do solo.                                                  | ZEYADA, Ahmed M. <i>et al.</i> Sentinel-2 Satellite Imagery Application to Monitor Soil Salinity and Calcium Carbonate Contents in Agricultural Fields. <b>Phyton (0031-9457)</b> , v. 92, n. 5, 2023.                                                                      | Sudão.            |
|                                   | Umidade do solo.                                                                        | MA, Chunfeng; JOHANSEN, Kasper; MCCABE, Matthew F. Combining Sentinel-2 data with an optical-trapezoid approach to infer within-field soil moisture variability and monitor agricultural production stages. <b>Agricultural Water Management</b> , v. 274, p. 107942, 2022. | Arábia Saudita.   |
| Mapeamento de Riscos e Desastres. | Danos causados pelo vento e infestações de besouros de casca em florestas de coníferas. | CANDOTTI, Anna <i>et al.</i> A Sentinel-2 based multi-temporal monitoring framework for wind and bark beetle detection and damage mapping. <b>Remote Sensing</b> , v. 14, n. 23, p. 6105, 2022.                                                                             | Itália e Áustria. |
|                                   | Mapeamento de danos em edifícios após terremoto.                                        | PUTRI, Ade Febri Sandhini; WIDYATMANTI, Wirastuti; UMARHADI, Deha Agus. Sentinel-1 and Sentinel-2 data fusion to distinguish building damage level of the 2018 Lombok Earthquake. <b>Remote Sensing Applications: Society and Environment</b> , v. 26, p. 100724, 2022.     | Indonésia.        |
|                                   | Inundações.                                                                             | CABALLERO, Isabel; RUIZ, Javier; NAVARRO, Gabriel. Sentinel-2 satellites provide near-real time evaluation of catastrophic floods in the west mediterranean. <b>Water</b> , v. 11, n. 12, p. 2499, 2019.                                                                    | Espanha.          |
| Monitoramento de Florestas.       | Conteúdo de clorofila nas folhas.                                                       | ZHEN, Jianing <i>et al.</i> Mapping leaf chlorophyll content of mangrove forests with Sentinel-2 images of four periods. <b>International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation</b> , v. 102, p. 102387, 2021.                                            | China.            |
|                                   | Classificação de florestas em ambientes mediterrâneos.                                  | PULETTI, Nicola <i>et al.</i> Use of Sentinel-2 for forest classification in Mediterranean environments. <b>Ann. Silv. Res.</b> , v. 42, n. 1, p. 32-38, 2018.                                                                                                              | Itália.           |
|                                   | Efeitos de eventos de seca extrema na saúde das florestas.                              | PULETTI, Nicola <i>et al.</i> Monitoring the effects of extreme drought events on forest health by Sentinel-2 imagery. <b>Journal of Applied Remote Sensing</b> , v. 13, n. 2, p. 020501-020501, 2019.                                                                      | Itália.           |
| Monitoramento de queimadas.       | Deteção de incêndios florestais usando modelos de segmentação semântica.                | AL-DABBAGH, Ali Mahdi; ILYAS, Muhammad. Uni-temporal Sentinel-2 imagery for wildfire detection using deep learning semantic segmentation models. <b>Geomatics, Natural Hazards and Risk</b> , v. 14, n. 1, p. 2196370, 2023.                                                | Turquia.          |
|                                   | Gerenciamento de risco de incêndio.                                                     | MOHAMED, I. S. S. A.; ABBOUD, Mohammad. Forest Fire Disaster Risk Analysis using Sentinel 2 and Landsat Images Case Study: Al-Qoubaiyat and Tyre regions, Lebanon. <b>Turkish Journal of Geosciences</b> , v. 3, n. 2, p. 84-94.                                            | Líbano.           |

|                                                                 |                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                               |                            |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
|                                                                 | Mapeamento de áreas queimadas.                                                                      | ARISANTY, Deasy <i>et al.</i> Utilizing sentinel-2 data for mapping burned areas in banjarbaru wetlands, South Kalimantan province. <b>International Journal of Forestry Research</b> , v. 2022, 2022.                                                        | Indonésia.                 |
| <b>Pesquisas envolvendo recursos hídricos.</b>                  |                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                               |                            |
| <b>Monitoramento da Qualidade da Água</b>                       | Concentrações de Matéria Suspensa Total (TSM) e Sólidos Totais. Dissolvidos (TDS) em água de lagos. | NOORI, Ashkan <i>et al.</i> A spatiotemporal monitoring model of TSM and TDS in arid region lakes utilizing Sentinel-2 imagery. <b>Journal of Arid Environments</b> , v. 216, p. 105024, 2023.                                                                | Irã.                       |
|                                                                 | Índices de parâmetros de qualidade da água do rio.                                                  | ZHANG, Yingyin <i>et al.</i> Monitoring and spatial traceability of river water quality using Sentinel-2 satellite images. <b>Science of The Total Environment</b> , p. 164862, 2023.                                                                         | China.                     |
|                                                                 | Nível de parâmetros ambientais em lagoas urbanas de águas pluviais.                                 | MAHMOUD, Shereif H. <i>et al.</i> Monitoring the spatial distribution of water quality of an urban stormwater pond using satellite images. <b>Ecological Informatics</b> , v. 77, p. 102205, 2023.                                                            | Canadá.                    |
| <b>Identificação e Monitoramento de Áreas Úmidas e Pântanos</b> | Mapeamento de áreas úmidas.                                                                         | MOHSENI, Farzane <i>et al.</i> Wetland Mapping in Great Lakes Using Sentinel-1/2 Time-Series Imagery and DEM Data in Google Earth Engine. <b>Remote Sensing</b> , v. 15, n. 14, p. 3495, 2023.                                                                | Estados Unidos da América. |
|                                                                 | Monitoramento de áreas úmidas                                                                       | NNAVARAPU, Lalitha Anupama <i>et al.</i> Estimation of Wetland Area Change Using Sentinel-2 Satellite Images. In: <b>2023 Fifth International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)</b> . IEEE, 2023. p. 1-5.            | Índia.                     |
|                                                                 | Monitoramento de parâmetros físico-químicos.                                                        | PADILLA-MENDOZA, César <i>et al.</i> Potential of Sentinel Images to Evaluate Physicochemical Parameters Concentrations in Water Bodies—Application in a Wetlands System in Northern Colombia. <b>Water</b> , v. 15, n. 4, p. 789, 2023.                      | Colômbia.                  |
| <b>Monitoramento da Turbidez</b>                                | Turbidez de lagos.                                                                                  | MA, Yue <i>et al.</i> Remote sensing of turbidity for lakes in northeast China using Sentinel-2 images with machine learning algorithms. <b>IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing</b> , v. 14, p. 9132-9146, 2021. | China.                     |
|                                                                 | Turbidez de lagoas costeiras.                                                                       | SEBASTIÁ-FRASQUET, María-Teresa <i>et al.</i> Sentinel 2 analysis of turbidity patterns in a coastal lagoon. <b>Remote Sensing</b> , v. 11, n. 24, p. 2926, 2019.                                                                                             | Espanha.                   |
|                                                                 | Monitoramento espaço-temporal da turbidez em águas rasas de lagoas costeiras.                       | MAIMOUNI, Soufiane <i>et al.</i> Spatiotemporal monitoring of low water turbidity in Moroccan coastal lagoon using Sentinel-2 data. <b>Remote Sensing Applications: Society and Environment</b> , v. 26, p. 100772, 2022.                                     | Marrocos.                  |
| <b>Deteção e mapeamento de corpos hídricos</b>                  | Algoritmo para detecção de água.                                                                    | TAYER, Thiago C. <i>et al.</i> Improving the accuracy of the Water Detect algorithm using Sentinel-2, Planetscope and sharpened imagery: a case study in an intermittent river. <b>GIScience &amp; Remote Sensing</b> , v. 60, n. 1, p. 2168676, 2023.        | Austrália.                 |
|                                                                 | Índices para detecção de recursos hídricos.                                                         | TESFAYE, Mathias; BREUER, Lutz. Performance of Water Indices for Water Resources Monitoring Using Large-Scale Sentinel-2 Data. 2023.                                                                                                                          | Etiópia.                   |

|                                           |                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                        |            |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
|                                           | Mapeamento de inundações em rios de pequeno porte.                                             | LOMBANA, Lorena. <b>Flood mapping in small-size water rivers: Analysis of spectral indexes using super-resolved Sentinel-2 images</b> . Copernicus Meetings, 2023.                                                                                                     | Espanha.   |
| <b>Monitoramento da Clorofila</b>         | Deteção de Florescências de Cianobactérias e Análise de Clorofila-a em Reservatório Eutrófico. | VISO-VÁZQUEZ, Manuel <i>et al.</i> Remote detection of cyanobacterial blooms and chlorophyll-a analysis in a eutrophic reservoir using Sentinel-2. <b>Sustainability</b> , v. 13, n. 15, p. 8570, 2021.                                                                | Espanha.   |
|                                           | Monitoramento de clorofila em lagos.                                                           | LI, Yongliu <i>et al.</i> Monitoring Chlorophyll-a concentration in karst plateau lakes using Sentinel 2 imagery from a case study of pingzhai reservoir in Guizhou, China. <b>European Journal of Remote Sensing</b> , v. 55, n. 1, p. 1-19, 2022.                    | China.     |
|                                           | Avaliação da dinâmica espacial da clorofila-a                                                  | OGASHAWARA, Igor <i>et al.</i> The use of Sentinel-2 for chlorophyll-a spatial dynamics assessment: A comparative study on different lakes in northern Germany. <b>Remote Sensing</b> , v. 13, n. 8, p. 1542, 2021.                                                    | Alemanha.  |
| <b>Monitoramento de Regiões Costeiras</b> | Mapeamento e Monitoramento de Parâmetros de Qualidade da Água Marinha                          | KWONG, Ivan HY; WONG, Frankie KK; FUNG, Tung. Automatic mapping and monitoring of marine water quality parameters in Hong Kong using Sentinel-2 image time-series and Google Earth Engine cloud computing. <b>Frontiers in Marine Science</b> , v. 9, p. 871470, 2022. | China.     |
|                                           | Monitoramento da Saúde de Corpos D'água Costeiros                                              | PEPI, Milva; ANTON, Stazione Zoologica. Current Trends in Engineering Science (CTES).; LOCK, Marcelle <i>et al.</i> Monitoring Coastal Water Body Health with Sentinel-2 MSI Imagery. <b>Remote Sensing</b> , v. 15, n. 7, p. 1734, 2023.                              | Australia. |
|                                           | Análise de Padrões de Turbidez em uma Lagoa Costeira                                           | SEBASTIÁ-FRASQUET, María-Teresa <i>et al.</i> Sentinel 2 analysis of turbidity patterns in a coastal lagoon. <b>Remote Sensing</b> , v. 11, n. 24, p. 2926, 2019.                                                                                                      | Espanha.   |

Fonte – Elaborado pelo autor

O quadro 1 apresenta uma compilação abrangente de exemplos de alguns dos estudos mais recentes que empregaram dados da missão Sentinel-2 em diversas áreas de pesquisa. Os estudos incluídos abrangem análises do uso do solo, monitoramento da vegetação, investigações de desastres naturais e monitoramento de ambientes aquáticos.

Conforme atestado no quadro 1, pesquisas científicas têm se utilizado de imagens provenientes do satélite Sentinel-2 para identificação da cobertura vegetal em distintas regiões geográficas, empregando uma variedade de parâmetros estimados. A fenologia florestal foi submetida à análise por meio de séries temporais de satélites, utilizando o algoritmo BFAST. O estudo de caso focou-se na floresta de Paphos, Chipre (Theocharidis *et al.*, 2023). Outra investigação abordou a quantificação e avaliação da saúde da vegetação na cidade de Ambon, Indonésia, por meio da utilização de dados provenientes das imagens do satélite Sentinel-2 e do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) (Rakuasa; Sihasale, 2023). Adicionalmente, uma pesquisa exploratória investigou a aplicação da transformação NDVI em

imagens do satélite Sentinel-2 para o mapeamento das condições dos manguezais na cidade de Makassar, Indonésia. A porcentagem de cobertura e a densidade dos manguezais foram parâmetros submetidos a estimativas (Faizal *et al.*, 2023).

Outra aplicação do Sentinel-2 relaciona-se ao mapeamento de usos do solo e da terra em diferentes regiões geográficas. O estudo conduzido por Zikiou e Rushmeier (2023) na Argélia avaliou o potencial do uso do satélite Sentinel-2 para o mapeamento do uso e cobertura do solo na região setentrional do país. A classificação de dados do Sentinel-2 foi explorada como uma ferramenta eficaz para o mapeamento de usos da terra na Argélia. Cuypers *et al.* (2023), por sua vez, realizaram pesquisas na França, com foco no uso de imagens ópticas para o reconhecimento de objetos na análise de imagens geográficas. Este estudo abordou métodos de mapeamento de usos do solo, enfatizando imagens multi-temporais do Sentinel-2. A detecção de mudanças na cobertura da terra foi o parâmetro de interesse em um estudo conduzido por Alonso *et al.* (2023) na Espanha. A pesquisa comparou um mapa de cobertura da terra obtido por meio de análise multi-temporal do Sentinel-2 com a cartografia florestal oficial, apresentando uma abordagem para avaliar mudanças na paisagem em Galícia.

Também, foram realizados estudos recentes sobre a aplicação do satélite Sentinel-2 no monitoramento quantitativo de secas e desertificação, por meio de pesquisas realizadas em Marrocos e Irã. Diferentes parâmetros foram estimados, proporcionando uma avaliação abrangente desses fenômenos em regiões específicas. O estudo conduzido por Lamaamri *et al.* (2023) abordou a avaliação quantitativa da desertificação na bacia do Moulouya, localizada no nordeste de Marrocos. Utilizando imagens do Sentinel-2 e técnicas de índices espectrais, a pesquisa forneceu insights sobre a dinâmica da desertificação na região. Zolfaghari e Abdollahi (2022) contribuíram com uma análise da intensidade da desertificação na província de Sistan e Baluchestan, no Irã. Empregando índices espectrais derivados de imagens do Sentinel-2, o estudo proporcionou uma compreensão da intensidade do processo de desertificação na área de estudo. Rayne *et al.* (2023) conduziram uma pesquisa focada na detecção de desertificação nos antigos oásis do sul de Marrocos. A utilização de imagens do Sentinel-2 permitiu a análise das mudanças nas condições ambientais, proporcionando uma visão importante sobre os impactos da desertificação, destacando a eficácia do Sentinel-2 no monitoramento quantitativo de secas e desertificação, oferecendo uma base para a compreensão e resposta a esses fenômenos em diferentes contextos geográficos.

O estudo de monitoramento da agricultura também é objeto de análise por meio de imagens do satélite Sentinel-2, como evidenciado por Jędrejek *et al.* (2023) em sua investigação

sobre a qualidade do solo agrícola. Em um cenário específico de cultivo de milho sob condições de seca, a análise das imagens do Sentinel-2 possibilitou uma avaliação mais precisa das características do solo agrícola na Polônia. No Sudão, Zeyada *et al.* (2023) exploraram as capacidades do Sentinel-2 para monitorar a salinidade do solo e os teores de carbonato de cálcio em campos agrícolas, contribuindo de maneira significativa para um acompanhamento das propriedades do solo. A umidade do solo, um parâmetro crítico para o desenvolvimento das culturas, foi objeto de estudo na Arábia Saudita por Ma, Johansen e McCabe (2022). Eles empregaram uma abordagem óptica-trapezoidal combinada com dados do Sentinel-2, permitindo inferir a variabilidade da umidade do solo dentro de um campo e monitorar as diferentes fases de produção agrícola. A utilização dessas imagens proporcionou uma avaliação dinâmica das condições de umidade do solo ao longo do ciclo de cultivo, destacando a contribuição significativa do Sentinel-2 no monitoramento da agricultura.

A aplicação do mapeamento de riscos e desastres utilizando imagens do Sentinel-2 é evidenciada em estudos abordando diversos parâmetros críticos. Candotti *et al.* (2022) desenvolveram um quadro de monitoramento multi-temporal baseado no Sentinel-2 para avaliar danos causados pelo vento e infestações de besouros de casca em florestas de coníferas na Itália e Áustria. Em outra abordagem, Putri *et al.* (2022) empregaram a fusão de dados do Sentinel-1 e Sentinel-2 para distinguir níveis de danos em edifícios após o terremoto de Lombok em 2018, na Indonésia. No contexto de inundações, Caballero *et al.* (2019) utilizaram dados do Sentinel-2 para fornecer uma avaliação de inundações catastróficas na região oeste do Mediterrâneo, na Espanha. Esses estudos destacam a utilidade do Sentinel-2 como uma ferramenta para a compreensão, monitoramento e resposta imediata a eventos adversos, contribuindo significativamente para a gestão de riscos e desastres em diferentes cenários geográficos.

O monitoramento de florestas por meio de imagens de satélite revela-se crucial para avaliar diversos parâmetros de interesse. Zhen *et al.* (2021) exploraram o potencial do Sentinel-2 para mapear o conteúdo de clorofila nas folhas de manguezais na China, utilizando imagens de quatro períodos distintos. Em um contexto de ambientes mediterrâneos, Puletti *et al.* (2018) empregaram o Sentinel-2 na classificação de florestas na Itália, destacando a utilidade dessa abordagem para a caracterização de diferentes coberturas florestais. Além disso, Puletti *et al.* (2019) conduziram um estudo na Itália, monitorando os efeitos de eventos de seca extrema na saúde das florestas por meio de imagens do Sentinel-2. Esses estudos evidenciam a capacidade

do Sentinel-2 em fornecer dados para compreender a dinâmica das florestas em diferentes cenários, contribuindo para o monitoramento e gestão eficaz desses ecossistemas.

Monitorar queimadas é fundamental para avaliar diferentes parâmetros relacionados a incêndios florestais. Al-Dabbagh e Ilyas (2023) abordaram a detecção de incêndios florestais na Turquia, utilizando imagens Sentinel-2 em um modelo de segmentação semântica baseado em *deep learning*. A eficácia dessa abordagem proporcionou uma ferramenta para a identificação de áreas afetadas pelo fogo. Em uma perspectiva de gerenciamento de risco de incêndio, Mohamed e Abboud (2023) conduziram uma análise de risco de desastres por incêndios florestais nas regiões de Al-Qoubaiyat e Tyre, no Líbano, empregando imagens do Sentinel-2 e Landsat, contribuindo para estratégias de prevenção e resposta a eventos de fogo. No contexto de mapeamento de áreas queimadas, Arisanty *et al.* (2022) exploraram o uso de dados do Sentinel-2 para mapear áreas queimadas nas zonas úmidas de Banjarbaru, na província de South Kalimantan, Indonésia. Esses estudos ressaltam a importância do Sentinel-2 no monitoramento de incêndios florestais em diferentes regiões geográficas, fornecendo insights para a gestão e mitigação desses eventos.

Em resumo, o satélite Sentinel-2 tem aplicações que se estendem por uma vasta gama de áreas, desempenhando um importante papel no gerenciamento de áreas agrícolas e florestais, bem como na gestão da segurança alimentar. Destaca-se também a sua capacidade de fornecer informações sobre índices de vegetação, alterações no solo e nos cursos de água, contribuindo para a gestão sustentável dos recursos naturais. A versatilidade da missão é evidenciada pelos estudos reunidos no Quadro 1, que vão desde a análise do uso do solo até o monitoramento de secas, desertificação, riscos e desastres, além do acompanhamento de ambientes aquáticos e florestais. Pesquisas recentes destacam a eficácia do Sentinel-2 no mapeamento da cobertura vegetal, avaliação da saúde da vegetação, quantificação de secas e detecção de incêndios florestais. Em diversos contextos geográficos, o Sentinel-2 se mostra uma ferramenta importante para a compreensão e resposta a fenômenos terrestres e aquáticos, contribuindo significativamente para o avanço da pesquisa e gestão ambiental.

#### 2.5.2. Aplicações do satélite Sentinel-2 para estudos e monitoramento de recursos hídricos.

A gestão eficiente e precisa dos recursos hídricos em ambientes continentais é de suma importância para garantir a sustentabilidade dos ecossistemas aquáticos, a segurança hídrica e tomadas de decisões embasadas. Nesse contexto, uma abordagem abrangente para obter

informações sobre a distribuição e dinâmica desses recursos é necessária. Uma importante ferramenta para isso é o Sensoriamento Remoto (Du *et al.* 2016).

O Sentinel-2 tem a capacidade de captar dados abrangentes, o que tem implicações significativas para a gestão eficiente e precisa dos recursos hídricos em ambientes continentais. Além disso, o Sensoriamento Remoto via Sentinel-2 permite a quantificação de parâmetros relacionados à qualidade da água, como turbidez, concentração de clorofila-a e sedimentos (Kuhn *et al.*, 2019; Marinho *et al.*, 2021; Tian *et al.*, 2023; Toming *et al.*, 2016). Isso é fundamental para avaliar a saúde dos corpos d'água e identificar possíveis fontes de poluição. A análise de padrões espectrais também facilita a avaliação da condição e eutrofização dos corpos d'água, contribuindo para a gestão e restauração desses ecossistemas (Pompêo *et al.*, 2021; Salama *et al.*, 2022).

Uma aplicação notável do Sensoriamento Remoto por meio do Sentinel-2 é a detecção e monitoramento de mudanças hidrológicas. A análise de séries temporais de imagens permite identificar variações sazonais nos níveis de água e detectar eventos extremos, como inundações e secas (Peña- Luque *et al.*, 2021).

A capacidade do Sentinel-2 em prover informações sobre a extensão e distribuição espacial dos recursos hídricos desempenha um importante papel para a gestão integrada das bacias hidrográficas. O monitoramento de áreas úmidas, nascentes e margens fluviais contribui diretamente para a conservação da biodiversidade e a preservação dos ecossistemas, auxiliando na identificação de mudanças nesses ambientes, na proteção das nascentes, na detecção de poluição, no planejamento de recursos hídricos, na promoção de práticas agrícolas sustentáveis e na gestão eficiente dos recursos hídricos (Klinke *et al.*, 2018; Machado, 2018; Pizani *et al.*, 2022; Toming *et al.*, 2016). Essas funcionalidades possibilitam uma resposta eficaz às ameaças ambientais e garantem a disponibilidade de água de qualidade, preservando a saúde dos ecossistemas aquáticos (Ghirardi *et al.*, 2019; Torres-Bejarano *et al.*, 2020). Além disso, a combinação dos dados do Sentinel-2 com informações hidrológicas e climáticas permite a modelagem hidrológica e a previsão das demandas hídricas, fatores essenciais para garantir a gestão sustentável dos recursos (Cristina *et al.*, 2021; Fernandes, 2017; Idalino *et al.*, 2018).

Conforme observado no Quadro 1, a versatilidade das imagens fornecidas pelo Sentinel-2 transcende as análises terrestres, abarcando igualmente o monitoramento de ambientes aquáticos. Estudos específicos evidenciam a eficácia e contribuição significativa desse satélite na compreensão de fenômenos associados a alvos aquáticos. Desde a avaliação da qualidade da água até o mapeamento de ecossistemas aquáticos, torna-se evidente o papel crucial

desempenhado pelo Sentinel-2 na vigilância de corpos d'água em diversos contextos geográficos.

O monitoramento da qualidade da água emerge como uma importante aplicação do Sentinel-2, evidenciando sua eficácia em diversas regiões geográficas. No Irã, Noori *et al.* (2023) desenvolveram um modelo espaço-temporal para avaliar concentrações de Matéria Suspensa Total (TSM) e Sólidos Totais Dissolvidos (TDS) em lagos de regiões áridas, destacando a capacidade do Sentinel-2 em fornecer informações precisas sobre a qualidade da água nesse contexto. Na China, Zhang *et al.* (2023) abordaram a utilização de imagens do Sentinel-2 para monitorar Índice de Permanganato (CODMn), Fósforo Total (TP) e Nitrogênio Total (TN) como parâmetros de qualidade da água em rios, sublinhando a aplicação abrangente do Sentinel-2 na avaliação química dos recursos hídricos. Em ambientes urbanos no Canadá, Mahmoud *et al.* (2023) exploraram a capacidade do Sentinel-2 para monitorar níveis da água, clorofila-a (Chl-a), sólidos suspensos totais (TSS), turbidez e profundidade de Secchi (SD) em lagoas urbanas de águas pluviais, ressaltando a utilidade do satélite na análise da qualidade da água em contextos urbanos e contribuindo para estratégias de gestão ambiental. Esses estudos destacam a relevância do Sentinel-2 no monitoramento da qualidade da água, fornecendo insights para a gestão sustentável dos recursos hídricos.

O emprego do Sentinel-2 para a identificação e monitoramento de áreas úmidas e pântanos se destaca como uma aplicação de grande relevância. Em um estudo realizado nos Estados Unidos da América, Mohseni *et al.* (2023) desenvolveram um mapeamento abrangente de áreas úmidas na região dos Grandes Lagos, utilizando uma série temporal de imagens do Sentinel-2 e dados de um modelo digital de elevação (DEM) no ambiente Google Earth Engine. Essa abordagem integrada evidenciou a capacidade do Sentinel-2 em fornecer informações sobre a dinâmica das áreas úmidas em uma escala regional. Na Índia, Navarapu *et al.* (2023) abordaram o monitoramento contínuo de áreas úmidas, utilizando imagens do Sentinel-2 para estimar mudanças na extensão dessas áreas ao longo do tempo. A aplicação de técnicas baseadas em Sensoriamento Remoto permitiu uma avaliação das alterações nas áreas úmidas, contribuindo para o entendimento dinâmico desses ecossistemas na Índia. No contexto colombiano, Padilla-Mendoza *et al.* (2023) exploraram o potencial das imagens do Sentinel para avaliar concentrações de parâmetros físico-químicos em corpos d'água, com foco em um sistema de áreas úmidas no norte da Colômbia. A utilização dessas imagens demonstrou ser uma ferramenta útil na avaliação não apenas da extensão, mas também das características físico-químicas dessas áreas úmidas, contribuindo para estratégias eficazes de gestão ambiental. Esses

estudos refletem a capacidade do Sentinel-2 em fornecer dados espaciais relevantes para o monitoramento integrado de áreas úmidas e pântanos em diferentes contextos geográficos.

A aplicação do monitoramento da turbidez, utilizando dados provenientes do satélite Sentinel-2, tem sido objeto de estudo em diversas regiões geográficas, evidenciando a relevância dessa abordagem para avaliações espaço-temporais. No contexto chinês, Ma *et al.* (2021) exploraram a estimativa da turbidez em lagos do nordeste da China, empregando imagens do Sentinel-2 juntamente com algoritmos de aprendizado de máquina. O estudo demonstrou a eficácia dessa combinação para fornecer informações sobre a turbidez em corpos d'água, destacando a utilidade do Sentinel-2 nesse cenário específico. Na Espanha, Sebastiá-Frasquet *et al.* (2019) analisaram padrões de turbidez em uma lagoa costeira por meio do Sentinel-2. A aplicação dessas imagens permitiu uma avaliação precisa dos níveis de turbidez, contribuindo para a compreensão da dinâmica ambiental nesse ecossistema costeiro específico. Em Marrocos, Maimouni *et al.* (2022) realizaram um monitoramento espaço-temporal da turbidez em lagoas costeiras, utilizando dados do Sentinel-2. Essa análise abrangente proporcionou insights sobre as variações da turbidez ao longo do tempo, oferecendo uma perspectiva das condições ambientais dessas lagoas costeiras marroquinas. Esses estudos destacam o papel do Sentinel-2 no monitoramento eficiente e abrangente da turbidez em diferentes contextos, contribuindo para a compreensão dos padrões espaciais e temporais desse importante parâmetro em ecossistemas aquáticos.

A aplicação da detecção e mapeamento de corpos hídricos também tem sido objeto de investigação, visando o aprimoramento de algoritmos e índices para uma avaliação precisa e eficaz. Na Austrália, Tayer *et al.* (2023) conduziram um estudo focado na melhoria da precisão do algoritmo Water Detect, utilizando imagens do Sentinel-2, Planetscope e imagens aprimoradas. Este estudo se destacou por sua abordagem em um rio intermitente, evidenciando a aplicação de tecnologias na detecção de água. Na Etiópia, Tesfaye e Breuer (2023) avaliaram o desempenho de índices para a detecção de recursos hídricos, fazendo uso extensivo de dados do Sentinel-2 em larga escala. A pesquisa abordou questões relacionadas ao monitoramento de recursos hídricos, proporcionando insights relevantes para a gestão sustentável desses recursos no contexto etíope. Lombana (2023) dedicou-se ao mapeamento de inundações em rios de pequeno porte na Espanha, analisando índices espectrais em imagens do Sentinel-2. O estudo enfocou a precisão na detecção de inundações, fornecendo uma abordagem valiosa para o monitoramento de eventos hidrológicos em escalas menores. Essas pesquisas coletivas contribuem significativamente para o avanço da detecção e mapeamento de corpos hídricos.

O monitoramento de clorofila tem sido objeto de estudo em diversos contextos geográficos, visando aprimorar a detecção de florescências de cianobactérias e realizar análises de clorofila-a em ambientes aquáticos. No estudo realizado na Espanha por Viso-Vázquez *et al.* (2021), foi realizada a detecção remota de florações de cianobactérias e a análise de clorofila-a em um reservatório eutrófico, utilizando imagens do Sentinel-2. Esta pesquisa destacou-se pelo enfoque na avaliação de corpos d'água eutróficos, fornecendo insights relevantes para a compreensão da dinâmica da clorofila em ambientes impactados por cianobactérias. Na China, Li *et al.* (2022) concentraram-se no monitoramento da concentração de clorofila-a em lagos de platô cárstico, utilizando imagens do Sentinel-2 do caso de estudo no Reservatório de Pingzhai em Guizhou. A pesquisa evidenciou a utilidade do Sentinel-2 na avaliação da qualidade da água em lagos, contribuindo para a compreensão das variações temporais da clorofila-a. Por fim, Ogashawara *et al.* (2021) conduziram um estudo comparativo em diferentes lagos no norte da Alemanha, utilizando o Sentinel-2 para avaliação da dinâmica espacial da clorofila-a. Essa pesquisa destacou-se pela análise comparativa em distintos corpos d'água, enfatizando a aplicabilidade do Sentinel-2 na compreensão da variabilidade espacial da clorofila-a em diferentes contextos aquáticos.

A aplicação do monitoramento de regiões costeiras tem sido abordada em diversos estudos, visando mapear e monitorar parâmetros importantes para a compreensão da qualidade da água marinha. Um estudo conduzido na China por Kwong *et al.* (2022) focou na automação do mapeamento e monitoramento de parâmetros de qualidade da água marinha em Hong Kong, utilizando séries temporais de imagens do Sentinel-2 e computação em nuvem pelo Google Earth Engine. Na Austrália, Pepi *et al.* (2023) abordaram o monitoramento da saúde de corpos d'água costeiros, utilizando imagens do Sentinel-2. O estudo enfatizou a tendência atual na ciência da engenharia e destacou a eficácia do Sentinel-2 na avaliação da saúde de corpos d'água costeiros. Além disso, Sebastiá-Frasquet *et al.* (2019) realizaram uma análise de padrões de turbidez em uma lagoa costeira na Espanha, utilizando o Sentinel-2. O estudo ressaltou a capacidade dessa tecnologia em analisar padrões espaciais de turbidez, proporcionando insights para a compreensão da dinâmica ambiental em lagoas costeiras.

Em síntese, o Sensoriamento Remoto, especialmente por meio do satélite Sentinel-2, desempenha um papel importante na administração dos recursos hídricos em ambientes continentais, apesar de algumas limitações inerentes à sua operação. Este sistema facilita a identificação de áreas propensas a inundações, monitoramento de vegetação, solos e regiões

costeiras, além de auxiliar na gestão de recursos hídricos, agricultura, florestas, zonas costeiras e desastres naturais.

Quando se trata de monitoramento de recursos hídricos, o Sensoriamento Remoto permite a identificação de áreas com escassez de água, monitoramento da qualidade da água, planejamento e gestão de recursos hídricos, detecção de vazamentos e desperdícios. Além disso, oferece suporte à tomada de decisão e monitoramento de diversos aspectos, como agricultura, florestas, zonas costeiras, águas interiores, desastres naturais e uso e ocupação das terras.

Pesquisas recentes que exploram as aplicações do Sensoriamento Remoto, particularmente no monitoramento de recursos hídricos continentais, estão inseridas em um campo de pesquisa em constante evolução. Esses estudos são fundamentais para promover o uso eficiente dessa tecnologia na gestão sustentável dos recursos hídricos continentais, proporcionando uma compreensão mais aprofundada das capacidades do Sentinel-2 e do seu potencial impacto na gestão dos ecossistemas aquáticos.

Em conclusão, as aplicações do satélite Sentinel-2 no monitoramento de recursos hídricos são extensas e importantes para a gestão eficaz e sustentável desses ecossistemas. A capacidade do Sentinel-2 de coletar dados abrangentes e fornecer informações sobre a distribuição e dinâmica dos recursos hídricos desempenha um papel importante. Desde a quantificação de parâmetros relacionados à qualidade da água até a detecção e monitoramento de mudanças hidrológicas, o Sentinel-2 se destaca como uma ferramenta valiosa. Além disso, o satélite contribui significativamente para a gestão integrada de bacias hidrográficas, monitorando áreas úmidas, nascentes e margens fluviais. O uso dessas informações possibilita uma resposta eficaz às ameaças ambientais, garantindo a disponibilidade de água de qualidade e a preservação da saúde dos ecossistemas aquáticos. Estudos específicos mencionados no Quadro 1 reforçam a versatilidade do Sentinel-2, destacando sua eficácia na avaliação da qualidade da água, no mapeamento de áreas úmidas, na detecção de corpos d'água e na análise da turbidez. O monitoramento de parâmetros, como a clorofila-a, em diferentes contextos geográficos evidencia a contribuição do Sentinel-2 para a compreensão da dinâmica desses ambientes.

## 2.6. Métodos de validação.

A validação é um componente essencial de qualquer estudo de Sensoriamento Remoto, consistindo na comparação dos dados de Sensoriamento Remoto com dados de referência independentes para avaliar a precisão das estimativas. Esses dados de referência são geralmente obtidos por meio de métodos tradicionais e diretos de coleta de dados, como observações in loco ou medições físicas, abrangendo diversas escalas (Chen *et al.*, 2022).

Por exemplo, estudos sobre monitoramento de reflorestamento na Itália utilizaram imagens Landsat e técnicas de aprendizado de máquina para comparar abordagens diretas e indiretas de mapeamento, destacando a importância da validação na avaliação da precisão dos mapas (Francini *et al.*, 2023). De modo similar, no monitoramento da expansão urbana, o uso de técnicas de separação espectral em Veneza sublinhou a necessidade de mapas precisos de abundância fracionária de referência para melhorar a precisão espacial e os procedimentos de validação (Cavalli, 2022). Além disso, a aplicação de modelos de Random Forest no monitoramento da seca em pastagens na Mongólia Interior demonstra a importância de validar os resultados para garantir a precisão e confiabilidade do modelo na avaliação de situações de seca (Wang *et al.*, 2022).

A validação é fundamental para sustentar a integridade e a qualidade dos estudos de Sensoriamento Remoto, verificando a precisão das estimativas derivadas dos dados. Dependendo do tipo de dados e do objetivo do estudo, diversos métodos de validação podem ser empregados. Por exemplo, ao estimar a cobertura florestal de uma região, os dados de Sensoriamento Remoto seriam comparados com dados coletados diretamente na floresta. Essa etapa é crucial para assegurar a confiabilidade e a precisão dos resultados. Sem uma validação adequada, as estimativas baseadas em Sensoriamento Remoto podem ser imprecisas, levando a conclusões errôneas ou a tomadas de decisão inadequadas.

Um método comum de validação é a comparação com dados de campo. Isso envolve a coleta de dados in situ que correspondem aos dados de Sensoriamento Remoto e a comparação para avaliar a precisão das estimativas. Por exemplo, em estudos de recursos hídricos, pode-se coletar amostras de água para medir turbidez ou concentração de clorofila e comparar essas medidas com as estimativas derivadas dos dados satelitais (Giardino *et al.*, 2007).

Outra abordagem é a comparação com outros conjuntos de dados de Sensoriamento Remoto. Dados do Landsat podem ser comparados com dados de outros satélites, como o MODIS, para avaliar a consistência entre os conjuntos de dados (Roy *et al.*, 2014). Além disso,

dados de Sensoriamento Remoto podem ser validados utilizando modelos físicos ou matemáticos, como a validação de dados de precipitação por meio de modelos hidrológicos que simulam o ciclo da água (Mohia *et al.*, 2023).

Todavia, todos esses métodos apresentam limitações e desafios. A coleta de dados de campo pode ser dispendiosa e demorada, além de ser difícil em áreas de acesso complicado (Gardiner, 2017). A comparação com outros conjuntos de dados de Sensoriamento Remoto pode ser afetada por diferenças nas características dos sensores e nas técnicas de processamento (Meng, 2023). A validação usando modelos físicos ou matemáticos pode ser comprometida por incertezas nos próprios modelos (Ling *et al.*, 2023).

Especificamente sobre a validação dos dados de Sensoriamento Remoto voltados aos recursos hídricos, segundo Barbosa *et al.* (2019), dados radiométricos obtidos *in loco*, como a radiância e a irradiância espectral, são essenciais para estudar o comportamento espectral dos corpos d'água e parametrizar algoritmos que estimam os Constituintes Opticamente Ativos (COAs). Contudo, essas medições podem ser afetadas por incertezas devido a fatores externos, como a reflexão especular. Portanto, o processamento desses dados é crucial para assegurar a consistência das medições e suas derivações matemáticas. Técnicas de filtragem podem ser aplicadas para eliminar espectros ruidosos e medições inconsistentes, além de identificar feições específicas e modelar os COAs.

## **2.7. Métodos de modelagem dos COAs.**

Segundo Barbosa *et al.* (2019), existem três abordagens principais para o desenvolvimento de algoritmos de modelagem dos COAs: empírica, semi-empírica e analítica. A abordagem empírica, foco dos estudos de caso desta dissertação, baseia-se em métodos estatísticos bivariados ou multivariados para relacionar as medidas de refletância de Sensoriamento Remoto com as concentrações de COAs medidas no local durante a passagem do satélite. A abordagem semi-empírica utiliza feições espectrais diagnósticas dos COAs conhecidas e incluídas na análise de regressão. Já a abordagem analítica fundamenta-se nas relações diretas e inversas entre os COAs e as propriedades ópticas inerentes medidas *in situ* (Barbosa *et al.*, 2019).

Os modelos empíricos são populares por sua simplicidade, mas possuem limitações temporais e não permitem caracterizar a composição espectral do campo de luz subaquático. Em contraste, os algoritmos semi-empíricos são importantes porque fornecem abrangência

temporal e permitem determinar o campo de luz subaquático, a profundidade da zona eufótica e os coeficientes de atenuação difusa (Barbosa *et al.*, 2019).

A abordagem empírica baseia-se no desenvolvimento de regressões estatísticas, tanto bivariadas quanto multivariadas, entre medidas concomitantes de refletância espectral e as concentrações de COAs. Quando as feições espectrais diagnósticas dos COAs são conhecidas e incluídas nas análises de regressão, essa abordagem é chamada de semi-empírica. Em contraste, a abordagem semi-analítica fundamenta-se nas relações diretas e inversas entre os COAs, as Propriedades Ópticas Inerentes (IOPs) e as Propriedades Ópticas Aparentes (AOPs), por meio de soluções da Equação de Transferência Radiativa (ETR) (Barbosa *et al.*, 2019).

Esta dissertação direciona o foco para a análise empírica dos dados, visando verificar a correlação dos dados ambientais dos COAs coletados em campo, que coincidem com as datas da passagem do satélite Sentinel-2. Isso foi feito para validar a correlação empírica desses dados e permitir a aplicação de estudos de caso em diferentes locais do Brasil, mesmo sem equipes presentes no local no momento dos eventos para a verificação radiométrica. Embora isso pudesse proporcionar uma abordagem semi-analítica, a exploração de mais áreas do vasto território brasileiro foi viabilizada por meio do levantamento de dados em campo dos COAs por outras instituições. Como resultado, uma robusta correlação empírica foi encontrada, como será apresentado nos estudos de caso subsequentes.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS.

Neste capítulo, são descritos os materiais e métodos utilizados nos estudos de caso que integram esta pesquisa. Primeiramente, introduzem-se as áreas de estudo e a lista dos casos analisados. Em seguida, detalham-se os procedimentos de aquisição, pré-processamento e correção atmosférica das imagens obtidas pelo satélite Sentinel-2. Após, são expostos os roteiros metodológicos específicos para cada caso estudado. Concluindo, o fluxo de trabalho é ilustrado através de um diagrama de fluxo.

#### 3.1 Áreas de estudo.

O processo investigativo desta pesquisa foi realizado, basicamente, por meio de testes em quatro diferentes estudos de caso, em quatro áreas distintas do território brasileiro. Dois desses estudos focaram na análise da qualidade da água, enquanto os outros dois se concentraram na análise da quantidade de água disponível.

Os estudos de caso voltados para a avaliação da qualidade da água ocorreram nos estados de Minas Gerais e São Paulo. Em Minas Gerais, o estudo foi realizado na bacia hidrográfica do rio Paraopeba, onde foi avaliada a turbidez após o rompimento de uma barragem de rejeitos de mineração. Em São Paulo, o estudo ocorreu próximo à região metropolitana da capital, nos reservatórios responsáveis pelo abastecimento público de água na região.

Em relação aos estudos de caso voltados para a avaliação da quantidade de água, o primeiro deles, e a maior área de estudo desta dissertação, abrangeu toda a região semiárida brasileira, e foi responsável por estimar o volume de água represada em pequenos e médios reservatórios da região. Já o segundo estudo de caso ocorreu no município de Rio Claro, interior do estado de São Paulo, e serviu para a avaliação da água armazenada no solo nas periferias urbanas do município.

A relação das áreas de estudo e das análises realizadas em cada uma delas está organizada no Quadro 2. Neste quadro, os estudos estão ordenados conforme os objetivos: primeiramente, os estudos de caso voltados à qualidade da água, e posteriormente, os estudos voltados à quantidade de água. Naturalmente, essa apresentação também está conforme os capítulos de resultados. O quadro apresenta, também, os dados produzidos em cada um dos estudos analisados durante a pesquisa.

Quadro 2 – Estudos de caso realizados por áreas de estudo.

| Eixo de Investigação | Área de estudo                                                            | Escala de Análise           | Análise realizada                                                                                            |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Qualidade da água    | Bacia hidrográfica do rio Paraopeba, Minas Gerais.                        | ~ 10.000 km <sup>2</sup>    | Avaliação da turbidez presente nas águas do rio Paraopeba após o rompimento de uma barragem de mineração.    |
| Qualidade da água    | Reservatórios de abastecimento público, Região Metropolitana de São Paulo | ~ 150 km <sup>2</sup>       | Avaliação da clorofila presente nas águas dos reservatórios Guarapiranga, Rio Grande e Billings.             |
| Quantidade de água   | Região semiárida do Brasil.                                               | ~ 1.000.000 km <sup>2</sup> | Avaliação da quantidade de água armazenada em pequenos e médio reservatórios na região semiárida brasileira. |
| Quantidade de água   | Município de Rio Claro, São Paulo                                         | ~ 500 km <sup>2</sup>       | Avaliação da umidade presente no solo, nas periferias da zona urbana do município de rio claro.              |

Fonte: Elaborado pelo autor

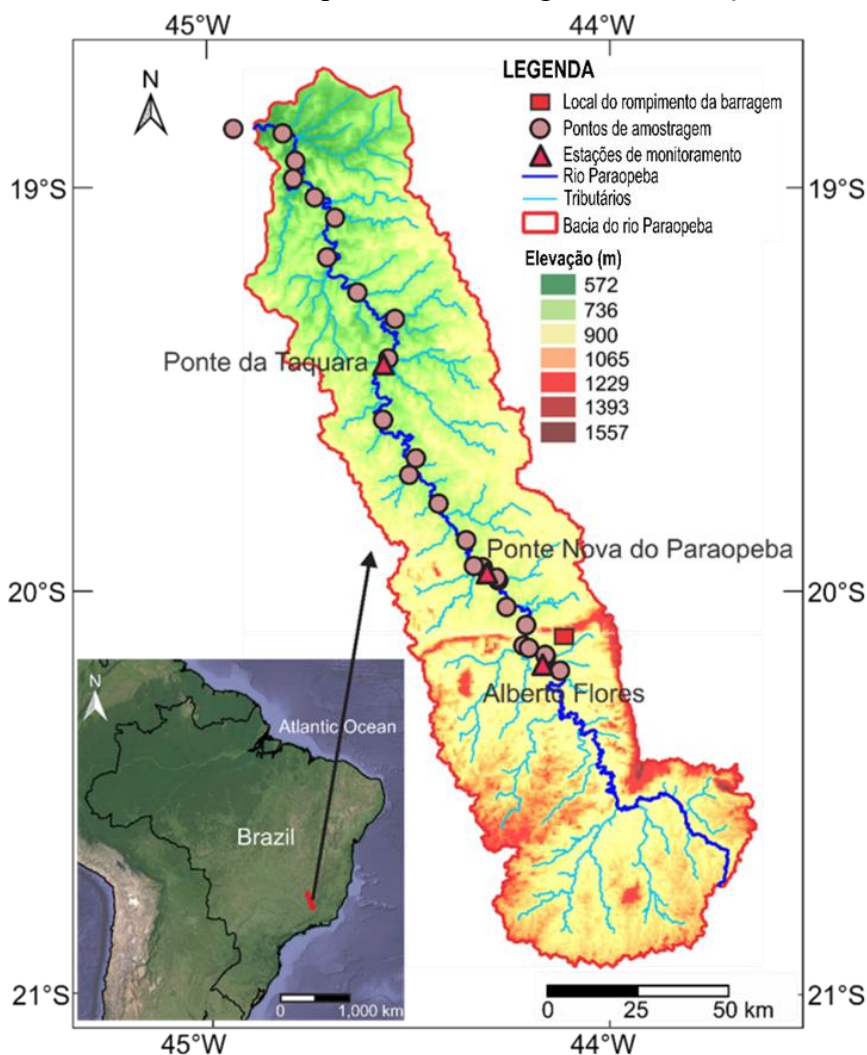
As análises realizadas representam a gama de investigações e análises nos estudos de caso, que ilustram diferentes aplicações do satélite Sentinel-2 no contexto brasileiro, em diferentes escalas e situações geográficas. Esse arcabouço de dados, escalas e análises diversas configura o processo exploratório adotado nesta pesquisa.

### 3.1.1. Área de Estudos das aplicações para qualidade de água.

A área de estudo (Figura 1), no estudo acerca da estimativa de turbidez, está localizada na Mesorregião Metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, que é o maior produtor de minério de ferro do país. Possuindo uma composição geológica diversificada, a região experimentou a atividade de mineração desde o período colonial brasileiro. A bacia hidrográfica do rio Paraopeba, um dos principais afluentes do rio São Francisco, tem uma extensão aproximada de 510 km, abrangendo uma área de 13.643 km<sup>2</sup> e

englobando 35 municípios. A nascente do rio Paraopeba está localizada na porção sul do município de Cristiano Ottoni, e sua foz está situada no reservatório de Três Marias, no município de Felixlândia.

Figura 1- Localização da área de estudo e distribuição das 49 estações de monitoramento in situ de turbidez; local do rompimento da barragem e três estações de medição



Fonte: Modelo Digital de Elevação ALOS PALSAR  
Elaborado pelo autor.

Na Figura 1, é possível observar o rio Paraopeba e seus afluentes, bem como a bacia hidrográfica associada. Além disso, estão demarcados 49 pontos de amostragem in situ. Vale destacar que o local onde a barragem de rejeitos estava situada também está dentro dessa bacia hidrográfica.

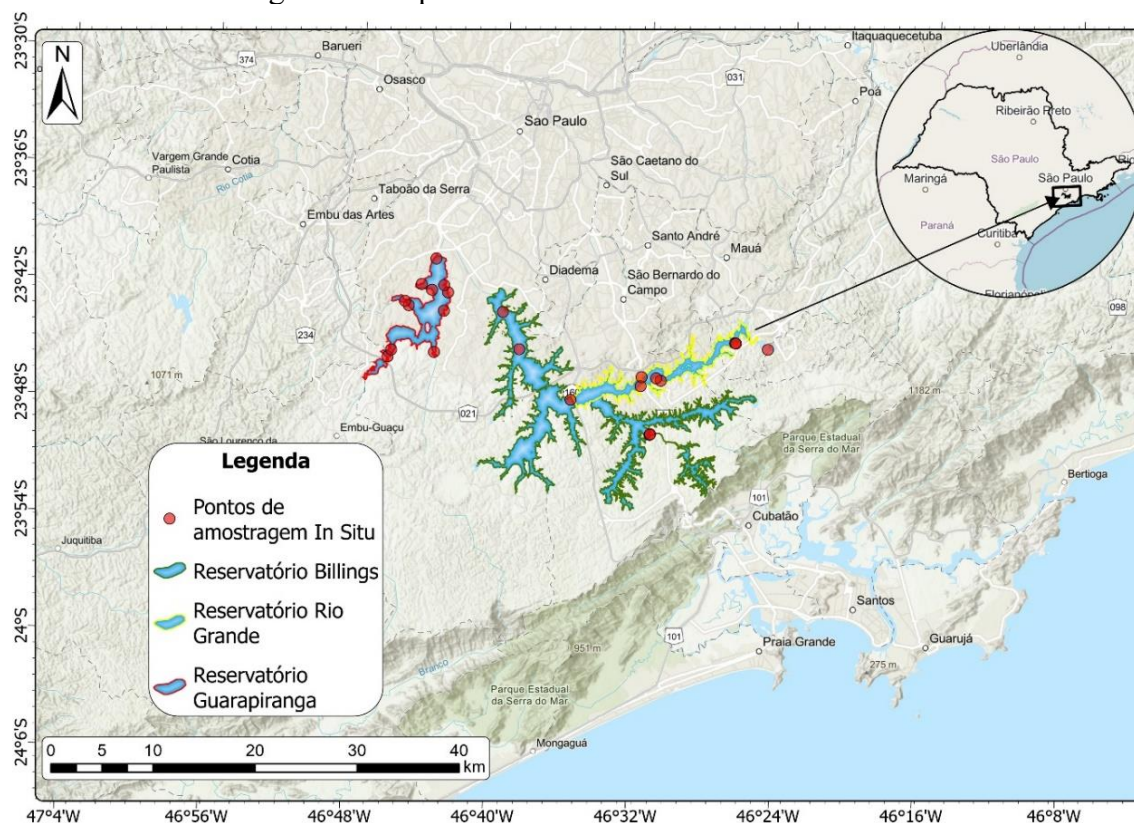
A área de estudo (Figura 2), no estudo acerca da estimativa da Concentração de Clorofila-a, concentra-se nas represas Billings, Guarapiranga e Rio Grande estão localizadas nas coordenadas 23°47'20"S, 46°36'00"O; 23°43'00"S, 46°43'50"O e 23°48'52.00"S,

46°32'15.00"O, respectivamente, e pertencem à bacia hidrográfica do Alto Tietê, uma das mais importantes do estado de São Paulo. Essas represas desempenham um papel crucial no abastecimento público de água na região metropolitana de São Paulo, sendo a Represa Guarapiranga utilizada para suprir a demanda da cidade de São Paulo, enquanto a Represa Billings atende principalmente a Grande ABC.

O Reservatório Billings, situado a oeste da cidade de São Paulo, a uma altitude de 746 metros, desempenha um papel fundamental na região. Com uma bacia de drenagem de extensão territorial considerável de aproximadamente 560 quilômetros quadrados, ele abrange áreas de diversos municípios (Cetesb, 1996). Sua criação remonta a 1927, quando foi idealizado pelo engenheiro estadunidense Asa Billings, com o objetivo inicial de aproveitar as águas do Alto Tietê para a geração de energia elétrica nas usinas de Cubatão (Cetesb, 2003).

Atualmente, o reservatório desempenha múltiplas funções essenciais para a região. Além do abastecimento público e industrial, ele também recebe efluentes domésticos e industriais, gera energia, viabiliza a pesca, a irrigação e oferece opções de recreação. A localização geográfica estratégica e a diversidade de usos das águas do Reservatório Billings evidenciam sua relevância em termos de planejamento territorial e sustentabilidade hidrológica, fornecendo recursos hídricos essenciais para uma ampla variedade de setores e atividades (Cetesb, 1996; Cetesb, 2003).

Figura 2 - Mapa da área de estudo com os reservatórios.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A formação morfológica do Reservatório Billings é caracterizada por um corpo central alongado e estreito que se conecta a diversos braços, alguns com grande volume (Figura 2). O afluxo de água ocorre preferencialmente ao longo do canal central, o que resulta no parcial isolamento do corpo central em relação à maior parte do volume de água presente nos braços (Cetesb, 2003). Esse isolamento possibilita a formação de compartimentos com diferenças na qualidade de suas águas (Wengrat; Bicudo, 2011).

O Reservatório Billings, localizado na região metropolitana de São Paulo, é um importante manancial que possui um compartimento característico, o braço Rio Grande. Esse braço é responsável pelo abastecimento público de cerca de 1,2 milhões de habitantes, por meio de uma estação de captação operada pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), sendo alimentado apenas pela região do seu entorno desde a construção de uma barragem sob a rodovia Anchieta em 1981. Esse fato interrompeu a descarga do corpo central para o Rio Grande, preservando a qualidade da água (Pompêo *et al.*, 2015).

Outro manancial importante na região metropolitana de São Paulo é o Reservatório Guarapiranga, construído em 1908 com o objetivo principal de regularizar o fluxo do Rio Tietê e gerar energia elétrica. Com uma área de 33,91 km<sup>2</sup>, perímetro de 85 km e volume de 194x106

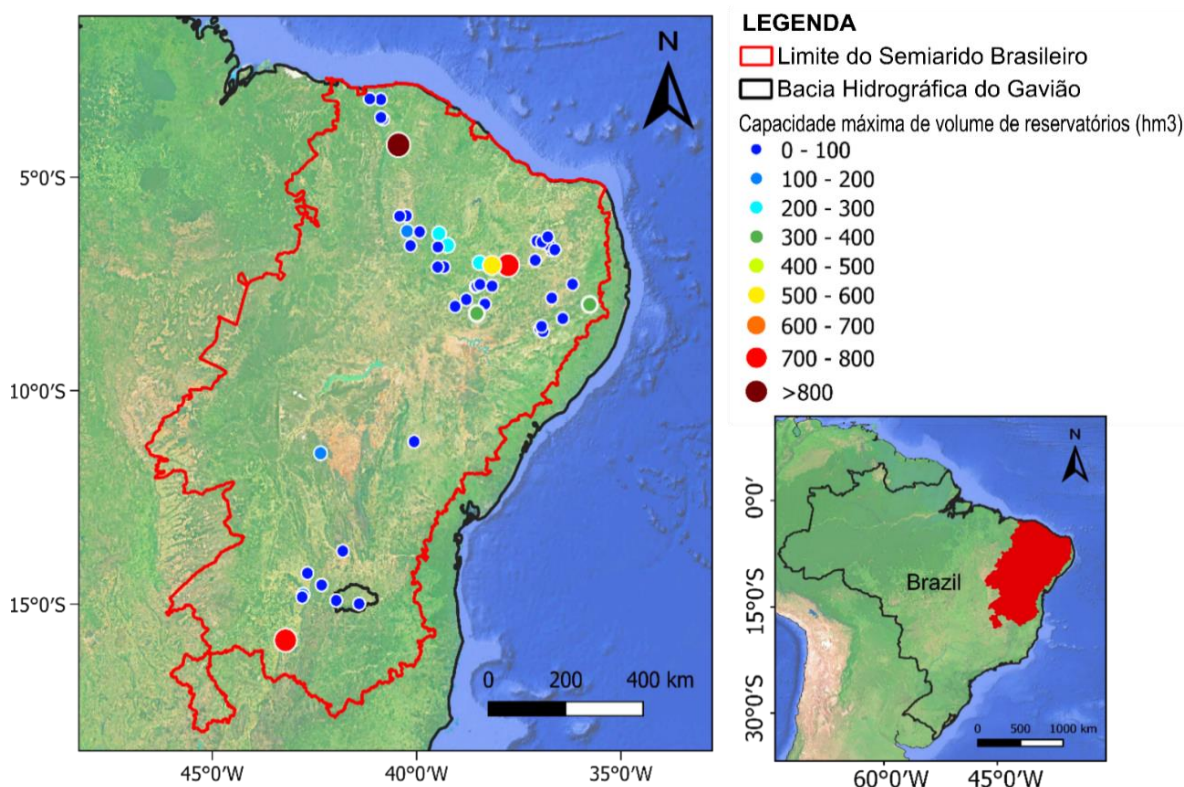
m<sup>3</sup>, o reservatório é alimentado por vários afluentes, incluindo o Rio Guarapiranga, Santa Rita, Laura, Embu-Guaçu, Embu-Mirim, Ribeirão Mirim e outros 17 córregos menores. Desde 1927, o reservatório é utilizado para abastecer a cidade de São Paulo com água potável (Cetesb, 2003).

A bacia hidrográfica do Guarapiranga abrange uma área de cerca de 640 km<sup>2</sup>, correspondendo a aproximadamente 8% da Região Metropolitana de São Paulo, com uma população de cerca de 622 mil pessoas, principalmente nas áreas próximas ao reservatório. Infelizmente, a ocupação desordenada na região resultou em um impacto significativo, substituindo a vegetação natural pela intensa urbanização e elevando os índices de poluição da água. Essa ocupação é mais notável em favelas e loteamentos clandestinos, onde muitos dos habitantes vivem em condições socioeconômicas precárias (Cetesb, 2003).

### 3.1.2 Área de Estudos das aplicações para quantidade de água.

O primeiro estudo de caso sobre as aplicações para a quantidade de água abrange a área do semiárido brasileiro, que ocupa uma área de 1.069.565,71 km<sup>2</sup>, correspondendo a 12,6% do território nacional (Figura 3). Essa região engloba 1.262 municípios e uma população de 26,5 milhões de habitantes (Sudene, 2017). O semiárido se caracteriza por apresentar valores de precipitação acumulada anual inferiores a 800 mm/ano, um índice de aridez de Thornthwaite abaixo de 0,50 e um déficit hídrico superior a 60% (Sudene, 2017).

Figura 3 - Semiárido brasileiro: limites do semiárido brasileiro e localização dos 48 reservatórios utilizados no presente estudo de caso



Fonte: Limite do semiárido através do catálogo de metadados da ANA, elaborado pelo autor.

Uma parcela significativa do território brasileiro é composta por regiões semiáridas, onde a escassez de água afeta a população local, limitando o desenvolvimento socioeconômico. Considerando a dependência de uma grande parte da população do semiárido brasileiro em relação aos reservatórios, a avaliação precisa do volume real de armazenamento de água nesses locais é de extrema importância para o uso sustentável desse recurso.

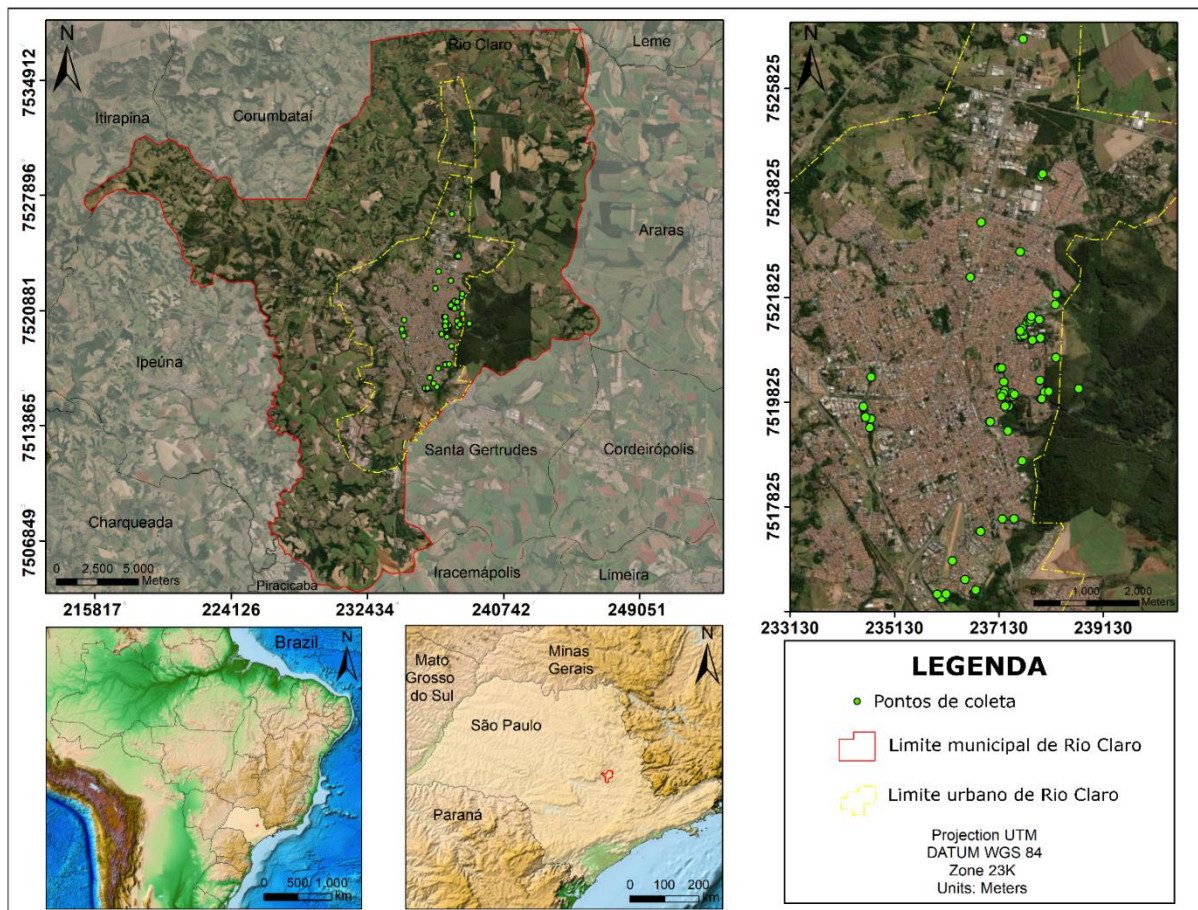
Embora os reservatórios mais relevantes sejam continuamente monitorados pelo Instituto Nacional do Semiárido (INSA), muitos reservatórios de pequeno a médio porte não são contabilizados, resultando em uma lacuna significativa de informações. Dada a grande importância dos reservatórios de menor porte no semiárido brasileiro como fonte de abastecimento de água e suporte à agricultura, é crucial que essas estruturas também sejam consideradas no monitoramento e gestão dos recursos hídricos.

O segundo estudo de caso sobre a quantidade de água tem como área de estudo o município de Rio Claro, localizado na região central do Estado de São Paulo, na região sudeste do Brasil, (conforme ilustrado na Figura 4). Mais especificamente, a área estudada engloba a zona urbana e as áreas periurbanas de Rio Claro, que apresentam uma diversidade de ocupação

e uso do solo. Uma parcela significativa é composta por áreas impermeáveis, como concreto e asfalto, categorizadas, no mapa de uso e cobertura da terra (Figura 15), como ‘Urbano’, enquanto outras áreas são cobertas por vegetação nativa ou reflorestada (‘Floresta’), solo exposto e cobertura de gramíneas ou pastagem.

A Figura 4 destaca a localização geográfica e os pontos específicos de coleta de amostras de solo para a determinação da umidade. A interação entre os ambientes urbano e periurbano é levada em consideração para uma compreensão abrangente dos processos hidrológicos e ambientais. A delimitação dessa área é importante para a análise dos fatores que influenciam a distribuição e o comportamento da umidade do solo nesses contextos.

Figura 4 - Localização do município de Rio Claro, onde se encontra a área de estudo. Também são apresentados os locais onde as amostras de solo foram coletadas para determinação da umidade do solo.

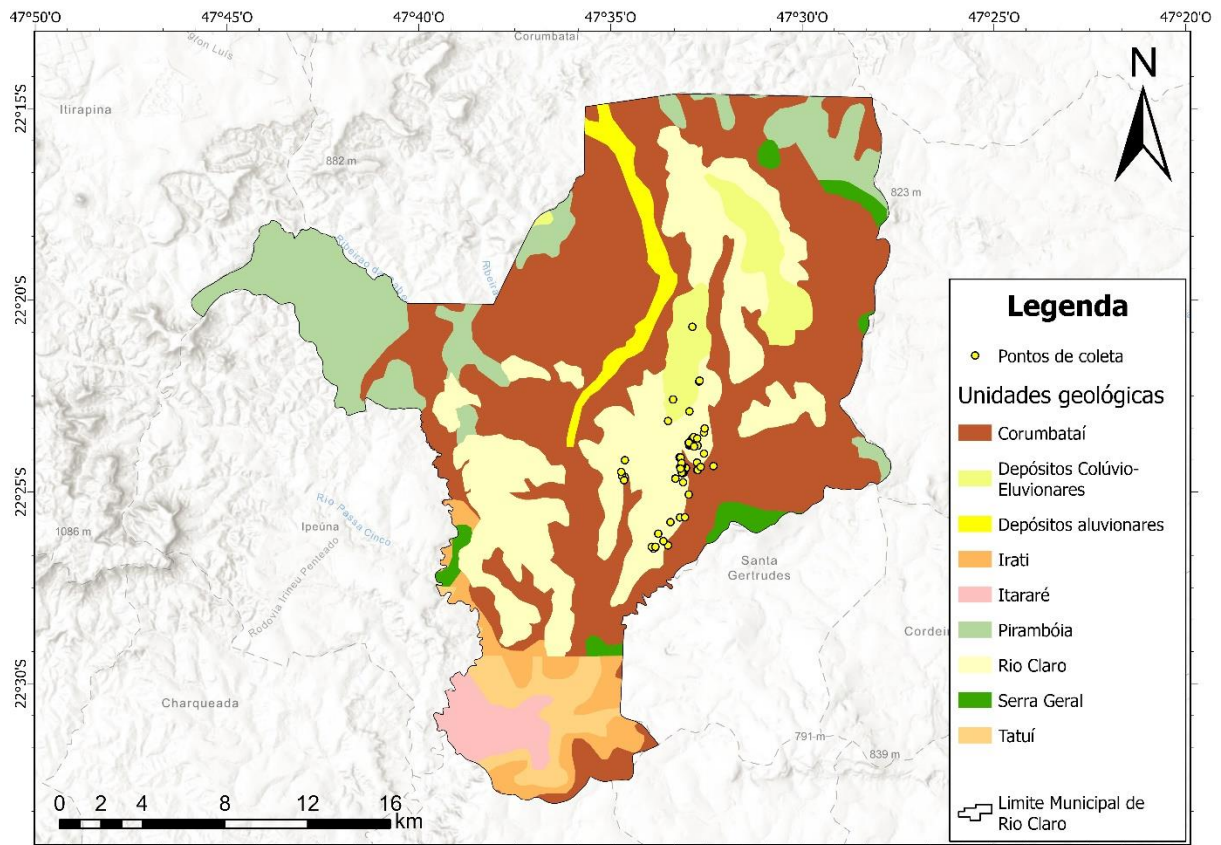


Fonte: elaborado pelo autor.

Em termos geológicos, a Formação Rio Claro, caracterizada por arenitos argilosos de granulação fina a média, cobre a maior parte da área de estudo. Siltitos da Formação Corumbataí, diabásios da Formação Serra Geral e depósitos aluviais quaternários são

encontrados em menor extensão. A maioria das amostras foi coletada no aquífero Rio Claro, objeto de vários estudos hidrogeológicos anteriores (Oliva, 2006; Nogueira; Kiang, 2015; Neto *et al.*, 2016). A Figura 5 ilustra as unidades geológicas do município de Rio Claro e os pontos específicos de coleta de amostras em campo.

Figura 5 - Mapa de caracterização das unidades geológicas de Rio Claro, escala 1:750.000.



Fonte: Unidades litológicas, Geologia e Recursos Minerais do Estado de São Paulo/ Programa Geologia do Brasil - CPRM (2006). Mapa criado pelo autor.

### 3.2 Aquisição, pré-processamento e correção atmosférica das imagens do satélite Sentinel-2.

As características das bandas do Sentinel-2 (MSI), incluindo os comprimentos de onda centrais e as resoluções espaciais correspondentes, estão apresentadas no quadro 3 a seguir:

Quadro 3 – Características das bandas do Sentinel-2 (MSI): comprimentos de onda centrais e resoluções espaciais das imagens.

| <b>Bandas do Sentinel-2</b>                              | <b>Comprimento de Onda Central (nm)</b> | <b>Resolução espacial (m)</b> |
|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------|
| Banda 1 – Aerossol costeiro                              | 442,7                                   | 60                            |
| Banda 2 – Azul                                           | 492,4                                   | 10                            |
| Banda 3 – Verde                                          | 559,8                                   | 10                            |
| Banda 4 – Vermelho                                       | 664,6                                   | 10                            |
| Banda 5 – Borda vermelha da vegetação                    | 704,1                                   | 20                            |
| Banda 6 – Borda vermelha da vegetação                    | 740,5                                   | 20                            |
| Banda 7 – Borda vermelha da vegetação                    | 782,8                                   | 20                            |
| Banda 8 – NIR (Infravermelho próximo)                    | 832,8                                   | 10                            |
| Banda 8A – Borda vermelha da vegetação                   | 864,7                                   | 20                            |
| Banda 9 – Vapor d'água                                   | 945,1                                   | 60                            |
| Banda 10 – SWIR (Infravermelho de ondas curtas) - Cirrus | 1373,5                                  | 60                            |
| Banda 11 – SWIR (Infravermelho de ondas curtas)          | 1617,7                                  | 20                            |
| Banda 12 – SWIR (Infravermelho de ondas curtas)          | 2202,4                                  | 20                            |

Fonte: Adaptado de ESA (2023).

Quadro 3 apresenta as características das bandas do satélite Sentinel-2, incluindo os comprimentos de onda centrais e as resoluções espaciais correspondentes. O comprimento de

onda central de cada banda, medido em nanômetros (nm), indica a região do espectro eletromagnético que a banda capta. A resolução espacial, medida em metros (m), indica a menor área na superfície da Terra que cada pixel da imagem representa. Por exemplo, a Banda 1 – Aerossol costeiro tem um comprimento de onda central de 442,7 nm e uma resolução espacial de 60 m, o que significa que cada pixel dessa banda representa uma área de 60 m x 60 m na superfície da Terra e capta a luz na região do espectro correspondente a 442,7 nm.

As imagens originais obtidas correspondem ao produto do Nível 1C (L1C) na parte superior da atmosfera (TOA), inicialmente expressas em Números Digitais (DN). Para converter esses valores em refletância, foi aplicada a Equação 1:

$$Reflectance = DN/Qv \quad (1)$$

O Valor de Quantização (Qv) é disponibilizado nos metarquivos associados às imagens do Sentinel-2, de acordo com a documentação do Sentinel Hub (2023).

Uma vez que os dados brutos são inicialmente expressos na forma de Números Digitais (DN), é necessário realizar uma conversão para unidades físicas de refletância. Tal transformação é realizada mediante a divisão pelo fator de dimensionamento conhecido como Valor de Quantização (Qv), conforme expresso na Equação 1. A informação referente ao Valor de Quantização encontra-se disponível nos metarquivos acompanhantes das imagens do Sentinel-2.

Em seguida, as imagens originais que continham a refletância TOA no Nível 1C foram submetidas à correção para redução dos efeitos atmosféricos, transformando-as na refletância de fundo da atmosfera (BOA). Essa transformação foi realizada utilizando o processador Sen2Cor (versão 2.8), desenvolvido pela Telespazio VEGA Deutschland GmbH em nome da ESA, e as imagens resultantes foram empregadas no processo de análise (Malenovsky *et al*, 2012). O procedimento de conversão da refletância TOA no nível 1C para a refletância BOA no nível 2A englobou correções atmosféricas, de terreno e de cirros.

O processo do Sen2Cor é fundamentado em um conjunto de 24 Tabelas de Pesquisa (LUTs), que abrangem a maior parte das condições atmosféricas terrestres e permitem a recriação de valores para a geração da imagem, através de etapas de correção atmosférica. No decorrer desta pesquisa, o plugin Sen2Cor foi implementado no software Sentinel Application Platform (SNAP), o qual é disponibilizado gratuitamente pela ESA e integra as funcionalidades necessárias para a análise das imagens processadas.

O procedimento estabelecido para a obtenção, pré-processamento e correção atmosférica das imagens provenientes do satélite Sentinel-2 foi meticulosamente replicado em todos os estudos subsequentes desenvolvidos nesta dissertação de mestrado. Essa abordagem metodológica uniforme serviu como uma base para a análise comparativa das variações espaço-temporais. Além disso, possibilitou a realização de investigações rigorosas e comparáveis em diferentes contextos e cenários, assegurando a integridade e a confiabilidade dos resultados obtidos.

### **3.3. Softwares utilizados.**

Além do uso mencionado do SNAP (Sentinel Application Platform) para os processos de correções radiométricas e atmosféricas das imagens Sentinel-2, outros softwares foram empregados no desenvolvimento do projeto. O Microsoft Excel foi fundamental para as análises estatísticas, incluindo o desenvolvimento de curvas de regressão, com cálculo do coeficiente de determinação  $R^2$ , além do cálculo do RMSE (Root Mean Square Error) e MAE (Mean Absolute Error). O software PAST (Paleontological STatistics) foi utilizado para a obtenção de box plots, enquanto o BioStat foi empregado para realizar as análises de distribuição de Shapiro-Wilk. Finalmente, os mapas e as representações visuais das imagens de satélite, assim como os produtos das aplicações dos modelos empíricos, foram elaborados utilizando os softwares ArcGIS Pro e QGIS.

### **3.4. Roteiro metodológico dos estudos de caso.**

Após a apresentação inicial das respectivas áreas focadas nos estudos de caso, e de uma seção sobre a aquisição, pré-processamento e correção atmosférica das imagens do satélite Sentinel-2, que foi utilizada igualmente para todos os estudos de caso, nesta seção, são descritos os demais detalhes metodológicos para cada um dos estudos de caso. Para facilitar a compreensão da sequência lógica de cada estudo de caso, eles serão apresentados em blocos. Inicialmente, serão apresentados os roteiros metodológicos para os estudos de caso de qualidade da água e, posteriormente, outro bloco será destinado aos estudos de caso voltados para a quantidade de água. Os estudos serão apresentados na mesma ordem em que aparecerão na sequência deste trabalho

### 3.4.1. Estudo de caso sobre qualidade da água: estimativa de turbidez.

Neste primeiro momento, será demonstrada a metodologia adotada para os estudos de Estimativa de Turbidez do rio Paraopeba.

#### 3.4.1.1 Aquisição dos dados de turbidez medidos in situ.

Para uma avaliação abrangente dos impactos da introdução dos rejeitos no rio Paraopeba sobre os níveis de turbidez, é importante considerar também as variações naturais observadas. Com esse objetivo em mente, procedeu-se à caracterização da variabilidade intrínseca da turbidez no rio Paraopeba no período que antecedeu o colapso da barragem. Para isso, foram utilizados dados de medições de turbidez realizadas de 2012 a 2018, coletados pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) e pela Agência Nacional de Águas (ANA). As informações decorrentes do monitoramento periódico estão prontamente disponíveis no site oficial do IGAM, permitindo uma análise detalhada da base de dados históricos da turbidez.

Já para a medição in situ dos valores de turbidez após o rompimento da barragem, a companhia Vale S.A, responsável pela barragem que rompeu e ocasionou o despejo de rejeitos de mineração, foi a responsável pela coleta destes dados e, posteriormente, cedeu tais informações para a realização desta pesquisa. Foram coletados dados nefelométricos de turbidez do rio Paraopeba, sendo efetuadas medições diárias em 49 estações de amostragem (conforme Figura 1). No total, foram conduzidas 87 medições utilizando um turbidímetro manual, em diferentes intervalos horários. A disposição desses pontos amostrais ocorreu a jusante da ruptura da barragem, abrangendo um trecho de aproximadamente 300 km do percurso do rio, desde a área de impacto até a sua entrada na represa de Três Marias.

#### 3.4.1.2. Desenvolvimento de um modelo empírico para Turbidez.

Com base nos resultados apresentados por Chen *et al.* (2007), Nechad *et al.* (2010), Dogliotti *et al.* (2015), Caballero *et al.* (2019), Rudolf *et al.* (2018) e Sakuno *et al.* (2018), levantou-se a hipótese de que é possível obter valores de turbidez por meio de modelos empíricos utilizando uma única banda espectral. Portanto, o foco deste estudo é desenvolver um modelo empírico representativo.

Os valores de refletância foram extraídos das imagens do Sentinel-2 nos pixels coincidentes aos pontos de medição de turbidez in situ. Esses valores foram comparados aos valores de turbidez medidos em campo entre maio e setembro de 2019. Foram selecionadas imagens coincidentes com os dias de coleta em campo, garantindo que todos os dados de campo possuísem uma imagem correlata para a calibração do modelo, permitindo a avaliação da correlação entre os valores.

A análise envolveu a criação de um gráfico de dispersão que correlaciona os valores de turbidez com os dados de refletância das bandas do Sentinel-2. Uma análise de regressão não linear foi conduzida para identificar a banda com maior capacidade de reproduzir as variações da turbidez in situ. Para avaliar a precisão dos valores previstos pela equação não linear, calculou-se o erro, definido como a diferença entre os valores observados e estimados de turbidez. O parâmetro estatístico chave utilizado foi o erro padrão da regressão (S) (Equação 2), que quantifica a média da distância entre os valores observados e os do modelo ajustado.

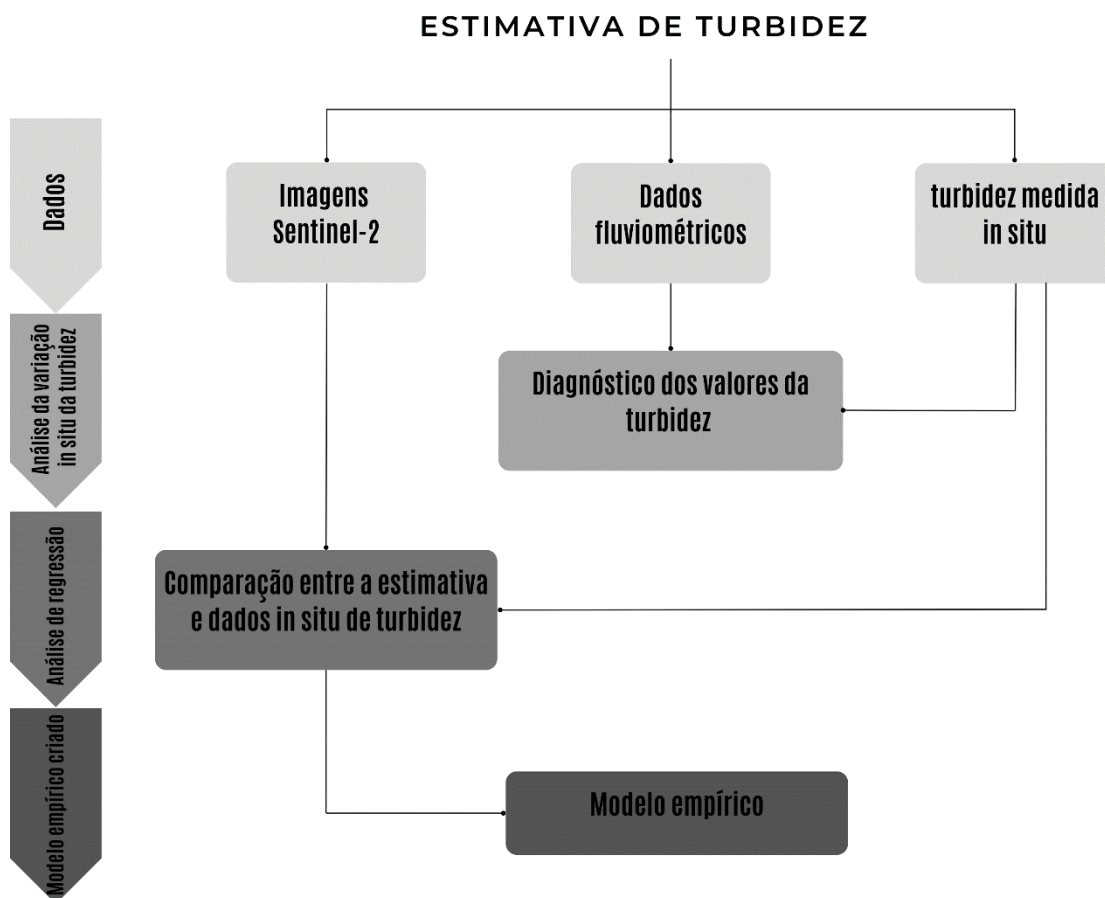
$$S = \sqrt{\frac{1}{n-2}} [T_{\text{obs}} - T_{\text{est}}]^2 \quad (2)$$

Onde n denota o número de amostras, e  $T_{\text{obs}}$  e  $T_{\text{est}}$  representam os valores de turbidez observados e estimados, respectivamente.

### 3.4.1.3. Fluxograma do roteiro metodológico para o estudo de caso da estimativa de turbidez.

Na Figura 6, apresenta-se o fluxograma que descreve o roteiro metodológico adotado para o estudo de caso da estimativa de turbidez do rio Paraopeba.

Figura 6 - Fluxograma do roteiro metodológico para o estudo de caso da estimativa de turbidez.



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 6, é apresentado o fluxograma dos passos seguidos para a obtenção do modelo empírico capaz de estimar a pluma de turbidez no rio Paraopeba. Observa-se que, inicialmente, conforme descrito anteriormente, os dados de campo adquiridos in situ e as estimativas provenientes das imagens do Sentinel-2 serviram de subsídio para a construção estatística de uma análise de regressão. Esta análise foi capaz de gerar, como produto, o modelo empírico que, executado por meio do software ArcGIS, posteriormente produziu um conteúdo gráfico da dispersão dessa turbidez (vide a Figura 23).

### 3.4.2. Estudo de caso sobre qualidade da água: estimativa de clorofila-a.

Neste momento, será demonstrada a metodologia adotada para os estudos de Estimativa de clorofila-a nos reservatórios de abastecimento público na Região Metropolitana de São Paulo.

#### 3.4.2.1. Aquisição da concentração de clorofila-a medida in situ.

Os dados de campo utilizados foram coletados entre os anos de 2016 e 2021 pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Essas informações foram obtidas através dos "Relatórios – Águas Interiores" da CETESB, que abrangeram dados referentes à presença de clorofila-a nos reservatórios da área de estudo no período de 2019 a 2021 (Cetesb, 2023). A Figura 2 destaca os pontos de amostragem in situ.

#### 3.4.2.2. Avaliação dos modelos de estimativa de clorofila-a.

Estudos voltados para inferir dados espectrais em áreas tropicais ainda estão longe de um modelo final, devido à alta diversidade de ambientes e notável biodiversidade, bem como à variabilidade sazonal. Portanto, é necessário validar e calibrar dados espectrais coletados tanto em campo quanto por sensores remotos. As inferências feitas por sensores remotos são baseadas na assinatura espectral de cada alvo, que varia de acordo com a banda espectral usada. A partir do comportamento espectral, é possível inferir tipos e concentrações de partículas em suspensão (Barbosa *et al.*, 2010).

A primeira abordagem a ser investigada consiste em um modelo de banda única para descrever os valores de clorofila, utilizando a reflectância dessa banda, conforme apresentado na Equação 3. Essa escolha foi feita com base em uma tentativa empírica de verificar a existência de uma correlação. O objetivo deste modelo é identificar a banda espectral que possui a melhor correlação com as medições de concentração de clorofila, sendo que a análise revelou que a faixa de 705nm apresentou a correlação mais significativa.

$$\text{Clorofila} \propto R_1 \quad (3)$$

A Equação 3 descreve a relação entre a concentração de clorofila e a reflectância na banda específica, indicando uma proporcionalidade direta. Isso significa que quanto maior a reflectância na banda selecionada ( $R_1$ ), maior será a concentração de clorofila. Nesse

contexto, a faixa de 705nm demonstrou a melhor correlação com as medições de concentração de clorofila.

O segundo modelo testado foi o proposto por Morel e Prieur (1977), que estabeleceu uma relação entre a concentração de clorofila e a razão entre a reflectância da faixa azul e a reflectância da faixa verde, conforme mostrado na Equação 4. Essa relação foi baseada na premissa de que a clorofila absorve eficientemente espectros na faixa azul ( $\lambda_1$ ), enquanto absorve minimamente na faixa verde ( $\lambda_2$ ).

$$\text{Clorofila} \propto R(\lambda_1)/R(\lambda_2) \quad (4)$$

A Equação 4 representa a proporção entre a reflectância na faixa azul ( $R(\lambda_1)$ ) e a reflectância na faixa verde ( $R(\lambda_2)$ ) como um indicador da concentração de clorofila. Quanto maior o valor da razão entre essas duas reflectâncias, maior será a concentração de clorofila.

O modelo de Gitelson *et al.* (2008) baseia-se em hipóteses semelhantes às apresentadas na Equação 4. No entanto, o modelo de Gitelson *et al.* (2008) relaciona a concentração de clorofila à razão entre a reflectância da banda do Infravermelho próximo (NIR) ( $R(\lambda_1)$ ) sobre a banda vermelha ( $R(\lambda_2)$ ), conforme mostrado na Equação 5. O uso da razão na Equação 5 é justificado em a premissa de que a clorofila atinge espectros de absorção máxima na faixa do vermelho, enquanto a absorção de partículas suspensas é mínima na água na faixa do infravermelho próximo.

$$\text{Clorofila} \propto R(\lambda_1)/R(\lambda_2) \quad (5)$$

A Equação 5 descreve a relação entre a concentração de clorofila e a razão entre a reflectância na banda do infravermelho próximo ( $\lambda_1$ ) e a reflectância na banda vermelha ( $\lambda_2$ ). Quanto maior for o valor dessa razão, maior será a concentração de clorofila.

O modelo de três bandas, descrito na Equação 6, foi originalmente proposto e validado por Gitelson *et al.* (2003) para estimar a pigmentação terrestre. Dall’Olmo *et al.* (2003) demonstraram sua eficácia na detecção de clorofila-a em corpos hídricos turvos. Essa abordagem é baseada na suposição de que a influência da matéria orgânica dissolvida e da absorção de material particulado em suspensão é significativa na faixa espectral  $R(\lambda_1)$  e deve ser reduzida por meio da subtração de  $R(\lambda_2)$ . Além disso, assume-se que a absorção da matéria orgânica dissolvida e do material particulado em suspensão é aproximadamente semelhante nos

comprimentos de onda  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ , enquanto a absorção de clorofila-a em  $\lambda_2$  deve ser muito menor do que em  $\lambda_1$ .

$$Clorofila \propto [R(\lambda_1)^{-1} - R(\lambda_2)^{-1}] \cdot R(\lambda_3) \quad (6)$$

Nessa equação,  $R(\lambda_1)$  representa a reflectância medida na banda espectral vermelha,  $R(\lambda_2)$  corresponde à banda Red Edge 1 (705nm) e  $R(\lambda_3)$  é equivalente à banda espectral NIR.

Dall'Olmo *et al.* (2003) propuseram um modelo de três bandas que utiliza a razão entre as bandas espectrais do vermelho ( $\lambda_2$ ) e do infravermelho próximo ( $\lambda_3$ ) para avaliar a presença de fitoplâncton. O algoritmo foi desenvolvido para detectar o pico máximo de refletividade em 705 nm, resultante da interação do retroespalhamento do fitoplâncton. Adicionalmente, o algoritmo utiliza a mínima absorção de água na banda do vermelho em 665 nm ( $\lambda_2$ ) como referência, considerando que a absorção de água aumenta no infravermelho. É importante notar que esse modelo é altamente eficaz em detectar a presença de fitoplâncton em corpos d'água. (Mathews, 2011).

$$Clorofila \propto R(\lambda_1) * \left( \frac{1}{R(\lambda_2)} - \frac{1}{R(\lambda_3)} \right) \quad (7)$$

Nessa equação,  $R(\lambda_1)$  corresponde à banda Red Edge 2 em 740 nm ( $\lambda_1$ ),  $R(\lambda_2)$  é a banda do vermelho em 665 nm ( $\lambda_2$ ) e  $R(\lambda_3)$  representa a banda espectral do infravermelho próximo em 705 nm ( $\lambda_3$ ).

Uma modificação do modelo de três bandas foi proposta por Yang *et al.* (2010) com o objetivo de estimar a concentração de clorofila-a em águas produtivas que apresentam uma elevada concentração de material inorgânico suspenso. Essa modificação foi desenvolvida para lidar com os desafios associados à presença de altas concentrações de material inorgânico, permitindo uma estimativa mais precisa da concentração de clorofila-a nessas condições.

$$Clorofila \propto \frac{\rho^{-1}(\lambda_1) - \rho^{-1}(\lambda_2)}{\rho^{-1}(\lambda_3) - \rho^{-1}(\lambda_2)} \quad (8)$$

Para o modelo de três bandas, estudos demonstraram que o parâmetro  $R(\lambda_1)$  deve estar na faixa do vermelho em torno de 665 nm ( $\lambda_1$ ),  $R(\lambda_2)$  na faixa da Banda Red Edge 1, entre 705

nm ( $\lambda_2$ ), e R( $\lambda_3$ ) na faixa do infravermelho próximo, em torno de 842 nm ( $\lambda_3$ ).

Os diferentes modelos apresentados para estimativas de concentração de clorofila (Equações 3 a 8) foram submetidos a testes consistentes usando análises de regressão linear e não linear. A qualidade dos ajustes foi avaliada pelos parâmetros coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e erro médio quadrático (RMSE), definidos nas Equações 9 e 10, respectivamente.

$$R^2 = \frac{n(\sum_{i=1}^n V_{obs} \cdot V_{cal}) - (\sum_{i=1}^n V_{obs}) \cdot (\sum_{i=1}^n V_{cal})}{\sqrt{[n \cdot \sum_{i=1}^n V_{obs}^2 - (\sum_{i=1}^n V_{obs})^2] \cdot [n \cdot \sum_{i=1}^n V_{cal}^2 - (\sum_{i=1}^n V_{cal})^2]}} \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{cal} - V_{obs})^2}{n}} \quad (10)$$

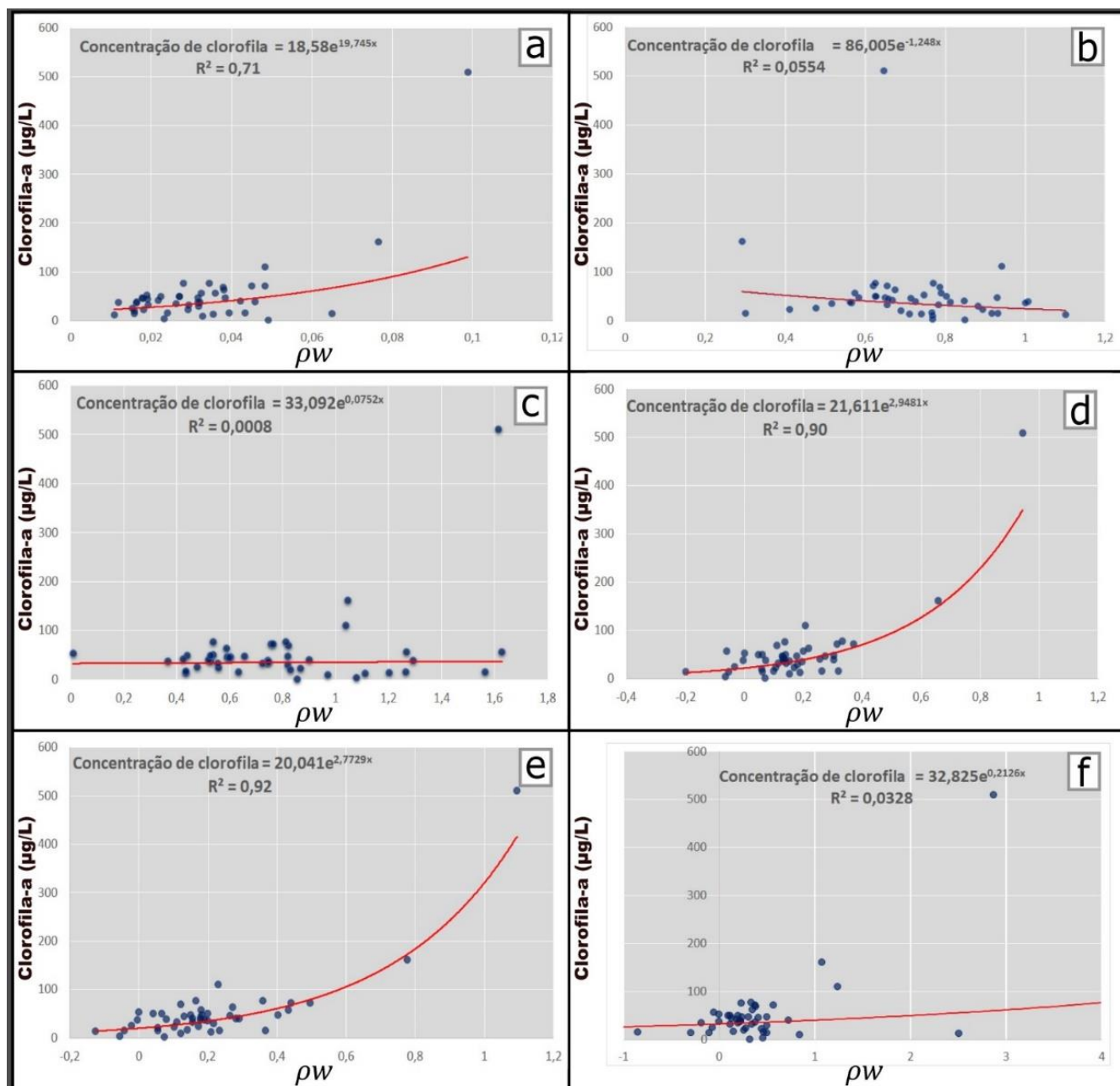
Onde n representa o número de amostras,  $V_{obs}$  o valor da concentração de clorofila medida *in situ* e  $V_{cal}$  o valor da turbidez ou concentração de clorofila estimada a partir dos modelos empíricos propostos.

#### 3.4.2.3. Identificação do modelo com melhor ajuste.

Para identificar os melhores modelos de estimativa de clorofila-a nas imagens Sentinel-2, foram avaliados os valores de  $R^2$  do modelo exponencial ajustado para cada um deles. Após aplicar diferentes modelos empíricos às especificidades dos reservatórios que abastecem a demanda hídrica da RMSP, observou-se que alguns modelos se adequaram melhor às condições da área de estudo, enquanto outros tiveram baixo desempenho.

Conforme ilustrado nos gráficos de dispersão dos modelos (Figura 7), observa-se que os modelos de Dall'Olmo *et al.* (2003) e Gitelson *et al.* (2003) produziram resultados consistentes. Os mapas gerados usando esses modelos mostraram valores de clorofila-a mais elevados do que os obtidos pelo modelo de banda única, com as porções central e norte do reservatório Billings apresentando valores de clorofila-a iguais ou superiores a 100 µg/L.

Figura 7 - Gráficos de dispersão dos modelos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 7 apresenta gráficos de dispersão da refletância equivalente para diversos modelos testados, juntamente com valores de clorofila-a (representados por pontos roxos) e uma linha vermelha que indica o modelo exponencial. Os modelos analisados foram: a) modelo de banda espectral única (705 nm); b) modelo Morel e Prieur (1977); c) modelo de Gitelson *et al.* (2008); d) modelo de Gitelson *et al.* (2003); e) modelo de Dall'Olmo *et al.* (2003); f) modelo de Yang *et al.* (2010).

Os melhores resultados foram obtidos com o modelo de Dall'Olmo *et al.* (2003), que apresentou um  $R^2$  de 0,92. O modelo de Gitelson *et al.* (2003) também teve bom desempenho, com  $R^2$  de 0,90, seguido pelo modelo de banda espectral única (705 nm), com  $R^2$  de 0,71. Os modelos de Morel e Prieur (1977) ( $R^2$  de 0,05), Gitelson *et al.* (2008) ( $R^2$  de 0,0008) e Yang *et al.* (2010) ( $R^2$  de 0,03) apresentaram baixo desempenho na identificação e estimativa de clorofila-a, conforme observado nos gráficos de dispersão apresentados na Figura 7.

#### 3.4.2.4 Teste de hipótese nula.

Para testar a hipótese nula de que os resíduos (diferença entre os valores estimados e medidos de concentração de clorofila) seguem uma distribuição normal, realizou-se o teste de normalidade de Shapiro-Wilk. Os resultados do teste de normalidade são apresentados na Tabela 1, evidenciando que os valores de p obtidos são significativamente menores que o nível de significância de 0,05 (correspondente a um intervalo de confiança de 95%). Isso indica que a hipótese nula não pode ser aceita e os valores dos resíduos não seguem uma distribuição normal. Portanto, a análise estatística paramétrica não é adequada para descrever a avaliação dos resíduos em cada um dos modelos testados.

Tabela 1 – Valores de p para os resíduos obtidos a partir dos testes de normalidade de Shapiro-Wilk.

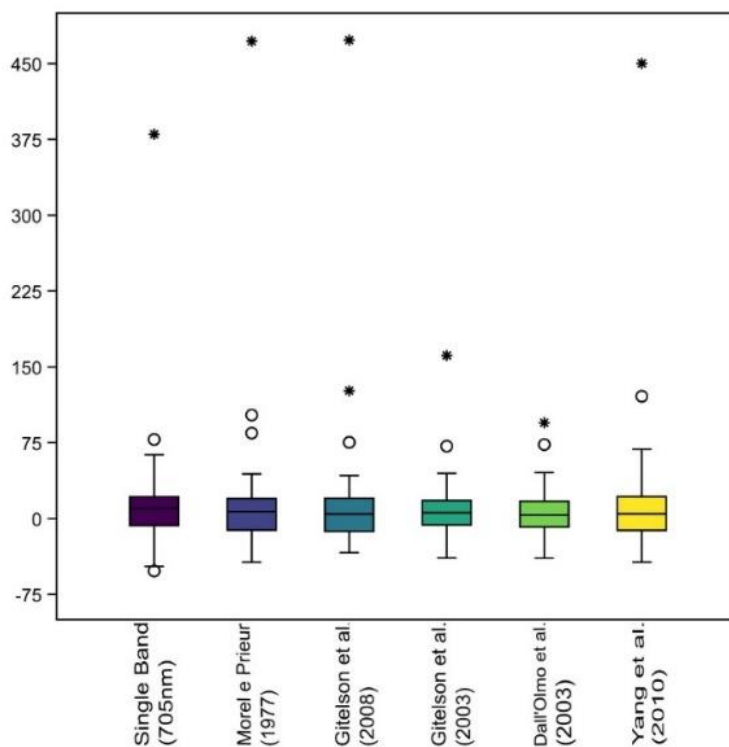
| <b>Modelo</b>                            | <b>p (normal)</b>      |
|------------------------------------------|------------------------|
| Modelo de Banda Única (705 nm)           | $2,69 \times 10^{-11}$ |
| Modelo de Morel e Prieur (1977)          | $4,80 \times 10^{-12}$ |
| Modelo de Gitelson <i>et al.</i> (2008)  | $1,21 \times 10^{-11}$ |
| Modelo de Gitelson <i>et al.</i> (2003)  | $9,36 \times 10^{-4}$  |
| Modelo de Dall'Olmo <i>et al.</i> (2003) | $1,03 \times 10^{-3}$  |
| Modelo de Yang <i>et al.</i> (2010)      | $3,31 \times 10^{-12}$ |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados da Tabela 1 indicam que os valores de p são significativamente baixos para todos os modelos, sugerindo que os resíduos não se ajustam a uma distribuição normal. Nesse contexto, é relevante considerar métodos estatísticos não paramétricos ou transformações nos dados para a análise. Embora os modelos tenham apresentado boas estimativas através do

coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e do erro médio quadrático (RMSE), é imprescindível abordar as limitações da distribuição dos resíduos para garantir a robustez e confiabilidade das estimativas de concentração de clorofila obtidas. Essa abordagem é importante para obter estimativas mais confiáveis, contribuindo significativamente para o monitoramento preciso da qualidade da água e a preservação da saúde do ecossistema aquático.

Figura 8 - Boxplot para a comparação da dispersão do erro entre modelos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 8, é apresentado um diagrama de caixa que compara a dispersão do erro entre diferentes modelos. Observa-se que os modelos com menor diferença interquartil (1º e 3º quartil) apresentam maior correspondência com os valores de  $R^2$ . Essa relação sugere que o grau de ajuste dos modelos pode ser avaliado não apenas pelo coeficiente de determinação, mas também pela análise da dispersão do erro.

Além disso, destaca-se que os modelos de Gitelson *et al.* (2003) e Dall'Olmo *et al.* (2003) exibem moda próxima a zero, enquanto o método de banda única apresenta moda superior a zero. Esse resultado sugere que os modelos de Gitelson *et al.* (2003) e Dall'Olmo *et al.* (2003) são mais adequados para a análise dos dados, uma vez que a extrapolação dos valores é minimizada.

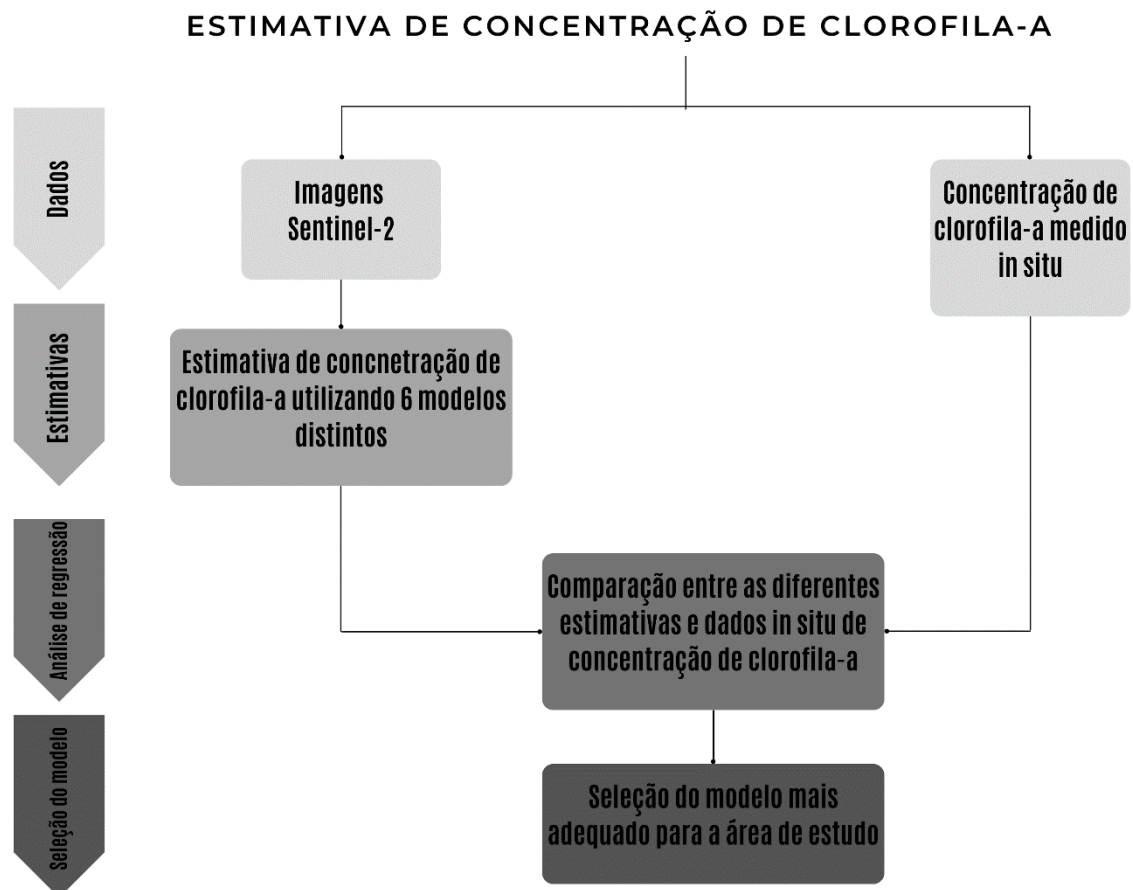
A análise dos resultados obtidos por meio desse segundo método analítico reforça a aplicabilidade dos modelos de Gitelson *et al.* (2003) e Dall'Olmo *et al.* (2003) na avaliação da

concentração de clorofila em corpos d'água. Conclui-se que essa abordagem pode ser uma alternativa viável e precisa para a análise de dados de Sensoriamento Remoto.

#### 3.4.2.5. Fluxograma do roteiro metodológico para o estudo de caso da estimativa de concentração de clorofila-a

Na Figura 9, é apresentado o fluxograma que descreve o roteiro metodológico adotado para o estudo de caso da estimativa de clorofila-a nos reservatórios de abastecimento público para a Região Metropolitana de São Paulo.

Figura 9 - Fluxograma do roteiro metodológico para o estudo da estimativa de concentração de clorofila-a.



Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 9, apresenta-se o fluxograma dos passos seguidos para obter o modelo empírico capaz de estimar a concentração de clorofila-a nos reservatórios responsáveis pelo abastecimento público na região metropolitana de São Paulo. Observa-se que, inicialmente, os dados de campo adquiridos in situ e as estimativas obtidas das imagens do Sentinel-2 foram

utilizados como subsídio para a construção estatística de uma análise de regressão visando uma possível correlação empírica, conforme descrito anteriormente. Paralelamente, outros modelos existentes na literatura acadêmica para estimativa de concentração de clorofila-a foram testados e submetidos a análise estatística para validação de sua aplicabilidade ao estudo de caso. Como resultado, os modelos mais bem-sucedidos foram aplicados na criação de um mapa representativo da distribuição da clorofila-a nos reservatórios, utilizando-se do software ArcGIS Pro (conforme ilustrado na Figura 25).

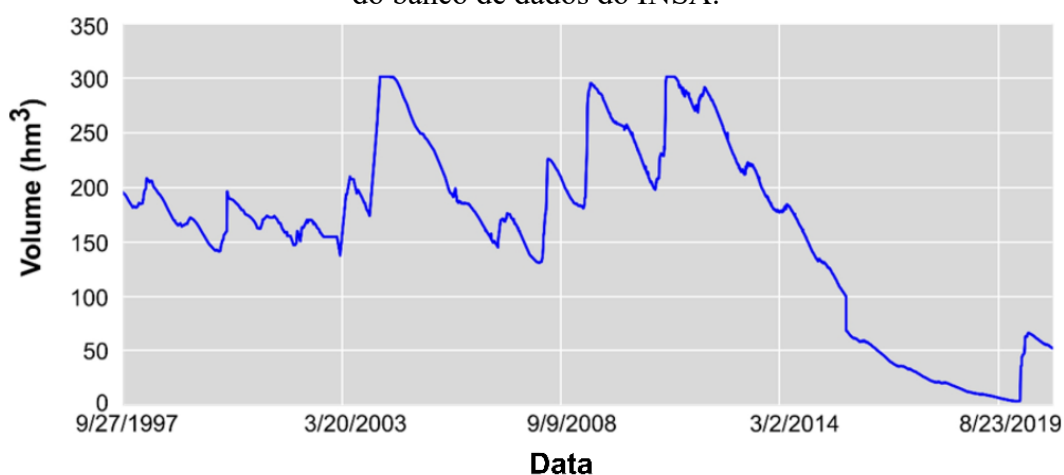
### *3.4.3. Estudo de caso sobre quantidade da água: estimativa de volume de água armazenada em reservatório.*

Neste momento, inicia-se o segundo bloco de estudos, voltados para a quantidade de água. Primeiramente, será demonstrada a metodologia adotada para os estudos de estimativa de volume de água armazenada em pequenos e médios reservatórios na região semiárida brasileira.

#### 3.4.3.1. Registro do volume de água armazenada nos reservatórios.

Para avaliar a variação temporal do volume de água nos reservatórios da área de estudo, consultou-se o banco de dados do INSA, que monitora 452 reservatórios no semiárido brasileiro. Neste estudo, foram coletados 293 registros de 48 reservatórios distribuídos pelo semiárido brasileiro, conforme ilustrado na Figura 3. É importante destacar que, a partir de 2014, foi observada uma queda significativa do volume de água em quase todos os reservatórios avaliados, como exemplificado na Figura 10.

Figura 10 - Exemplo de variação de volume ao longo do tempo em um reservatório adquirido do banco de dados do INSA.



Fonte: INSA, elaborado pelo autor.

Os dados foram agrupados considerando contextos geológicos distintos, como embasamento cristalino e bacias sedimentares, e características geomorfológicas diversas, com prioridade para os reservatórios com monitoramento detalhado. Devido à notável variação de escalas, a análise foi restrita a valores de áreas alagadas que variam de 0,1 a 15 km<sup>2</sup>.

#### 3.4.3.2. Aquisição de imagens e cálculo NDWI.

Neste estudo, foram coletadas imagens do Sentinel-2 em períodos próximos ( $\pm 5$  dias) das datas em que ocorreram medições dos volumes dos reservatórios, entre os anos de 2016 e 2020. Ao todo, foram adquiridas 86 cenas. A fim de quantificar o volume de água armazenado em reservatórios naturais ou artificiais, diferentes abordagens fundamentadas em técnicas de Sensoriamento Remoto têm sido propostas (Cai *et al.*, 2016; Deutsch; Alameddine, 2018; Gao *et al.*, 2012; Lu *et al.*, 2013).

Grande parte destes estudos foi conduzida em regiões semiáridas, onde os recursos hídricos são escassos (Liebe *et al.*, 2005; Mady *et al.*, 2020; Sawunyama *et al.*, 2006). No cenário atual, a maior parte dos métodos empregados para a identificação e delimitação de reservatórios por meio de técnicas de Sensoriamento Remoto é mediada pelo cálculo do Índice de Diferença Normalizada de Água (NDWI), desenvolvido por McFeeters (1996), ou pelo Índice de Diferença Normalizada Modificada de Água (MNDWI), proposto por Xu (2006). O NDWI e o MNDWI têm por base a diferença normalizada na absorção e reflexão da luz entre a água e outros elementos em distintas faixas de frequência (Mcfeeter, 1996; Xu, 2006).

O Índice de Diferença de Água Normalizado (NDWI) constitui um método desenvolvido para mapear corpos d'água na superfície com base em imagens digitais obtidas por Sensoriamento Remoto. Segundo McFeeters (1996), o NDWI utiliza a radiação refletida no infravermelho próximo e na faixa visível do verde para identificar a presença de água e distingui-la do solo e da vegetação terrestre. Visto que a refletância da água nos comprimentos de onda do visível ao infravermelho enfraquece gradualmente, a superfície da água em uma imagem pode ser delineada por meio do índice NDWI, que exploram o contraste entre os comprimentos de onda visíveis e infravermelhos próximos. A fórmula de cálculo do NDWI é expressa pela Equação 11.

$$NDWI = \frac{(\rho_{GREEN} - \rho_{NIR})}{(\rho_{GREEN} + \rho_{NIR})} \quad (11)$$

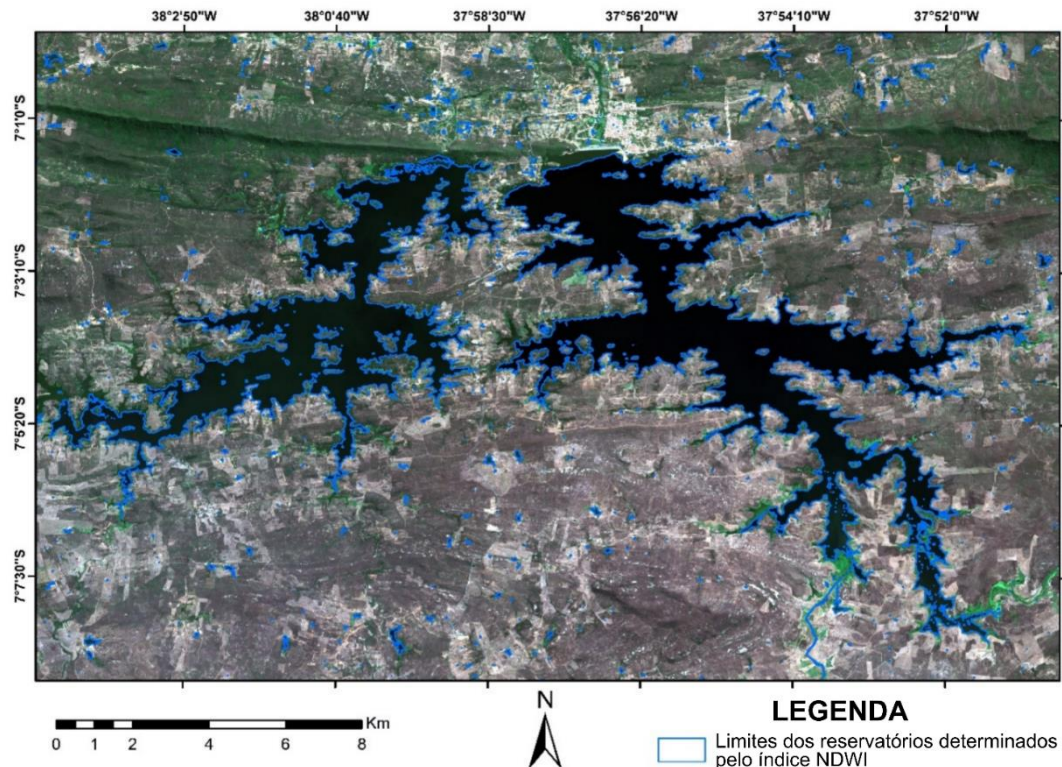
Onde  $\rho_{GREEN}$  denota a banda verde (banda 3 no Sentinel-2) e  $\rho_{NIR}$  representa a banda infravermelha mais próxima (banda 8 no Sentinel-2). Essa equação gera valores de pixel que variam em escala de -1 a 1, em que os valores de  $NDWI \geq 0$  representam áreas de água, enquanto  $NDWI < 0$  corresponde a solo e vegetação e outros elementos. Através das imagens NDWI, foi realizada a definição da extensão lateral do reservatório com resolução de 10 x 10 m.

No entanto, algumas considerações são importantes. Em situações de alta turbidez, os valores de NDWI podem ser influenciados, resultando em interpretações ambíguas. Além disso, áreas de sombra, que frequentemente apresentam NDWI elevado, nem sempre correspondem a corpos d'água. Para superar essas limitações, foram realizados ajustes manuais quando necessário.

A eficácia do cálculo do NDWI na identificação de corpos d'água superficiais foi avaliada por meio de uma inspeção visual da classificação NDWI. Imagens RGB de cor verdadeira, geradas a partir das mesmas imagens do Sentinel-2 usadas para calcular o NDWI, foram utilizadas para essa inspeção. Algumas inconsistências foram identificadas e corrigidas durante essa inspeção. Em geral, as correções necessárias após a análise visual foram mínimas.

No entanto, algumas exceções foram detectadas, principalmente em casos que envolviam sombras de nuvens ou variações de terreno. Nessas situações, o índice NDWI indicou erroneamente a presença de corpos d'água devido a valores acima de 0. Além disso, ao examinar as margens de certos reservatórios, foi identificada a presença de vegetação macrófita. Nessas áreas, os valores do índice NDWI foram inferiores a 0, resultando na não classificação como corpos d'água.

Figura 11 - Coremas (PB): Composição de cor verdadeira RGB e limite de área inundada para reservatório identificado pelo cálculo do índice NDWI, 2021.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar das discrepâncias identificadas terem um impacto potencialmente limitado, foram realizadas correções manuais quando necessário. Essas correções garantem a precisão dos resultados e a eficácia do NDWI na identificação de corpos d'água superficiais. Em quase todas as situações, observou-se uma correspondência completa entre as áreas identificadas como corpos d'água pelo NDWI e as regiões indicadas pelas imagens RGB, conforme demonstrado na Figura 11.

#### 3.4.3.3. Estimativa das áreas dos reservatórios a partir do NDWI.

Todas as imagens NDWI produzidas foram recortadas próximo às margens do reservatório, visando evitar o cálculo de áreas contíguas de água superficial. Em seguida, essas imagens foram transformadas em um *shapefile* de pontos. A determinação da área do reservatório (A) ocorreu ao multiplicar-se o número de pixels categorizados como água (ou seja, índice NDWI  $\geq 0$ ) pela área de cada pixel da imagem do Sentinel-2, ou seja, 100 m<sup>2</sup> (Equação 12). Os valores de NDWI calculados foram ordenados em ordem crescente, com o

propósito de identificar os valores de NDWI situados entre 0 e 1, um intervalo que sinaliza a presença de áreas cobertas por água.

$$A = \sum_{i=1}^n P_i * 100 \quad (12)$$

Onde  $n$  representa o número de pixels classificados como água e  $P_i$  um pixel individual classificado como água.

#### 3.4.3.4. Avaliação do modelo área x volume para o semiárido brasileiro

Foram reunidos modelos empíricos previamente utilizados para prever o volume de água armazenado com base na área coberta por água, desenvolvidos em outras regiões semiáridas ao redor do mundo. Foram Identificados os modelos de Liebe *et al.* (2005), Sawunyama *et al.* (2006) e Mady *et al.* (2020), representados pelas Equações 14, 15 e 16 do Quadro 4, como potenciais candidatos capazes de estimar o volume de reservatórios de pequeno a médio porte no contexto do semiárido brasileiro, devido à similaridade das condições climáticas onde esses estudos foram conduzidos. Como alternativa, para obter um modelo específico de relação entre área e volume para o semiárido brasileiro, um modelo de função de potência foi ajustado à área alagada estimada pelo índice NDWI e ao volume de água medido. Por meio de uma regressão não linear, o modelo genérico de relação área-volume (Equação 13) foi ajustado aos dados compilados e os valores de melhor ajuste dos coeficientes “a” e “b” foram determinados.

Após a obtenção das áreas inundadas dos reservatórios por intermédio da técnica de Sensoriamento Remoto, é possível estimar o volume de água armazenado em um dado momento nos reservatórios por meio de uma abordagem convencional embasada em um modelo empírico de relação área-volume (como ilustrado por Lehner; Döll, 2004; Ran; Lu, 2012; Cai *et al.*, 2016; Cunha *et al.*, 2020). Devido à geometria do reservatório, a relação área-volume pode ser expressa por uma equação de potência padrão (Equação 13), em que o volume (V) é estimado a partir da área inundada (A) mediante um coeficiente “a” e um expoente “b” (Lehner *et al.*, 2011).

$$V = a \cdot A^b \quad (13)$$

Segundo Liebe *et al.* (2005), o expoente “b” é um parâmetro relacionado à geometria do reservatório do vale e espera-se que tenha um valor próximo a 1,5. No entanto, valores distintos de “a” e “b” variam de 0,98 a 1,46 na literatura (por exemplo, Liebe *et al.*, 2005; Lehner; Döll, 2004; Ran; Lu, 2012; Cai *et al.*, 2016; Cunha *et al.*, 2020).

Quadro 4 – Modelos alternativos de área-volume testados nesta pesquisa.

| Função de potência área x volume  | Referência                     | Descrição                                                                                                |
|-----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $V = 3.574 \cdot A^{1.4367}$ (14) | Liebe <i>et al.</i> (2005)     | Um modelo empírico para pequenos reservatórios nas regiões semiáridas de Gana, África Ocidental.         |
| $V = 2.122 \cdot A^{1.327}$ (15)  | Sawunyama <i>et al.</i> (2006) | Um modelo empírico para reservatórios na região semiárida da Bacia do Limpopo, no Zimbábue.              |
| $V = 4.148 \cdot A^{1.173}$ (16)  | Mady <i>et al.</i> (2020)      | Um modelo empírico para reservatórios de pequeno a médio porte nas regiões semiáridas ao redor do mundo. |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram reunidos todos os modelos testados, avaliando a sua adequação através do cálculo dos coeficientes de erro médio absoluto (E) e RMSE (Root Mean Square Error), respectivamente representados pelas Equações 17 e 18.

$$E(\%) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{V_{calc} - V_{obs}}{V_{obs}} \right) \cdot 100 \quad (17)$$

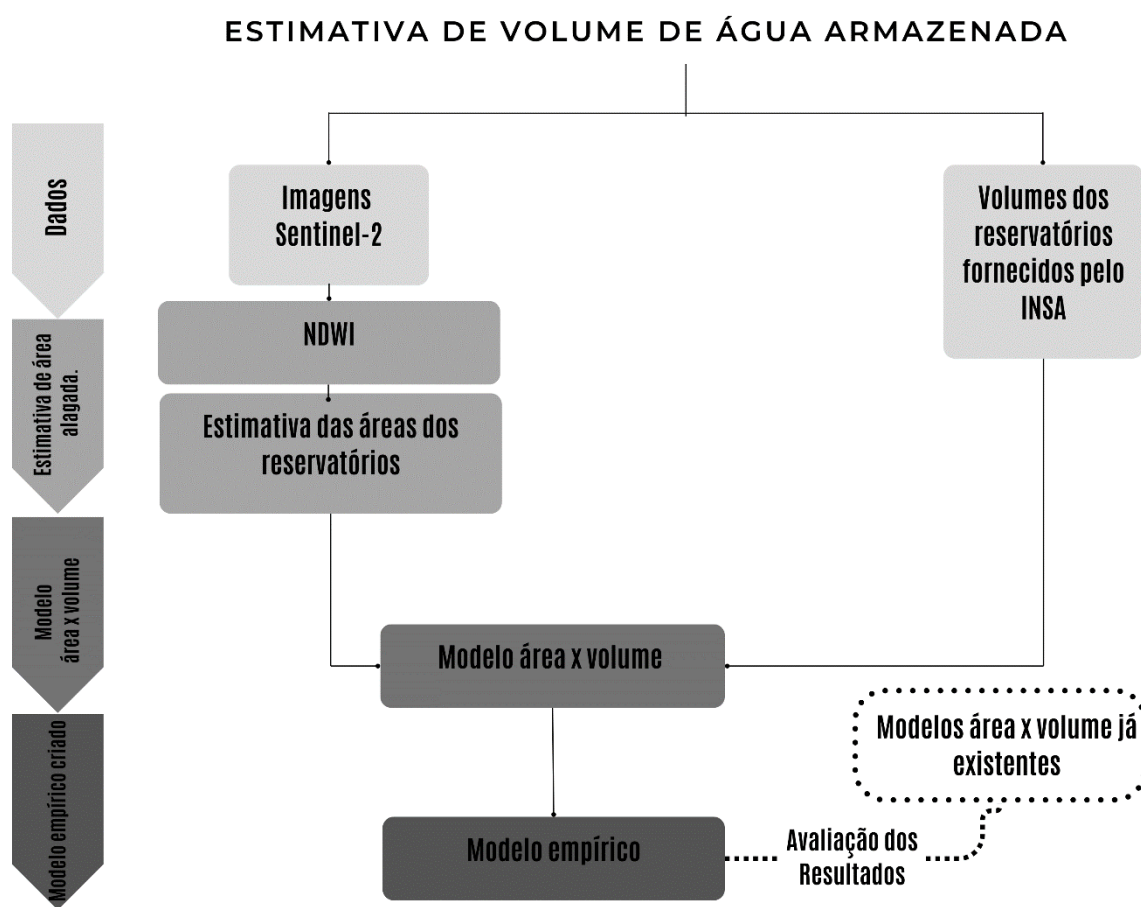
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{cal} - V_{obs})^2}{n}} \quad (18)$$

Onde Vcal e Vobs denotam o volume calculado e observado de água armazenada, respectivamente, e n representa o número de amostras.

### 3.4.3.5. Fluxograma do roteiro metodológico para o estudo de caso de estimativa de volume de água armazenada.

Na Figura 12, é apresentado o fluxograma que descreve o roteiro metodológico adotado para o estudo de caso da estimativa de volume de água armazenada nos reservatórios de pequeno e médio porte da região semiárida brasileira.

Figura 12 - Fluxograma do roteiro metodológico para o estudo da estimativa de volume de água armazenada nos pequenos e médio reservatórios da região semiárida brasileira.



Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 12, apresenta-se o fluxograma dos passos seguidos para obter o modelo empírico capaz de estimar o volume de água armazenada nos reservatórios de pequeno e médio porte da região semiárida do Brasil. Observa-se que, inicialmente, os dados de campo adquiridos in situ e as estimativas obtidas das imagens do Sentinel-2 foram utilizados como subsídio para a construção estatística de uma análise visando uma possível correlação empírica, conforme descrito anteriormente. A partir das imagens do Sentinel-2, utilizou-se o NDWI, um

índice capaz de detectar pixels como sendo água, que posteriormente foram transformados em pontos no software ArcGIS. Uma contagem desses pixels/pontos foi utilizada para estimar a área dos reservatórios, que, em seguida, foi analisada juntamente com os dados de volume adquiridos *in situ*. Outros modelos já obtidos na literatura para outras regiões semiáridas, em diferentes países, também foram considerados. Posteriormente, realizou-se uma análise comparativa entre os resultados do modelo empírico encontrado e a aplicação desses outros modelos na região semiárida brasileira. Por fim, o modelo empiricamente obtido foi utilizado para estimar o volume de água armazenada.

#### *3.4.4. Estudo de caso sobre quantidade da água: umidade do solo.*

Por fim, o segundo estudo de caso sobre quantidade de água, e último estudo de caso presente nessa dissertação. Trata-se, portanto, do estudo responsável por tentar estimar a umidade do solo, a partir do método OPTRAM, no município de Rio Claro, interior do estado de São Paulo.

##### 3.4.4.1 Mensuração da umidade *in situ*

Para testar a adequação da estimativa de umidade do solo produzida pelo OPTRAM no local de estudo, foram coletadas 52 amostras de solo para determinar a umidade do solo coletadas entre julho de 2021 e janeiro de 2022. A data para medição *in situ* da umidade do solo foi planejada para coincidir com a visita do satélite Sentinel-2. Todas as amostras de solo foram coletadas em profundidades de 5 a 10 cm em pontos representativos das unidades geológicas aflorantes na área de estudo. Em cada local de amostragem, foram coletados três pontos diferentes com distâncias entre 2 e 3 metros entre si para reduzir problemas de representatividade da amostra. Todas as amostras de solo coletadas foram armazenadas em potes hermeticamente fechados e imediatamente levadas ao laboratório.

No laboratório, aproximadamente 10 gramas de amostras de solo foram pesadas em triplicata e colocadas em cápsulas. Em seguida, essas cápsulas foram colocadas em uma estufa a 70 °C para secar. Após 48 horas, as amostras foram retiradas da estufa e pesadas novamente. A diferença de massa entre a amostra úmida inicial e a amostra seca representa a quantidade de água presente nas amostras de solo. Essa diferença foi utilizada para calcular a umidade do solo.

Assumindo que a densidade da água é igual a 1 g/cm<sup>3</sup>, o volume de água ( $V_w$ ) foi obtido subtraindo-se a massa de solo úmido ( $M_{hs}$ ) pela massa de solo seco ( $M_{ds}$ ).

$$V_w = M_{hs} - M_{ds} \quad (19)$$

O volume de solo seco ( $V_s$ ) foi obtido dividindo-se a massa de solo seco pela densidade aparente do solo ( $\rho$ ), conforme descrito pela Eq. 20. Nesta análise, foi utilizada uma densidade de solo igual a 1,4 g/cm<sup>3</sup>.

$$W = \frac{M_{ds}}{\rho} \quad (20)$$

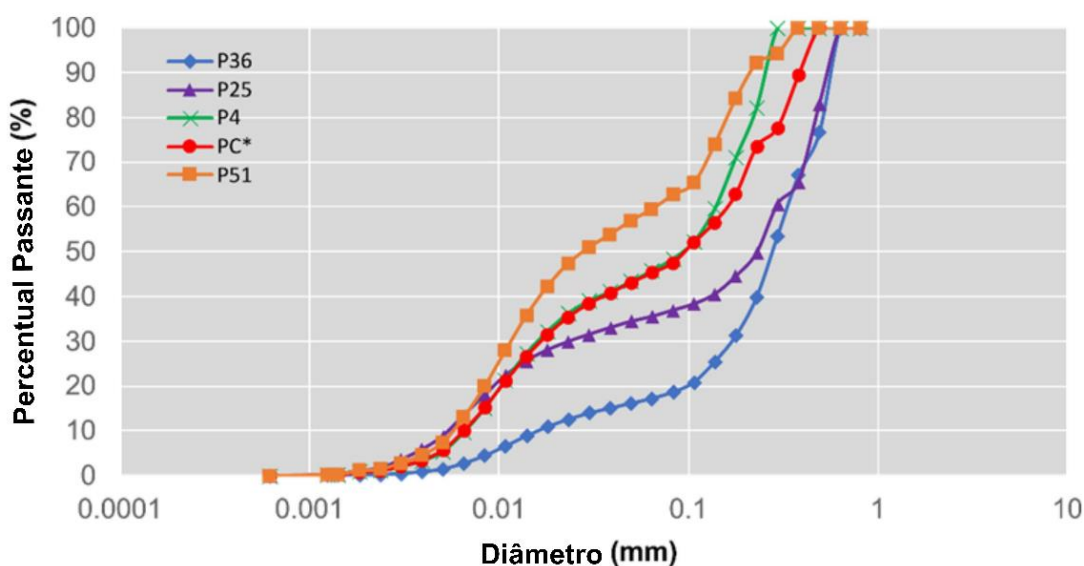
Por fim, a umidade volumétrica do solo foi determinada de acordo com a Eq. 21. Em seguida, foi calculada a média e o desvio padrão de amostras triplicadas.

$$W_{field} = \frac{V_w}{V_s} \quad (21)$$

#### 3.4.4.2 Granulometria da área de estudo

Para verificar a adequação da estimativa do OPTRAM em resposta à granulometria do solo, mediu-se a distribuição de tamanho de partícula de amostras representativas usando um analisador de tamanho e forma de partícula QIPIC®.

Figura 13 - Curvas de distribuição granulométrica de cinco tipos de solos representativos nos quais a umidade do solo foi medida em laboratório.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 13 apresenta uma representação gráfica das curvas de distribuição granulométrica, ilustrando a textura média superficial dos solos por unidade litológica. Essas unidades englobam diversos tipos de solo presentes na área de estudo, variando desde solos argilosos siltosos até texturas mais finas ou médias. Os solos arenosos estão associados à Formação Rio Claro, enquanto os solos argilosos siltosos e argilosos arenosos têm suas origens, respectivamente, nos siltitos da Formação Corumbataí e nos diabásios da Formação Serra Geral.

#### 3.4.4.2. Modelos trapezoidais TOTRAM e OPTRAM.

Como alternativa ao método TOTRAM (Modelo Trapezoidal Térmico Óptico), Sadeghi *et al.* (2017) desenvolveram o OPTRAM (Modelo Trapezoidal Óptico), uma nova abordagem baseada em sensores ópticos de satélites multiespectrais. Semelhante ao TOTRAM, a abordagem OPTRAM é baseada em uma abordagem gráfica que plota o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) contra um índice relacionado à umidade do solo. O NDVI, um parâmetro relacionado à robustez da vegetação, é uma métrica que usa a luz refletida nas faixas do vermelho visível (RED) e do infravermelho próximo (NIR) para quantificar a atividade

fotossintética das plantas. Os valores do NDVI variam de -1 a 1, e é calculado da seguinte forma.

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)} \quad (22)$$

Onde NIR representa a banda do espectro de luz na faixa do infravermelho próximo, enquanto RED representa a luz refletida na faixa do vermelho visível.

O TOTRAM é uma abordagem amplamente utilizada para estimar a umidade superficial em solos por meio de dados de Sensoriamento Remoto (Burdun et.al 2020; Mallick et.al 2009; Zhang et. al 2015), por exemplo. Inicialmente desenvolvido para interpretar a distribuição trapezoidal dos valores de pixel no espaço definido por LST (*Land surface temperature*) e um índice de vegetação, como FVC, NDVI ou LAI, o método utiliza as bordas seca e úmida, representadas pelos extremos mais altos e mais baixos de LST ao longo do gradiente de cobertura vegetal. Essas bordas indicam a disponibilidade uniforme de umidade do solo para condições extremas úmidas e secas. A evapotranspiração na borda úmida é máxima, não limitada pela disponibilidade de água, enquanto na borda seca é mínima devido à extrema limitação de água. Além disso, isópléas adicionais podem ser desenhadas, indicando condições transitórias de umidade. O índice de umidade do solo TOTRAM, de cada pixel *i* é calculado com base em sua posição relativa em relação às bordas úmida e seca dentro do espaço LST-VI em um único passo de tempo ou cena. (Burdun et.al 2020)

Já Sadeghi *et al.* 2015, introduziram o conceito de OPTRAM, que utiliza STR (*shortwave infrared transformed reflectance*) como um parâmetro sensível à umidade do solo. O OPTRAM define um trapezoide com base no NDVI para a cobertura vegetal e no STR para o teor de umidade, independente das condições climáticas específicas. A borda seca é determinada por um ajuste linear aos valores mínimos de STR, enquanto a borda úmida é menos explicitamente definida, sendo modelada por um ajuste linear aos valores de "mediana + desvio padrão". O índice de umidade do solo, WOPTRAM, é derivado por uma escala linear entre os valores máximo e mínimo de STR para um determinado NDVI. (Burdun et.al 2020)

Ao invés dos dados térmicos usados no TOTRAM, o OPTRAM usa o STR, um novo parâmetro proposto por Sadeghi *et al.* (2015). A dedução de STR foi baseada na teoria de Kubelka-Munk, dois fluxos, transferência radiativa, que descreve a refletância difusa de um meio uniforme, opticamente espesso, absorvente e espalhador (Sadeghi *et al.*, 2015). Sob esta

abordagem com base física, o STR é obtido do SWIR (*short wave infrared*) pela Eq. 23.

$$STR = \frac{(1 - SWIR)^2}{(2SWIR)} \quad (23)$$

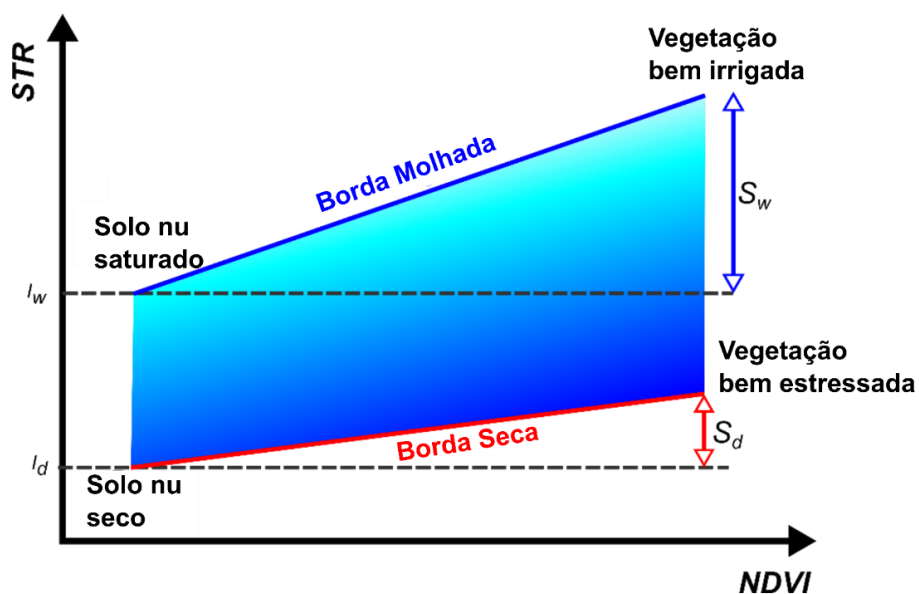
Com base no pressuposto descrito por Sadeghi *et al.* (2015), a umidade do solo está linearmente relacionada ao SRT, seguindo a relação descrita pela Eq. 24.

$$W = \frac{STR - STR_d}{STR_w - STR_d} \quad (24)$$

Onde  $STR_d$  representa o STR para solo seco ( $W=0$ ) e  $STR_w$  representa o STR para solo úmido ( $W=1$ ).

Para obter as estimativas de umidade do solo, os valores de pixel computados do NDVI e STR de imagens sem nuvens são plotados em um gráfico de dispersão, no qual os pontos são distribuídos dentro de um envelope semelhante a um trapézio, semelhante aos ilustrados na Figura 14.

Figura 14 - Ilustração do Modelo Ótico Trapezooidal conceituado (OPTRAM) produzido pela plotagem do STR contra os valores de pixel NDVI obtidos do sensor óptico (Sadeghi *et al.*, 2017).



Fonte: Sadeghi *et al.*, 2017, adaptado pelo autor.

Conforme ilustrado na Figura 14, os quatro cantos do trapézio representam quatro condições distintas, nas quais um baixo NDVI e baixo STR representam solo nu seco, um baixo NDVI e alto STR representam solo nu saturado, um alto NDVI e baixo STR representam vegetação estressada e altos NDVI e STR representam vegetação bem irrigada. Adicionalmente, as arestas superior e inferior do trapézio são compostas por linhas úmidas e secas, obtidas empiricamente a partir da análise do gráfico trapezoidal, e são descritas pelas Equações 25 e 26, respectivamente.

$$STR_d = i_d + s_d NDVI \quad (25)$$

$$STR_w = i_w + s_w NDVI \quad (26)$$

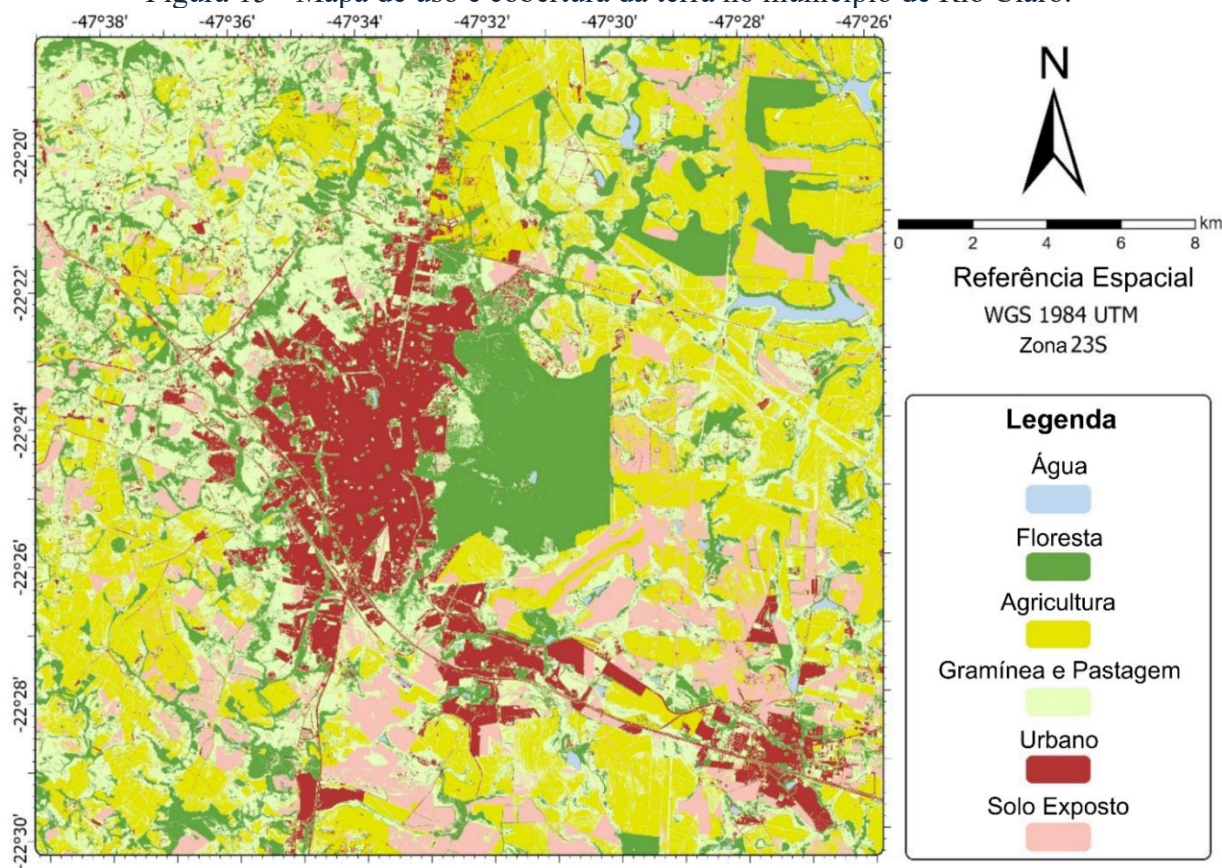
Finalmente, W é obtido combinando as Eqs. 25 a 26, produzindo a Eq. 27.

$$W = \frac{i_d + s_d NDVI - SRT}{i_d - i_w + (s_d - s_w) NDVI} \quad (27)$$

#### 3.4.4.3. Uso e cobertura da terra no município de Rio Claro.

A análise das informações provenientes da imagem capturada pelo Sentinel-2 (Figura 15) evidencia a manifestação de padrões distintos de uso e cobertura do solo, possibilitando a espacialização de variadas classes de uso. Na localidade de Rio Claro, é notável uma considerável diversificação na ocupação do solo e nos padrões de uso da terra. Nestas áreas, as regiões urbanas coexistem com zonas de vegetação nativa ou reflorestada, além de vastas extensões destinadas à prática de agricultura monocultura. A classificação da categoria urbana engloba superfícies impermeáveis, como as constituídas por concreto, telhados e asfalto.

Figura 15 - Mapa de uso e cobertura da terra no município de Rio Claro.



Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 15 ilustra o resultado da classificação do uso do solo, com foco na área de estudo que abrange as áreas urbanas e suas adjacências. Nesta classificação, é possível observar uma quantidade significativa de solo exposto, coincidindo com o período de estiagem no inverno local, época de safra e colheita da cana-de-açúcar, monocultura predominante na região. Após a colheita, o solo fica desnudo. Não é possível identificar corpos d'água expressivos, devido ao limite da resolução espacial da imagem Sentinel-2 em comparação com o tamanho dos corpos hídricos locais. Predominam áreas agrícolas que, em sua maioria, são canaviais, além de uma área de reflorestamento de eucaliptos, representada pela Floresta Estadual Edmundo Navarro de Andrade (FEENA).

Para a elaboração da Figura 15, realizou-se uma classificação supervisionada no software SIG QGIS, utilizando uma composição RGB de cor verdadeira, utilizada para a elaboração do mapa de uso e cobertura da terra da área de estudo, registradas no dia 13/06/2021. O software utilizado foi o QGIS versão 3.22.7, um software livre de código aberto, e a extensão Orfeo Toolbox (OTB), uma biblioteca de processamento de imagens de Sensoriamento Remoto desenvolvida pela CNES, a Agência Espacial Francesa, foi empregada

para a elaboração do mapa a partir da imagem RGB cor verdadeira. As aplicações do OTB são amplamente consolidadas e possuem uma vasta gama de aplicações, e existem diversas documentações de suas funcionalidades, como as de Cresson et.al (2018), Grizonnet et.al (2017) e Inglada e Christophe (2009).

Foram delimitadas 5 classes de uso do solo: Corpo d'água, Florestas, Gramíneas e pastagem, Agricultura, Solo e Urbanização. A partir da definição dessas classes, foram criados vetores de amostragem dos valores espectrais dos alvos, onde cada amostra é composta por valores de pixels em cada banda espectral. Assim, por meio do algoritmo TrainImages Classifier do OTB, que tem por objetivo classificar o uso e cobertura da terra a partir de pares de imagens e dados vetoriais de treinamento, foi possível obter o uso e ocupação de solo.

O treinamento das classes foi efetuado utilizando o algoritmo Random Forest, uma técnica de aprendizado de máquina. Este algoritmo atua por meio da construção de várias árvores de decisão durante a fase de treinamento. Posteriormente, ele determina a classe de saída com base na classe que é mais frequente entre as classes resultantes de cada árvore individual.

Para validar estatisticamente os resultados obtidos a partir da execução do algoritmo de classificação, recorreu-se ao cálculo do Coeficiente Kappa. Este coeficiente é uma medida que quantifica o grau de concordância entre duas avaliações, levando em consideração a possibilidade de concordância ao acaso.

Neste estudo, 70% dos vetores de treinamento foram utilizados para a execução do algoritmo. Estes vetores de treinamento são essenciais para “ensinar” o algoritmo a classificar corretamente os dados. Eles representam uma amostra dos dados que contém as características essenciais necessárias para a classificação.

Os 30% restantes dos vetores foram reservados para a validação estatística dos resultados. Esta etapa é crucial para testar a eficácia do algoritmo de classificação. Ao comparar as previsões do algoritmo com os vetores de validação, é possível avaliar a precisão, a sensibilidade e a especificidade do algoritmo.

O coeficiente Kappa de Cohen é uma medida da concordância entre dois avaliadores, corrigida pela concordância esperada por acaso. É calculado pela fórmula:

$$k = \frac{p_o - p_c}{1 - p_c} \quad (28)$$

Onde  $P_0$  é a proporção de concordância observada e  $P_c$  é a proporção de concordância

esperada por acaso. O valor de  $k$  varia de -1 a 1, onde 1 indica concordância perfeita, 0 indica concordância não melhor do que o acaso, e valores negativos indicam concordância pior do que o acaso.

A Proporção de concordância observada  $P_0$  é calculada pela fórmula:

$$P_0 = \frac{\sum_{i=1}^n X_{ii}}{N} \quad (29)$$

Onde  $X_{ii}$  são os elementos da diagonal principal de uma matriz de confusão  $X$  e  $N$  é o número total de observações. Esta proporção representa a frequência com que os avaliadores concordam.

A proporção de concordância esperada por acaso ( $P_c$ ) é calculada pela fórmula:

$$P_c = \frac{\sum_{i=1}^n L_i C_i}{N^2} \quad (30)$$

Onde  $L_i$  e  $C_i$  são as somas marginais para cada categoria  $i$  (ou seja, a soma das linhas e a soma das colunas, respectivamente) e  $N$  é o número total de observações. Esta proporção representa a frequência de concordância que seria esperada se os avaliadores estivessem classificando aleatoriamente.

O Coeficiente Kappa, proposto por Cohen (1960), é um método estatístico usado para avaliar o nível de concordância ou reprodutibilidade entre dois conjuntos de dados. Isso permite verificar a confiabilidade na precisão da classificação (Kotz; Johnson, 1983).

Landis e Koch (1977) classificam os diferentes níveis de concordância, conforme mostrado no quadro 5.

Quadro 5 – Níveis de concordância índice Kappa.

| Índice Kappa | Grau de concordância       |
|--------------|----------------------------|
| <0,00        | Não há                     |
| 0,00 - 0,20  | Mínimo                     |
| 0,21 - 0,40  | Razoável                   |
| 0,41 - 0,60  | Moderado                   |
| 0,61 - 0,80  | Substancial                |
| 0,81 - 1,00  | Excelente (quase perfeito) |

Fonte: Adaptado de Landis e Koch (1977).

No caso específico da classificação do Uso e Ocupação do Solo, após o cálculo do Índice Kappa, obteve-se um valor de 0,62, indicando um grau substancial de concordância. Para

aprimorar a concordância entre as classes analisadas e a realidade, foram realizadas modificações manuais no produto de Uso e Ocupação do Solo.

O valor do Coeficiente Kappa fornece uma indicação da confiabilidade das classificações realizadas pelo algoritmo. Um valor próximo de 1 indica uma concordância quase perfeita entre as classificações do algoritmo e os vetores de validação, enquanto um valor próximo de 0 sugere que qualquer concordância observada pode ser atribuída ao acaso. Portanto, o uso do Coeficiente Kappa não apenas valida os resultados da classificação, mas também quantifica o grau de confiabilidade desses resultados, contribuindo para a robustez da análise e fornecendo uma base sólida para interpretações e conclusões subsequentes.

A imagem *raster* produzida foi convertida em um arquivo vetorial, transformando valores de pixel em valores de ponto. Em seguida, algumas inconsistências identificadas por meio de uma inspeção detalhada da classificação original foram corrigidas manualmente. Por fim, os pontos com coberturas permeáveis foram removidos, deixando apenas as coberturas impermeáveis e corpos d'água. Estes foram convertidos em polígonos vetoriais e utilizados como máscara nos mapas de umidade do solo produzidos, evitando que áreas com cobertura de concreto e asfalto ou superfícies aquáticas fossem erroneamente classificadas como umidade de solo.

#### 3.4.4.4. Processamento e estimativa da umidade.

A partir das imagens Sentinel-2, o cálculo do NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) foi conduzido pela Equação 22, utilizando a Banda 4 (vermelho) e a Banda 8 (infravermelho). Para determinar o STR (Razão da Temperatura de Superfície), a Banda 12 (infravermelho próximo de onda curta) foi inicialmente reamostrada para 10 metros no software SNAP e em seguida aplicada a Equação 23. Imagens processadas de janeiro de 2020 a janeiro de 2022 foram analisadas, e os valores de pixel do NDVI e do STR foram extraídos e plotados para formar um diagrama trapezoidal. Ajustando manualmente as bordas correspondentes às áreas molhadas e secas, foram obtidos os seguintes valores:  $S_d$ , que é o valor de NDVI associado à borda seca do diagrama trapezoidal, indicando áreas com menor cobertura vegetal e, conseqüentemente, maior temperatura de superfície;  $S_w$ , que é o valor de NDVI associado à borda molhada do diagrama trapezoidal, representando áreas com maior cobertura vegetal e, geralmente, menor temperatura de superfície;  $I_d$ , que é o valor de STR associado à borda seca do diagrama trapezoidal, expressando a proporção da temperatura de superfície em relação à

temperatura máxima registrada; e  $I_w$ , que é o valor de STR associado à borda molhada do diagrama trapezoidal, representando a proporção da temperatura de superfície em relação à temperatura mínima registrada.

Considerando a variabilidade de uso e cobertura do solo na área de estudo, foi realizada uma classificação supervisionada para elaborar um mapa de uso e ocupação do solo. O objetivo era identificar regiões com superfícies impermeáveis, como concreto e asfalto (classificadas como “urbano”), vegetação de grande porte nativa ou reflorestada (“floresta”), pastagem e gramíneas, solo descoberto de vegetação (“solo exposto”) e áreas agricultáveis, predominantemente canaviais (classificadas como “agricultura”), conforme ilustrado na Figura 15. A partir desta classificação, o solo classificado como “urbano”, que é solo impermeável, foi transformado em um polígono. Em seguida, foi criada uma “máscara” a partir deste polígono, que foi aplicada aos modelos de umidade para evitar que o solo impermeável fosse erroneamente classificado como água.

Para medir a representatividade da umidade do solo estimada pelo OPTRAM, foram realizadas comparações com dados de campo usando três métricas distintas: o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o erro médio absoluto (MAE) e a raiz quadrada do erro médio (RMSE), descritos na Equações 31, 32 e 33, respectivamente, para  $N$  observações.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (W_{field,i} - W_{OPTRAM,i})^2}{\sum_{i=1}^N (W_{field,i} - \bar{W}_{field})^2} \quad (31)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (W_{field} - W_{OPTRAM}) \quad (32)$$

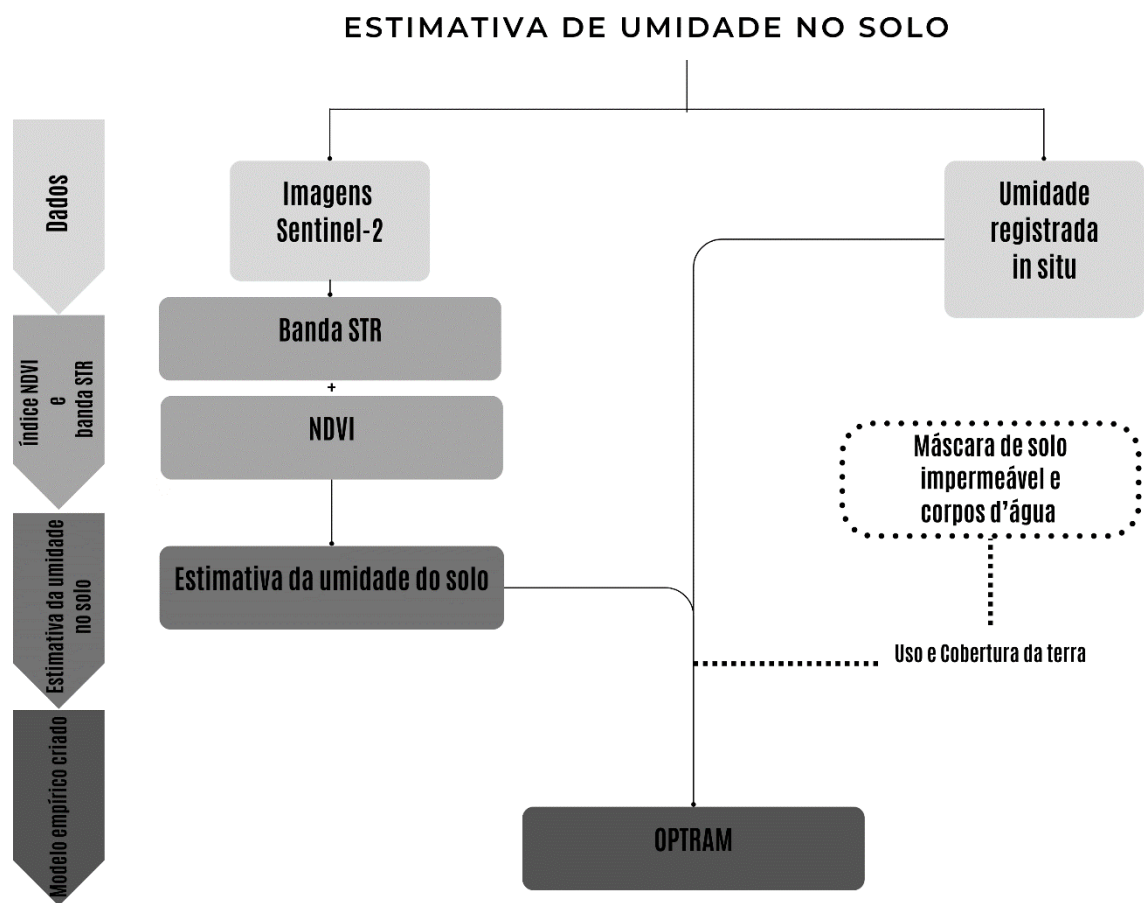
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (W_{field} - W_{OPTRAM})^2} \quad (33)$$

Onde  $\bar{W}_{field}$  representa o valor médio de  $W$  medido no campo.

#### 3.4.4.5. Fluxograma do roteiro metodológico para o estudo de caso da estimativa de umidade do solo.

Na Figura 16, é apresentado o fluxograma que descreve o roteiro metodológico adotado para o estudo de caso da estimativa de umidade de solo nas bordas urbanas do município de Rio Claro.

Figura 16 - Fluxograma do roteiro metodológico para o estudo da estimativa de volume de umidade do solo no município de Rio Claro.



Fonte: elaborado pelo autor

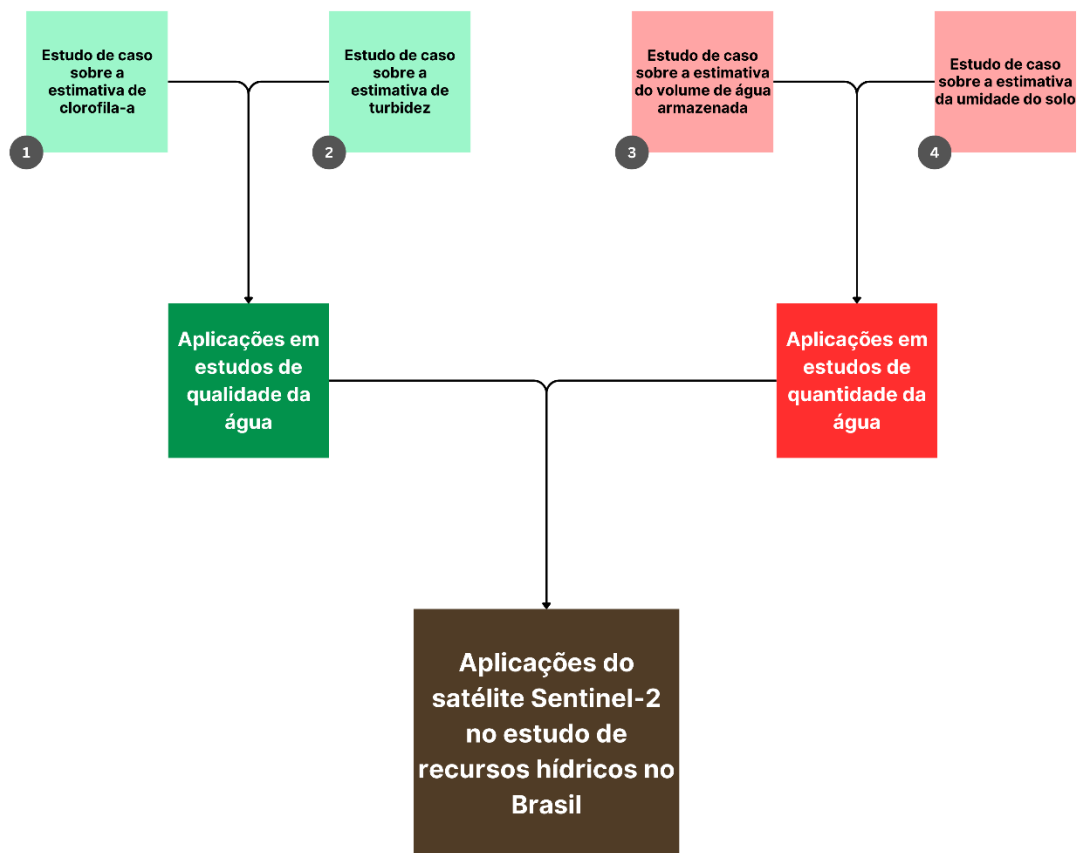
Na Figura 16, apresenta-se o fluxograma dos passos seguidos para obter o modelo empírico capaz de estimar a umidade do solo nas bordas da zona urbana do município de Rio Claro, no interior do estado de São Paulo. Observa-se que, inicialmente, os dados de campo adquiridos in situ e as estimativas obtidas das imagens do Sentinel-2 foram utilizados como subsídio para a construção estatística de uma análise visando uma possível correlação empírica, conforme descrito

anteriormente. A partir das imagens do Sentinel-2, utilizou-se o NDVI, um índice capaz de detectar pixels como sendo vegetação, e a banda 12 SWIR, que passou por um processo de reamostragem no software SNAP, alterando sua resolução espacial de 20 para 10 metros, como parâmetros para a obtenção do modelo empírico do OPTRAM. Também foi elaborado um mapa de uso da terra, a partir do qual se obtiveram polígonos para serem usados como máscara, com o intuito de evitar erros nas estimativas de umidade em áreas classificadas como solo impermeabilizado e corpos d'água. Posteriormente a isso, mapas de umidade foram gerados para ilustrar a estimativa de umidade do solo a partir do modelo OPTRAM obtido.

### **3.5. Fluxograma do trabalho.**

Com o objetivo de apresentar de forma organizada a sequência dos estudos de caso, ressaltando a relação entre eles, é elaborado o Fluxograma de Trabalho, que é apresentado na Figura 17. O fluxograma realça as relações entre os estudos e apresenta a ideia geral desta pesquisa, proporcionando uma melhor compreensão de como os estudos de caso são utilizados para investigar as aplicações do satélite Sentinel-2 no estudo de recursos hídricos no Brasil.

Figura 17 - Fluxograma do trabalho



Fonte: elaborado pelo autor

No fluxograma representado na Figura 17, é melhor esboçada a ideia por trás desta dissertação, onde quatro diferentes estudos de caso são elaborados. Inicialmente, os quatro estudos de caso, conforme mencionados, resumem-se a: Estimativa de Turbidez, Estimativa de Clorofila-a, Estimativa do Volume de Água Armazenada e Estimativa de Umidade do Solo. Respectivamente, os dois primeiros estudos estão voltados para avaliar a aplicabilidade do satélite Sentinel-2 no estudo da qualidade de água no Brasil e, posteriormente, os dois últimos estudos de caso apresentados estão voltados para avaliar a aplicabilidade do satélite Sentinel-2 no estudo da quantidade da água do Brasil. Todos estes estudos de caso confluem para uma ideia geral desta dissertação que é a ‘Aplicação do satélite Sentinel-2 no estudo de recursos hídricos no Brasil’.

#### **4. ESTUDOS DE CASO DE QUALIDADE DA ÁGUA.**

Este capítulo apresenta estudos de caso dedicados a compreender a aplicabilidade do uso das imagens do Sentinel-2 para o estudo da qualidade da água no Brasil. Os estudos abordam duas áreas distintas: a bacia hidrográfica do rio Paraopeba, no estado de Minas Gerais, e os reservatórios responsáveis pelo abastecimento público na Região Metropolitana de São Paulo. Esses estudos confirmam a hipótese de que as imagens de Sensoriamento Remoto do satélite Sentinel-2 são válidas para a aplicação de modelos empíricos na avaliação da qualidade da água.

##### **4.1. Estimativa de turbidez: Estudo de Caso do Rio Paraopeba após o rompimento da barragem de rejeitos de mineração.**

Em 25 de janeiro de 2019, a súbita ruptura da Barragem I, contendo rejeitos de mineração da mineradora Vale, liberou cerca de 12 milhões de metros cúbicos de resíduos, dos quais uma parcela significativa foi despejada no Rio Paraopeba. Imediatamente após o rompimento da barragem e a descarga dos rejeitos, os valores de turbidez aumentaram em três a quatro ordens de magnitude superiores aos níveis naturais do rio, com medições em janeiro ultrapassando 50.000 NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez), conforme relatado pela CPRM (2019). Devido à abundância de óxidos de ferro nos resíduos, as plumas de turbidez resultantes variaram em cores do avermelhado ao acastanhado, como discutido por Teramoto *et al.* (2020).

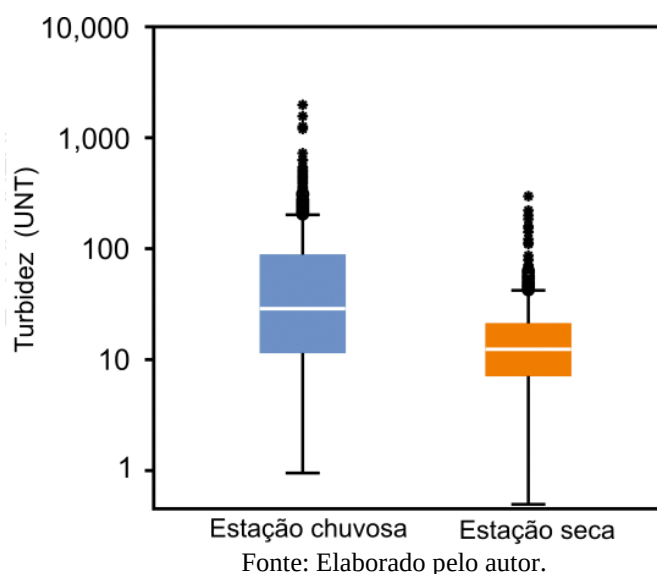
##### **4.1.1. Variação natural dos níveis de turbidez do rio Paraopeba.**

Normalmente, a turbidez exibe um padrão sazonal e cíclico diretamente relacionado às variações no volume de precipitação. Para investigar essa relação, os dados de turbidez entre 2012 e 2018 foram subdivididos em dois períodos distintos: épocas de chuvas (de outubro a março) e períodos secos (de abril a setembro). A visualização desses dados é apresentada na Figura 18, que mostra um boxplot comparativo entre os níveis de turbidez durante estas duas estações do ano. Os resultados revelam que a média de turbidez durante as épocas chuvosas é de 88,13 NTU, valor significativamente superior à média de 20,56 NTU observada durante os períodos secos. É importante destacar a presença de valores atípicos, particularmente durante as épocas chuvosas, onde medições de turbidez ultrapassam a marca de 500 NTU. Apenas três

medições exibiram valores de turbidez superiores a 1.000 NTU, indicando que a ocorrência de níveis de turbidez extremamente elevados era rara antes da introdução de resíduos de mineração no rio Paraopeba.

A análise gráfica da Figura 18 também sugere uma distinção notável na turbidez entre as épocas chuvosas e secas prévias ao colapso da barragem da Vale, indicando uma clara associação entre os padrões sazonais e as flutuações no fluxo do rio. Esse padrão sugere que a turbidez está positivamente correlacionada com o aumento do fluxo do rio durante as épocas chuvosas. Para compreender a evolução da turbidez após o colapso da barragem e sua resposta às variações sazonais no fluxo do rio, foi desenvolvido um hidrograma utilizando dados de três estações de monitoramento ao longo de 2019, conforme representado na Figura 20. A localização dessas estações é destacada na Figura 1, nos materiais e métodos desta pesquisa.

Figura 18 - Boxplot para valores sazonais de turbidez.



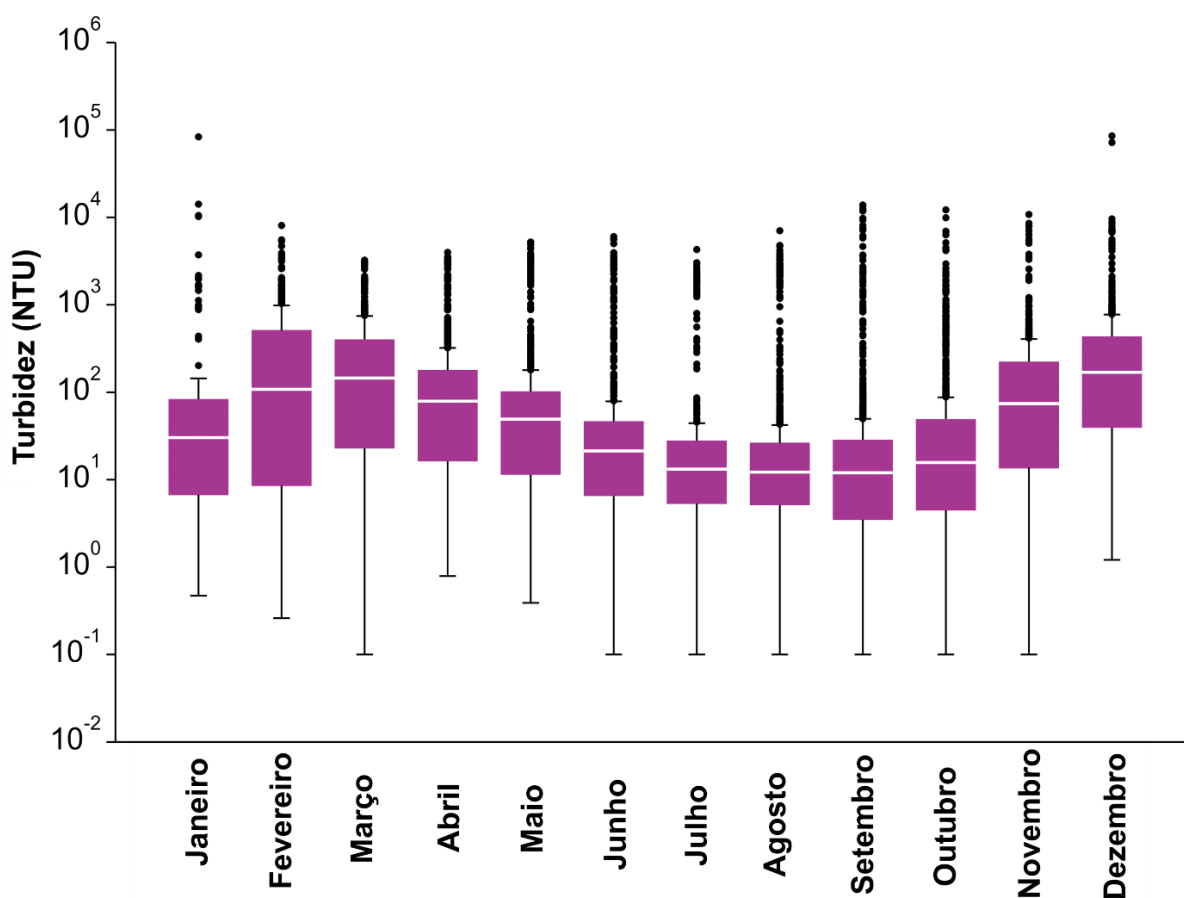
A Figura 18 apresenta um boxplot para valores de turbidez nos períodos chuvoso (outubro a março) e seco (abril a setembro) entre 2012 e 2018. Os valores de turbidez são apresentados em escala logarítmica. A linha central dentro da caixa representa a mediana, e os limites superior e inferior da caixa representam os valores do primeiro e terceiro quartis, respectivamente. A distinção da turbidez durante as estações seca e chuvosa é controlada pela variação do fluxo do rio.

#### 4.1.2. Variação da turbidez do rio Paraopeba após o rompimento da barragem de rejeitos de mineração.

Os resultados obtidos ao longo de 2019 foram resumidos em um boxplot, conforme apresentado na Figura 19. É notável o aumento significativo nos valores de turbidez registrados durante a estação seca desse ano em comparação com os períodos secos prévios ao colapso da barragem, como evidenciado anteriormente na Figura 18.

A evolução temporal da turbidez, ilustrada na Figura 19, reflete de forma coerente as oscilações no fluxo do rio (Figura 20). Os valores medianos de turbidez aumentaram gradualmente, atingindo o pico em março e diminuindo nos meses subsequentes. Durante os períodos mais secos de agosto e setembro, foram registrados os valores mais baixos de turbidez. Com o início da estação chuvosa em setembro, ocorreu um acentuado aumento na mediana da turbidez, aproximando-se dos valores observados nos meses de fevereiro e março.

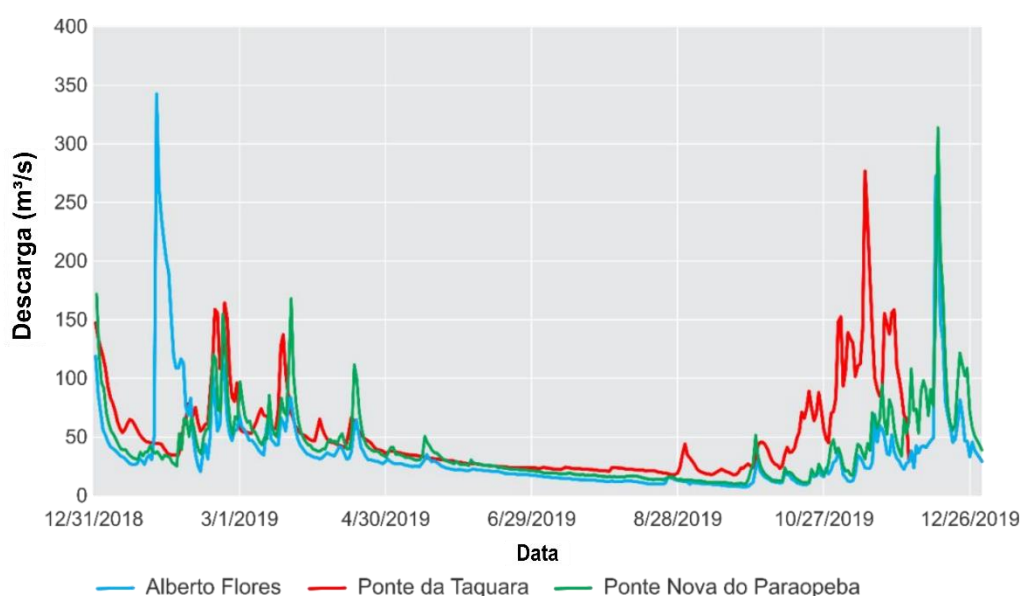
Figura 19 - Boxplot das variações dos valores de turbidez no ano de 2019.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme observado na Figura 19, o boxplot ilustra as variações dos valores de turbidez entre janeiro e dezembro de 2019. A linha central dentro da caixa representa a mediana, enquanto os limites superior e inferior da caixa representam os valores do primeiro e terceiro quartis, respectivamente. A turbidez apresenta uma variação sazonal, com os valores mais altos sendo observados durante a estação chuvosa em fevereiro e março. Posteriormente, ocorre uma diminuição gradual, seguida de um aumento no final de setembro, o que está em forte concordância com a variação do fluxo do rio, conforme mostrado na Figura 20.

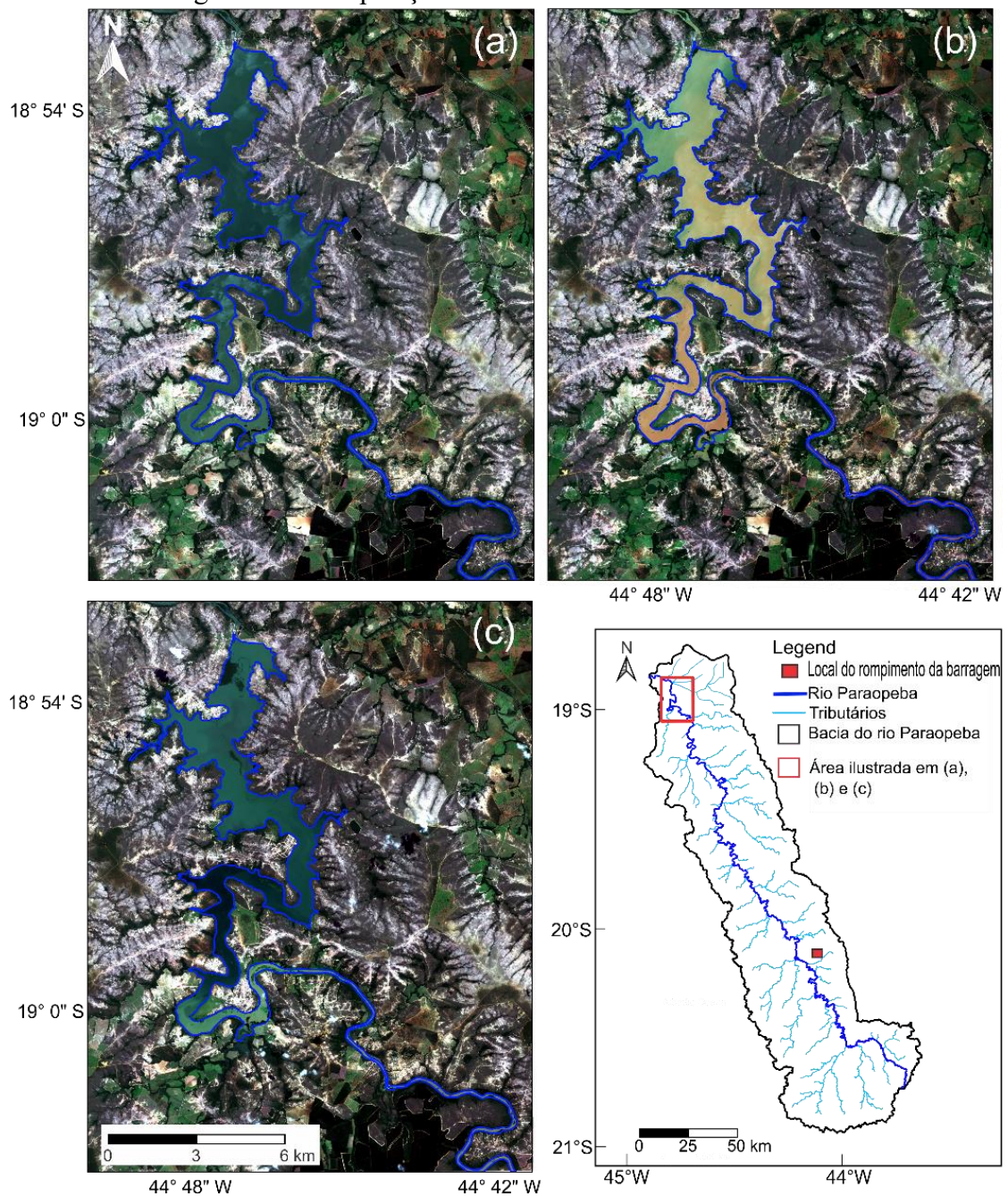
Figura 20 - Hidrograma das três estações de medição observadas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 20 apresenta um hidrograma das três estações de medição observadas durante 2019 (localizações apresentadas na Figura 1). Os maiores valores de vazão foram registrados entre janeiro e abril, caindo posteriormente e aumentando no final de setembro em resposta à variação das chuvas. A dispersão da pluma de turbidez foi influenciada pelo movimento advectivo ao longo do rio Paraopeba, resultando na chegada dessa pluma ao reservatório de Retiro Baixo, aproximadamente dois meses após a ruptura da barragem. Essa dinâmica pode ser observada nas imagens sequenciais do reservatório apresentadas na Figura 21, que ilustram a variação na turbidez em diferentes períodos: antes da ruptura da barragem (Figura 21a), durante o transporte da pluma de turbidez (Figura 21b) e em um estágio posterior (Figura 21c), quando houve uma certa atenuação na turbidez.

Figura 21 - Composição cor-verdadeira reservatório Retiro Baixo.



Fonte: Imagens Sentinel-2.  
Elaborado pelo autor.

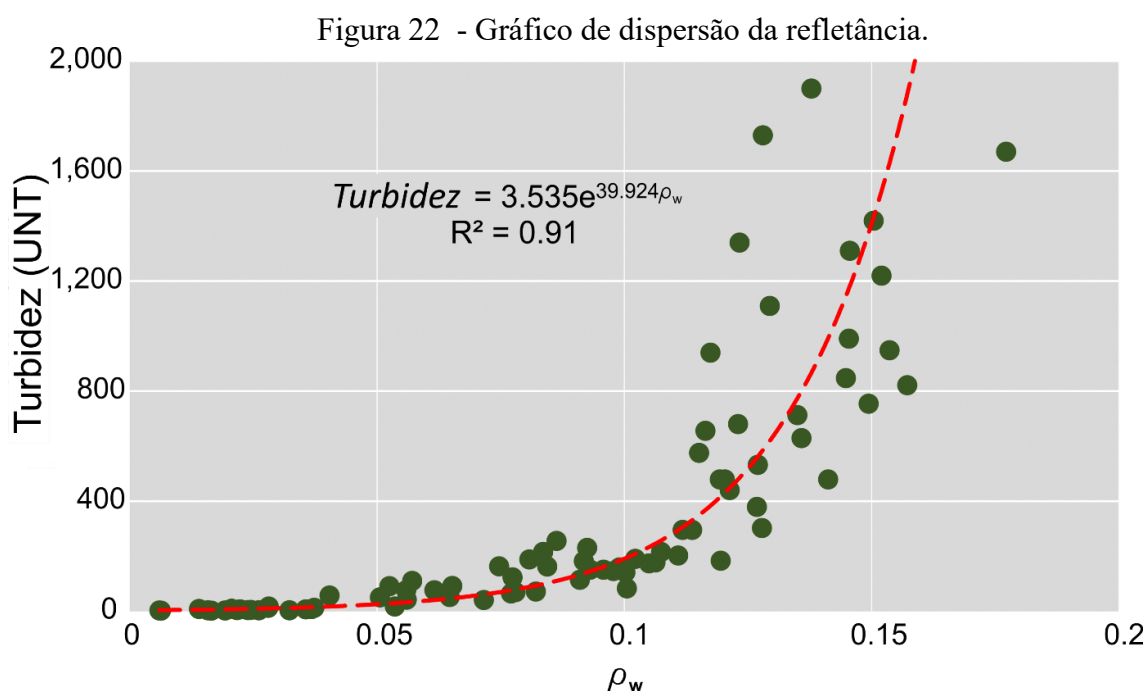
A Figura 21 demonstra a composição de cores verdadeiras para três datas distintas de períodos representativos: a) 22 de janeiro de 2019, três dias antes do rompimento da barragem de rejeitos da Vale, quando os valores de turbidez estavam relativamente baixos; b) 8 de março de 2019, 42 dias após o rompimento da barragem de rejeitos da Vale, quando a pluma de turbidez atingiu a barragem; e c) 27 de maio de 2019, 122 dias após o rompimento da barragem de rejeitos da mina, quando grande parte da pluma de turbidez havia se dissipado. As plumas

de turbidez em (a) e (b) são facilmente reconhecidas por regiões de coloração acastanhada, refletindo a natureza dos rejeitos da mina, que são ricos em óxidos de ferro.

#### 4.1.3.. Modelo empírico desenvolvido.

Das bandas do Sentinel-2 testadas, aquelas com os menores valores de erro padrão de regressão (S) (Equação 2) foram selecionadas como as mais representativas para estimar a turbidez. As equações resultantes da análise de regressão, com os menores valores de S, foram identificadas como as mais apropriadas para a estimativa da turbidez do rio Paraopeba a partir das imagens obtidas pelo Sentinel-2.

As medições in situ da turbidez e as imagens do Sentinel-2 foram obtidas simultaneamente, possibilitando uma comparação direta entre os valores de turbidez e a refletância em diversos pontos de amostragem. A análise de regressão não linear revelou que um modelo exponencial ofereceu o melhor ajuste, sendo a banda de infravermelho próximo (banda 8) do Sentinel-2 a mais adequada para estimar a turbidez.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 22 apresenta o gráfico de dispersão da refletância da banda 8 do Sentinel-2 e os valores de turbidez (pontos verdes) com o modelo exponencial (linha vermelha). Observa-se que o desvio dos valores observados em relação à curva do modelo aumenta conforme a turbidez cresce.

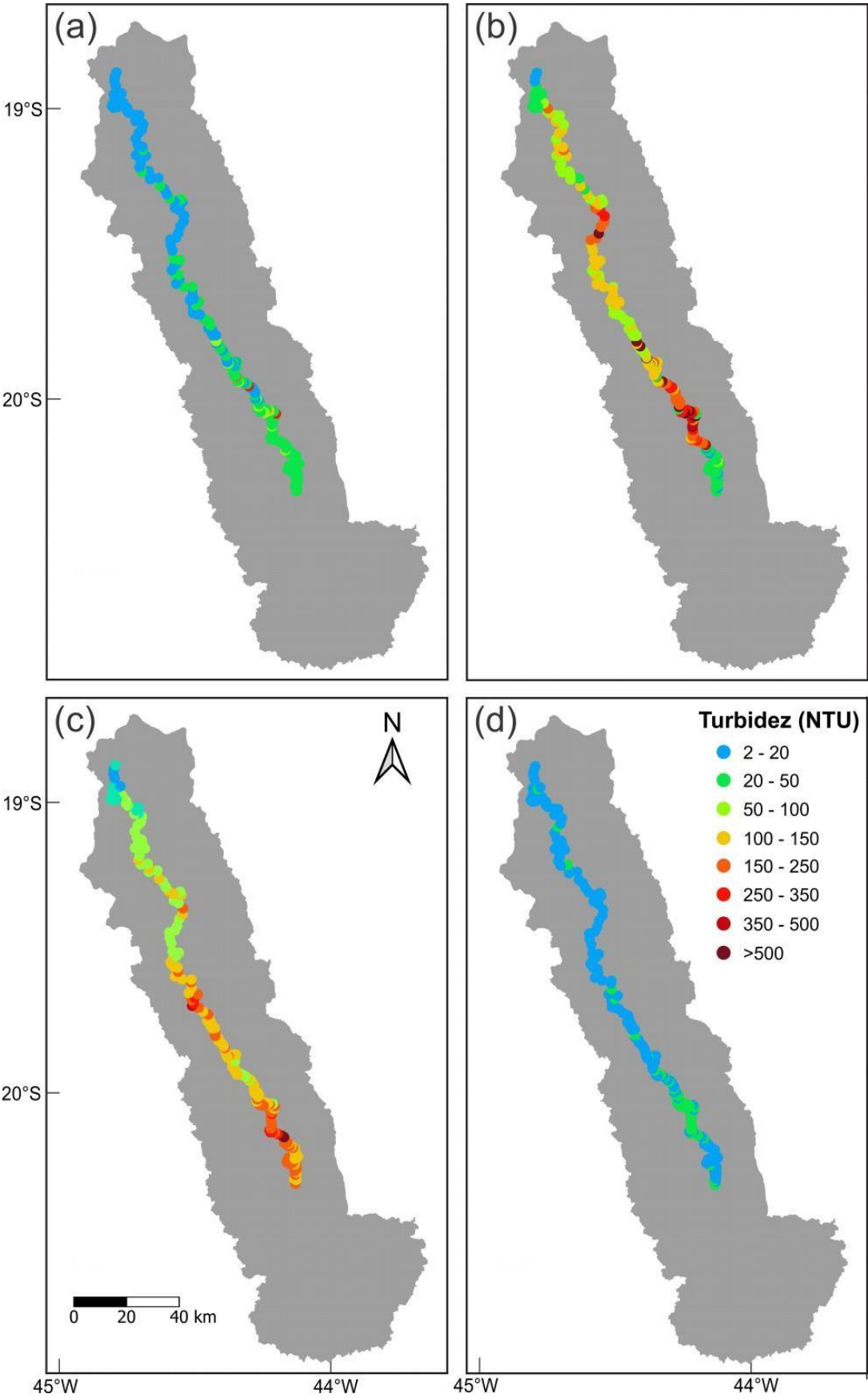
$$Turbidez = 3.535 * e^{39.324*pw} \quad (34)$$

A equação exponencial resultante (Equação 34) foi utilizada para estimar a turbidez com base na refletância da banda 8 do Sentinel-2. Essas estimativas demonstraram boa consistência com os valores observados, especialmente durante os períodos de aumento significativo na turbidez.

#### 4.1.4. Aplicação do modelo empírico desenvolvido para estimar a turbidez.

Para avaliar a consistência do modelo empírico proposto, foram gerados mapas de distribuição da turbidez estimada com base na Equação 34, utilizando imagens do Sentinel-2 antes e após o colapso da barragem. A análise desses mapas, apresentada na Figura 23, revelou padrões coerentes com a evolução da turbidez ao longo do tempo. A distribuição estimada de turbidez para 22 de janeiro de 2019 (Figura 23a), três dias antes do rompimento da barragem, mostrou valores inferiores a 100 NTU. Em 8 de março de 2019 (Figura 23b), 42 dias após o colapso da barragem, foram observados valores elevados de turbidez, ultrapassando 500 NTU, evidenciando o transporte de uma grande quantidade de material em suspensão. Em 27 de maio de 2019 (Figura 23c), 122 dias após o rompimento, observou-se uma redução na turbidez em relação a março. Em setembro de 2019, a turbidez atingiu seu valor mais baixo, no final da estação seca (Figura 23d), devido à redução da vazão do rio registrada nesse período.

Figura 23 - Mapa de distribuição de turbidez.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 23 é possível ver o mapa de distribuição de turbidez estimado para 206 pontos ao longo do rio Paraopeba: a) 22 de janeiro de 2019; b) 8 de março de 2019; c) 27 de maio de 2019; e d) 19 de setembro de 2019. A maior turbidez foi observada em março de 2019, diminuindo nos meses seguintes e atingindo valores mais baixos em setembro de 2019. Essa tendência coincide com as medições de campo apresentadas na Figura 19.

#### 4.1.5. Considerações acerca do estudo.

Nesta dissertação, destaca-se a elaboração bem-sucedida de um modelo empírico para estimar a turbidez no rio Paraopeba, após o incidente com a barragem de rejeitos de mineração. O rio Paraopeba, um dos principais afluentes do rio São Francisco, desempenha um papel crucial no fornecimento de água e na irrigação de diversos municípios na região central de Minas Gerais. O incidente com a barragem no córrego do Ferro-Carvão causou danos significativos ao meio ambiente e à comunidade local.

Segundo a Fundação Joaquim Nabuco (2020), a falta de informações sobre a qualidade da água é uma realidade crônica para os ribeirinhos que vivem às margens do Rio Paraopeba, em Minas Gerais. Desde o incidente com a barragem I da Mina Córrego do Feijão, em 25 de janeiro de 2019, a Vale realizou 4,5 milhões de análises de água, solo e sedimento em 90 pontos de monitoramento. No entanto, as comunidades afetadas denunciam que os resultados não são divulgados (Fundação Joaquim Nabuco, 2020).

Um estudo realizado pelo Instituto Butantã e a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) revelou que embriões de peixes da espécie “paulistinha” apresentam morte ou anomalias quando expostos às águas do Paraopeba. Esta espécie tem 70% de semelhança genética com a espécie humana, sugerindo que os impactos da contaminação podem ser extensos e prejudiciais (Fundação Joaquim Nabuco, 2020). Além disso, a contaminação das águas do rio Paraopeba após o incidente com a barragem de rejeitos de mineração tem causado a morte e deformidades em peixes (Fernandes *et. al*, 2021; Altino e Azevedo, 2024).

O aumento expressivo nos níveis de turbidez, foco deste estudo, representa um grande impacto ambiental relacionado ao incidente com a barragem de rejeitos, resultando na contaminação da água do rio e tornando-a imprópria para o consumo humano, conforme a Resolução nº 357 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Assim, o desenvolvimento de técnicas de monitoramento da turbidez é de grande importância, tanto do

ponto de vista ambiental quanto social (Brasil, 2005).

Dado o contexto, é essencial um monitoramento constante da qualidade da água para avaliar os efeitos adversos da introdução desses resíduos ao longo do tempo. A turbidez é um grande problema ambiental, mas não é o único problema causado pelo incidente com a barragem no rio Paraopeba. Existem outros problemas que não podem ser monitorados apenas pela análise da turbidez da água.

Os resultados deste estudo apontam para a consideração das características físicas específicas do sistema fluvial, como a largura do rio e a natureza dos materiais em suspensão. Nesse contexto, a banda NIR 8 do satélite Sentinel-2 se destaca como a mais adequada para a estimativa de turbidez. Essa escolha possibilita um monitoramento eficaz das variações de turbidez em uma escala regional ao longo do tempo. Com a frequência média de revisita de cinco dias do Sentinel-2, é possível construir uma série histórica, permitindo um monitoramento sistemático das flutuações de turbidez no rio Paraopeba por meio de técnicas de Sensoriamento Remoto.

É importante destacar que, embora a estimativa de turbidez por Sensoriamento Remoto apresentada neste estudo e em pesquisas anteriores (por exemplo, Petus *et al.*, 2010; Pereira *et al.*, 2017; Kuhn *et al.*, 2019) não alcance a mesma precisão das medições de campo, ela oferece uma abordagem complementar e contínua. As medições de campo fornecem dados pontuais, enquanto o Sensoriamento Remoto permite identificar tendências espaciais e temporais ao longo do curso do rio. Além disso, devido aos seus custos relativamente mais baixos, o monitoramento via Sensoriamento Remoto permite uma melhor espacialização dos parâmetros. Isso é possível devido à quantidade de pontos amostrais coletados pelo Sensoriamento Remoto, que podem ser muito superiores aos coletados em estações fluviais, possibilitando estimativas em toda a extensão do rio.

Embora estudos anteriores tenham demonstrado a aplicabilidade bem-sucedida de técnicas de Sensoriamento Remoto em regiões costeiras e lagos, poucos exploraram o monitoramento da turbidez em rios. Este estudo identificou um modelo que possibilita estimativas consistentes de turbidez a partir de imagens do Sentinel-2 no rio Paraopeba. É fundamental reconhecer que, devido às particularidades dos tipos e características dos materiais em suspensão, o modelo empírico que relaciona a turbidez com a resposta espectral das imagens de satélite é específico para a localização. Ademais, embora existam diversos modelos para gerar estimativas confiáveis de turbidez com base na resposta espectral, a abordagem de modelo único demonstrada neste trabalho se mostra confiável para águas

impactadas por rejeitos de mineração.

A análise de regressão sugere que o modelo exponencial é mais adequado para os dados de turbidez, dada a ampla variação desse parâmetro, enquanto a refletância segue uma variação mais linear. É relevante notar que o desvio entre os valores de turbidez observados e o modelo ajustado aumenta com o aumento da turbidez, indicando uma avaliação menos precisa de valores extremamente elevados. Essa discrepância pode ser devida a imprecisões do turbidímetro utilizado para medição nessa faixa ou a uma possível saturação na resposta espectral em níveis mais elevados de turbidez.

Apesar da falta de precisão comparável às medições de campo, a abordagem de Sensoriamento Remoto ainda consegue fornecer estimativas confiáveis e consistentes de turbidez. Para ilustrar a aplicação prática do modelo desenvolvido, construiu-se uma série temporal de turbidez estimada, seguindo tendências semelhantes às observadas nas medições de campo.

O comportamento dos resíduos de mineração no rio Paraopeba pode seguir um padrão sazonal, com ressuspensão ocorrendo durante o aumento da vazão na estação chuvosa. Contudo, na estação seca, quando a vazão do rio diminui significativamente, é provável que os resíduos transportados se depositem no leito do rio. Portanto, o modelo desenvolvido neste estudo oferece uma ferramenta valiosa para o monitoramento de longo prazo da turbidez do rio e proporciona uma avaliação consistente da qualidade da água.

Esta abordagem evidenciou a habilidade de estimar a turbidez por meio de modelos de banda única, tendo a banda NIR do satélite Sentinel-2 como a mais adequada. Isso oferece uma alternativa econômica às medições *in situ* e pode ser aplicada usando imagens de satélite de acesso público. Permitindo que agências ambientais, instituições acadêmicas e a sociedade em geral monitorem de maneira eficaz e contínua os impactos de longo prazo das atividades de mineração nos corpos d'água, que desempenham um papel crucial no abastecimento de água.

É importante esclarecer que este trabalho busca o desenvolvimento de uma técnica capaz de estimar a turbidez após o rompimento da barragem, utilizando imagens Sentinel-2. No entanto, esta dissertação não teve a pretensão de monitorar o rio a longo prazo. O objetivo principal foi estabelecer uma base para futuras pesquisas e aplicações práticas, fornecendo uma ferramenta para avaliar a qualidade da água em resposta a eventos ambientais significativos, como o rompimento de uma barragem de rejeitos de mineração.

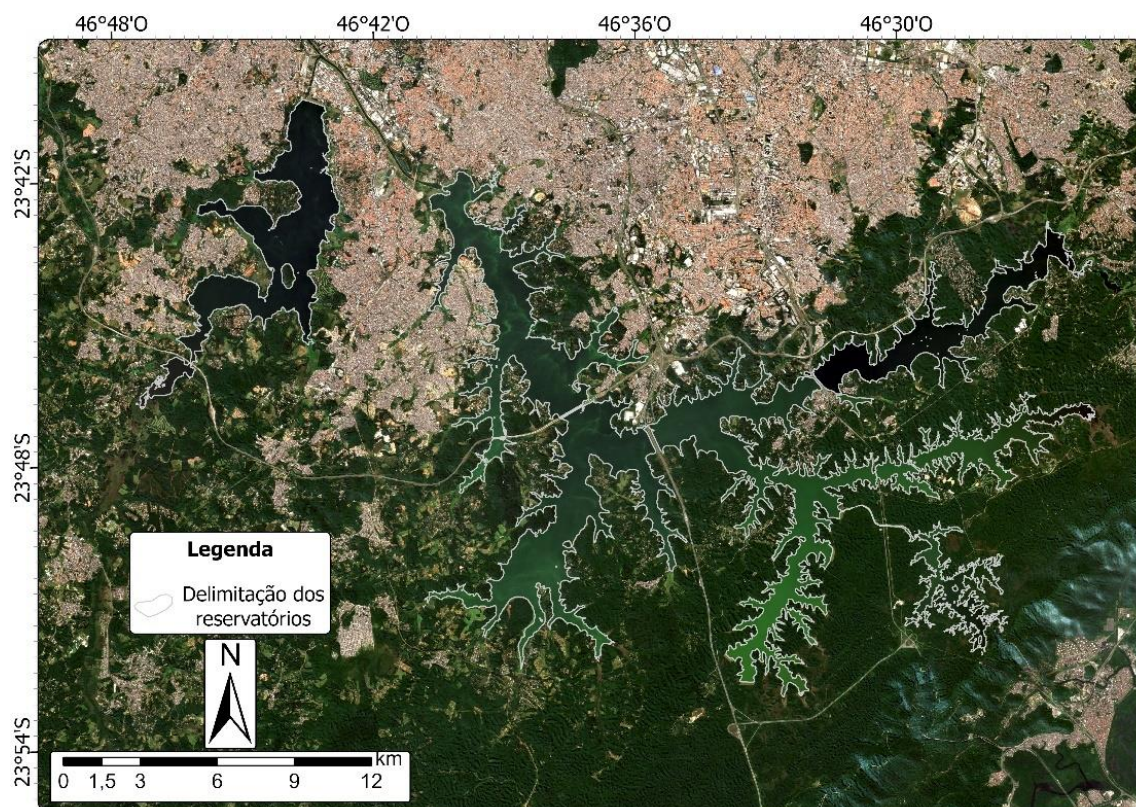
#### **4.2. Estimativa de clorofila-a: Estudo de Caso dos reservatórios de abastecimento público da Região Metropolitana de São Paulo.**

O presente estudo foi conduzido nas represas Billings, Guarapiranga e Rio Grande, localizadas na região metropolitana de São Paulo, Brasil. Essas represas foram escolhidas devido à sua relevância ambiental e à significativa contribuição para o abastecimento de água na região.

O crescimento urbano descontrolado próximo aos reservatórios e o descarte de resíduos em seus afluentes são responsáveis por impactos negativos na qualidade da água. Com o acúmulo de matéria orgânica, a clorofila-a encontra condições ideais para seu desenvolvimento, afetando ainda mais a qualidade da água. A presença de clorofila em corpos d'água pode afetar a qualidade da luz refletida e absorvida, resultando em uma coloração esverdeada na composição RGB (cor verdadeira) de imagens de satélite, como ilustrado na Figura 24.

A clorofila é um pigmento essencial para a fotossíntese, encontrado em plantas e algas, que absorve energia luminosa para a síntese de compostos orgânicos e sustentação do crescimento e desenvolvimento desses organismos. Quando a concentração de clorofila é alta em um corpo d'água, ocorre um efeito de dispersão da luz, resultando na aparência esverdeada da imagem. Isso se deve ao fato de que a clorofila absorve luz azul ( $0,4 - 0,5 \mu\text{m}$ ) e vermelha ( $0,6 - 0,7 \mu\text{m}$ ), enquanto reflete luz verde ( $0,5 - 0,6 \mu\text{m}$ ) (Pereira, 2007).

Figura 24 - Composição RGB cor verdadeira da imagem Sentinel-2 para o dia 28/10/2020.



Fonte: Imagem Sentinel-2.  
Elaborado pelo autor.

A Figura 24 apresenta a composição cor verdadeira RGB no dia 28/10/2020 nos três reservatórios avaliados no presente estudo, sendo possível observar fortes variações da concentração de clorofila-a na água, que se manifesta a partir da intensidade da cor verde na água destes reservatórios.

O "bloom de algas" é um fenômeno repentino e intenso que resulta no aumento significativo da biomassa de algas em corpos de água, geralmente associado a mudanças ambientais, como o aumento de nutrientes e a elevação da temperatura. Esse evento pode indicar problemas ambientais, como a eutrofização, caracterizada pelo acúmulo excessivo de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, que estimulam o crescimento descontrolado de algas e organismos aquáticos, reduzindo os níveis de oxigênio dissolvido na água e prejudicando a vida aquática. Além disso, a poluição hídrica proveniente do lançamento de resíduos orgânicos e inorgânicos em corpos d'água também pode promover a proliferação de algas e organismos aquáticos, impactando negativamente a qualidade da água e a biodiversidade aquática (Barreto *et al.*, 2013; Ruivo, 2017).

#### 4.2.1. Aplicação das equações derivadas dos modelos com melhores ajustes

A análise de regressão não linear revelou que três modelos exponenciais se ajustaram melhor aos dados de resposta espectral e aos dados de clorofila-a medidos in situ: o modelo de banda espectral única (705 nm) com  $R^2$  de 0,71; o modelo de Gitelson *et al.* (2003) com  $R^2$  de 0,90; e o modelo de Dall’Olmo *et al.* (2003) com  $R^2$  de 0,92, conforme observado na Figura 7. Usou-se as equações não lineares resultantes desses modelos com melhor ajuste para produzir estimativas de turbidez a partir das imagens Sentinel-2, conforme mostrado nas Equações 35, 36 e 37.

$$\text{Clorofila} - a = 18,58e^{19,745x*pw} \quad (35)$$

Equação 35, ajuste para a aplicação na do modelo banda espectral única em 705nm.

$$\text{Clorofila} - a = 21,611e^{2,9481*Indice \text{ de Gitelson et al (2003)}} \quad (36)$$

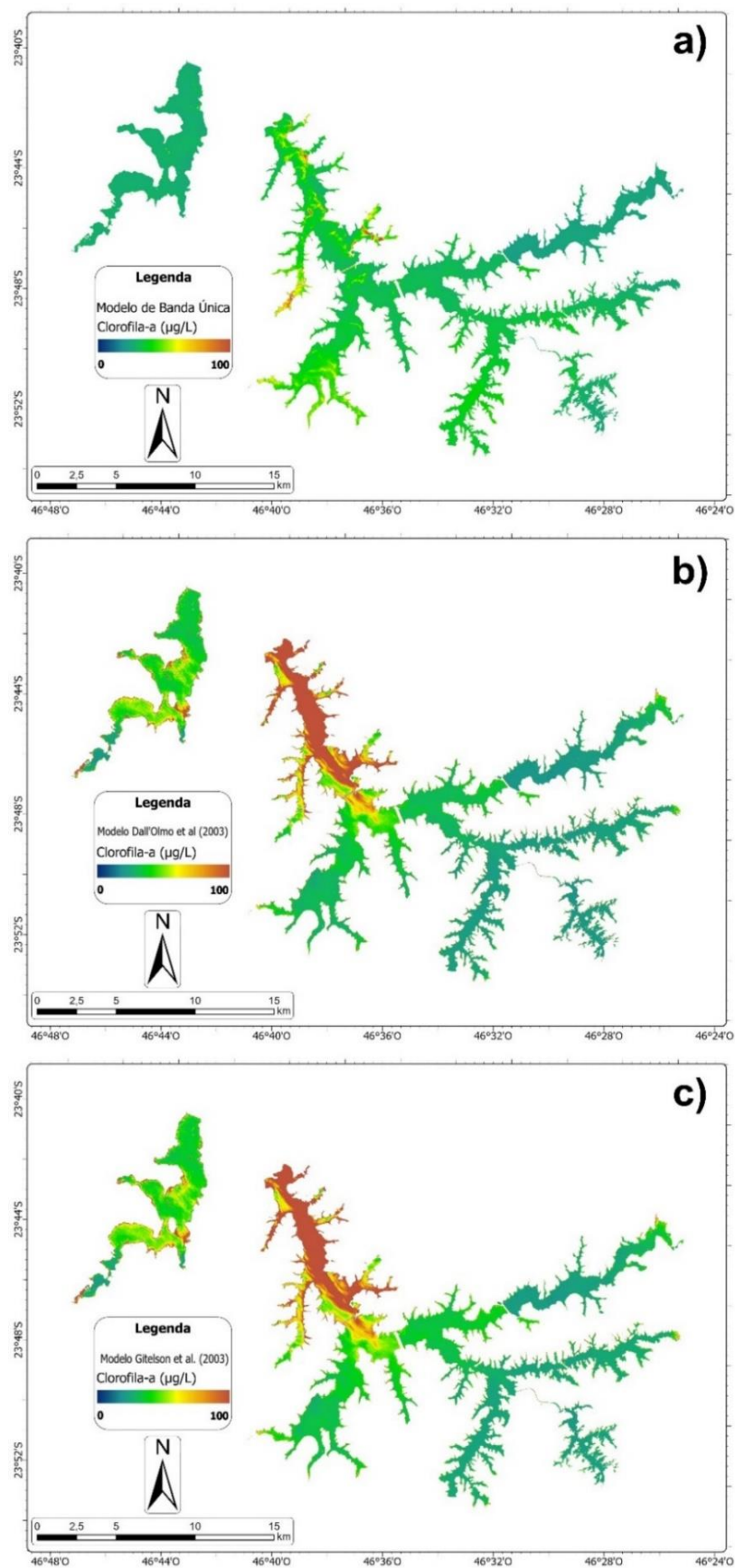
Equação 36, ajuste para a aplicação do modelo de Gitelson *et al* (2003).

$$\text{Clorofila} - a = 20,041e^{2,7729*Indice \text{ de Dall'Olmo et al (2003)}} \quad (37)$$

Equação 37, ajuste para a aplicação do modelo de Dall’Olmo *et al* (2003).

Para avaliar a consistência dos modelos empíricos analisados, foram gerados mapas de distribuição de clorofila-a estimados a partir das equações 35 (Figura 25a), 36 (Figura 25c) e 37 (Figura 25b), aplicadas em imagens obtidas pelo satélite Sentinel-2 no dia 20 de agosto de 2020. As equações não lineares, derivadas dos modelos com melhor ajuste, foram então aplicadas aos mapas produzidos, conforme ilustrado na Figura 25. As equações selecionadas (Equações 35, 36 e 37) foram escolhidas com base em sua capacidade de estimar consistentemente a concentração de clorofila-a.

Figura 25 - Aplicação dos Melhores Modelos de Regressão Não Linear nas Imagens do Sentinel-2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 25, são aplicadas as equações não lineares obtidas aos modelos que apresentaram melhores correspondências. Todas as imagens na Figura referem-se à mesma imagem Sentinel-2 obtida em 28/10/2020. A imagem a) ilustra a aplicação do modelo de banda única (705 nm); na imagem b), o modelo de Dall'Olmo *et al.* (2003) foi utilizado; e na imagem c), o modelo de Gitelson *et al.* (2003) foi aplicado.

O modelo de banda única mostrou uma diferença distinta dos outros modelos testados, uma vez que os níveis de clorofila-a permaneceram abaixo de 50 ( $\mu\text{g/L}$ ) em média nas áreas dos reservatórios. No entanto, todos os três modelos identificaram valores mais elevados de clorofila-a no reservatório Billings, principalmente em sua porção norte.

#### 4.2.2. Considerações acerca do estudo

Outra perspectiva sobre a qualidade da água abordada nesta dissertação foi o teste de aplicações relacionadas à estimativa da concentração de clorofila-a. Esta seção discutiu a aplicação de técnicas de Sensoriamento Remoto para estimar a concentração de clorofila-a nos reservatórios da Região Metropolitana de São Paulo. A qualidade da água nesses reservatórios – Billings, Guarapiranga e Rio Grande – é crucial para o fornecimento de água potável à população. No entanto, o rápido crescimento urbano e a poluição dos afluentes têm comprometido essa qualidade (Silva, 2014; Cardoso-Silva *et al.*, 2014; Araujo, 2017).

A relevância deste estudo reside na sua contribuição para a compreensão da aplicabilidade de diferentes modelos de estimativa de clorofila-a em reservatórios urbanos. Os resultados ajudam a identificar áreas críticas, orientando estratégias para a gestão e preservação dos recursos hídricos. Além disso, a pesquisa destaca a eficácia do Sensoriamento Remoto como uma ferramenta para monitorar a qualidade da água em ambientes urbanos, onde respostas rápidas são vitais para a sustentabilidade ambiental e a saúde pública. Este estudo está alinhado com a Resolução N° 357 do CONAMA, que estabelece diretrizes para a classificação dos corpos de água e as condições e padrões de lançamento de efluentes, visando à preservação da qualidade da água (Brasil, 2005).

Apesar da variedade de modelos para estimativas confiáveis de clorofila-a baseados em dados espectrais de satélite, é fundamental ressaltar que esses modelos disponíveis na literatura científica não foram originalmente projetados considerando as características específicas das regiões tropicais. O estudo de caso presente nesta dissertação revela que nem todos esses modelos são igualmente apropriados para a área de estudo. A aplicação do

Sensoriamento Remoto para monitorar a clorofila-a em reservatórios da Região Metropolitana de São Paulo foi pouco explorada em estudos anteriores, e o uso específico de imagens do Sentinel-2 para esse propósito também é uma novidade. Assim, uma investigação cuidadosa é necessária para adaptar esses modelos à área de estudo em questão. Pesquisas futuras podem explorar a aplicação de outros modelos ou o desenvolvimento de novos modelos adaptados às condições específicas dos reservatórios.

Os resultados mostraram que os modelos propostos por Gitelson *et al.* (2003) e Dall’Olmo *et al.* (2003) se alinham bem com as medições *in situ* da concentração de clorofila-a. Especificamente, o modelo de Dall’Olmo *et al.* (2003) se destacou com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,92, oferecendo o melhor ajuste para monitorar a variação da clorofila-a na área de estudo. Este modelo foi validado com sucesso por meio de dados de campo, levando em consideração as características físicas locais do sistema fluvial, como a natureza dos materiais em suspensão.

Em conclusão, este estudo demonstrou a eficácia do satélite Sentinel-2 na estimativa da concentração de clorofila-a em reservatórios urbanos situados em regiões tropicais, contribuindo para a gestão da qualidade da água. A aplicação bem-sucedida desses modelos permite a obtenção de mapas da distribuição espacial da clorofila-a, auxiliando no monitoramento da qualidade da água e na preservação dos ecossistemas aquáticos. No entanto, é importante ressaltar que este foi um estudo preliminar, que buscou validar a aplicação de modelos de monitoramento de clorofila-a por meio de Sensoriamento Remoto já existentes na literatura, no contexto de lagos urbanos em regiões tropicais, além de testar a aplicabilidade do satélite Sentinel-2 para tal fim. O estudo não se aprofundou nos resultados do monitoramento contínuo da área de estudo, resultando apenas na seleção de equações que se mostraram mais adequadas em detrimento de outras que não apresentaram bons resultados.

Os mapas temáticos gerados pelo satélite Sentinel-2 revelaram padrões de distribuição superficial com uma resolução adequada para satélites operacionais com distribuição de imagens gratuitas. Embora a missão do Sentinel-2 não tenha sido inicialmente concebida para estudos de qualidade da água, este estudo confirmou sua eficácia na estimativa de clorofila-a por meio de Sensoriamento Remoto em lagos eutróficos.

## 5. ESTUDOS DE CASO DE QUANTIDADE DE ÁGUA

Este capítulo apresenta os estudos de caso que investigaram a aplicabilidade do uso das imagens do Sentinel-2 para o estudo da quantidade de água no Brasil. Os estudos aqui abordados focam em duas áreas distintas. A primeira é a região semiárida do Brasil, que se estende por vários estados, incluindo Ceará, Rio Grande do Norte, a maior parte da Paraíba e Pernambuco, sudeste do Piauí, oeste de Alagoas e Sergipe, região central da Bahia, e uma faixa que se estende em Minas Gerais, seguindo o Rio São Francisco. O outro estudo de caso ocorreu no município de Rio Claro, no interior do estado de São Paulo. Esses estudos contribuíram para afirmar a hipótese de que as imagens de Sensoriamento Remoto provenientes do satélite Sentinel-2 são válidas para o emprego de modelos empíricos na avaliação da quantidade de água.

### 5.1. Estimativa de volume de água armazenada: Estudo de Caso do volume de água armazenada nos reservatórios de pequeno e médio porte na região semiárida do Brasil.

Quase 2,5 bilhões de pessoas em todo o mundo vivem em regiões áridas e semiáridas, que cobrem uma área total de aproximadamente 41% da superfície terrestre (Gaur; Squires, 2018). Essas regiões são consideradas vulneráveis devido à extrema imprevisibilidade das condições climáticas, que controlam a disponibilidade de água (por exemplo, Hazbavi *et al.*, 2018; Akbas *et al.*, 2020). Além disso, mais da metade da expansão das terras áridas ocorreu em regiões semiáridas desde a década de 1960, induzida por mudanças climáticas (Huang *et al.*, 2016). A expansão das terras áridas intensificou a indisponibilidade de recursos hídricos, afetando fortemente as populações que vivem nessas regiões.

Devido à escassez de recursos hídricos em regiões semiáridas ou áridas, o represamento de rios permanentes ou intermitentes foi estabelecido como a principal estratégia para melhorar a disponibilidade de água doce nessas regiões (por exemplo, Duker *et al.*, 2020; Dos Anjos; Cabral, 2021; Chinnasamy *et al.*, 2021). Consequentemente, em vários casos, pequenos reservatórios consistem na única fonte de recurso hídrico para irrigação agrícola e uso doméstico, constituindo um importante motor de segurança alimentar, especialmente durante os prolongados períodos secos em regiões semiáridas (por exemplo, Mugabe *et al.*, 2003; Masih *et al.*, 2009; Faramarzi *et al.*, 2017).

### 5.1.1. Modelo Área Volume obtido empiricamente.

A análise de 293 imagens do satélite Sentinel-2 proporcionou informações relevantes sobre 48 reservatórios situados na região semiárida. Esses resultados, que abrangem diferentes períodos temporais, estão ilustrados na Figura 3. As áreas desses reservatórios foram estudadas em conjunto com os volumes mensurados, obtidos por meio de medições mensais para cada reservatório.

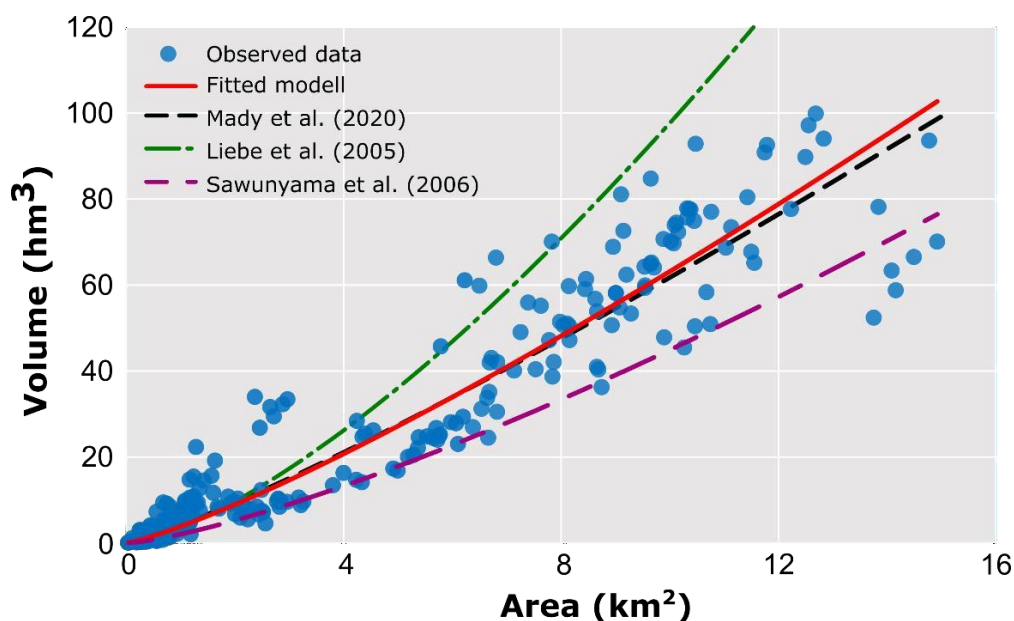
A Figura 26 apresenta um gráfico de dispersão dos reservatórios delimitados pelo índice NDWI, comparando a área calculada através da Equação 12 com o volume medido desses reservatórios. Adicionalmente, exibe a curva ajustada por uma função de potência (Equação 13). A função de potência apresentou um ajuste satisfatório, resultando em um modelo empírico área-volume para a região semiárida brasileira (Equação 38).

$$V = 3.847 * A^{1.215} \quad (38)$$

### 5.1.2. Comparação entre modelos.

Ao se compararem vários modelos alternativos de função de potência (conforme Quadro 4), pode-se notar que o modelo de Mady *et al.* (2020) é bastante similar ao modelo ajustado à área de estudo, indicando que o primeiro é adequado para a estimativa de volume na região semiárida brasileira. Entretanto, o cálculo do erro revela que os modelos de Liebe *et al.* (2005) e Sawunyama *et al.* (2006) possuem ajustes parciais em relação às amostras avaliadas, sendo inadequados para esta área de estudo.

Figura 26 - Gráfico de dispersão da área inundada estimada por Sensoriamento Remoto e volume medido do reservatório, função de potência ajustada e curva de outros modelos anteriores desenvolvidos para regiões semiáridas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados do erro médio quadrático (RMSE) e do erro médio absoluto para todos os modelos testados estão apresentados na Tabela 2. Pode-se observar que o modelo de Mady *et al.* (2020) possui erros médios semelhantes ao modelo ajustado, e ambos são significativamente inferiores aos demais modelos testados. Além disso, o cálculo do erro sugere que o modelo de Liebe *et al.* (2005) tende a superestimar, enquanto o modelo de Sawunyama *et al.* (2006) tende a subestimar o volume real.

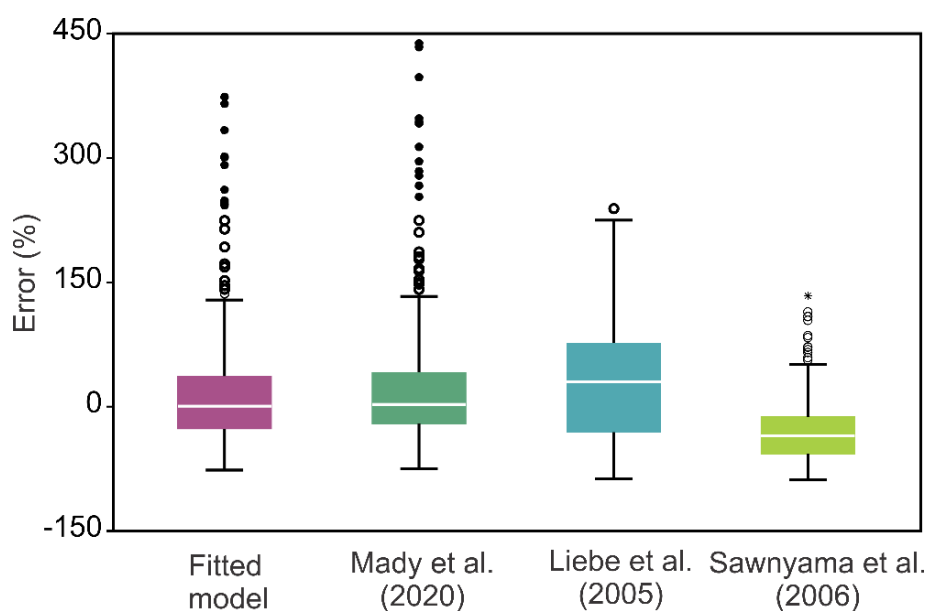
Tabela 2 – Comparação de R<sup>2</sup>, RSME e erro médio produzido por todas as equações testadas usadas para estimar o volume de água da área inundada.

| Equação                        | R <sup>2</sup> | RSME (hm <sup>3</sup> ) | Erro absoluto(%) |
|--------------------------------|----------------|-------------------------|------------------|
| Fitted model                   | 0,90           | 8,69                    | 17,54            |
| Mady <i>et al.</i> (2020)      | 0,90           | 8,57                    | 24,59            |
| Liebe <i>et al.</i> (2005)     | 0,89           | 26,14                   | 29,79            |
| Sawunyama <i>et al.</i> (2006) | 0,90           | 13,19                   | -31,05           |

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 27 exibe um *boxplot* dos erros calculados, mostrando a distribuição desses erros. Tanto o modelo estudado quanto o modelo de Mady *et al.* (2020) possuem medianas próximas de zero, com o primeiro e terceiro quartis posicionados de maneira quase simétrica em relação a zero. No caso do modelo de Liebe *et al.* (2005), a mediana e o terceiro quartil estão consideravelmente acima de zero, indicando a tendência de superestimar o volume. Já em relação ao modelo de Sawunyama *et al.* (2006), o terceiro quartil está abaixo de zero, sugerindo uma inclinação para subestimar o volume. Vale ressaltar que tanto o modelo estudado quanto o de Mady *et al.* (2020) apresentam outliers com erros acima de 150%, especialmente em reservatórios pequenos ( $< 0,5 \text{ hm}^3$ ).

Figura 27 - Boxplot de erro de estimação do modelo ajustado e modelos alternativos. Modelo e inferior a outros modelos, apresentando mediana de erro próxima a zero e RSME semelhante.



Fonte: Elaborado pelo autor.

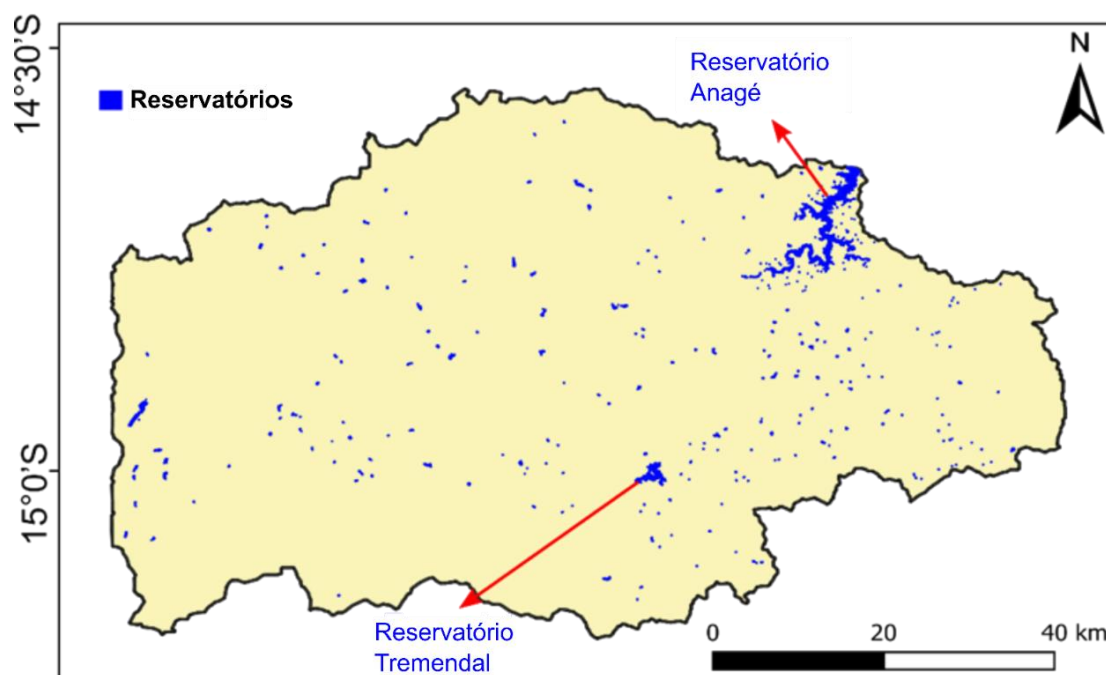
### 5.1.3. Aplicação do modelo empírico obtido.

Para testar a hipótese, considerou-se que os reservatórios implantados em rios intermitentes ou perenes em uma mesma bacia hidrográfica estão interligados à mesma rede de córregos. Com base nesse pressuposto, a quantificação do volume total de água armazenada na escala da bacia hidrográfica é mais benéfica para a gestão hídrica do que a simples determinação do volume em reservatórios individuais. Assim, aplicou-se o modelo empírico da função potência para determinar a variação do total de água armazenada nos reservatórios

da bacia hidrográfica do Rio Gavião, localizada no sul do estado da Bahia, na região sul do semiárido brasileiro (Figura 28). Esta bacia, que possui uma área de aproximadamente 5.547,6 km<sup>2</sup>, foi selecionada devido à ocorrência de períodos mais prolongados de estiagem registrados na região (Brito *et al.*, 2017).

Utilizando o Índice NDWI, foi possível identificar 515 reservatórios na bacia hidrográfica do Gavião (Figura 28), com destaque para os reservatórios Anagé e Tremedal. A área inundada dos reservatórios menores foi calculada em cinco períodos distintos: agosto de 2016, novembro de 2016, setembro de 2018, outubro de 2019 e setembro de 2020. Essas áreas inundadas foram convertidas em volumes correspondentes usando a Equação 23. Ao somar os volumes de todos os reservatórios, estimou-se o total de água armazenada nos períodos avaliados.

Figura 28 - Bacia do Gavião, Bahia, Brasil: Distribuição dos 515 reservatórios identificados na bacia do Gavião. Tremedal e Anagé, os principais reservatórios da bacia hidrográfica, são destaque, 2021.



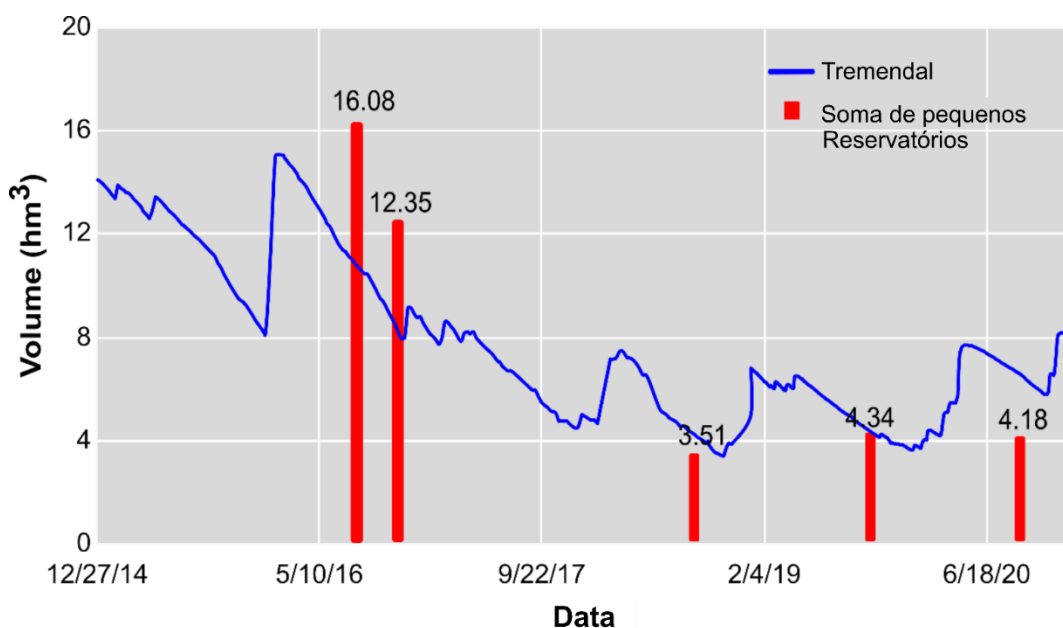
Fonte: Elaborado pelo autor.

O volume total de água armazenado nos reservatórios dessa microbacia foi calculado em agosto de 2016 e novembro de 2016, a fim de estimar a variação das perdas de água nos reservatórios devido à vazão, evapotranspiração e captação para uso agrícola.

A Figura 29 apresenta um gráfico mostrando a variação da soma de todos os reservatórios pequenos e não monitorados da bacia do Gavião nos períodos avaliados.

Também demonstra as mudanças temporais do volume de água do reservatório do Tremedal, que apresenta ciclos sazonais com aumento na estação chuvosa e diminuição na estação seca. A variação de volume dos pequenos reservatórios é proporcional em magnitude com a variação registrada no reservatório de Tremedal, reforçando algum grau de interligação de reservatórios de pequeno e grande porte.

Figura 29 - Variação do volume de água armazenada no reservatório do Tremedal e total de água armazenada nos pequenos reservatórios da Bacia do Gavião.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Comparando o volume de água dos dois períodos consecutivos, é possível avaliar o aumento da água armazenada em resposta à entrada das chuvas nos períodos chuvosos ou sua retirada por evapotranspiração, descarga e consumo. Os volumes estimados em agosto e novembro de 2016 foram de 16,08 hm<sup>3</sup> e 12,35 hm<sup>3</sup>, respectivamente, o que corresponde a uma redução de 23,2%. Dividindo o volume perdido pelo intervalo de tempo entre as duas medições, se obtém uma taxa de perda igual a 0,041 hm<sup>3</sup> por dia.

#### 5.1.4. Considerações acerca do estudo.

O contexto da região semiárida, que abrange uma grande parte do território brasileiro, é conhecida por abrigar a população mais carente do país. A escassez de água nessa região é um fator crucial que prejudica o desenvolvimento socioeconômico local, levando à insegurança alimentar e provocando o deslocamento da população (Marengo *et al.*, 2016).

Nos últimos anos, uma das principais medidas para combater a falta de água no semiárido nordestino do Brasil foi a transposição de parte das águas do Rio São Francisco para essa região. Embora essa transposição tenha o potencial de fornecer água para a população local, seus benefícios a longo prazo, impactos ambientais e sociais ainda são desconhecidos (Lee *et al.*, 2014).

Além disso, é comum encontrar elevada salinidade nas águas subterrâneas dessa região, muitas vezes com sólidos totais dissolvidos superiores a 1.000 mg/L (por exemplo, Britto Costa *et al.*, 2006; Souza Filho *et al.*, 2010; Rojas *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2020). Essa salinidade elevada é geralmente natural e resulta da alta taxa de evaporação (por exemplo, Burte *et al.*, 2011; Almeida; Frischkorn, 2015). Portanto, em muitas áreas do semiárido brasileiro, as águas subterrâneas não são uma fonte viável para abastecimento ou uso agrícola.

Apesar das limitações, o armazenamento de água em pequenos reservatórios ainda é a opção mais sustentável e segura para uso na agricultura nessas regiões secas (Brasil; Medeiros, 2019). Portanto, a quantificação da água armazenada nesses reservatórios e suas variações sazonais são essenciais para a formulação de políticas locais. No entanto, em muitos casos, essas redes de reservatórios são construídas individualmente por agricultores locais para atender às suas necessidades de irrigação durante períodos de seca prolongada.

O uso da função de potência (Eq. 13) ainda é uma abordagem comum para estimar o volume de água em reservatórios com base em suas áreas. No entanto, Pereira *et al.* (2019) demonstraram que essa abordagem tende a superestimar o volume de água armazenada. Embora tenham sido propostas abordagens alternativas, como a de Pereira *et al.* (2019), muitas vezes as informações necessárias para aplicar essas abordagens estão ausentes. Portanto, o modelo empírico baseado na função de potência ainda é a maneira mais viável de estimar a disponibilidade de recursos hídricos.

A análise considerou uma variedade de dimensões de reservatórios e diferentes contextos geológicos, geomorfológicos e hidrológicos encontrados na região semiárida brasileira. Entre os modelos testados para prever o volume de água em regiões semiáridas, a equação proposta por Mady *et al.* (2020) apresentou os melhores resultados, se assemelhando ao modelo empírico área-volume. No entanto, alguns dados não se encaixaram perfeitamente em nenhum modelo, devido à diversidade de fatores, como escalas, topografia, geometria dos reservatórios e contexto geológico.

Em resumo, este estudo demonstra que a técnica de Sensoriamento Remoto pode ser utilizada para monitorar a longo prazo o armazenamento de água em reservatórios na região

semiárida brasileira. No entanto, muitos reservatórios não são monitorados, o que gera incertezas nas estimativas de disponibilidade de água. Portanto, este modelo preenche essa lacuna, permitindo a estimativa do volume de água armazenada em reservatórios de pequeno a médio porte (0,1 a 100 hm<sup>3</sup>). Este modelo aprimora as estimativas de disponibilidade de água e pode ser útil na gestão de recursos hídricos. Além disso, permite avaliar a taxa de perda de volume de água por descarga, evapotranspiração, infiltração e uso agrícola, auxiliando na previsão de escassez de água, especialmente durante secas prolongadas. Considerando a escala dessa análise, a utilização de imagens do Sentinel-2 oferece uma ferramenta interessante para detectar e estimar a quantidade de água armazenada em pequenos e médios reservatórios na região semiárida brasileira.

Também, devido à interconexão da rede de córregos represados em uma bacia hidrográfica, a avaliação da disponibilidade de água deve ser realizada considerando a variabilidade de reservatórios em uma escala de bacia hidrográfica em vez de analisá-los individualmente. Como destacado por Araújo e Medeiros (2013), a presença de uma densa rede de pequenos reservatórios a montante de diversas pequenas barragens pode afetar positivamente ou negativamente a disponibilidade geral de água. Portanto, o modelo foi expandido para calcular a variação de água em uma bacia de tamanho médio, considerando a mudança no volume de água armazenada. Isso permitiu calcular uma redução de 3,48% na Bacia do Gavião em um período de 4 meses, com base em fatores naturais (descarga, evapotranspiração, infiltração) e antrópicos (retirada). O uso das imagens NDWI do Sentinel-2, com sua média espacial e temporal, possibilita um diagnóstico do armazenamento de água em reservatórios. No entanto, a presença frequente de cobertura de nuvens é uma limitação registrada na região semiárida brasileira.

É importante mencionar que, assim como os demais estudos desta dissertação, esta seção voltada à investigação da quantidade de água em reservatórios não buscou verificar a longo prazo a avaliação do volume de água nos reservatórios. Resumiu-se à construção de uma base para um método avaliativo, construído e validado no contexto da região semiárida brasileira. Este método serve como referência para futuras pesquisas e intervenções nesta região, que carece de dados e análises em grande escala nos pequenos e médios reservatórios, foco deste estudo.

## 5.2. Estimativa de umidade do solo: Estudo de Caso da umidade do solo nas periferias urbanas do município de Rio Claro, São Paulo.

A umidade do solo é um estado altamente dinâmico que representa a quantidade de água armazenada no solo. Ela responde rapidamente às variações climáticas e a vários processos na interface entre a atmosfera e a superfície do solo (Pandey *et al.*, 2021). Apesar de sua pequena porcentagem nos recursos de água doce do planeta ( $\sim 0,15\%$ ), a umidade do solo desempenha um papel crucial no ciclo hidrológico como um reservatório significativo de água (Western *et al.*, 2002). Além disso, a umidade do solo é de grande importância na agricultura, pois influencia diretamente o crescimento das plantas (Green *et al.*, 2019; Cui *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2021), por exemplo. Adicionalmente, a umidade do solo serve como um parâmetro-chave para determinar o índice de seca (Ghulam *et al.*, 2007; Ajaz *et al.*, 2019; Xu *et al.*, 2020), por exemplo.

Existem várias abordagens para medir a umidade do solo com precisão em diferentes escalas. Técnicas tradicionais de campo, como dispersão de nêutrons, atenuação de gama, dielétrica, reflectometria no domínio do tempo, sensor de resistividade do solo, bloco de dissipação térmica, sensor de fluxo de calor e técnicas tensiométricas têm sido amplamente utilizadas (Su *et al.*, 2014). No entanto, esses métodos de campo têm cobertura limitada e são inadequados para estudar áreas de grande escala. Consequentemente, técnicas de Sensoriamento Remoto ganharam destaque nas últimas décadas, especialmente para monitoramento da umidade do solo em escalas de bacia hidrográfica e regional (Western *et al.*, 2002; Fang; Lakshmi, 2014; Pandey *et al.*, 2021).

Satélites dedicados foram desenvolvidos para medições de umidade do solo, incluindo o Soil Moisture and Ocean Salinity - SMOS (Kerr *et al.*, 2001) e o Soil Moisture Active Passive - SMAP (Entekhabi *et al.*, 2010), que são amplamente utilizados para diversos fins. No entanto, esses satélites têm uma resolução espacial grosseira (variando de 9 a 50 km) e não são capazes de detectar variações em pequena escala na umidade do solo. Para atender aos requisitos em escala local, várias abordagens foram desenvolvidas usando índices derivados de satélites multiespectrais. Uma abordagem amplamente utilizada é o Modelo de Trapezoide Térmico-Óptico (TOTRAM), introduzido por Nemani *et al.* (1993) e Carlson *et al.* (1994), que estima a umidade do solo através de um gráfico de dispersão dos valores de pixels da temperatura da superfície terrestre (LST) e de um índice de vegetação (VI) no espaço LST-VI. O TOTRAM tem sido amplamente aplicado e validado em numerosos estudos de campo (Bai *et al.*, 2019;

Pandey *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2021), por exemplo. No entanto, o TOTRAM apresenta limitações que precisam ser abordadas. Primeiramente, ele depende de sensores termais, tornando-o inadequado para satélites que não possuem esses sensores, como o Sentinel-2. Além disso, a LST não é controlada exclusivamente pela umidade do solo, pois também reflete as condições atmosféricas ambientes, como velocidade do vento, temperatura do ar e umidade (Mallick *et al.*, 2009; Sadeghi *et al.*, 2017; Bababeian *et al.*, 2019).

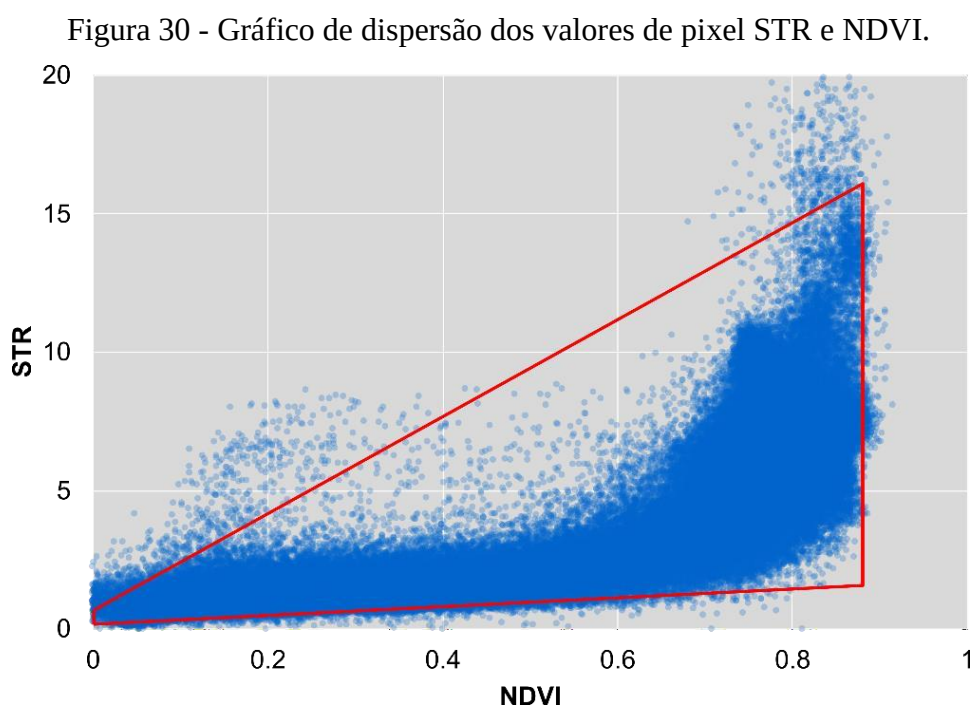
Para superar essas limitações, Sadeghi *et al.* (2017) desenvolveram uma nova abordagem chamada Modelo Óptico de Trapezoide (OPTRAM). O OPTRAM substitui a LST por STR, um parâmetro derivado da banda de infravermelho de ondas curtas (SWIR), e emprega apenas sensores ópticos, eliminando possíveis erros associados às medições de LST. Estudos recentes (Babaeian *et al.*, 2018; Ambrosone *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2020; Dubinin *et al.*, 2020), por exemplo, demonstraram a adequação do OPTRAM em fornecer estimativas consistentes de umidade do solo.

Dados de umidade do solo em ambientes urbanos são informações cruciais para várias aplicações, como modelagem hidrológica (Schatffitel *et al.*, 2020; Koltsidas *et al.*, 2023) e avaliação das propriedades dos ecossistemas da vegetação urbana (Gonchrova *et al.*, 2020; Eldridge *et al.*, 2021; Cui *et al.*, 2021). Apesar de sua importância, a determinação da umidade do solo em ambientes urbanos de pequenos a médios municípios utilizando Sensoriamento Remoto e imagens de satélite com resolução média pode apresentar desafios devido aos pixels mistos.

O município de Rio Claro, localizado no estado de São Paulo, sudeste do Brasil, representa um exemplo típico de uma região com alta variabilidade no uso e ocupação do solo, onde edifícios, corpos d'água, vegetação nativa e culturas coexistem na mesma área. Portanto, a representatividade do OPTRAM derivado de imagens do Sentinel-2 em ambientes urbanos permanece incerta. Para abordar essa questão e investigar a adequação do OPTRAM derivado de imagens do Sentinel-2 em fornecer estimativas representativas de umidade do solo em ambientes urbanos, o presente estudo de caso teve como objetivo estimar a umidade do solo usando esse modelo em uma região específica do município de Rio Claro e validá-lo com dados de campo.

### 5.2.1. Modelo OPTRAM empírico encontrado.

Ao realizar uma análise mais aprofundada do gráfico de dispersão exibindo os resultados processados de NDVI e STR (Figura 30), conduz-se uma sistemática definição empírica dos limites do trapezoide STR-NDVI, procedendo de acordo com a metodologia delineada por Sadeghi *et al.* (2017). A partir dessas parametrizações delimitadas, empreende-se a configuração do modelo OPTRAM, culminando nos valores de  $I_d$ ,  $I_w$ ,  $S_d$  e  $S_w$ , os quais totalizam respectivamente 0, 0,6, 2,55 e 14.



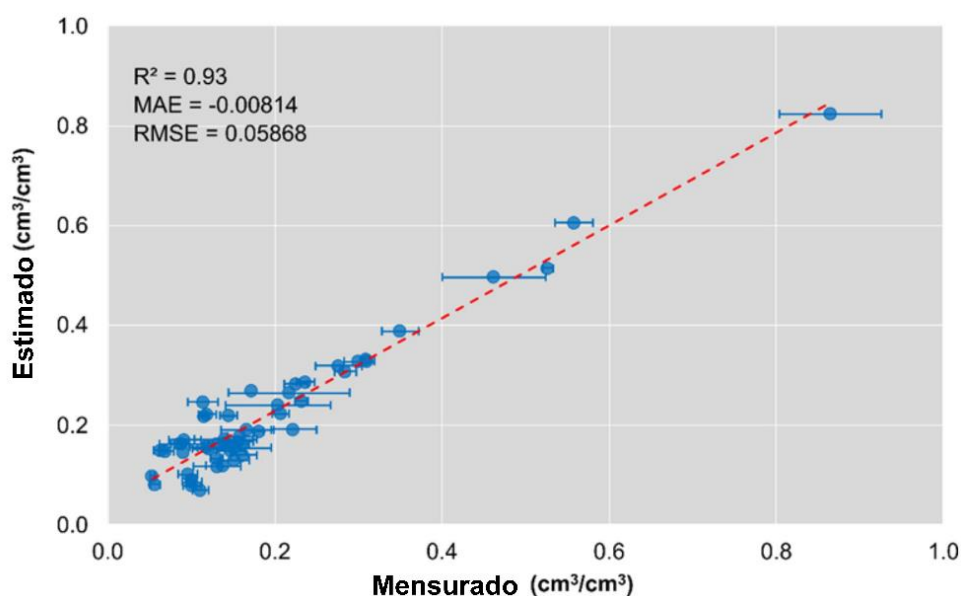
Na Figura 30 é possível observar o Gráfico de dispersão dos valores de pixel STR e NDVI formando o espaço trapezoidal STR-NDVI com imagens Sentinel-2 de agosto de 2020 a janeiro de 2022. As bordas secas e molhadas foram delineadas empiricamente por ajustes manuais.

### 5.2.2. Comparação entre os dados de umidade coletados in situ e os derivados do OPTRAM

É importante salientar que os valores aferidos in loco denotaram uma notável variabilidade, oscilando entre  $0,057 \pm 0,006$  e  $0,865 \pm 0,061$ , o que reflete o intervalo de amostragem abrangendo tanto períodos de estiagem quanto de precipitação. A variação no coeficiente de umidade do solo, situada entre 5,55% e 17,73%, sugere uma uniformidade

relativa nos locais de amostragem. O gráfico de dispersão comparativo entre as medições diretas e as estimativas da umidade do solo é representado pela Figura 31, revelando uma notável concordância entre ambos os conjuntos de dados. Os indicadores estatísticos,  $R^2$ , MAE e RMSE, alcançaram valores de 0,92, -0,0196 e 0,1413, respectivamente. Importante frisar ainda que não foram identificadas discrepâncias significativas na representação da umidade do solo advinda do modelo OPTRAM, o que denota a insensibilidade desta abordagem em relação ao tipo de solo.

Figura 31 - Gráfico de dispersão da umidade do solo medida em campo e aquela obtida pelo OPTRAM no local de estudo. As barras de erro horizontais representam o desvio padrão de triplicados.

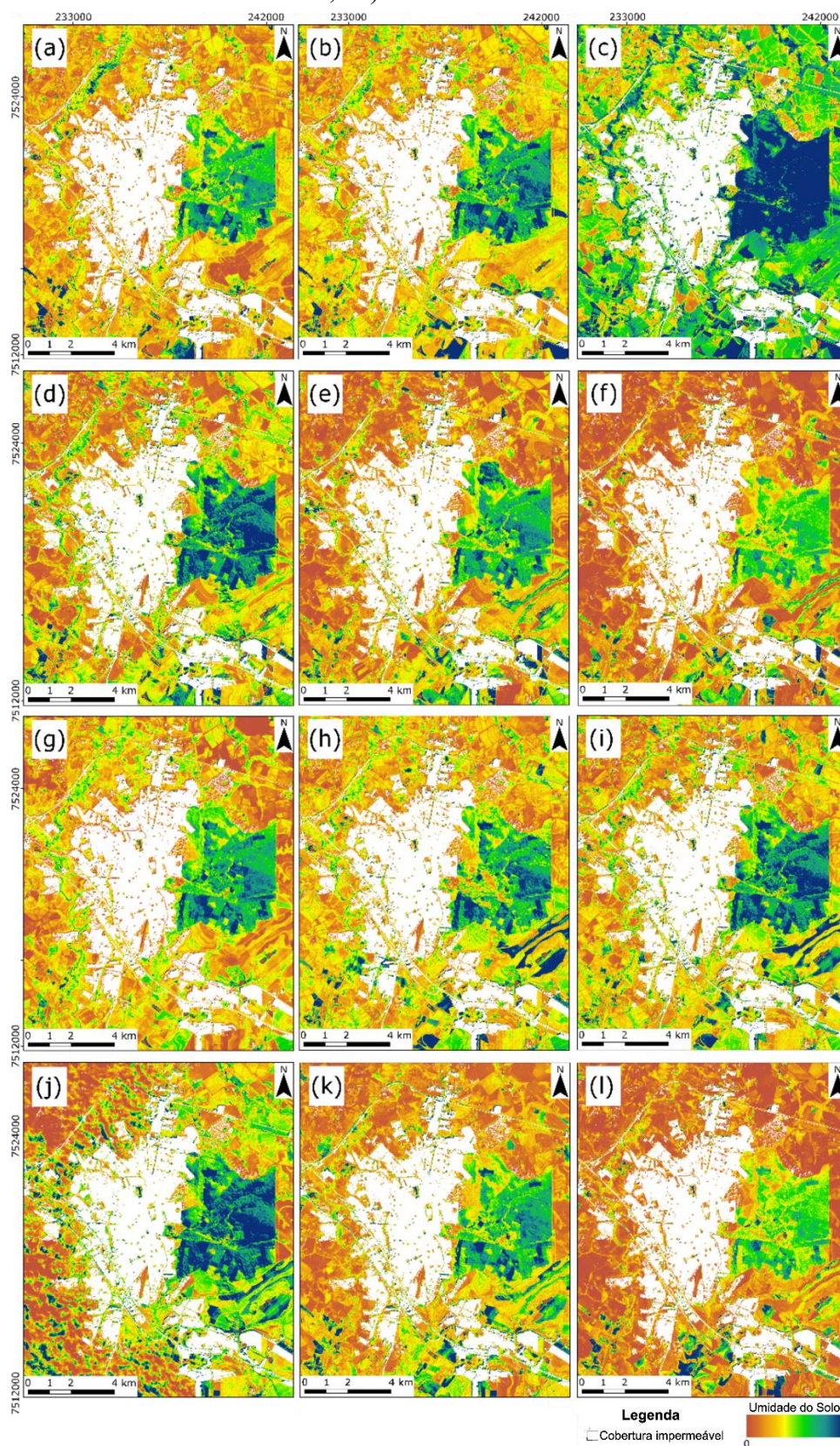


Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.2.3. Série temporal da umidade do solo.

Para investigar as flutuações sazonais da umidade do solo ao longo de dois anos hidrológicos, utilizou-se o método OPTRAM para a construção de uma série temporal mensal da umidade do solo, abrangendo o período de janeiro de 2020 a novembro de 2021. Essa construção baseou-se em dados de NDVI e STR derivados de imagens capturadas pelo Sentinel-2. A Figura 32 apresenta mapas representativos das estimativas de umidade do solo.

Figura 32 - Mapa de umidade estimada no solo em períodos distintos: a) janeiro de 2020; b) março de 2020; c) maio de 2020; d) julho de 2020; e) setembro de 2020; f) novembro de 2020; g) janeiro de 2021; h) março de 2021; i) maio de 2021; j) julho de 2021; k) setembro de 2021; e l) novembro de 2021.

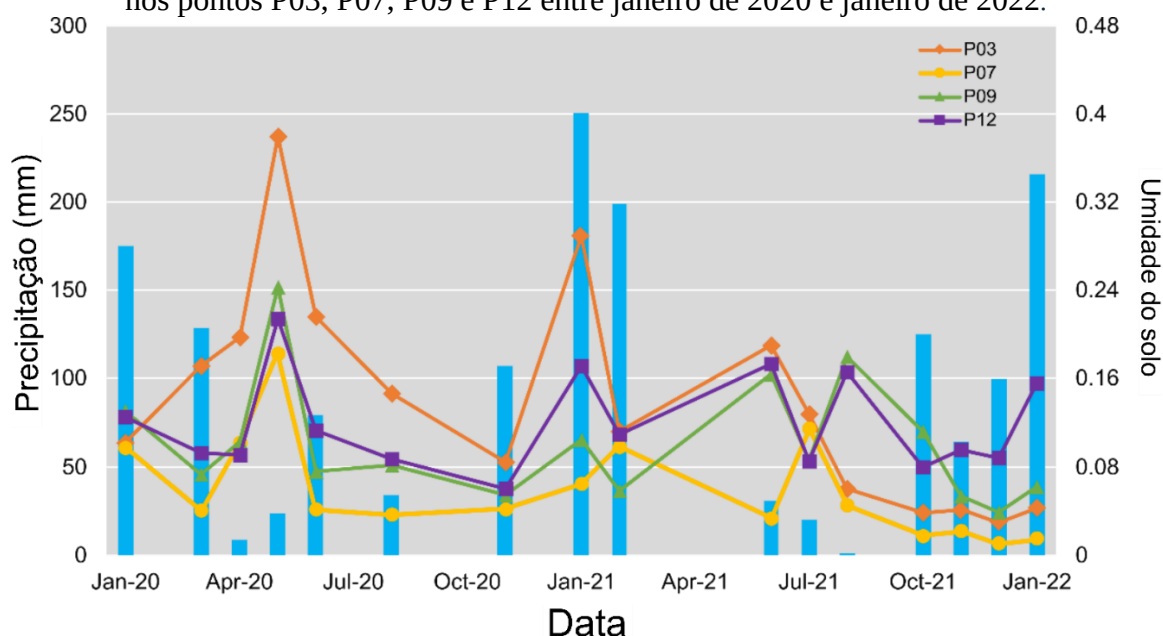


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os níveis mais elevados de umidade do solo foram observados nas proximidades dos cursos d'água e em áreas densamente arborizadas, seguidos por áreas irrigadas em zonas agrícolas. Além disso, observou-se uma notável flutuação nos níveis de umidade ao longo do tempo, com os valores máximos registrados em março de 2020 e os mínimos em novembro de 2021. Durante a estação seca (abril a outubro), os valores de umidade foram mais baixos, atingindo seu mínimo em agosto. Nas proximidades das áreas urbanas, a variação temporal da umidade do solo apresentou características particulares.

Para aprofundar a compreensão das variações na umidade do solo, construiu-se um gráfico comparativo entre a série temporal das estimativas obtidas pelo método OPTRAM em pontos amostrais específicos e os registros de precipitação diária durante o mesmo período (Figura 33).

Figura 33 - Série temporal de precipitação mensal e umidade do solo derivada do OPTRAM nos pontos P03, P07, P09 e P12 entre janeiro de 2020 e janeiro de 2022.



Fonte: elaborado pelo autor.

A análise da Figura 33 revela que não há uma correlação direta entre os picos de precipitação e os picos de umidade registrados. O presente estudo não encontrou um comportamento sazonal na umidade do solo, mas sim uma variação de curto prazo em resposta a eventos de chuva. Observou-se que os picos de umidade não coincidem diretamente com os picos de chuva registrados. Hipotetiza-se que essa correlação não foi encontrada devido à cobertura de nuvens durante períodos chuvosos, que impediu o registro de imagens nítidas. Assim, as imagens utilizadas para a estimativa da umidade do solo não coincidem exatamente

com as datas dos picos de precipitação, resultando em um descompasso devido à evapotranspiração e infiltração do solo.

Contudo, a análise da Figura 33 também demonstra que, embora os picos de precipitação e os picos de umidade não coincidam exatamente, após os picos de precipitação, a umidade do solo tende a subir. Isso reflete a eficácia do método OPTRAM na estimativa da umidade do solo, capturando as variações temporais em resposta à precipitação. Portanto, a aplicabilidade do OPTRAM em estudos de monitoramento da umidade do solo é validada, mesmo que a precisão dessas estimativas possa ser influenciada por fatores como a cobertura do solo, a vegetação e as condições atmosféricas.

#### 5.2.4. Considerações acerca do estudo.

A determinação da umidade do solo é essencial para estudos hidrológicos, climatológicos e agrícolas. Nas últimas décadas, diversas técnicas de Sensoriamento Remoto foram desenvolvidas, incluindo o Modelo Óptico de Trapezoide (OPTRAM). Esta abordagem, que utiliza o índice STR calculado com a banda SWIR em vez do tradicional índice LST (banda termal), tem demonstrado eficácia na previsão da umidade do solo em várias pesquisas. No entanto, a aplicação do OPTRAM em áreas urbanas ainda não foi amplamente explorada.

Para abordar essa lacuna, este estudo de caso buscou realizar testes no município de Rio Claro, São Paulo, onde o uso e a ocupação do solo variam. Utilizando imagens multiespectrais do Sentinel-2, foi construído o espaço NDVI-STR para estimar a umidade do solo e esses dados foram comparados com medições de campo. Os resultados, expressos pelos valores de  $R^2$ , MAE e RMSE, indicam que as estimativas do OPTRAM são representativas mesmo em áreas urbanizadas. A resolução espacial das imagens Sentinel-2 mostrou-se adequada para as dimensões das áreas avaliadas.

É sabido que a expansão urbana altera drasticamente as condições hidrogeológicas naturais, aumentando o escoamento superficial e as inundações, enquanto reduz a recarga de águas subterrâneas e aumenta a contaminação, conforme estudos anteriores (Rosa, 2017; Silva; Denaldi, 2019; Maropo *et al.*, 2019).

Monitorar a hidrologia em áreas urbanas e as mudanças no uso do solo é crucial para políticas de planejamento e desenvolvimento. A água infiltrada, armazenada como umidade do solo, é um parâmetro essencial para avaliar e gerenciar as águas subterrâneas. Contudo, a estimativa da umidade do solo permanece um desafio significativo.

A expansão urbana tem impacto significativo nas condições hidrogeológicas naturais, conforme observado em diversas regiões (Oudin *et al.*, 2018; Gori *et al.*, 2019; Sheldon *et al.*, 2019). A diminuição da recarga de águas subterrâneas, devido à proliferação de superfícies impermeáveis, é um problema comum em áreas urbanizadas (Erickson; Stefan, 2009; Braud *et al.*, 2013; Lamichhane; Shakya, 2020). Assim, o monitoramento a longo prazo da hidrologia em áreas urbanas é essencial para políticas de planejamento e desenvolvimento.

O OPTRAM é uma abordagem recente validada por numerosos estudos, especialmente em escalas de bacias hidrográficas (Babaeian *et al.*, 2018; Ambrosone *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2020; Dubinin *et al.*, 2020). Utilizando imagens Sentinel-2, o estudo de caso valida a eficácia do OPTRAM em obter valores realistas de umidade do solo em áreas urbanas, abrindo novas possibilidades para o monitoramento hidrológico.

Dada a expansão urbana significativa em várias cidades brasileiras, a aplicação do OPTRAM é crucial para entender os efeitos das mudanças climáticas. Além disso, pode calibrar simulações numéricas na zona não saturada, produzindo previsões realistas de recarga de águas subterrâneas e evapotranspiração.

A variabilidade geológica no local de estudo sugeriu que o OPTRAM poderia produzir resultados distintos em resposta a diferentes tipos de solo. No entanto, descobriu-se que a representatividade da umidade do solo derivada do OPTRAM não foi impactada pelo tipo de solo.

Apesar da variabilidade geológica, o OPTRAM produziu resultados consistentes, independentemente da textura do solo. Observou-se uma notável variação nas litologias, resultando em diferentes tipos de solo, mas o OPTRAM mostrou-se adequado para todos os tipos de solo amostrados. Embora houvesse boa concordância entre os valores de umidade do solo medidos no campo e os derivados do OPTRAM, alguns erros perceptíveis foram observados.

A precisão do OPTRAM, medida pelos valores de  $R^2$ , variou em estudos anteriores devido a fatores como o tipo de uso do solo, a resolução do sensor e a abordagem de medição da umidade do solo no campo. O Sentinel-2 é adequado devido à sua resolução espacial e ao tempo de revisita de 5 dias, permitindo a criação de séries temporais detalhadas de umidade do solo.

Em um estudo anterior, Teramoto *et al.* (2019) observaram a variação sazonal do NDVI em relação à precipitação e ao nível freático nessa área de estudo. No entanto, o presente estudo não encontrou um comportamento sazonal da umidade do solo, mas sim uma variação de curto

prazo em resposta a eventos de chuva. Esses achados sugerem que o OPTRAM pode ser crucial em estudos hidrológicos e na calibração de modelos numéricos de fluxo de água.

Apesar do potencial do Sentinel-2, cenas com alta cobertura de nuvens não podem ser utilizadas durante períodos chuvosos, limitando a estimativa da umidade do solo pelo OPTRAM.

Embora o OPTRAM tenha sido validado em áreas rurais, este trabalho tem um teor de pioneirismo em investigar áreas urbanas, tendo como área de estudo para isso o município de Rio Claro. A comparação entre os dados derivados de Sensoriamento Remoto e os medidos in situ revela que o OPTRAM fornece estimativas adequadas de umidade do solo. Essas estimativas podem preencher lacunas importantes no balanço hidrológico e auxiliar em atividades agrícolas e no monitoramento dos efeitos das mudanças climáticas.

Por fim, o objetivo desta seção foi verificar a aplicabilidade do modelo OPTRAM, por meio de imagens do Sentinel-2, em solos na área urbana e nas periferias da área urbana. Este trabalho foi estabelecido como uma base, focando no teste da aplicabilidade do modelo para o satélite e contexto geográfico, sem ter em vista o monitoramento contínuo da umidade do solo. Portanto, os resultados obtidos representam um passo importante para a compreensão dos processos hidrológicos em áreas urbanas e podem servir como referência para estudos futuros.

## 6. CONSIDERAIS FINAIS.

Desde a introdução do sensoriamento remoto para aplicações científicas no Brasil na década de 1970, essa tecnologia tem evoluído significativamente. As tecnologias atuais de sensoriamento remoto por sensores orbitais oferecem resoluções espectrais, espaciais e radiométricas superiores, além de períodos de revisita mais curtos em comparação com os equipamentos do passado. Esses avanços permitem aplicações eficazes para o monitoramento de sistemas aquáticos continentais, mesmo sem a existência de satélites de distribuição gratuita de imagens dedicados para este fim.

O satélite Sentinel-2 é um exemplo marcante dessa evolução. Com um tempo de revisita de cinco dias, ele é crucial para o estudo de recursos hídricos, pois a dinâmica das condições da água não pode esperar semanas por uma nova passagem do sensor. Sua resolução espacial de 10 metros, superior à de muitos outros satélites de acesso gratuito, permite análises detalhadas de corpos hídricos continentais que exigem maior precisão. Os estudos de caso apresentados nesta dissertação demonstraram a eficácia do Sentinel-2 no estudo dos recursos hídricos brasileiros, abordando tanto a qualidade quanto a quantidade de água disponível em diferentes regiões. As características dos sensores do Sentinel-2 adequaram-se bem às situações estudadas, revelando excelentes correlações empíricas e comprovando sua utilidade no contexto brasileiro.

Ao utilizar o satélite Sentinel-2, esta dissertação propõe uma abordagem inovadora para monitorar e compreender os impactos ambientais sobre os recursos hídricos em diversas regiões do Brasil. O estudo destaca a eficácia do modelo empírico na estimativa da turbidez do rio Paraopeba após o rompimento de uma barragem de rejeitos de mineração, evidenciando que a contaminação da água é um desafio significativo para o meio ambiente, a comunidade local e a saúde pública. O uso de técnicas de sensoriamento remoto, exemplificado pelo Sentinel-2, oferece uma solução viável para o monitoramento contínuo da qualidade da água e a avaliação dos impactos a longo prazo das atividades humanas. A pesquisa sobre a estimativa da concentração de clorofila-a em reservatórios urbanos e a análise da disponibilidade de água em áreas semiáridas fornecem insights valiosos para a gestão sustentável dos recursos hídricos.

A aplicação do modelo OPTRAM em áreas urbanas, como no estudo realizado em Rio Claro, enfatiza a importância do sensoriamento remoto na compreensão dos efeitos das mudanças climáticas e no planejamento urbano. Além disso, a pesquisa na região semiárida brasileira para monitorar o volume de água em reservatórios desempenha um papel crucial na gestão dos recursos hídricos nessa área vulnerável. As técnicas de sensoriamento remoto e modelos empíricos permitem estimar o volume de água em reservatórios de pequeno a médio

porte, fornecendo informações essenciais para políticas e intervenções destinadas a mitigar a escassez de água. Esses esforços são vitais para garantir a sustentabilidade ambiental e o bem-estar das comunidades dependentes desses recursos em ambientes desafiadores como o semiárido brasileiro.

Em resumo, o Sentinel-2 se destaca como uma importante ferramenta no avanço da gestão sustentável dos recursos hídricos continentais, fornecendo dados espaciais relevantes para a tomada de decisões informadas e a preservação dos ecossistemas. A validação das técnicas e do satélite Sentinel-2 para o monitoramento de recursos hídricos no Brasil é um marco significativo, visto que a maior parte da bibliografia e aplicações referenciadas sobre este satélite não foram constituídas no Brasil. Este avanço demonstra a adaptabilidade e a relevância do Sentinel-2 para contextos geográficos diversos, reforçando seu papel como uma ferramenta importante na gestão sustentável dos recursos hídricos.

### **6.1. Conclusão.**

Os estudos de caso desta dissertação validam a aplicação do sensoriamento remoto, por meio das imagens do satélite Sentinel-2, na gestão dos recursos hídricos no Brasil. A análise da turbidez no rio Paraopeba, a medição da concentração de clorofila-a em reservatórios urbanos, a avaliação da disponibilidade de água em áreas semiáridas e o monitoramento da umidade do solo em áreas urbanas destacam a versatilidade e aplicabilidade do Sentinel-2 em diferentes contextos geográficos e ambientais.

Este trabalho demonstra que o Sentinel-2 é uma ferramenta eficaz para o monitoramento de recursos hídricos no Brasil. Abordando de maneira abrangente e inovadora os impactos ambientais relacionados aos recursos hídricos em diversas regiões do país, cada estudo de caso exemplifica a versatilidade e capacidade do Sentinel-2 para diversas análises e monitoramentos, sublinhando a importância do avanço tecnológico no sensoriamento remoto para a gestão dos recursos hídricos.

Contudo, é importante ressaltar que esses estudos de caso representam apenas um ponto de partida, estabelecendo uma base para futuras pesquisas e intervenções. À medida que enfrentamos desafios cada vez maiores relacionados à disponibilidade e qualidade da água, é fundamental continuar desenvolvendo e aplicando abordagens inovadoras e multidisciplinares para proteger e preservar nossos ecossistemas aquáticos, garantindo o acesso equitativo à água limpa para todas as comunidades.

Os desafios associados à qualidade e disponibilidade da água, intensificados pela demanda crescente, aumento populacional, desenvolvimento econômico e mudanças climáticas, exigem soluções inovadoras. Apesar das ferramentas eficazes demonstradas nesta dissertação, ainda há lacunas a serem abordadas. É crucial que futuras pesquisas avancem além das conclusões atuais, validando as técnicas de sensoriamento remoto utilizando o Sentinel-2 e explorando novos sensores e tecnologias emergentes. A adaptação de modelos empíricos a diferentes condições locais e a integração com outras fontes de dados podem aprimorar ainda mais a precisão e eficácia do monitoramento dos recursos hídricos. Pesquisas futuras devem focar na validação de equações para o monitoramento da qualidade da água em outros contextos locais, no desenvolvimento de modelos mais robustos para a estimativa de COAs e na expansão do uso do sensoriamento remoto para outras regiões e tipos de corpos d'água. Além disso, a utilização de outros sensores e a combinação de diferentes técnicas de sensoriamento remoto podem fornecer uma visão mais abrangente e detalhada dos recursos hídricos.

## REFERÊNCIAS

- ABDON, M. M.; MEYER, M. Variação temporal de áreas ocupadas por macrófitas aquáticas no reservatório de Tucuruí através de dados do satélite Landsat/TM. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 6., 1990, Curitiba. Anais... Curitiba, 1990. p. 545-548.
- AJAZ, A., TAGHVAEIAN, S., KHAND, K., GOWDA, P. H., & MOORHEAD, J. E. Development and evaluation of an agricultural drought index by harnessing soil moisture and weather data. *Water*, v. 11, n. 7, p. 1375, 2019. <https://doi.org/10.3390/w11071375>.
- AKBAS, Abdullah *et al.* What about reservoirs? Questioning anthropogenic and climatic interferences on water availability. **Hydrological Processes**, v. 34, n. 26, p. 5441-5455, 2020.
- AL-DABBAGH, Ali Mahdi; ILYAS, Muhammad. Uni-temporal Sentinel-2 imagery for wildfire detection using deep learning semantic segmentation models. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 14, n. 1, p. 2196370, 2023.
- ALMEIDA, João RF; FRISCHKORN, Horst. Salinization mechanisms of a small alluvial aquifer in the semiarid region of northeast Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 19, p.643-649, 2015.
- ALONSO, Laura *et al.* Comparison of a Sentinel-2 land cover map obtained through multi-temporal analysis with the official forest cartography. the case of Galicia (Spain). **Geocarto International**, v. 38, n. 1, p. 2181986, 2023.
- ALTINO, Lucas; AZEVEDO, Luis Felipe. Brumadinho: cinco anos após tragédia, Rio Paraopeba segue interditado, e mais da metade dos peixes tem contaminação alta. *O Globo*, Rio de Janeiro, 25 jan. 2024. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/brasil/noticia/2024/01/25/brumadinho-cinco-anos-apos-tragedia-rio-paraopeba-segue-interditado-e-mais-da-metade-dos-peixes-tem-contaminacao-alta.ghtml>. Acesso em: 26 jan. 2024.
- AMBROSONE, Mariapaola; MATESE, Alessandro; GENNARO, Salvatore Filippo di; GIOLI, Beniamino; TUDOROIU, Marin; GENESIO, Lorenzo; MIGLIETTA, Franco; BARONTI, Silvia; MAIENZA, Anita; UNGARO, Fabrizio. Retrieving soil moisture in rainfed and irrigated fields using Sentinel-2 observations and a modified OPTRAM approach. **International Journal Of Applied Earth Observation And Geoinformation**, [S.L.], v. 89, p. 102113, jul. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2020.102113>.
- ARAÚJO, Diego César dos Santos; MONTENEGRO, Suzana Maria Gico Lima; CORBARI, Chiara; VIANA, Jussara Freire de Souza. Calibration of FEST-EWB hydrological model using remote sensing data in a climate transition region in Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, v. 66, n. 3, p. 513-524, 17 fev. 2021. Informa UK Limited. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2021.1881100>.
- ARAUJO, Paula Lopes de. A RELAÇÃO ENTRE O USO DO SOLO E A QUALIDADE DA ÁGUA EM MICROBACIAS HIDROGRÁFICAS NO RESERVATÓRIO BILLINGS, NA

GRANDE SÃO PAULO - SP. 2017. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Federal do ABC, Santo André - Sp, 2017.

ARISANTY, Deasy *et al.* Utilizing sentinel-2 data for mapping burned areas in banjarbaru wetlands, South Kalimantan province. **International Journal of Forestry Research**, v. 2022, 2022.

AUGUSTO, L. G. da S.; GURGEL, I. G. D.; NETO, H. F. C.; MELO, C. H.; COSTA, A. M. O contexto global e nacional frente aos desafios do acesso adequado à água para consumo humano. **Ciência & Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 17, n. 6, 2012.

BABAEIAN, E.; SADEGHI, M.; FRANZ, T. E.; JONES, S.; TULLER, M. Mapping soil moisture with the Optical TRapezoid Model (OPTRAM) based on long-term MODIS observations. **Remote Sensing of Environment**, v. 211, p. 425-440, 2018.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.029>.

BABAEIAN, E., SIDIKE, P., NEWCOMB, M. S., MAIMAITIJIANG, M., WHITE, S. A., DEMIEVILLE, J., WARD, R. W., SADEGHI, M., LEBAUER, D. S., JONES, S. B., SAGAN, F., TULLER, M. A new optical remote sensing technique for high-resolution mapping of soil moisture. **Frontiers in Big Data**, v. 2, p. 37, 2019.  
<https://doi.org/10.3389/fdata.2019.00037>.

BAI, L., LONG, D., YAN, L. Estimation of surface soil moisture with downscaled land surface temperatures using a data fusion approach for heterogeneous agricultural land. **Water Resources Research**, v. 55, n. 2, p. 1105-1128, 2019.  
<https://doi.org/10.1029/2018WR024162>.

BARBOSA, C.C.F.; NOVO, E.M.L.M.; MARTINS, V.S. Introdução ao Sensoriamento Remoto de Sistemas Aquáticos: princípios e aplicações. 1. ed. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2019. 161 p.

BARBOSA, C.C. F; NOVO, E.M.L.D.; MELACK, J.M.; GASTIL-BUHL, M.; PEREIRA, W. Geospatial analysis of spatiotemporal patterns of pH, total suspended sediment and chlorophyll-a on the Amazon floodplain. **Limnology**, v.11, n.2, p.155-166, 2010.

BARRETO, L.; BARROS, F.; BONOMO, P.; ROCHA, F.; AMORIM, J. Eutrofização em rios brasileiros. *Enciclopédia Biosfera*, v. 9, n. 16, 2013.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 18 mar. 2005. Seção 1, p. 58. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/>. Acesso em: 12 jan. 2024.

BRASIL. **Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico**. Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos: RNQA. 2022. Disponível em: <https://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/webappviewer/index.html?id=e745db7488f64e1a9a2e4e150e41b08e>. Acesso em: 21 ago. 2023.

BRASIL. Líria Jade. Empresa Brasil de Comunicação - EBC (ed.). **ONDE ESTÁ A ÁGUA NO BRASIL?** 2018. Disponível em: <https://www.ebc.com.br/especiais-agua/agua-no-brasil/>. Acesso em: 07 nov. 2023.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção Mineral (1973-1987). Projeto Radambrasil. Levantamento de recursos naturais. 34 vols. Rio de Janeiro.

BRASIL, Paulilo; MEDEIROS, Pedro. NeStRes – Model for Operation of Non-Strategic Reservoirs for Irrigation in Drylands: model description and application to a semiarid basin. **Water Resources Management**, [S.L.], v. 34, n. 1, p. 195-210, 17 dez. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-019-02438-x>.

BRAUD, I.; BREIL, P.; THOLLET, F.; LAGOUY, M.; BRANGER, F.; JACQUEMINET, C.; MICHEL, K. Evidence of the impact of urbanization on the hydrological regime of a medium-sized periurban catchment in France. **Journal of Hydrology**, v. 485, p. 5-23, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.049>.

BRITO, S. S. B.; CUNHA, A. P. M. A.; CUNNINGHAM, C. C.; ALVALÁ, R. C.; MARENGO, J. A.;

BURDUN, Iuliia; BECHTOLD, Michel; SAGRIS, Valentina; KOMISARENKO, Viacheslav; LANNOY, Gabrielle de; MANDER, Ülo. A Comparison of Three Trapezoid Models Using Optical and Thermal Satellite Imagery for Water Table Depth Monitoring in Estonian Bogs. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 12, n. 12, p. 1980, 19 jun. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs12121980>.

BUREK, Peter *et al.* Water futures and solution-fast track initiative. 2016.

BURTE, Julien; JAMIN, Jean-Yves; COUDRAIN, Anne; FRISCHKORN, Horst; MARTINS, Eduardo Sávio. Simulations of multipurpose water availability in a semiarid catchment under different management strategies. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 96, n. 8, p. 1181-1190, ago. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2009.03.013>.

CABALLERO, Isabel; RUIZ, Javier; NAVARRO, Gabriel. Sentinel-2 satellites provide near-real time evaluation of catastrophic floods in the west mediterranean. **Water**, v. 11, n. 12, p. 2499, 2019.

CABALLERO, Isabel; STUMPF, Richard; MEREDITH, Andrew. Preliminary Assessment of Turbidity and Chlorophyll Impact on Bathymetry Derived from Sentinel-2A and Sentinel-3A Satellites in South Florida. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 11, n. 6, p. 645, 16 mar. 2019. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/rs11060645>.

CAI, Xiaobin; FENG, Lian; HOU, Xuejiao; CHEN, Xiaoling. Remote Sensing of the Water Storage Dynamics of Large Lakes and Reservoirs in the Yangtze River Basin from 2000 to 2014. **Scientific Reports**, [S.L.], v. 6, n. 1, p. 1-9, 4 nov. 2016. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/srep36405>.

CANDOTTI, Anna *et al.* A Sentinel-2 based multi-temporal monitoring framework for wind and bark beetle detection and damage mapping. **Remote Sensing**, v. 14, n. 23, p. 6105, 2022.

CARLSON, T. N.; GILLIES, R. R.; PERRY, E. M. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover. **Remote Sensing Reviews**, v. 9, n. 1-2, p. 161-173, 1994. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02757259409532220>.

CARMO, Roberto Luiz do; DAGNINO, Ricardo de Sampaio; JOHANSEN, Igor Cavallini. Transição demográfica e transição do consumo urbano de água no Brasil. **Revista Brasileira de Estudos de População**, [S.L.], v. 31, n. 1, p. 169-190, jun. 2014. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0102-30982014000100010>.

CARDOSO, Sabrina Brandão; CUNHA, Caroline Favoreto da; ENGELBRECHT, Bruno Zanon; CHANG, Hung Kiang. Detecção e delimitação de pequenos reservatórios na Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira, Bahia, utilizando imagens multiespectrais. **Holos Environment**, v. 20, n. 4, p. 458-475, 20 ago. 2020. Lepidus Tecnologia. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14295/holos.v20i4.12391>.

CARDOSO-SILVA, Sheila *et al.* Ecologia e Meio Ambiente: Compartimentalização e qualidade da água: o caso da Represa Billings. **Bioikos**, Campinas, v. 28, n. 1, p. 31-43, jan./jun. 2014.

CARVALHO, M. A. Frequency, duration and severity of drought in the Semiarid Northeast Brazil region. **International Journal Of Climatology**, [S.L.], v. 38, n. 2, p. 517-529, 17 ago. 2017. Wiley. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/joc.5225>.

CAVALLI, Rosa Maria. Spatial Validation of Spectral Unmixing Results: a case study of venice city. **Remote Sensing**, v. 14, n. 20, p. 5165, 15 out. 2022. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/rs14205165>.

CETESB. COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Comunidade planctônica e clorofila-a do Complexo Billings: out/92 a out/93. São Paulo: CETESB, Secretaria de Estado do Meio Ambiente, 1996.

CETESB. COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Relatório de qualidade das águas interiores do estado de São Paulo 2002. São Paulo: CETESB, Secretaria de Estado do Meio Ambiente, 2003.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Publicações e Relatórios. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/publicacoes-e-relatorios/#>. Acesso em: 16 maio 2023.

CHEN, Jianjun *et al.* Multi-Scale Validation and Uncertainty Analysis of GEOV3 and MuSyQ FVC Products: a case study of an alpine grassland ecosystem. **Remote Sensing**, v. 14, n. 22, p. 5800, 17 nov. 2022. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/rs14225800>.

CHEN, M.; ZHANG, Y.; YAO, Y.; LU, J.; PU, X.; HU, T.; WANG, P. Evaluation of the OPTRAM model to retrieve soil moisture in the Sanjiang Plain of northeast China. **Earth and**

**Space Science**, v. 7, n. 6, e2020EA001108, 2020. Disponível em:  
<https://doi.org/10.1029/2020EA001108>.

CHEN, Zhiqiang; HU, Chuanmin; MULLER-KARGER, Frank. Monitoring turbidity in Tampa Bay using MODIS/Aqua 250-m imagery. **Remote Sensing Of Environment**, [S.L.], v. 109, n. 2, p. 207-220, jul. 2007. Elsevier BV. Disponível em:  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2006.12.019>.

CHINNASAMY, Pennan *et al.* Sustainable development of water resources in marginalised semi-arid regions of India: Case study of Dahod in Gujarat, India. In: Natural Resources Forum. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd, 2021. Disponível em:  
<https://doi.org/10.1111/1477-8947.12217>.

CRISTINA, Sónia; ICELY, John; NEWTON, Alice. Os satélites como instrumentos de aprendizagem e auxílio da Ria Formosa. In: ANÍBAL, Jaime *et al* (ed.). À descoberta da Ria Formosa. Faro: Universidade do Algarve, 2021. p. 95-103.

CLARK, Helen; WU, Hongbo. The sustainable development goals: 17 goals to transform our world. Furthering the Work of the United Nations; UN: New York, NY, USA, p. 36-54, 2016.

COHEN, Jacob. A coefficient of agreement for nominal scales. **Educational and psychological measurement**, v. 20, n. 1, p. 37-46, 1960.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Ruptura da Barragem do Complexo do Feijão em Brumadinho – MG: Boletim de Monitoramento Compartilhado do Rio Paraopeba. Belo Horizonte, 08 mar. 2019.

CRESSON, Rémi; GRIZONNET, Manuel; MICHEL, Julien. Orfeo ToolBox Applications. Qgis And Generic Tools, [S.L.], p. 151-242, 19 jan. 2018. John Wiley & Sons, Inc. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/9781119457091.ch5>.

CUI, B.; WANG, X.; SU, Y.; CHEN, Y.; YU, W.; GONG, C.; LI, L.; REHIM, A.; WANG, X. Impacts of pavement on the growth and biomass of young pine, ash and maple trees. **Trees**, v. 35, p. 2019-2029, 2021.

CUI, Y.; WANG, X.; ZHANG, X.; JU, W.; DUAN, C.; GUO, X.; WANG, Y.; FANG, L. Soil moisture mediates microbial carbon and phosphorus metabolism during vegetation succession in a semiarid region. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 147, p. 107814, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107814>.

CUNHA, Caroline Favoreto da; CARDOSO, Sabrina Brandão; TERAMOTO, Elias Hideo; CHANG, Hung Kiang. Modelo área-volume para a Represa Guarapiranga empregando o índice NDWI. **Holos Environment**, [S.L.], v. 20, n. 1, p. 137, 25 fev. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14295/holos.v20i1.12370>.

CUYPERS, Suzanna; NASCETTI, Andrea; VERGAUWEN, Maarten. Land Use and Land Cover Mapping with VHR and Multi-Temporal Sentinel-2 Imagery. **Remote Sensing**, v. 15, n. 10, p. 2501, 2023.

DALL'OLMO, Giorgio; GITELSON, Anatoly A.; RUNDQUIST, Donald C.. Towards a

unified approach for remote estimation of chlorophyll-a in both terrestrial vegetation and turbid productive waters. **Geophysical Research Letters**, [S.L.], v. 30, n. 18, set. 2003. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2003gl018065>.

DEUTSCH, Eliza S.; ALAMEDDINE, Ibrahim. Hindcasting eutrophication and changes in temperature and storage volume in a semiarid reservoir: a multi-decadal landsat-based assessment. **Environmental Monitoring And Assessment**, [S.L.], v. 191, n. 1, p. 1-16, 28 dez. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-018-7180-7>.

DOGLIOTTI, A.I.; RUDDICK, K.G.; NECHAD, B.; DOXARAN, D.; KNAEPS, E.. A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters. **Remote Sensing Of Environment**, [S.L.], v. 156, p. 157-168, jan. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.020>.

DOS ANJOS LUÍS, António; CABRAL, Pedro. Small dams/reservoirs site location analysis in a semi-arid region of Mozambique. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 9, n. 3, p. 381-393, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.02.002>.

DRUSCH, M. *et al.* Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. **Remote Sensing of Environment**, v. 120, p. 25-36, 2012.

DU, Yun; ZHANG, Yihang; LING, Feng; WANG, Qunming; LI, Wenbo; LI, Xiaodong. Water Bodies' Mapping from Sentinel-2 Imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m Spatial Resolution Produced by Sharpening the SWIR Band. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 8, n. 4, p. 354, 22 abr. 2016. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs8040354>.

DUBE, Timothy *et al.* Advancements in earth observation for water resources monitoring and management in Africa: a comprehensive review. **Journal Of Hydrology**, p. 129738, ago. 2023. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129738>.

DUBININ, V., SVORAY, T., STAVI, I., YIZHAQ, H. Using LANDSAT 8 and VENμS Data to Study the Effect of Geodiversity on Soil Moisture Dynamics in a Semiarid Shrubland. **Remote Sensing**, v. 12, n. 20, p. 3377, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12203377>.

DUKER, A. *et al.* Using nature-based water storage for smallholder irrigated agriculture in African drylands: Lessons from frugal innovation pilots in Mozambique and Zimbabwe. **Environmental Science & Policy**, v. 107, p. 1-6, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.02.010>.

ELACHIN, C. Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing. New York: Wiley, 1987.

ELDRIDGE, D. J., BENHAM, M., SINGH, B. K., DELGADO-BAQUERIZO, M. Ecosystem properties in urban areas vary with habitat type and settlement age. **Plant and Soil**, v. 461, p. 489-500, 2021.

ENTEKHABI, D., NJOKU, E. G., O'NEILL, P. E., KELLOGG, K. H., CROW, W. T., EDELSTEIN, W. N., ... & VAN ZYL, J. The soil moisture active passive (SMAP) mission. **Proceedings of the IEEE**, v. 98, n. 5, p. 704-716, 2010. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2043918>.

ERICKSON, T. O.; STEFAN, H. G. Natural groundwater recharge response to urbanization: Vermillion River Watershed, Minnesota. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 135, n. 6, p. 512-520, 2009. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2009\)135:6\(512\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2009)135:6(512)).

ESA. Primeiras aplicações do Sentinel-2A. Lisboa, 2015.

ESA - **Agência Espacial Europeia. Water Bodies**. Disponível em: [https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus/Sentinel-2/Water\\_bodies](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2/Water_bodies). Acesso em: março de 2023.

FAIZAL, Ahmad *et al.* Application of NDVI Transformation on Sentinel 2A Imagery for mapping mangrove conditions in Makassar City. **Akuatikisle: Jurnal Akuakultur, Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil**, v. 7, n. 1, p. 59-66, 2023.

FANG, B., LAKSHMI, V. Soil moisture at watershed scale: Remote sensing techniques. **Journal of Hydrology**, v. 516, p. 258-272, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.12.008>.

FARAMARZI, Monireh *et al.* Uncertainty based assessment of dynamic freshwater scarcity in semiarid watersheds of Alberta, Canada. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 9, p. 48-68, 2017.

FELEGARI, Shilan; SHARIFI, Alireza; MORAVEJ, Kamran; AMIN, Muhammad; GOLCHIN, Ahmad; MUZIRAFUTI, Anselme; TARIQ, Aqil; ZHAO, Na. Integration of Sentinel 1 and Sentinel 2 Satellite Images for Crop Mapping. **Applied Sciences**, [S.L.], v. 11, n. 21, p. 10104, 28 out. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/app112110104>.

FERNANDES, Eduardo de Souza. **SINERGIA DE DADOS DOS SATÉLITES SENTINEL-2 E LANDSAT-8 PARA ESTIMAR EVAPOTRANSPIRAÇÃO NA REGIÃO DO CERRADO**. 2017. 61 f. TCC (Graduação) - Curso de Agronomia, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

FERNANDES, Antoniel Silva *et al.* RMRH -Rev. Min. Rec. Hidr., Belo Horizonte, v.2,e021008,2021. 1 ANÁLISE DO IMPACTO NA QUALIDADE DA ÁGUA DO RIO PARAÓPEBA APÓS 2 CICLOS HIDROLÓGICOS DO ROMPIMENTO DAS BARRAGENS DE REJEITOS DA MINERADORA VALE S.A. **Revista Mineira de Recursos Hídricos**, Belo Horizonte, v. 2, n. 0, p. 1-19, jan. 2021.

FRANCINI, Saverio *et al.* Reusing Remote Sensing-Based Validation Data: comparing direct and indirect approaches for afforestation monitoring. **Remote Sensing**, v. 15, n. 6, p. 1638, 17 mar. 2023. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/rs15061638>.

FUNDAÇÃO JOAQUIM NABUCO. Brumadinho: águas do Rio Paraopeba provocam morte e deformidades em peixes. Disponível em: <https://www.gov.br/fundaj/pt-br/destaques/observa-fundaj-itens/observa-fundaj/revitalizacao-de-bacias/brumadinho-aguas-do-rio-paraopeba-provocam-morte-e-deformidades-em-peixes>. Acesso em: 20 jan. 2024.

GAO, Huilin; BIRKETT, Charon; LETTENMAIER, Dennis P.. Global monitoring of large reservoir storage from satellite remote sensing. **Water Resources Research**, [S.L.], v. 48, n. 9, p. 1-12, set. 2012. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2012wr012063>.

GARDINER, Tom *et al.* Field Validation of Remote Sensing Methane Emission Measurements. **Remote Sensing**, v. 9, n. 9, p. 956, 14 set. 2017. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/rs9090956>.

GARGIULO, Massimiliano; DELL'AGLIO, Domenico A. G.; IODICE, Antonio; RICCIO, Daniele; RUELLO, Giuseppe. Integration of Sentinel-1 and Sentinel-2 Data for Land Cover Mapping Using W-Net. **Sensors**, [S.L.], v. 20, n. 10, p. 2969, 24 maio 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s20102969>.

GAUR, Mahesh K.; SQUIRES, Victor R. Geographic extent and characteristics of the world's arid zones and their peoples. In: **Climate variability impacts on land use and livelihoods in drylands**. Springer, Cham, 2018. p. 3-20. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.02.010>.

GHIRARDI, Nicola; BOLPAGNI, Rossano; BRESCIANI, Mariano; VALERIO, Giulia; PILOTTI, Marco; GIARDINO, Claudia. Spatiotemporal Dynamics of Submerged Aquatic Vegetation in a Deep Lake from Sentinel-2 Data. **Water**, [S.L.], v. 11, n. 3, p. 563, 18 mar. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w11030563>.

GHULAM, A., QIN, Q., TEYIP, T., LI, Z. L. Modified perpendicular drought index (MPDI): a real-time drought monitoring method. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 62, n. 2, p. 150-164, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2007.03.002>.

GIARDINO, Claudia *et al.* Assessment of water quality in Lake Garda (Italy) using Hyperion. **Remote Sensing Of Environment**, v. 109, n. 2, p. 183-195, jul. 2007. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2006.12.017>.

GITELSON, Anatoly A. *et al.* A simple semi-analytical model for remote estimation of chlorophyll-a in turbid waters: Validation. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 9, p. 3582-3593, 2008.

GITELSON, Anatoly A.; Yuri Gritz; MERZLYAK, Mark N.. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. **Journal Of Plant Physiology**, [S.L.], v. 160, n. 3, p. 271-282, jan. 2003. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1078/0176-1617-00887>.

GLEICK, P. H. (1993). Water in crisis: A A guide to the world's freshwater resources. **Oxford University Press**. 473 p.

GOMES, J. L.; BARBIERI, J. C.. **Gerenciamento de recursos hídricos no Brasil e no Estado de São Paulo**: um novo modelo de política pública. **Cad. EBAPE.BR**, Rio de

Janeiro , v. 2, n. 3, p. 01-21,dez. 2004.

GONCHAROVA, O., MATYSHAK, G., UDOVENKO, M., SEMENYUK, O., EPSTEIN, H., BOBRIK, A. Temporal dynamics, drivers, and components of soil respiration in urban forest ecosystems. **Catena**, v. 185, p. 104299, 2020.

GORDON, H. R. *et al.* Phytoplankton pigment concentrations in the Middle Atlantic Bight: comparison of ship determinations and CZCS estimates. **Applied Optics**, v. 22, n. 1, p. 20-36, 1983.

GORI, A.; BLESSING, R.; JUAN, A.; BRODY, S.; BEDIENT, P. Characterizing urbanization impacts on floodplain through integrated land use, hydrologic, and hydraulic modeling. **Journal of Hydrology**, v. 568, p. 82-95, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.053>.

GREEN, J. K., SENEVIRATNE, S. I., BERG, A. M., FINDELL, K. L., HAGEMANN, S., LAWRENCE, D. M., GENTINE, P. Large influence of soil moisture on long-term terrestrial carbon uptake. *Nature*, v. 565, n. 7740, p. 476-479, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0848-x>.

GRIZONNET, Manuel; MICHEL, Julien; POUGHON, Victor; INGLADA, Jordi; SAVINAUD, Mickaël; CRESSON, Rémi. Orfeo ToolBox: open source processing of remote sensing images. **Open Geospatial Data, Software And Standards**, [S.I.], v. 2, n. 1, p. 1-8, 29 jun. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1186/s40965-017-0031-6>.

HAZBAVI, Zeinab; BAARTMAN, Jantien E.M.; NUNES, João P.; KEESSTRA, Saskia D.; SADEGHI, Seyed Hamidreza. Changeability of reliability, resilience and vulnerability indicators with respect to drought patterns. **Ecological Indicators**, [S.L.], v. 87, p. 196-208, abr. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.12.054>.

HUANG, J., JI, M., XIE, Y., WANG, S., HE, Y., & RAN, J. Global semiarid climate change over last 60 years. **Climate Dynamics**, v. 46, n. 3-4, p. 1131-1150, 2016.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico** 2022.

IDALINO, F. D.; ROSA, K. K. da; SIMÕES, J. C. Respostas das geleiras do Monte Melimoyu, Chile, às tendências mais secas e quentes da Patagônia Norte nas últimas décadas. **Revista do Departamento de Geografia**, [S. l.], v. 39, p. 126-137, 2020. DOI: 10.11606/rdg.v39i0.160197.

IGAM - INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DE ÁGUAS. 2018. Monitoramento da Qualidade das Águas. <http://www.igam.mg.gov.br/monitoramento-da-qualidade-das-aguas2>. Accessed 12 November 2020

INGLADA, Jordi; CHRISTOPHE, Emmanuel; "The Orfeo Toolbox remote sensing image processing software," 2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009, pp. IV-733-IV-736, doi: 10.1109/IGARSS.2009.5417481.

IOCCG. **Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optically-Complex Waters**. Dartmouth, NS, Canada: International Ocean-Colour Coordinating Group

(IOCCG), 2000. 140 p. (Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No. 3).

JĘDREJEK, Anna; JADCZYSZYN, Jan; PUDEŁKO, Rafał. Increasing Accuracy of the Soil-Agricultural Map by Sentinel-2 Images Analysis—Case Study of Maize Cultivation under Drought Conditions. **Remote Sensing**, v. 15, n. 5, p. 1281, 2023.

JENSEN, J. R. Remote sensing of the environment: an earth resource perspective. Prentice Hall, 2007.

KERR, Y. H., WALDTEUFEL, P., WIGNERON, J. P., MARTINUZZI, J. A. M. J., FONT, J., BERGER, M. Soil moisture retrieval from space: The Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) mission. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 39, n. 8, p. 1729-1735, 2001. <https://doi.org/10.1109/36.942551>.

KHAN, Muhammad Xaaceph; BUTT, Abida. Evaluation of Water Quality Using Physicochemical Parameters and Aquatic Insects Diversity. **River Basin Management - Under A Changing Climate**, [S.L.], p. 0-0, 22 fev. 2023. IntechOpen. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.108423>.

KLINKE, Randolph; KUECHLY, Helga; FRICK, Annett; FÖRSTER, Michael; SCHMIDT, Tobias; HOLTGRAVE, Ann-Kathrin; KLEINSCHMIT, Birgit; SPENGLER, Daniel; NEUMANN, Carsten. Indicator-Based Soil Moisture Monitoring of Wetlands by Utilizing Sentinel and Landsat Remote Sensing Data. **Pfg – Journal Of Photogrammetry, Remote Sensing And Geoinformation Science**, [S.L.], v. 86, n. 2, p. 71-84, abr. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s41064-018-0044-5>.

KOLTSIDAS, P., MAMASSIS, N., KALLIORAS, A. Hydrological modeling using the Soil and Water Assessment Tool in urban and peri-urban environments: the case of Kifisos experimental subbasin (Athens, Greece). **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 27, n. 4, p. 917-931, 2023.

KOTZ, S.; JOHNSON, N. L. Encyclopedia of statistical sciences. New York: John Wiley & Sons, 1983. v. 4, p. 352-4.

KUHN, Catherine; VALERIO, Aline de Matos; WARD, Nick; LOKEN, Luke; SAWAKUCHI, Henrique Oliveira; KAMPEL, Milton; RICHEY, Jeffrey; STADLER, Philipp; CRAWFORD, John; STRIEGL, Rob. Performance of Landsat-8 and Sentinel-2 surface reflectance products for river remote sensing retrievals of chlorophyll-a and turbidity. **Remote Sensing Of Environment**, [S.L.], v. 224, p. 104-118, abr. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.023>.

KUTSER, Tiit; PAAVEL, Birgot; VERPOORTER, Charles; LIGI, Martin; SOOMETS, Tuuli; TOMING, Kaire; CASAL, Gema. Remote Sensing of Black Lakes and Using 810 nm Reflectance Peak for Retrieving Water Quality Parameters of Optically Complex Waters. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 8, n. 6, p. 497, 14 jun. 2016. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs8060497>

KWONG, Ivan H. Y.; WONG, Frankie K. K.; FUNG, Tung. Automatic Mapping and Monitoring of Marine Water Quality Parameters in Hong Kong Using Sentinel-2 Image Time-

Series and Google EarthEngine Cloud Computing. **Frontiers In Marine Science**, [S.L.], v. 9, p. 0-0, 10 maio 2022. Frontiers Media SA. <http://dx.doi.org/10.3389/fmars.2022.871470>.

LAKSHMI, G. Jaya *et al.* Water Quality Monitoring Using Remote-Sensing. 2023 International Conference On Computational Intelligence And Sustainable Engineering Solutions (Cises), [S.L.], v. 0, n. 0, p. 0-0, 28 abr. 2023. IEEE. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/cises58720.2023.10183395>.

LAMAAMRI, Mohamed *et al.* Evaluation of desertification in the middle Moulouya basin (north-east morocco) using sentinel-2 images and spectral index techniques. **Earth Systems and Environment**, v. 7, n. 2, p. 473-492, 2023.

LAMICHHANE, S.; SHAKYA, N. M. Shallow aquifer groundwater dynamics due to land use/cover change in highly urbanized basin: The case of Kathmandu Valley. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 30, p. 100707, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100707>.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. An application of hierarchical kappa-type statistics in the assessment of majority agreement among multiple observers. **Biometrics**, p. 363-374, 1977.

LEE, Zhongping; SHANG, Shaoling; LIN, Gong; CHEN, Jun; DOXARAN, David. On the modeling of hyperspectral remote-sensing reflectance of high-sediment-load waters in the visible to shortwave- infrared domain. **Applied Optics**, [S.L.], v. 55, n. 7, p. 1738, 1 mar. 2016. The Optical Society. <http://dx.doi.org/10.1364/ao.55.001738>.

LEE, Hannah; CHAN, Zamyra; GRAYLEE, Kai; KAJENTHIRA, Arani; MARTÍNEZ, Daniela; ROMAN, Andrei. Challenge and response in the São Francisco River Basin. **Water Policy**, [S.L.], v. 16, n. 1, p. 153-200, 1 mar. 2014. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/wp.2014.007>.

LEE, Z.P. *et al.* Hyperspectral remote sensing for shallow waters: 2. deriving bottom depths and water properties by optimization. **Applied Optics**, v. 38, p. 3831-3843, 1999.

LEHNER, Bernhard; DÖLL, Petra. Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. **Journal Of Hydrology**, [S.L.], v. 296, n. 1-4, p. 1-22, ago. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.03.028>.

LEHNER, Bernhard; LIERMANN, Catherine Reidy; REVENGA, Carmen; VÖRÖSMARTY, Charles; FEKETE, Balazs; CROUZET, Philippe; DÖLL, Petra; ENDEJAN, Marcel; FRENKEN, Karen; MAGOME, Jun. High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management. **Frontiers In Ecology And The Environment**, [S.L.], v. 9, n. 9, p. 494-502, 31 maio 2011. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1890/100125>.

LI, Yongliu *et al.* Monitoring Chlorophyll-a concentration in karst plateau lakes using Sentinel 2 imagery from a case study of pingzhai reservoir in Guizhou, China. **European Journal of Remote Sensing**, v. 55, n. 1, p. 1-19, 2022

LIEBE, J.; GIESEN, N. van de; ANDREINI, M.. Estimation of small reservoir storage capacities in a semiarid environment. **Physics And Chemistry Of The Earth, Parts A/B/C**,

[S.L.], v. 30, n. 6-7, p. 448-454, jan. 2005. Elsevier BV.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2005.06.011>.

LING, Xiaolu *et al.* Uncertainty Analysis of Remote Sensing Underlying Surface in Land–Atmosphere Interaction Simulated Using Land Surface Models. **Atmosphere**, v. 14, n. 2, p. 370, 13 fev. 2023. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/atmos14020370>.

LIU, Huizeng; LI, Qingquan; SHI, Tiezhu; HU, Shuibo; WU, Guofeng; ZHOU, Qiming. Application of Sentinel 2 MSI Images to Retrieve Suspended Particulate Matter Concentrations in Poyang Lake. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 9, n. 7, p. 761, 23 jul. 2017. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs9070761>.

LIU, Bo *et al.* Water extraction from optical high-resolution remote sensing imagery: a multi-scale feature extraction network with contrastive learning. **Giscience & Remote Sensing**, v. 60, n. 1, p. 0-0, 10 jan. 2023. Informa UK Limited. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/15481603.2023.2166396>.

LINS, R. C. *et al.* Assessment of chlorophyll-a remote sensing algorithms in a productive tropical estuarine-lagoon system. **Remote Sensing**, v. 9, n. 6, p. 516, 2017.

LOMBANA, Lorena. **Flood mapping in small-size water rivers: Analysis of spectral indexes using super-resolved Sentinel-2 images**. Copernicus Meetings, 2023.

LORENZZETTI, João Antônio. *Princípios físicos de Sensoriamento Remoto*. São Paulo: Blucher, 2015. 293 p.

LU, Shanlong; OUYANG, Ninglei; WU, Bingfang; WEI, Yongping; TESEMMA, Zelalem. Lake watervolume calculation with time series remote-sensing images. *International Journal Of RemoteSensing*, [S.L.], v. 34, n. 22, p. 7962-7973, 2 set. 2013. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2013.827814>.

MA, Yue *et al.* Remote sensing of turbidity for lakes in northeast China using Sentinel-2 images with machine learning algorithms. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 14, p. 9132-9146, 2021.

MA, Chunfeng; JOHANSEN, Kasper; MCCABE, Matthew F. Combining Sentinel-2 data with an optical-trapezoid approach to infer within-field soil moisture variability and monitor agricultural production stages. **Agricultural Water Management**, v. 274, p. 107942, 2022.

MACHADO, Anderson Patric Ávila. **USO DE IMAGENS DE SATÉLITE SENTINEL-2 PARA DELIMITAÇÃO DE APPS: ESTUDO DE CASO MUNICÍPIO DE FELIZ-RS**. 2018. 58 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Pampa (Unipampa, Rs), Alegrete, 2018.

MADY, B., LEHMANN, P., GORELICK, S. M. Distribution of small seasonal reservoirs in semiarid regions and associated evaporative losses. **Environmental Research Communications**, v. 2, n. 6, p. 061002, 2020. Or, D. (2020). Distribution of small seasonal reservoirs in semiarid regions and associated evaporative losses. *Environmental Research Communications*, 2(6), 061002.

MAGNONI, Pedro Henrique Jandreice. Estimativa de recarga de águas subterrâneas por Sensoriamento Remoto e computação em nuvem. 2020. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2020.

MAHMOUD, Shereif H. *et al.* Monitoring the spatial distribution of water quality of an urban stormwater pond using satellite images. **Ecological Informatics**, v. 77, p. 102205, 2023.  
 MAIMOUNI, Soufiane *et al.* Spatiotemporal monitoring of low water turbidity in Moroccan coastal lagoon using Sentinel-2 data. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 26, p. 100772, 2022.

MALENOVSKÝ, Zbyněk; ROTT, Helmut; CIHLAR, Josef; SCHAEPMAN, Michael E.; GARCÍA-SANTOS, Glenda; FERNANDES, Richard; BERGER, Michael. Sentinels for science: potential of sentinel-1, -2, and -3 missions for scientific observations of ocean, cryosphere, and land. **Remote Sensing Of Environment**, [S.L.], v. 120, p. 91-101, maio 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.026>.

MALLICK, Kaniska; BHATTACHARYA, Bimal K.; PATEL, N.K.. Estimating volumetric surface moisture content for cropped soils using a soil wetness index based on surface temperature and NDVI. **Agricultural And Forest Meteorology**, [S.L.], v. 149, n. 8, p. 1327-1342, ago. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.03.004>.

MARENGO, J. A. *et al.* Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 2, p. 1973-1985, 2016.

MARINHO, Rogério Ribeiro; HARMEL, Tristan; MARTINEZ, Jean-Michel; FILIZOLA JUNIOR, Naziano Pantoja. Spatiotemporal Dynamics of Suspended Sediments in the Negro River, Amazon Basin, from In Situ and Sentinel-2 Remote Sensing Data. **Isprs International Journal Of Geo-Information**, [S.L.], v. 10, n. 2, p. 86, 19 fev. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ijgi10020086>.

MAROPO, V. L. B., MORAIS, E. E., NUNES, A. C., & SILVEIRA, J. A. R. (2019). Planejamento urbano sustentável: um estudo para implantação de infraestrutura verde no Bairro Bancários, João Pessoa-PB, Brasil. *urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 11, e20180005. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.011.002.AO09>

MARENGO, Jose A.; TORRES, Roger Rodrigues; ALVES, Lincoln Muniz. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. **Theoretical And Applied Climatology**, v. 129, n. 3-4, p.1189-1200, 9 jun. 2016. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>.

MASIH, I., UHLENBROOK, S., TURRAL, H., & KARIMI, P. Analysing streamflow variability and water allocation for sustainable management of water resources in the semiarid Karkheh river basin, Iran. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 34, n. 4-5, p. 329-340, 2009.

MATTHEWS, Mark William. A current review of empirical procedures of remote sensing in inland and near-coastal transitional waters. **International Journal Of Remote Sensing**, [S.L.], v. 32, n. 21, p. 6855- 6899, 11 ago. 2011. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2010.512947>.

McCABE, M. F. *et al.* The future of Earth observation in hydrology. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 7, p. 3879-3914, 2017.

MCFEETERS, S. K.. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal Of Remote Sensing**, [S.L.], v. 17, n. 7, p. 1425-1432, maio 1996. Informa UK Limited.  
<http://dx.doi.org/10.1080/01431169608948714>.

MENG, Qingyan. Remote Sensing Data Preprocessing Technology. Remote Sensing Of Urban Green Space, p. 9-26, 2023. **Springer Nature Singapore**. Disponível em:  
[http://dx.doi.org/10.1007/978-981-99-0703-8\\_2](http://dx.doi.org/10.1007/978-981-99-0703-8_2).

MOBLEY, C.D. Light and water: radiative transfer in natural waters. Academic Press, 1994

MOHAMED, I. S. S. A.; ABOUD, Mohammad. Forest Fire Disaster Risk Analysis using Sentinel 2 and Landsat Images Case Study: Al-Qoubaiyat and Tyre regions, Lebanon. **Turkish Journal of Geosciences**, v. 3, n. 2, p. 84-94.

MOHIA, Yacine *et al.* Quantitative Estimation of Rainfall from Remote Sensing Data Using Machine Learning Regression Models. **Hydrology**, v. 10, n. 2, p. 52, 16 fev. 2023. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/hydrology10020052>.

MOHSENI, Farzane *et al.* Wetland Mapping in Great Lakes Using Sentinel-1/2 Time-Series Imagery and DEM Data in Google Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 15, n. 14, p. 3495, 2023.

MOREL, Anclré; PRIEUR, Louis. Analysis of variations in ocean color 1. **Limnology and oceanography**, v. 22, n. 4, p. 709-722, 1977.

NECHAD, B.; RUDDICK, K.G.; PARK, Y.. Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters. **Remote Sensing Of Environment**, [S.L.], v. 114, n. 4, p. 854-866, abr. 2010. Elsevier BV.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2009.11.022>.

MUGABE, Francis T.; HODNETT, M. G.; SENZANJE, A. Opportunities for increasing productive water use from dam water: a case study from semiarid Zimbabwe. **Agricultural Water Management**, v. 62, n. 2, p. 149-163, 2003.

NEMANI, R., PIERCE, L., RUNNING, S., GOWARD, S. Developing satellite-derived estimates of surface moisture status. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 32, n. 3, p. 548-557, 1993. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1993\)032](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1993)032)

NOGUEIRA, Guilherme Emidio Horta; KIANG, Chang Hung. Simulação numérica de fluxo de águas subterrâneas do aquífero rio claro, porção nordeste do município de Rio Claro, SP. **Águas Subterrâneas**, [S.L.], v. 29, n. 2, p. 175, 10 ago. 2015. Lepidus Tecnologia.  
<http://dx.doi.org/10.14295/ras.v29i2.28304>.

NETO, Dagmar; CHANG, Hung K.; VAN GENUCHTEN, Martinus Th.. A Mathematical View of Water Table Fluctuations in a Shallow Aquifer in Brazil. **Groundwater**, [S.L.], v. 54, n. 1, p. 82-91, 27mar. 2015. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/gwat.12329>.

- NOORI, Ashkan *et al.* A spatiotemporal monitoring model of TSM and TDS in arid region lakes utilizing Sentinel-2 imagery. **Journal of Arid Environments**, v. 216, p. 105024, 2023.
- Novo, E. M.; Silva, M. L. S. Combined analysis of SAR C and TM/Landsat data in the assessment of aquatic vegetation changes in the Tucuruí reservoir, Pará State, Brazilian Amazon. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, p. 1242-1245, 1995.
- NOVO, E.M.L.M. **Monitoramento de Quantidade e Qualidade da Água e Sensoriamento Remoto**, XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo, 2007.
- NOVO, Evlyn Márcia Leão de Moraes. Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2010. 386 p.
- NOVO, Evlyn Márcia Leão de Moraes; BARBOSA, Claudio Clemente Farias; LOBO, Felipe de Lucia. Comportamento Espectral dos ambientes Aquáticos. In: MENESES, Paulo Roberto; ALMEIDA, Tati de; BAPTISTA, Gustavo Macedo de Mello (org.). *Reflectância dos Materiais Terrestres: análise e interpretação*. São Paulo: Oficina de Textos, 2019. p. 225-248.
- NNAVARAPU, Lalitha Anupama *et al.* Estimation of Wetland Area Change Using Sentinel-2 Satellite Images. In: **2023 Fifth International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)**. IEEE, 2023. p. 1-5.
- OGASHAWARA, Igor *et al.* The use of Sentinel-2 for chlorophyll-a spatial dynamics assessment: A comparative study on different lakes in northern Germany. **Remote Sensing**, v. 13, n. 8, p. 1542, 2021.
- OLIVA, A. Estudo Hidrofaciológico do Aquífero Rio Claro no Município de Rio Claro - SP. (Tese de Doutorado), Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro (SP). 196 p., 2006.
- LOUDIN, L.; SALAVATI, B.; FURUSHO-PERCOT, C.; RIBSTEIN, P.; SAADI, M. Hydrological impacts of urbanization at the catchment scale. **Journal of Hydrology**, v. 559, p. 774-786, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.064>.
- PADILLA-MENDOZA, César *et al.* Potential of Sentinel Images to Evaluate Physicochemical Parameters Concentrations in Water Bodies—Application in a Wetlands System in Northern Colombia. **Water**, v. 15, n. 4, p. 789, 2023.
- PEÑA-LUQUE, Santiago *et al.* Sentinel-1&2 multitemporal water surface detection accuracies, evaluated at regional and reservoirs level. **Remote Sensing**, v. 13, n. 16, p. 3279, 2021.
- PANDEY, R., GOSWAMI, S., SARUP, J., MATIN, S. The thermal–optical trapezoid model-based soil moisture estimation using Landsat-8 data. *Modeling Earth Systems and Environment*, v. 9, p. 361-377, 2023. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01488-2>.
- PAHLEVAN, N.; SARKAR, S.; FRANZ, B.A.; BALASUBRAMANIAN, S.V.; HE, J.. Sentinel-2 MultiSpectral Instrument (MSI) data processing for aquatic science applications: demonstrations and validations. *Remote Sensing Of Environment*, [S.L.], v. 201, p. 47-56, nov. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2017.08.033>.

PAIVA, Rodrigo Cauduro Dias de *et al.* Advances and challenges in the water sciences in Brazil: a community synthesis of the xxiii brazilian water resources symposium. Rbrh, v.

PEPI, Milva; ANTON, Stazione Zoologica. Current Trends in Engineering Science (CTES).; LOCK, Marcelle *et al.* Monitoring Coastal Water Body Health with Sentinel-2 MSI Imagery. **Remote Sensing**, v. 15, n. 7, p. 1734, 2023.

Pereira, R. (2007). Aplicabilidade de métodos de Sensoriamento Remoto na avaliação e monitoramento do estado trófico de lagoas costeiras do Rio Grande do Sul-Brasil.

PEREIRA, Leticia S. F.; ANDES, Lisa C.; COX, Amanda L.; GHULAM, Abduwasit. Measuring Suspended-Sediment Concentration and Turbidity in the Middle Mississippi and Lower Missouri Rivers Using Landsat Data. **Jawra Journal Of The American Water Resources Association**, [S.L.], v. 54, n. 2, p. 440-450, 19 dez. 2017. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/1752-1688.12616>.

PEREIRA, Bruno; MEDEIROS, Pedro; FRANCK, Till; RAMALHO, Geraldo; FOERSTER, Saskia; ARAÚJO, José Carlos de. Assessment of the geometry and volumes of small surface water reservoirs by remote sensing in a semiarid region with high reservoir density. **Hydrological Sciences Journal**, v.64, n. 1, p. 66-79, 2019.

PERROTTA, Mônica Mazzini; SALVADOR, Elizete Domingues; LOPES, Ricardo da Cunha; D'AGOSTINO, Liz Zanchetta; CHIEREGATI, Luiz Antonio; PERUFFO, Nazário; GOMES, Sylvio Dutra; SACHS, Liliane Lavoura Bueno; MEIRA, Vinicius Tieppo; GARCIA, Maria da Gloria Motta; LACERDA FILHO, Joffre Valmório de. Geologia e recursos minerais do estado de São Paulo. 2006. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/2966>. Acesso em: 15/01/2024.

PETUS, Caroline; CHUST, Guillem; GOHIN, Francis; DOXARAN, David; FROIDEFOND, Jean- Marie; SAGARMINAGA, Yolanda. Estimating turbidity and total suspended matter in the Adour Riverplume (South Bay of Biscay) using MODIS 250-m imagery. **Continental Shelf Research**, [S.L.], v. 30, n. 5, p. 379-392, mar. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2009.12.007>.

PIZANI, Fernanda Mara Coelho; FERREIRA, Adrielly Fonseca Fialho; MAILLARD, Philippe.

POMPÊO *et al.* (Orgs.) Ecologia de reservatórios e interfaces, São Paulo : Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, 2015.

POMPÊO, Marcelo; MOSCHINI-CARLOS, Viviane; BITENCOURT, Marisa Dantas; SÒRIA- PERPINYÀ, Xavier; VICENTE, Eduardo; DELEGIDO, Jesus. Water quality assessment using Sentinel-2 imagery with estimates of chlorophyll a, Secchi disk depth, and Cyanobacteria cell number:the cantareira system reservoirs (são paulo, brazil). **Environmental Science And Pollution Research**,[S.L.], v. 28, n. 26, p. 34990-35011, 4 mar. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-021-12975-x>.

PULETTI, Nicola *et al.* Use of Sentinel-2 for forest classification in Mediterranean environments. **Ann. Silv. Res**, v. 42, n. 1, p. 32-38, 2018

PULETTI, Nicola *et al.* Monitoring the effects of extreme drought events on forest health by Sentinel-2 imagery. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 13, n. 2, p. 020501-020501, 2019.

PUTRI, Ade Febri Sandhini; WIDYATMANTI, Wirastuti; UMARHADI, Deha Agus. Sentinel-1 and Sentinel-2 data fusion to distinguish building damage level of the 2018 Lombok Earthquake. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 26, p. 100724, 2022.

RAKUASA, Heinrich; SIHASALE, Daniel Anthoni. Analysis of Vegetation Index in Ambon City Using Sentinel-2 Satellite Image Data with Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Method based on Google Earth Engine. **Journal of Innovation Information Technology and Application (JINITA)**, v. 5, n. 1, p. 74-82, 2023.

RAN, Lishan; LU, X. X.. Delineation of reservoirs using remote sensing and their storage estimate: an example of the yellow river basin, china. **Hydrological Processes**, [S.L.], v. 26, n. 8, p. 1215-1229, 22jul. 2011. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.8224>.

RAYNE, Louise *et al.* Detecting desertification in the ancient oases of southern Morocco. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 19424, 2023.

REBOUÇAS, Aldo da C.. Água no Brasil: abundância, desperdício e escassez. **Bahia Análise & Dados**, Salvador, p. 341-345, 2003.

ROJAS, Lino Valcarcel; SANTOS JUNIOR, José Araujo; ALVARADO, José Corcho; AMARAL, Romilton Santos; RÖLLIN, Stefan; MILAN, Marvic Ortueta; FERNÁNDEZ, Zahily Herrero; FRANCIS, Kennedy; CAVALCANTI, Marianna; SANTOS, Josineide M. N.. Quality and management status of the drinking water supplies in a semiarid region of Northeastern Brazil. **Journal Of Environmental Science And Health, Part A**, [S.L.], v. 55, n. 10, p. 1247-1256, 22 jun. 2020. InformaUK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/10934529.2020.1782668>.

ROSA, Andressa Ferreira. Os impactos da urbanização sobre o ciclo hidrológico no município de Patrocínio - MG. 2017. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017. Disponível em: 1. Acesso em: 18 jan. 2024.

RUDORFF, Natalia; RUDORFF, Conrado M.; KAMPEL, Milton; ORTIZ, Gustavo. Remote sensing monitoring of the impact of a major mining wastewater disaster on the turbidity of the Doce River plume off the eastern Brazilian coast. **Isprs Journal Of Photogrammetry And Remote Sensing**, [S.L.], v. 145, p. 349-361, nov. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.02.013>.

Ruivo, P. M. D. C. P. (2017). Análise de risco para cultura de moluscos bivalves na costa continental de Portugal: Blooms de Algas Tóxicas (HAB) (Doctoral dissertation).

Ruz-Verdú, A., Gibaja, G., Romo, S., Soria, J. M., Tenjo, C., Peña, R., ... Moreno, J. (2016). Mapping water quality with Sentinel-2 in Albufera de Valencia. Paper presented at the XVIII Iberian Congress of Limnology, IRTA, Tortosa, Italy, 4-8 July 2016.

SADEGHI, Morteza; JONES, Scott B.; PHILPOT, William D.. A linear physically-based

model for remote sensing of soil moisture using short wave infrared bands. **Remote Sensing Of Environment**, [S.L.], v. 164, p. 66-76, jul. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.04.007>.

SADEGHI, Morteza; BABAEIAN, Ebrahim; TULLER, Markus; JONES, Scott B.. The optical trapezoid model: a novel approach to remote sensing of soil moisture applied to sentinel-2 and landsat-8 observations. **Remote Sensing Of Environment**, [S.L.], v. 198, p. 52-68, set. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2017.05.041>.

SAKUNO, Yuji; YAJIMA, Hiroshi; YOSHIOKA, Yumi; SUGAHARA, Shogo; ELBASIT, MohamedAbd; ADAM, Elhadi; CHIRIMA, Johannes. Evaluation of Unified Algorithms for Remote Sensing of Chlorophyll-a and Turbidity in Lake Shinji and Lake Nakaumi of Japan and the Vaal Dam Reservoir of South Africa under Eutrophic and Ultra-Turbid Conditions. **Water**, [S.L.], v. 10, n. 5, p. 618, 9 maio 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w10050618>.

SALAMA, Mhd Suhyb *et al.* Validation of Sentinel-2 (MSI) and Sentinel-3 (OLCI) water quality products in turbid estuaries using fixed monitoring stations. **Frontiers in Remote Sensing**, v. 2, p. 808287, 2022.

SANTOS, Lucas Marcone dos; HERCULANO, Alexandre; RAMOS, Luan Lacerda; ALVE, Neise Mare de Souza; NASCIMENTO, Raimunda Joysse Pereira dos Reis; SILVEIRA, Roniex da. MAPEAMENTO DE USO E OCUPAÇÃO DAS TERRAS DO ALTO CURSO DO RIO PAGÃO A PARTIR DO MÉTODO DE SEGMENTAÇÃO - UMBAÚBA, SANTA LUZIA DO ITANHY E INDIAROBA/SE. In: XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 19., 2019, Santos. **Anais [...]**. [S.L.]: Inpe, 2019. p. 2976-2979.

SCHAFFITEL, A.; SCHUETZ, T.; WEILER, M. A distributed soil moisture, temperature and infiltrometer dataset for permeable pavements and green spaces. **Earth System Science Data**, v. 12, n. 1, p. 501-517, 2020.

Sentinel Hub. Sentinel-2 L2A Documentation: Optical Data. Disponível em: [https://docs.sentinel-hub.com/api/latest/data/sentinel-2-l2a/#:~:text=For%20Sentinel%2D2%20optical%20data,See%20also%20Harmonize%20Values.&text=\\*Higher%20values%20are%20expected%20in,can%20easily%20be%20above%201](https://docs.sentinel-hub.com/api/latest/data/sentinel-2-l2a/#:~:text=For%20Sentinel%2D2%20optical%20data,See%20also%20Harmonize%20Values.&text=*Higher%20values%20are%20expected%20in,can%20easily%20be%20above%201). Acesso em: 13 de novembro de 2023.

SHELDON, F.; LEIGH, C.; NEILAN, W.; NEWHAM, M.; POLSON, C.; HADWEN, W. Urbanization: hydrology, water quality, and influences on ecosystem health. In: Approaches to water sensitive urban design. Woodhead Publishing, 2019. p. 229-248. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812843-5.00011-3>.

SILVA, Ana Paula; DENALDI, Rosana. Análise espacial para priorização da aplicação do PEUC em vazios urbanos. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, Curitiba, v. 11, n. 3, p. 539-555, (2019-09-30). <https://doi.org/10.1590/2175-3369.011.003.ao03>.

SILVA, E. N.; FERREIRA, L. C. L.; PEREIRA FILHO, A. J. Variabilidade climática e qualidade da água do Reservatório Guarapiranga. *Estudos Avançados*, São Paulo, v. 28, n. 80, p. 167-182, abr. 2014. Disponível em: 1. Acesso em: 18 fev. 2024

SLATER, P. N. Remote Sensing: Optics and Optical Systems. 1980. Hardcover. Addison-Wesley Pub. Co.

SMITH, W. J. Modern Optical Engineering. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2013.

SIMONETTI, D. S.; ULABY, F. T. (EDS). Manual of Remote Sensing. 2. ed. Vol. I. Falls ChurchVA: American Society of Photogrammetry, 1983, 1232 p.

SOUZA FILHO, Oderson Antônio de; SILVA, Adalene Moreira; REMACRE, Armando Zaupa; SANCEVERO, Sérgio Sacani; MCCAFFERTY, Anne Elizabeth; PERROTTA, Mônica Mazzini. Usinghelicopter electromagnetic data to predict groundwater quality in fractured crystalline bedrock in a semiarid region, Northeast Brazil. **Hydrogeology Journal**, [S.L.], v. 18, n. 4, p. 905-916, 1 abr. 2010. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-010-0582-4>.

SU, S. L.; SINGH, D. N.; BAGHINI, M. S. A critical review of soil moisture measurement. *Measurement*, v. 54, p. 92-105, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.04.007>.

SUDENE. 2017. Delimitação do Semiárido. Disponível em: <http://www.sudene.gov.br/delimitacao-do-semiarido>.

SCHOWENGERDT, R.A. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing. 3ª edição. Elsevier, Arizona, 2007.

TAYER, Thiago C. *et al.* Improving the accuracy of the Water Detect algorithm using Sentinel-2, Planetscope and sharpened imagery: a case study in an intermittent river. **GIScience & Remote Sensing**, v. 60, n. 1, p. 2168676, 2023.

TESFAYE, Mathias; BREUER, Lutz. Performance of Water Indices for Water Resources Monitoring Using Large-Scale Sentinel-2 Data. 2023.

TERAMOTO, Elias Hideo; BENJUMEA, Maria Teresa; GONÇALVES, Roger; KIANG, Chang. Séries Temporais do Índice NDVI na Avaliação do Comportamento Sazonal do Aquífero Rio Claro. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S.L.], v. 70, n. 3, p. 1135-1157, 30 set. 2018. EDUFU - Editora da Universidade Federal de Uberlândia. <http://dx.doi.org/10.14393/rbcv70n3-45986>.

TERAMOTO, Elias H.; GEMEINER, Hendryk; ZANATTA, Melina B.T.; MENEGÁRIO, Amauri A.; CHANG, Hung K.. Metal speciation of the Paraopeba river after the Brumadinho dam failure. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 757, p. 143917, fev. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143917>.

THEOCHARIDIS, Christos *et al.* **Satellite times-series analysis and assessment of the BFAST algorithm to detect possible abrupt changes in forest seasonality utilising Sentinel-1 and Sentinel-2 data. Case study: Paphos forest, Cyprus.** Copernicus Meetings, 2023.

TIAN, Shang; GUO, Hongwei; XU, Wang; ZHU, Xiaotong; WANG, Bo; ZENG, Qinghuai; MAI, Youquan; HUANG, Jinhui Jeanne. Remote sensing retrieval of inland water quality parameters using Sentinel-2 and multiple machine learning algorithms. **Environmental Science And Pollution Research**, [S.L.], v. 30, n. 7, p. 18617-18630, 10 out. 2022. Springer Science and Business Media LLC.<http://dx.doi.org/10.1007/s11356-022-23431-9>.

TOMING, Kaire; KUTSER, Tiit; LAAS, Alo; SEPP, Margot; PAAVEL, Birgot; NÕGES, Tiina. First Experiences in Mapping Lake Water Quality Parameters with Sentinel-2 MSI Imagery. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 8, n. 8, p. 640, 5 ago. 2016. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs8080640>.

TORRES-BEJARANO, F.; ARTEAGA-HERNÁNDEZ, F.; RODRÍGUEZ-IBARRA, D.; MEJÍA-ÁVILA, D.; GONZÁLEZ-MÁRQUEZ, L. C.. Water quality assessment in a wetland complex using Sentinel 2 satellite images. **International Journal Of Environmental Science And Technology**, [S.L.], v. 18, n. 8, p. 2345-2356, 24 out. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s13762-020-02988-3>.

TUNDISI, José Galizia. Água no século XXI: enfrentando a escassez. São Carlos: RiMa/IIE, 2003. 247 p.

UNESCO. UN World Water Development Report 2018 - Nature-based Solutions for Water. Paris: UNESCO, 2018. Disponível em: [\[https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261424\]](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261424). Acesso em: 14 fev. 2022.

VANHELLEMONT, Q.; RUEDA, F. ACOLITE for Sentinel-2: Aquatic Applications of MSI Imagery. In: LIVING PLANET SYMPOSIUM. Proceedings... Prague, Czech Republic, 2016.

VISO-VÁZQUEZ, Manuel *et al.* Remote detection of cyanobacterial blooms and chlorophyll-a analysis in a eutrophic reservoir using Sentinel-2. **Sustainability**, v. 13, n. 15, p. 8570, 2021.

WANG, Y. P.; CHEN, C. T.; TSAI, Y. C.; SHEN, Y. A Sentinel-2 Image-Based Irrigation Advisory Service: Cases for Tea Plantations. **Water**, v. 13, n. 9, p. 1305, 2021. <https://doi.org/10.3390/w13091305>.

WEI, 苏伟 Su; MINGZHENG, 张明政 Zhang; KUNPING, 蒋坤萍 Jiang; DEHAI, 朱德海

WESTERN, A. W.; GRAYSON, R. B.; BLÖSCHL, G. Scaling of soil moisture: A hydrologic perspective. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 30, n. 1, p. 149-180, 2002. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.30.091201.140434>

Zhu; JIANXI, 黄健熙 Huang; PENGXIN, 王鹏新 Wang. Atmospheric Correction Method for Sentinel-2 Satellite Imagery. **Acta Optica Sinica**, [S.L.], v. 38, n. 1, p. 0128001, 2018. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics. <http://dx.doi.org/10.3788/aos201838.0128001>.

WATANABE, F. *et al.* Remote sensing of the chlorophyll-a based on OLI/Landsat-8 and MSI/Sentinel-2a (Barra Bonita Reservoir, Brazil). **Anais da Academia Brasileira de Ciencias**, v. 90, n. 2, p. 1987–2000, 2018.

WENGRAT, S.; BICUDO, D. C. Avaliação espacial da qualidade da água em reservatório urbano (Complexo Billings, sudeste do Brasil). **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 23, n. 2, p. 200-216, 2011.

XU, Hanqiu. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open

water features in remotely sensed imagery. **International Journal Of Remote Sensing**, [S.L.], v. 27, n. 14, p. 3025- 3033, 20 jul. 2006. Informa UK Limited.  
<http://dx.doi.org/10.1080/01431160600589179>.

XU, L.; ABBASZADEH, P.; MORADKHANI, H.; CHEN, N.; ZHANG, X. Continental drought monitoring using satellite soil moisture, data assimilation and an integrated drought index. **Remote Sensing of Environment**, v. 250, p. 112028, 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112028>.

YANG, Wei *et al.* An Enhanced Three-Band Index for Estimating Chlorophyll-a in Turbid Case-II Waters: Case Studies of Lake Kasumigaura, Japan, and Lake Dianchi, China. **Ieee Geoscience And Remote Sensing Letters**, [S.I.], v. 7, n. 4, p. 655-659, out. 20.

ZEYADA, Ahmed M. *et al.* Sentinel-2 Satellite Imagery Application to Monitor Soil Salinity and Calcium Carbonate Contents in Agricultural Fields. *Phyton* (0031-9457), v. 92, n. 5, 2023.

ZHANG, Dianjun; TANG, Ronglin; TANG, Bo-Hui; WU, Hua; LI, Zhao-Liang. A Simple Method for Soil Moisture Determination From LST–VI Feature Space Using Nonlinear Interpolation Based on Thermal Infrared Remotely Sensed Data. **Ieee Journal Of Selected Topics In Applied Earth Observations And Remote Sensing**, [S.L.], v. 8, n. 2, p. 638-648, fev. 2015. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).  
<http://dx.doi.org/10.1109/jstars.2014.2371135>.

ZHANG, Yingyin *et al.* Monitoring and spatial traceability of river water quality using Sentinel-2 satellite images. **Science of The Total Environment**, p. 164862, 2023

ZHEN, Jianing *et al.* Mapping leaf chlorophyll content of mangrove forests with Sentinel-2 images of four periods. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 102, p. 102387, 2021.

ZIKIOU, Nadia; RUSHMEIER, Holly. Sentinel-2 data classification for land use land cover mapping in Northern Algeria. In: **Algorithms, Technologies, and Applications for Multispectral and Hyperspectral Imaging XXIX**. SPIE, 2023. P. 147-161.

ZOLFAGHARI, Farhad; ABDOLLAHI, Vahideh. Determining the desertification intensity based on spectral indices using Sentinel-2 images (Case study: Sistan and Baluchestan province). **Journal of RS and GIS for Natural Resources**, v. 13, n. 1, p. 108-126, 2022.