



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO - UFPE**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS - CTG**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL - DECIV**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**JOSÉ RENATO BEZERA DE CARVALHO**

**DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DO RESERVATÓRIO JAZIGO E VEGETAÇÃO  
NO ENTORNO ATRAVÉS DO NDVI E NDWI – SERRA TALHADA / PE**

**RECIFE**

**2023**

**JOSÉ RENATO BEZERRA DE CARVALHO**

**DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DO RESERVATÓRIO JAZIGO E VEGETAÇÃO  
NO ENTORNO UTILIZANDO NDVI E NDWI - SERRA TALHADA – PE.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

**Orientadora:** Prof<sup>a</sup>. D. Sc. Profa. Leidjane Maria Maciel de Oliveira

**Coorientadora:** Prof<sup>a</sup>. M. Sc. Debora Natália Oliveira de Almeida

**RECIFE**

**2023**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Carvalho, José Renato Bezerra de .

Dinâmica espaço-temporal do reservatório Jazigo e vegetação no entorno através do NDVI e NDWI - Serra Talhada / PE / José Renato Bezerra de Carvalho. - Recife, 2023.

44 : il., tab.

Orientador(a): Leidjane Maria Maciel Oliveira

Coorientador(a): Debora Natália Oliveira de Almeida

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Civil - Bacharelado, 2023.

9.10.

1. Análise pluviométrica. 2. Imagens orbitais. 3. Índices espectrais. I. Oliveira , Leidjane Maria Maciel . (Orientação). II. Almeida , Debora Natália Oliveira de. (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

JOSÉ RENATO BEZERRA DE CARVALHO

**DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DO RESERVATÓRIO JAZIGO E VEGETAÇÃO  
NO ENTORNO ATRAVÉS DO NDVI E NDWI – SERRA TALHADA / PE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 05/10/2023.

**BANCA EXAMINADORA**

\_\_\_\_\_  
Prof<sup>ª</sup>. D. Sc. Leijdane Maria Maciel de Oliveira (Orientadora)  
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

\_\_\_\_\_  
Prof<sup>ª</sup>. M. Sc. Debora Natália Oliveira de Almeida (Coorientadora)  
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

\_\_\_\_\_  
Prof. M. Sc. Ubiratan Joaquim da Silva Junior (Examinador Externo)  
Universidade Federal de Pernambuco

\_\_\_\_\_  
Prof. D. Sc. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), instituição de excelência acadêmica, pelo suporte e oportunidade de realizar este trabalho de conclusão de curso no âmbito do curso de Engenharia Civil. Agradeço à UFPE pela sólida formação que me proporcionou ao longo destes anos, permitindo a adquirir conhecimentos fundamentais e desenvolver habilidades essenciais para a minha futura carreira na engenharia.

Aos professores, em especial a Prof<sup>ª</sup>. Leidjane Oliveira e orientadores do curso de Engenharia Civil da UFPE, que me guiaram, ensinaram e inspiraram ao longo deste percurso acadêmico. Seu comprometimento com a educação e sua dedicação em compartilhar seus conhecimentos foram fundamentais para o meu desenvolvimento como estudante e futuro engenheiro.

A Minha coorientadora Prof<sup>ª</sup>. Débora Almeida e a meus amigos e familiares, principalmente a minha mãe e a meu pai, pelo apoio incondicional, compreensão e incentivo durante toda a minha trajetória acadêmica. Suas palavras de encorajamento e amor foram fundamentais para me manter motivado e confiante para alcançar este objetivo.

A todos os profissionais e instituições que colaboraram de alguma forma com nosso trabalho de pesquisa e estudo de caso, agradecemos pela disponibilidade e pela contribuição valiosa para a realização deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos que de alguma maneira contribuíram para a minha formação e sucesso acadêmico na UFPE. Este é apenas o começo dessa jornada como engenheiro civil, e levarei comigo os ensinamentos, experiências e valores adquiridos durante minha passagem por esta prestigiosa instituição.

## RESUMO

Corpos hídricos superficiais interiores, como rios, lagos, reservatórios e geleiras, são componentes importantes do ciclo global da água e desempenham um papel insubstituível no ecossistema global e no sistema climático. No entanto, considerando as mudanças globais, questões relacionadas com a água, como escassez de água, inundações e poluição da água, surgiram em diferentes partes do mundo, colocando sérios desafios à segurança dos recursos hídricos. O objetivo deste estudo foi identificar alterações na área superficial do Reservatório do Jazigo, inserido na Bacia do Pajeú, no Semiárido pernambucano, a partir da sensibilidade espectral dos Índice de Água de Diferença Normalizada (NDWI) e o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) nos anos 2015, 2018 e 2021. Para tanto, foram utilizadas imagens do sensor OLI a bordo do satélite Landsat-8, obtidas para o mês de outubro, período de baixa precipitação pluviométrica afim de selecionar imagens com menor incidência de nuvens e minimizar possíveis efeitos de mistura espectral de pixels. A metodologia consistiu em avaliar mudanças na área superficial do reservatório num processo de extração da área de classes de uso do solo derivadas dos índices espectrais, por meio do método de classificação binária, buscando separar pixels “puros” de água. Nesse contexto, os pixels foram classificados em 0 a 1, separando pixels puros de água e não água (vegetação, ocupação e solo exposto), além disso, foram analisados uso e cobertura do solo por meio de cartas temáticas derivadas do NDVI. Os resultados mostraram uma melhor separação dos pixels para o NDWI, realizando uma maior distinção de água e não água, e delineamento de borda. O NDWI também proporcionou a identificação e delineamento da área superficial do corpo hídrico, porém obteve uma maior abrangência nos valores de pixels de água com o incremento de áreas de solo exposto com umidade, ou com presença de vegetação, resultando numa maior parcela de mistura espectral. O NDVI por sua vez apresentou um aumento de área da vegetação em correlação com a precipitação entre 2018 e 2021. Por fim, os resultados obtidos encontraram aumento na área ao longo dos anos por consequência de uma média de precipitação anual maior nos últimos anos na região.

**Palavras-chave:** Análise pluviométrica; imagens orbitais; índices espectrais.

## ABSTRACT

Inland surface water bodies, such as rivers, lakes, reservoirs and glaciers, are important components of the global water cycle and play an irreplaceable role in the global ecosystem and climate system. As a direct source of freshwater in human life, surface water plays a vital role in industrial manufacturing, sustainable economic development, food production and transportation. However, in the context of global changes, water-related issues such as water scarcity, floods and water pollution have emerged in different parts of the world, posing serious challenges to the security of water resources. The objective of this study was to identify changes in the surface area of the Jazigo Reservoir, located in the Pajeú Basin, in the semi-arid region of Pernambuco, based on the spectral sensitivity of the NDWI water and NDVI vegetation indices from 2015 to 2021. To this end, images were used of the OLI sensor on board the Landsat-8 satellite. The images were obtained for the month of October, a period of low rainfall in order to minimize possible effects of spectral mixing of pixels. The methodology consisted of evaluating changes in the surface area of the reservoir in a process of extracting the area of land use classes derived from spectral indices, using the binary classification method, seeking to separate “pure” water pixels. In this context, the pixels were classified from 0 to 1, separating pure water and non-water pixels (vegetation, occupation and exposed soil), in addition, land use and coverage were analyzed using thematic maps derived from the NDVI. The results showed a better separation of pixels for NDWI, achieving greater distinction between water and non-water, and edge delineation. The NDWI also provided the identification and delineation of the surface area of the water body, but achieved greater coverage in water pixel values with the increase in areas of exposed soil with moisture, or with the presence of vegetation, resulting in a greater portion of spectral mixing. The NDVI in turn showed an increase in vegetation area in correlation with precipitation between 2018 and 2021. Finally, the results obtained found an increase in the area over the years as a result of a higher average annual precipitation in recent years in the region.

**Keywords:** Rainfall analysis; orbital images; spectral indices.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma da metodologia para obtenção dos índices espectrais NDVI e NDWI.....	21
Figura 2 - Localização da área de estudo, Reservatório do Jazigo.....	22
Figura 3 - Visualização da Barragem do Jazigo, em MÊS/ANO.....	23
Figura 4 - Precipitação mensal da Estação 91, nos anos de 2018, 2018 e 2021.....	25
Figura 5 - Volume útil mensal do Reservatório Jazigo, de 2015 a 2021 .....	26
Figura 6 - Fluxograma das etapas para obtenção e análise dos mapas com os índices NDVI e NDWI .....	27
Figura 7 - Tabela do Excel para conferência de refletância dos índices espectrais. .	29
Figura 8 - Interface da ferramenta Calculadora Raster para aplicação das formulas dos índices. ....	30
Figura 9 - Cartas imagem representando a distribuição espacial de <i>pixels</i> do índice NDVI, do reservatório Jazigo e seu entorno, para os anos de 2015, 2018 e 2021 ...	32
Figura 10 - Mapeamento de uso e cobertura do solo da área de estudo, através do MapBiomas, para os anos de 2015, 2018 e 2021 .....	35
Figura 11 - Cartas imagem representando a distribuição espacial de <i>pixels</i> do índice NDWI, do reservatório Jazigo e seu entorno, para os anos de 2015, 2018 e 2021 ..	36
Figura 12 - Extração por binarização das áreas do reservatório para os anos analisados, pelo NDWI.....	38
Figura 13 - Extração das áreas do Reservatório Jazigo ao longo do tempo .....	40

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados do Satélite LANDSAT-8 .....	18
Tabela 2 - Bandas do satélite LANDSAT 8 .....	19
Tabela 3 - Dados hidrológicos para região de estudo, anual e durante o período de aquisição das imagens.....	24
Tabela 4 - Data de aquisição das cenas e características do OLI - LANDSAT-8.....	26
Tabela 5 - Áreas obtidas através do processo de binarização para o Reservatório Jazigo, nas datas estudadas.....	39

## LISTA DE ABREVIATURAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
EWI	Índice de Água Aprimorado
IWS	Índice de Superfícies de Água
MBWI	Índice de Água Multi-Banda
MNDWI	Índice da Diferença Normalizada Modificada
NDVI	Índice de Vegetação da Diferença Normalizada
NDWI	Índice de Água por Diferença Normalizada
NWI	Novo Índice de Água
OLI	Operational Land Imager
SAR	Sistema de Acompanhamento de Reservatórios
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Transverse Mercator
WRI	Índice de Proporção de Água

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1 OBJETIVOS .....	16
1.1.1 Objetivo geral .....	16
1.1.2 Objetivos específicos.....	16
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>16</b>
2.1 SENSORIAMENTO REMOTO .....	17
2.1.1 Satélite Landsat-8 .....	18
2.1.2 Parâmetros biofísicos de sensoriamento remoto .....	19
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>20</b>
3.1 ÁREA DE ESTUDO.....	21
3.2 DADOS HIDROLÓGICOS.....	24
3.3 DADOS ORBITAIS.....	26
3.4 PROCESSAMENTOS DAS IMAGENS E CÁLCULOS DOS ÍNDICES ESPECTRAIS: NDVI E NDWI .....	27
3.5 EXTRAÇÃO DA ÁREA SUPERFICIAL DO RESERVATÓRIO.....	30
3.6 VALIDAÇÃO DOS DADOS .....	31
<b>4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS DADOS</b> .....	<b>31</b>
4.1 NDVI.....	31
4.2 VALIDAÇÃO DO USO E COBERTURA DO SOLO.....	34
4.3 NDWI.....	35
4.4 MAPEAMENTO ESPAÇO TEMPORAL DA ÁREA SUPERFICIAL DO RESERVATÓRIO.....	37
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	<b>41</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>42</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A escassez de água é um dos problemas da humanidade que já tem sido uma realidade nos últimos anos, e apenas se evidencia ao passo que a população cresce. Segundo Oliveira (2007), esse forte crescimento acarreta um aumento na demanda de água e de serviços de infraestruturas relacionados. O Brasil é um país rico nesse recurso, mas seu território não usufrui de forma igualitária. Na região Nordeste do país, há uma extensa área que apresenta escassez de água, com atenção voltada ao Semiárido, onde ocorrem longos períodos de estiagem e baixa disponibilidade hídrica.

Os recursos hídricos superficiais são de grande valor para a humanidade, uma vez que oferecem uma ampla gama de serviços essenciais, mesmo sendo a menor parcela de água doce no planeta. Estes serviços incluem suporte à produção industrial e agrícola, regulação do clima regional e manutenção dos ecossistemas (Yu *et al.*, 2021; Zou *et al.*, 2018). Além disso, os corpos d'água de superfície desempenham papéis cruciais nos ciclos hidrológicos e biogeoquímicos em níveis local, nacional e global (Wang *et al.*, 2019). Essas áreas são altamente sensíveis tanto às mudanças climáticas quanto às atividades humanas, servindo, portanto, como indicadores fundamentais das diversas influências da alteração ambiental e da ação humana (Jin *et al.*, 2018).

Os métodos tradicionais de monitoramento das águas superficiais baseiam-se principalmente em levantamentos manuais no terreno ou em estações de medição estabelecidas. Embora a precisão dos dados adquiridos seja alta, é um trabalho demorado e de alto custo. Além disso, muitos corpos d'água estão em locais remotos e acidentados, e apenas dados de pontos limitados em séries temporais incompletas podem ser obtidos devido às limitações de fatores econômicos e de terreno (Li *et al.*, 2018). Recentemente, o desenvolvimento do Sensoriamento Remoto (SR) forneceu uma maneira de monitorar corpos d'água amplamente espalhados por vastas regiões durante longos períodos (Herndon *et al.*, 2020).

O Sensoriamento Remoto surge então como um meio presente em estudos da problemática em regiões de incidência de secas, sendo uma ferramenta importante para a pesquisa hidrológica, permitindo estimar a precipitação pluviométrica por meio de imagens de satélite com alta resolução espaço-temporal, por meio de sensores como o Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with

Stations (CHIRPS) e analisar a variação do uso do solo, por meio de índices espectrais, como o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) derivado de imagens geradas por sensores como o sensor OLI a bordo do satélite Landsat 8, considerado um bom indicador para identificar áreas de vegetação e mudanças de longo prazo em sua condição. Dentre suas diversas utilidades, é possível detectar variações na superfície da região que se estuda e presença de corpo hídrico. Inúmeras técnicas e algoritmos foram desenvolvidos para extrair água com base em imagens multiespectrais, entre os quais os métodos de índice espectral de água de bandas múltiplas são os mais populares, pois são simples, eficientes e reprodutíveis, especialmente para análises de longo prazo e em grande escala. Os índices de água são frequentemente baseados na refletância da superfície na faixa de bandas visíveis a bandas infravermelhas de ondas curtas (Xiong *et al.*, 2018). Ao aumentar a diferença de refletância entre os tipos de água e não-água, os índices podem ser usados para extrair água com valores ideais de limite de segmentação (Li *et al.*, 2021).

Quando se trata da extração de corpos d'água em uma vasta região, é importante reconhecer que o contexto terrestre, as condições atmosféricas e a qualidade da água podem ser complexos e exercer influência sobre a eficácia desse método. Nesse cenário, pesquisadores têm conduzido estudos abrangentes com o objetivo de aprimorar a detecção de corpos d'água, fazendo uso de diversos índices de água, considerando diferentes tipos de cenários, explorando fontes de dados multiespectrais e variadas resoluções espaciais. Tudo isso na tentativa de encontrar soluções que possam superar os desafios por esses fatores complexos.

Dentre os índices espectrais utilizados para detecção de paisagem vegetada e hídrica, tem-se o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI). O NDVI detecta mudanças sazonais e interanuais no desenvolvimento e atividades que acontecem na vegetação (Rouse *et al.*, 1973). Obtém-se a partir da banda do infravermelho próximo e a do vermelho, modelado a partir de dados espectrais para evidenciar as condições da cobertura vegetal em cada pixel da imagem de forma numérica, variando entre o intervalo de cada pixel em -1 a 1. O NDWI proposto por McFeeters (1996), utilizando-se bandas do verde e do infravermelho próximo com o propósito de delinear feições presentes nos ambientes aquáticos e realçar os corpos d'água, automatizando assim a distinção entre a vegetação terrestre e os solos.

A pesquisa em reservatórios desempenha um papel fundamental, exemplificado pelo reservatório de Jazigo, cujo objetivo principal é o armazenamento de água para irrigação das terras situadas acima e abaixo dele. As terras próximas à barragem têm visto uma transformação ao longo dos anos, afastando-se de sua especificidade original. Esta área também serve como fonte de água para agricultores e empresários, que utilizam para agricultura e consumo animal, dedicando a terra a pastagens e cultivos irrigados (Silva *et al.*, 2011).

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Identificar mudanças na paisagem do Reservatório Jazigo e seu entorno por meio da sensibilidade espectral dos índices de vegetação (NDVI) e de água (NDWI), em associação com dados hidrológicos, no período de baixa precipitação, nos anos 2015, 2018 e 2021.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- I. Identificar mudanças de uso e cobertura do solo, no entorno do reservatório utilizando o índice de vegetação NDVI .
- II. Identificar mudanças na área superficial do reservatório utilizando o índice espectral de água NDWI.
- III. Analisar por meio da sensibilidade espectral dos índices a capacidade de monitorar áreas de uso e ocupação do solo do bioma Caatinga em períodos de baixa precipitação nos anos de 2015, 2018 e 2021.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

A água é um recurso natural essencial para a economia de qualquer território nacional. É o insumo importantíssimo para a sobrevivência humana e dos animais, e para produção agrícola. A distribuição de água é dada de forma não homogênea tanto em termos espaciais e em questões de periodicidade. No Nordeste brasileiro, onde a evaporação é consideravelmente elevada, ocorre esvaziamento de açudes (Melo; Sales; Oliveira, 2011).

É necessário que o comportamento de reservatórios de pequeno porte e importância para atividades antrópicas como o da barragem do Jazigo seja constantemente observado, monitorado e estudado para que possa ter uma visão ampla do reservatório em diferentes espaços de tempo. Tendo em vista a relevância de empreendimentos para as pessoas da região, o sensoriamento remoto surge

como grande alternativa tecnológica e economicamente mais viável para estudo e diagnósticos da variabilidade de grandes áreas da superfície terrestre.

A utilização de parâmetros biofísicos como o NDVI e o NDWI possibilitam a constatação e magnitude das mudanças no ambiente hídrico da paisagem. No que concerne ao NDWI, baixos valores de parâmetros indicam ausência de água, caracterizando estresse hídrico na bacia hidrográfica e a perda de vigor vegetativo indicando déficit de precipitação gerando risco de desertificação da área.

## 2.1 SENSORIAMENTO REMOTO

O Sensoriamento Remoto (SR) é a arte e a ciência de obter informações sobre um objeto, área ou fenômeno sem que seja necessário ter contato físico direto com o mesmo objeto (Jensen, 2009).

Dados de sensoriamento remoto podem ser usados para estimar variáveis geofísicas e biofísicas. As utilizações mais comuns de dados de sensoriamento remoto são a modelagem de processos naturais (mudanças climáticas, eutrofização, desertificação, desastres naturais etc.) (Moraes, 1999).

O desenvolvimento de novas tecnologias e sensores capazes de coletar informações em diferentes partes do espectro eletromagnético trouxe uma importante contribuição para o progresso da pesquisa científica (Knust, 2007).

Tradicionalmente, o monitoramento da variabilidade das águas superficiais tem se baseado em observações in situ que quantificam o movimento (altura, extensão, fluxo) e a qualidade da água em canais de rios, lagos e zonas úmidas (OULARÉ et al., 2022). No entanto, as redes in situ são escassas e distribuídas de forma desigual, sobretudo em zonas isoladas, de difícil acesso ou com problemas de segurança. Além disso, quando existem, essas medidas são na maioria das vezes difíceis de obter devido à sua heterogeneidade no espaço e no tempo (ALSDORF et al., 2016)

Dados derivados de Sensoriamento Remoto, por meio de produtos como os índices espectrais de água, como o NDWI (Normalized Difference Water Index) (McFeeters, 1996), o MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) (XU, 2006), fornece uma plataforma conveniente para monitorar as mudanças de longo prazo dos corpos de água superficiais.

### 2.1.1 Satélite Landsat-8

A série de satélites LANDSAT teve início na segunda metade da década de 1960, a partir de um projeto desenvolvido pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) para monitorar os recursos naturais da Terra, cujas características são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados do Satélite LANDSAT-8

Instrumento/Sensor	OLI e TIRS
Operadora/Instituição Responsável	NASA ( <i>National Aeronautics and Space Administration</i> )
País	Estados Unidos
Situação Atual	Ativo
Lançamento	02/11/2013
Altitude	705 km
Inclinação	98,2°
Órbita	Circular, Polar, Heliossincrona
Faixa Imageada	185 Km
Tempo de duração da Órbita	99 min.
Horário de Passagem	10h / 12h
Período de Revisita	16 dias
Resolução Espacial	Pancromatico: 15 m   Multiespectral:30 m Termal: 100 m reamostrada para 30m

Fonte: INPE (2023).

O primeiro a ser lançado, o LANDSAT-1, carregava dois instrumentos, uma câmera RBV e um MSS. Operou por cinco anos e realizou mais de 300.000 imagens cobrindo repetidamente a superfície da Terra (INPE, 2021). Todos os 8 satélites da Série lançados possuem imagens multiespectrais. A última imagem LANDSAT-8 da série usa dados multiespectrais OLI (Operational Land Sensors) e TIRS (Thermal Infrared Sensor) com resolução de 15-30 metros, corrigidos, todos no catálogo. Os produtos estão disponíveis gratuitamente online no formato GeoTIFF.

A plataforma LANDSAT-8 opera com dois instrumentos imageadores, sendo o primeiro, *Operational Land Imager* (OLI), com nove bandas espectrais incluindo a banda pancromática e o segundo é o *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) com duas

bandas de pixel de 100 metros, processadas e disponibilizadas em 30 metros, para coincidir com a maioria das bandas multiespectrais do sistema imageador OLI (USGS, 2022). Conforme a Tabela 2 que consta as bandas multiespectrais.

Tabela 2 - Bandas do satélite LANDSAT 8

Banda	Comprimento de Onda ( $\mu\text{m}$ )	Resolução espacial (m)
Banda 1 - Visível Ultra-Azul	0,43 – 0,45	30
Banda 2 - Visível Azul	0,45 – 0,51	30
Banda 3 - Visível Verde	0,53 – 0,59	30
Banda 4 - Visível Vermelho	0,64 – 0,67	30
Banda 5 - Infravermelho Próximo	0,85 – 0,88	30
Banda 6 - Infravermelho Médio/SWIR 1	1,57 – 1,65	30
Banda 7 - Infravermelho Médio/SWIR 2	2,11 – 2,29	30
Banda 8 - Pancromática (PAN)	0,50 – 0,68	15
Banda 9 - Cirrus	1,36 – 1,38	30
Banda 10 - Infravermelho Termal/TIRS 1	10,60 – 11,19	reamostradas para 30bm
Banda 11 - Infravermelho Termal/TIRS 2	11,50 – 12,51	reamostradas para 30bm

Fonte: *United States Geological Survey* (2023).

### 2.1.2 Parâmetros biofísicos de sensoriamento remoto

O índice espectral é resultado de operações matemáticas entre valores numéricos de pixels das bandas de uma imagem. Existem os índices de vegetação que realçam o comportamento espectral da vegetação e se correlacionam com os parâmetros biofísicos da vegetação (Epiphanyo *et al.*, 2014), como também existem índices de água que se relacionam com a identificação de superfícies hídricas.

Xie *et al.* (2016) combinaram um conjunto de NDWIs calculados por diferentes pares de bandas de imagens do WorldView-2 e o índice morfológico de sombra para extrair água superficial. Sánchez *et al.* (2018) e Wen *et al.* (2021) combinaram um conjunto de índices de água existentes ponderados para construir um ou mais novos

vetores e extraiu água com base neles. Ferriby *et al.* (2021) e Yu *et al.* (2020) também coletaram os índices hídricos existentes e permitiram que identificassem a água individualmente.

O Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI), concebido por (McFeeters, 1996) tem por objetivo realçar e delinear automaticamente as águas abertas através da operação de bandas multiespectrais. O método é uma variação do NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), e combina as bandas verde e infravermelho próximo.

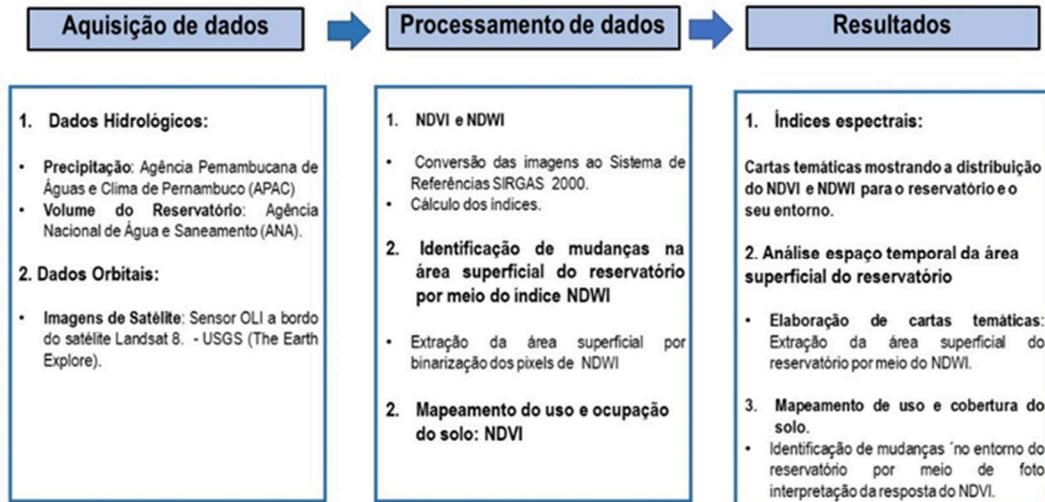
O NDWI gera uma imagem, cujos valores dos pixels variam de -1 a 1, sendo 0 o limiar entre os alvos que são água e o que não são água. Ou seja: todos os pixels com valor igual ou menor que zero não são água ( $NDWI \leq 0$ ), e todos os pixels que possuem valor maior que 0 são água ( $NDWI > 0$ ). Assim, na imagem gerada pelo NDWI, os corpos d'água são evidenciados, conferindo maior valor de brilho, enquanto as feições de solo e vegetação são minimizadas (Gil; Padovani; Coelho, 2019).

### **3 METODOLOGIA**

A metodologia esta compreendida em três etapas: aquisição de dados, processamento de dados e resultados. A Figura 1 representa o fluxograma da metodologia.

A metodologia empregada foi realizada corfome a Figura 1 em três etapas: na primeira etapa foi realizada a aquisição de dados em que foi feita a seleção das cenas, considerando fatores como ampla cobertura e ausência de nuvens e disponibilidade dos dados. A segunda etapa tratou-se do processamento digital das imagens. Em que, foram processados os índices NDVI e NDWI para as imagens do sensor OLI a bordo do satélite Landsat -8 para os anos de 2015, 2018 e 2021 no período de baixa precipitação na região(Outubro).

Figura 1 - Fluxograma da metodologia para obtenção dos índices espectrais NDVI e NDWI



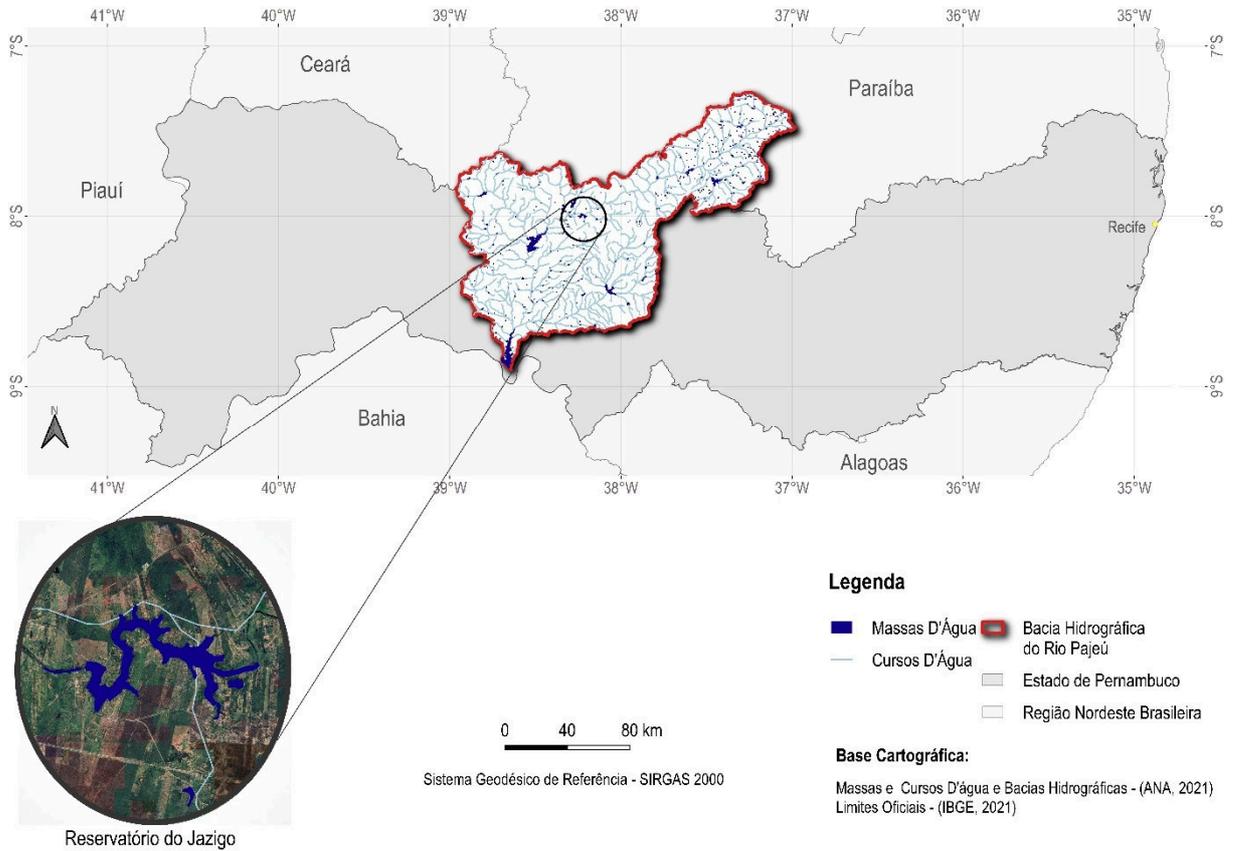
Fonte: Autor (2023).

Na terceira etapa foram elaboradas as cartas temáticas para cada ano investigado, utilizadas para identificar alterações na área superficial do reservatório por meio da binarização de pixels de NDWI e do seu entorno por meio de fotointerpretação da resposta espectral do NDVI ao longo dos anos. Esses dados foram validados por meio das cartas temáticas de mapeamento de uso e cobertura do solo do programa MAPBIOMAS (MAPBIOMAS, 2023). Em seguida os resultados das áreas superficiais foram correlacionados com o volume do reservatório e a precipitação na área de estudo.

### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

A pesquisa foi realizada tendo como área de estudo o Reservatório do Jazigo (Figura 2 e Figura 3) e o seu entorno, construído em 1983 pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS), localizado no Semiárido Pernambucano, no município de Serra Talhada, de coordenadas geográficas (08° 11' 58,64"S, 38° 32' 31,98"W). Com capacidade máxima de armazenamento de 15,54 (hm<sup>3</sup>) de água, pertencente à Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú.(ANA, 2023)

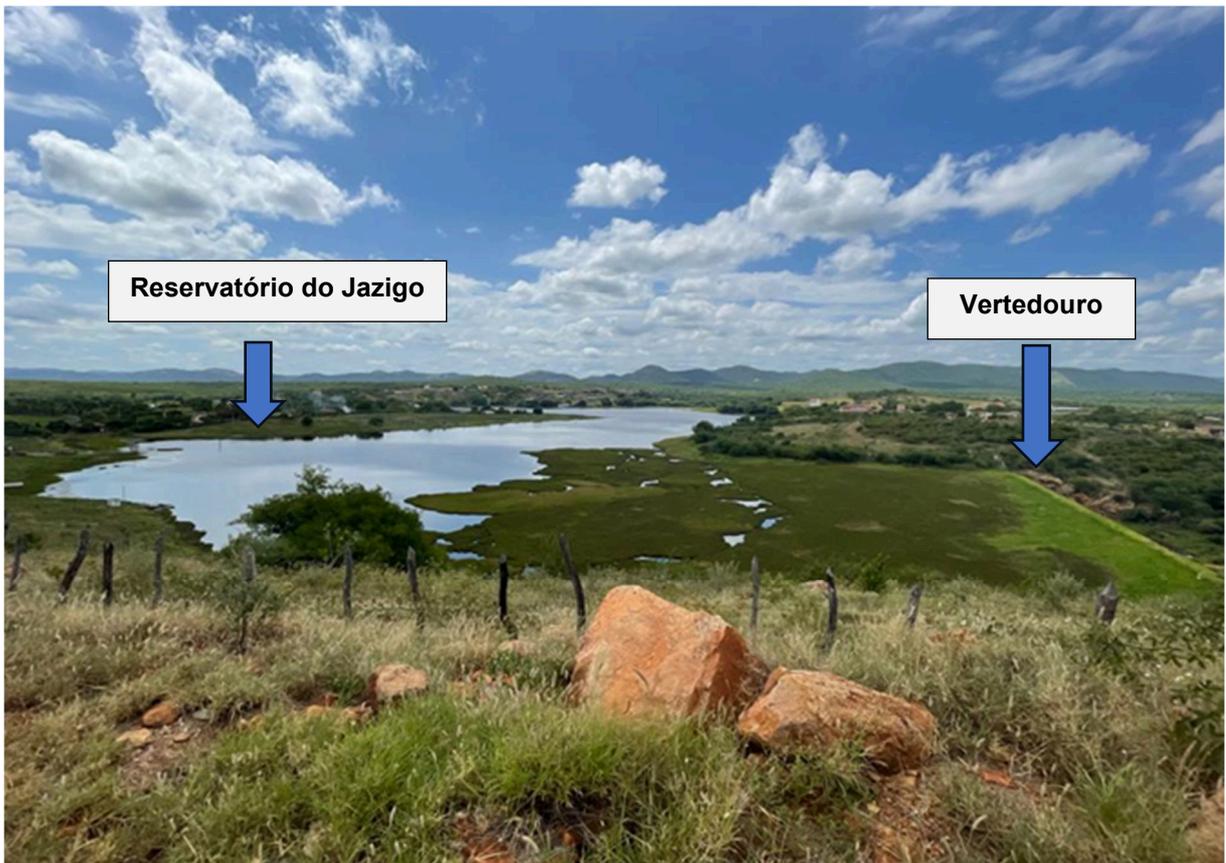
Figura 2 - Localização da área de estudo, Reservatório do Jazigo



Fonte: Autor (2023).

A Bacia Hidrográfica do Pajeú limita-se ao norte com os estados do Ceará e Paraíba, ao sul com o Grupo de Bacias de Pequenos Rios Interiores e a bacia do Rio Moxotó, a leste com a bacia do Rio Moxotó e o Estado da Paraíba, e a oeste com a bacia do Rio Terra Nova e o Grupo de Bacias de Pequenos Rios Interiores. Está localizada entre  $07^{\circ} 16' 20''$  e  $08^{\circ} 56' 01''$  de latitude sul, e  $36^{\circ}59' 00''$  e  $38^{\circ}57' 45''$  de longitude oeste.

Figura 3 - Visualização da Barragem do Jazigo, em MÊS/ANO



Fonte: Autor (2023).

O Rio Pajeú nasce no município de Brejinho e percorre uma extensão de aproximadamente 353 km. Inicialmente apresenta sentido nordeste-sudoeste, até desaguar no lago de Itaparica, no Rio São Francisco. Seu regime fluvial é intermitente e, ao longo do seu curso, margeia as cidades de Itapetim, Tuparetama, Ingazeira, Afogados da Ingazeira, Carnaíba, Flores, Calumbi, Serra Talhada e Floresta. Seus afluentes principais são: pela margem direita, os riachos Tigre, Barreira, Brejo, São Cristóvão e Belém; e, pela margem esquerda, os riachos do Cedro, Quixabá, São Domingos, Poço Negro e do Navio) (APAC, 2022).

A Bacia Hidrográfica do Pajeú ocupa uma área de 16.685,63 km<sup>2</sup>, correspondendo a 16,97% da área do Estado e sendo assim a maior bacia do estado de Pernambuco. Possui uma área de drenagem que envolve 27 municípios dos quais 7 possuem suas sedes inseridas na bacia (Carnaíba, Carnaubeira da Penha, Floresta, Igaraci, Itacuruba, Mirandiba e São José do Belmonte).

### 3.2 DADOS HIDROLÓGICOS

#### a) Precipitação

Os dados de precipitação foram adquiridos através de estações de monitoramento da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2023) e Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC, 2022) – Estação 91 no município de Calumbi - PE, conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Dados hidrológicos para região de estudo, anual e durante o período de aquisição das imagens

Ano	Precipitação Anual (mm)	Precipitação mensal - outubro (mm)	Dias de Chuva em outubro
2015	437,1	0	0
2018	607,7	0	0
2021	817,9	35,4	5

Fonte: ANA (2023); APAC (2022).

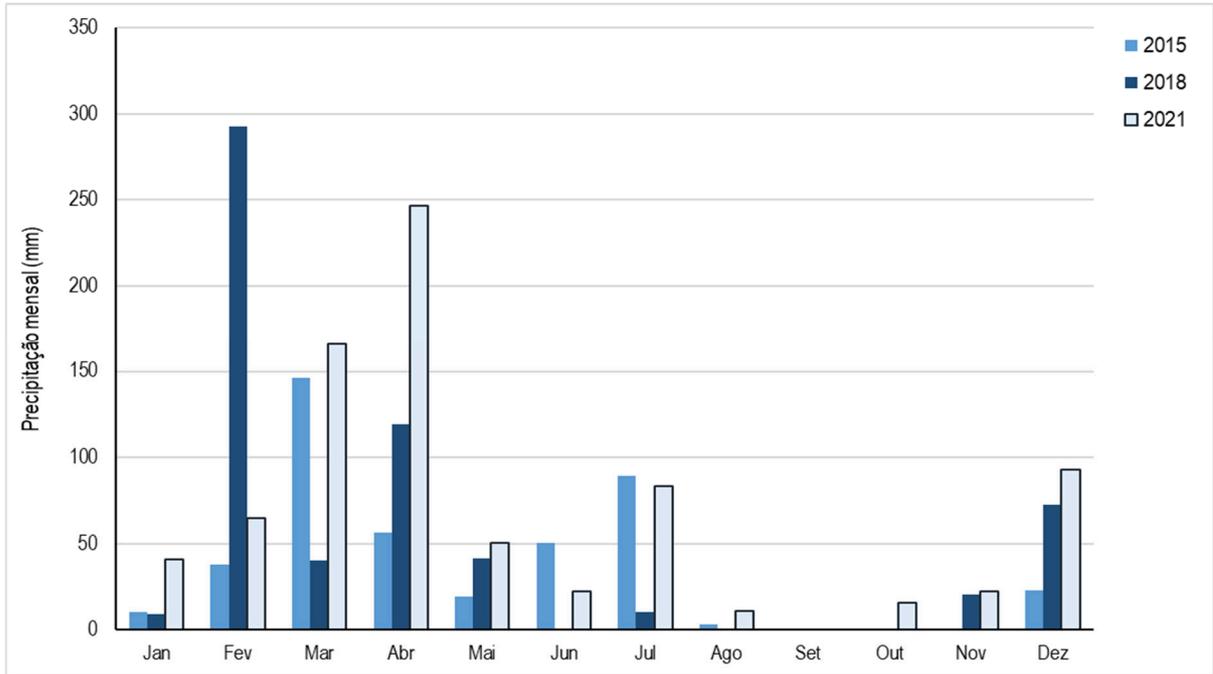
Na Figura 4, observou-se a distribuição da precipitação mensal dos anos 2015, 2018 e 2021.

Constatou-se que os meses de agosto a novembro de 2015 (Figura 4) totalizaram 3 mm, o que pode ser classificado como muito baixo em relação aos dados captados dos meses restantes. De agosto a outubro de 2018 foi possível identificar (Figura 4) o registro de 0 mm, o que impacta diretamente no acréscimo de volume útil do reservatório.

Em relação aos meses correspondentes ao período de aquisição das imagens orbitais, a Tabela 3 apresenta dados para o mês de outubro, que é o mês predominante para as medições. Em 2015 e 2018 a precipitação registrada para esse mês foi de 0,0 mm; em 2021 ocorreu precipitação, atingindo 35,4 mm. Ao analisar os dados fornecidos, observou-se um aumento progressivo na precipitação anual e uma precipitação atípica no mês de outubro de 2021.

A comparação dos dados dos anos de estudos evidenciou a ocorrência de uma maior precipitação pluviométrica no ano de 2021 com um total de precipitação pluviométrica anual de 817,9 mm, enquanto para o ano de 2015 a precipitação pluviométrica anual foi de 437,1 mm.

Figura 4 - Precipitação mensal da Estação 91, nos anos de 2015, 2018 e 2021

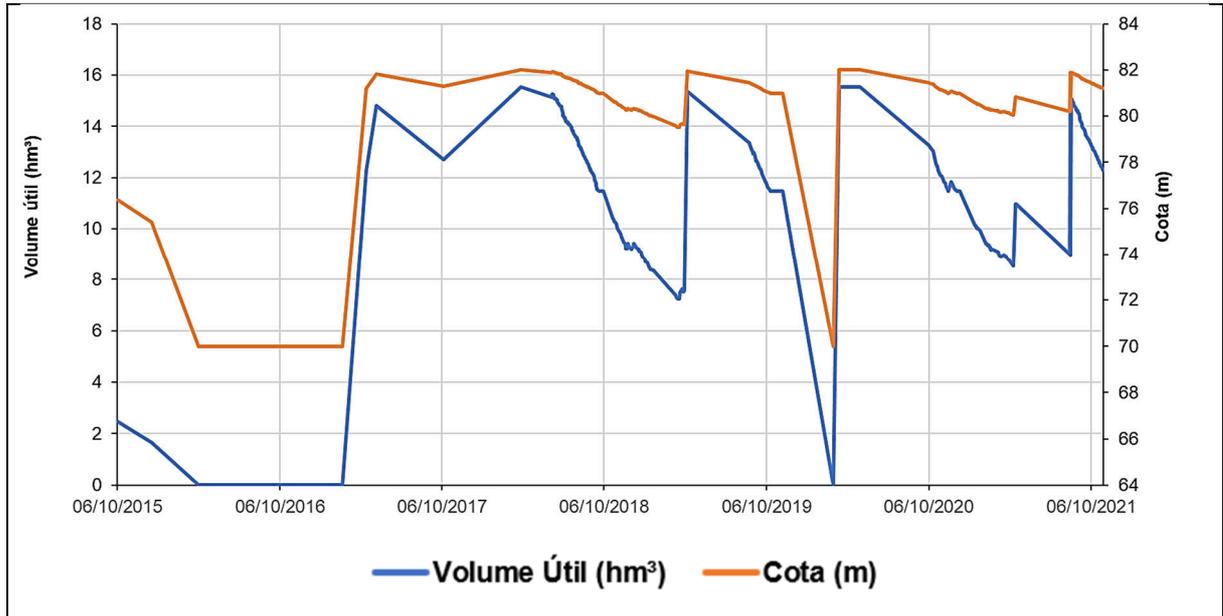


Fonte dos dados: APAC (2022). Fonte: Autor (2023).

## b) Volume útil do Reservatório Jazigo

Para obtenção da representação gráfica dos dados de volume do reservatório conforme a Figura 5, os dados foram coletados pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) - Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR), para o período de 2017 – 2018 em relação ao reservatório Jazigo em Pernambuco:

Figura 5 - Volume útil mensal do Reservatório Jazigo, de 2015 a 2021



Fonte: ANA-SAR (2023).

### 3.3 DADOS ORBITAIS

Foram utilizadas cenas de imagens orbitais do satélite OLI - Landsat 8, órbita 218 e ponto 067, composta por bandas espectrais adquiridas gratuitamente através do site do *United States Geological Survey* (USGS, 2023). As imagens orbitais e os arquivos vetoriais foram reprojatados para o Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas), UTM fuso 24 Sul, conforme as características apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Data de aquisição das cenas e características do OLI - LANDSAT-8

<b>Datas de aquisição das cenas</b>	<b>Características Sensor OLI – LANDSAT-8</b>	
04/10/2015	Horário de passagem	10 / 12h
28/10/2018	Resolução Radiométrica	12 bits
12/10/2021	Resolução Espacial	30 m
-	Resolução Temporal	16 dias
Fonte de aquisição	Fonte de aquisição	United States Geological Survey (USGS)

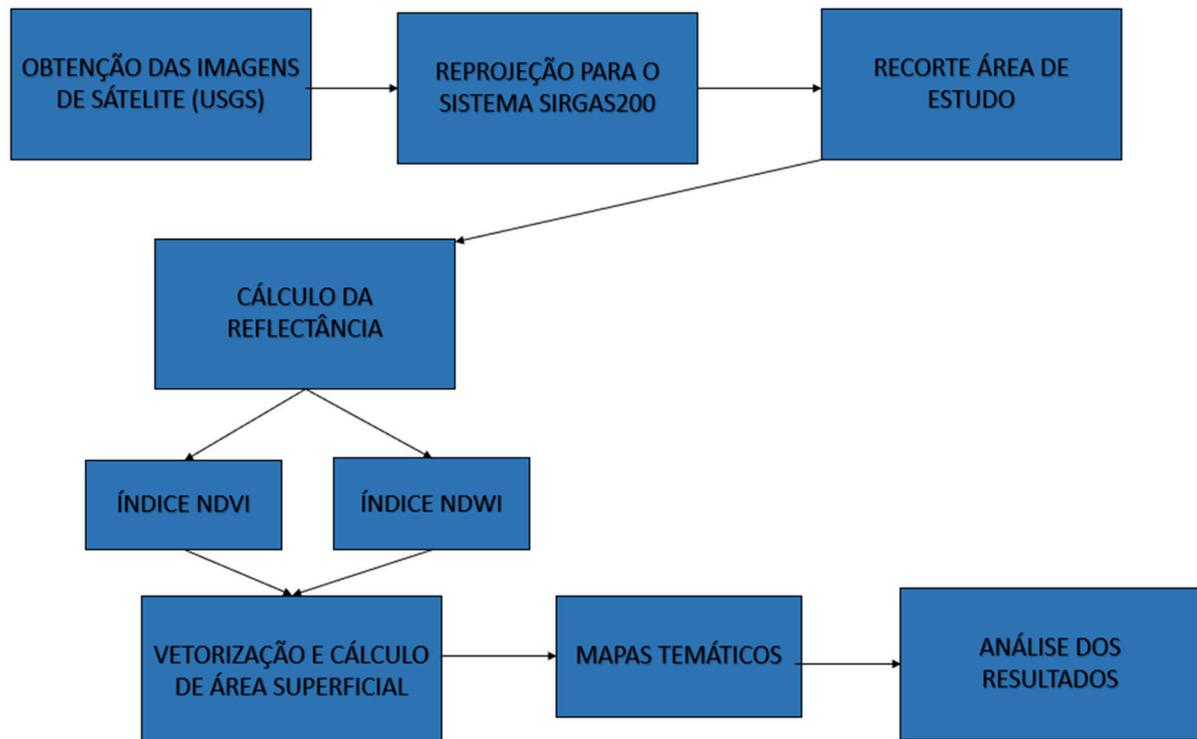
Fonte: USGS (2023).

As imagens foram obtidas para o período de baixa incidência pluviométrica da região de estudo, que compreende os meses de agosto a dezembro, escolhidos a fim de identificar possíveis efeitos que a queda de precipitação possa ter no reservatório e no seu entorno.

### 3.4 PROCESSAMENTOS DAS IMAGENS E CÁLCULOS DOS ÍNDICES ESPECTRAIS: NDVI E NDWI

Após a aquisição das imagens, foi realizado o processamento considerando o recorte da cena de acordo com a área de interesse. Para aquisição dos parâmetros biofísicos NDVI e NDWI utilizou-se a ferramenta “Calculadora Raster” do software gratuito de livre acesso QGIS versão 3.24.1– Las Palmas. Na Figura 6, tem-se descritas as etapas para o processamento digital da imagem e criação dos mapas temáticos contendo o resultado dos parâmetros biofísicos.

Figura 6 - Fluxograma das etapas para obtenção e análise dos mapas com os índices NDVI e NDWI



Fonte: Autor (2023).

No presente estudo, foram utilizadas as bandas 4 a 5 do sensor OLI, através do software QGIS, sendo inicialmente utilizados os comandos Raster / Calculadora Raster, para o NDVI e as bandas 3 e 5 para o NDWI com os mesmos comandos.

O processamento das imagens foi em conformidade com Silva *et al.* (2016), para conversão dos valores em nível de cinza (ND) do sistema sensor OLI Landsat 8 para reflectância espectral. Utilizou-se coeficientes radiométricos disponibilizados no arquivo de metadados das imagens USGS (2020). Para tanto, os números digitais de cada pixel e banda, foram convertidos para reflectância planetária a partir de fatores aditivo e multiplicativo, reportados no ficheiro de metadados da imagem. No entanto, foi necessário corrigir a reflectância de acordo com a Equação 1.

$$\rho_{\lambda i} = (A_{\rho i} + M_{\rho i} \cdot ND_i) \quad (1)$$

em que:  $\rho_{\lambda i}$  (adimensional) é a reflectância planetária no topo da atmosfera de cada banda  $i$ ;  $A_{\rho i}$  é o fator aditivo de redimensionamento de cada banda (disponível no arquivo metadados da imagem);  $M_{\rho i}$  é o fator multiplicativo de redimensionamento de cada banda (disponível no arquivo metadados da imagem);  $ND_i$  é o número digital correspondente a intensidade do pixel de cada banda.

A determinação do NDVI para o OLI/Landsat 8 se deu a partir da razão entre a diferença das reflectâncias das faixas do infravermelho próximo ( $\rho_5$ ) e vermelho ( $\rho_4$ ) e a soma das mesmas, bandas 5 e 4, como ilustra a Equação 2 (Rouse *et al.*, 1973):

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}} = \frac{\rho_5 - \rho_4}{\rho_5 + \rho_4} \quad (2)$$

Já para o Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI) proposto por McFeeters (1996), utilizaram-se bandas do verde e do infravermelho próximo, as faixas de comprimento de onda correspondem às bandas 3 e 5, conforme a Equação 3.

$$NDWI = \frac{\rho_{green} - \rho_{NIR}}{\rho_{green} + \rho_{NIR}} = \frac{\rho_3 - \rho_5}{\rho_3 + \rho_5} \quad (3)$$

Ao final de todo processamento no software QGIS, um pixel foi escolhido aleatoriamente para verificar o processamento do NDVI e NDWI no Excel (Figura 7). Feita a verificação dos índices espectrais, foram obtidos os valores estatísticos da imagem correspondentes aos dados de mínimo, máximo, médio e desvio padrão.

Todos os índices obtidos acessando cada camada de índice espectral por vez no software QGIS através das Propriedades da Camada e Propriedades de Metadata. Processo este que foi repetido para obtenção dos Histogramas de cada camada através das Propriedades da Camada e Histograma.

Para obtenção da área superficial do corpo hídrico foi utilizado o Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI), proposto por McFeeters (1996). Uma vez que este possibilita geoespacializar corpos hídricos, permitindo inclusive definir a área superficial ou espelho d'água. Foi realizado então o processamento do NDWI pelo comando Calculadora Raster (Figura 8) para evidenciar somente a representação do corpo hídrico ( $NDWI > 0$ ).

Figura 7 - Tabela do Excel para conferência de refletância dos índices espectrais.

INDICES ESPECTRAIS				
CONFERIR COM OS DADOS DA REFLECTANCIA E INDICES ESPECTRAIS				
BANDA	Reflectancia (p l) (IMAGEM)	NDVI	NDWI	
		0,0122586	-0,00998217793	
B3	0,0761592	$NDVI = \frac{\rho_{B5} - \rho_{B4}}{\rho_{B5} + \rho_{B4}}$	$NDWI = \frac{\rho_{B3} - \rho_{B5}}{\rho_{B3} + \rho_{B5}}$	
B4	0,0758132			
B5	0,077695			
INDICES ESPECTRAIS	MAXIMO	MEDIO	MINIMO	DESVIO PADRAO
NDVI	0,865166724	0,281404257	-0,989473701	0,179150705
NDWI	0,993045211	-0,335203956	-0,757040381	0,191105781

Fonte: Autor (2023).



Resultando nas áreas ocupadas pelas classes binarizadas para cada ano conforme o respectivo índice. O processo de binarização, ou seja, este tipo de classificação foi baseado no modelo de presença e não presença. Dessa forma, como Silva Junior *et al.* (2021), o processo seguiu o critério de  $(f(x,y) < \sigma)$ , em que, o conjunto de pixels classificados recebe o valor 1 (presença) e  $(f(x,y) > \sigma)$  recebe o valor de 0 (não presença). Onde,  $f(x,y)$  é função que representa a imagem a ser binarizada gerada por cada índice, e “ $\sigma$ ” é a média obtida pela estatística zonal da seleção amostral realizada para as classes de vegetação, presença antrópica e água (reservatório). Dessa forma, além de separar as classes de interesse foi possível efetuar o cálculo de suas áreas.

### 3.6 VALIDAÇÃO DOS DADOS

Os dados obtidos com as cartas temáticas de NDWI e NDVI foram validados a partir de carta temáticas de uso e ocupação do solo da plataforma MapBiomas.

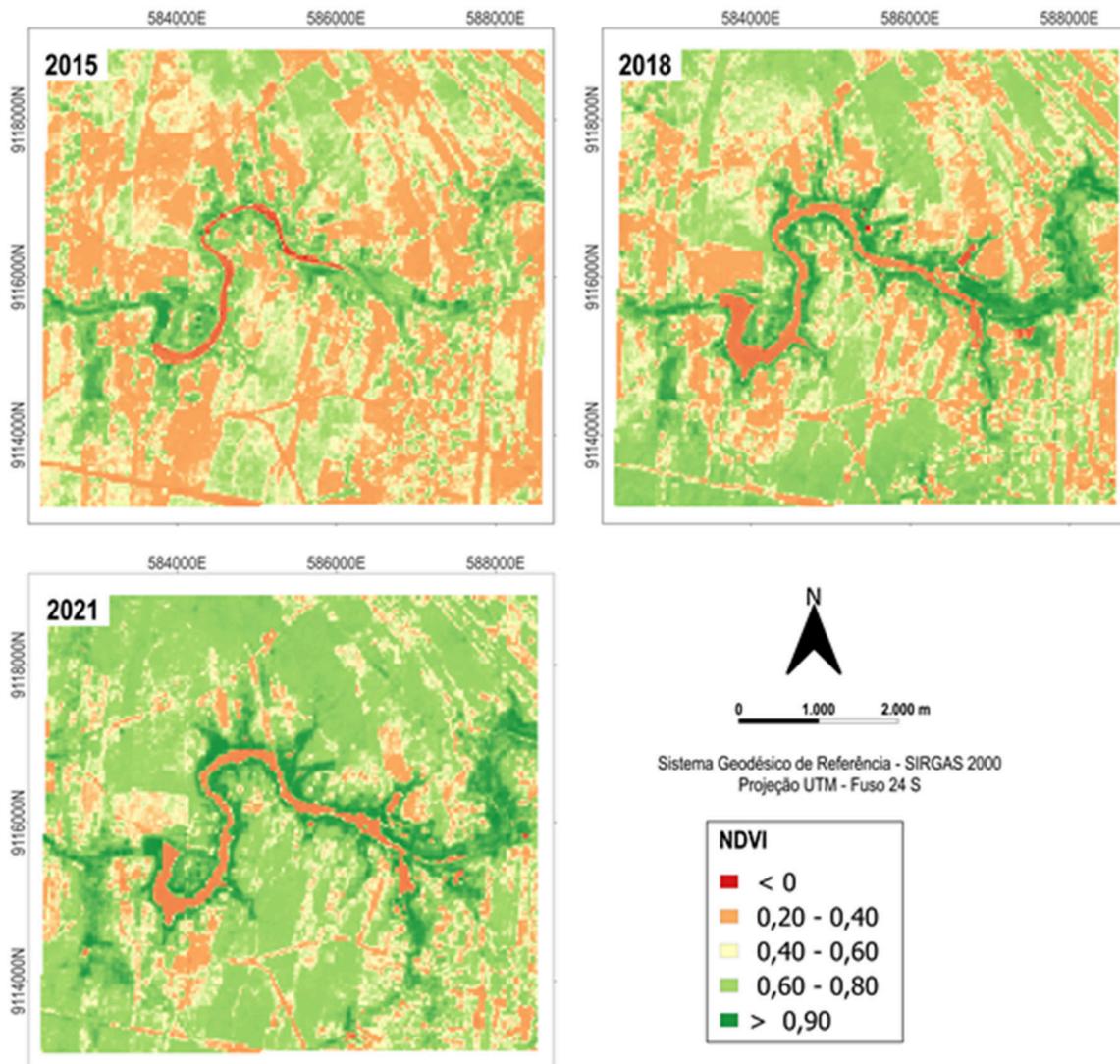
O projeto MAPBIOMAS é uma iniciativa brasileira dedicada ao Mapeamento Anual de Cobertura e Uso do Solo do Brasil. Ele é resultado da colaboração de uma rede de especialistas em áreas como sensoriamento remoto, biomas, usos da terra, sistemas de informação geográfica (SIG) e ciência da computação. Esse projeto utiliza recursos de processamento em nuvem e algoritmos classificadores automatizados, que foram desenvolvidos e são operados por meio da plataforma Google Earth Engine. Isso possibilita a criação de uma série histórica de mapas anuais que descrevem a cobertura e o uso da terra em todo o território brasileiro (MAPBIOMAS, 2023).

## 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS DADOS

### 4.1 NDVI

Através da metodologia aplicada foram geradas cartas georreferenciadas (Figura 9) do sensor OLI, a bordo dos satélites Landsat-8, representando a distribuição espacial do índice NDVI dos anos 2015, 2018 e 2021.

Figura 9 - Cartas imagem representando a distribuição espacial de *pixels* do índice NDVI, do reservatório Jazigo e seu entorno, para os anos de 2015, 2018 e 2021



Fonte: Autor (2023).

Ao analisar os resultados obtidos, as zonas com comportamentos negativos no NDVI foram bem reconhecíveis (entre laranja e vermelho) e, as de comportamentos positivos (verde) representaram *pixels* que correspondem possivelmente a regiões densamente vegetadas ou de porte rasteiro, em que, a área que envolve o reservatório do Jazigo, apresentou uma variação entre 0,6 e 0,9.

A precipitação observada no Reservatório do Jazigo em outubro de 2021 trouxe um aumento significativo na umidade do solo e na disponibilidade de água

para a vegetação circundante. Isso teve um impacto direto na melhoria do NDVI na região. Os sensores remotos, como os satélites de observação da Terra, puderam detectar esse aumento na atividade vegetal devido à precipitação e traduzi-lo em valores mais elevados do NDVI.

O NDVI é um índice de vegetação amplamente utilizados para monitorar a saúde e a produtividade da vegetação com base em dados de sensoriamento remoto (Jacques *et al.*, 2014; Cunha *et al.*, 2015; Souza; Ribeiro Neto; Souza, 2021). Conforme Barbosa *et al.* (2019) e Prudnikova *et al.* (2019), o comportamento espectral do NDVI em reservatórios do Semiárido brasileiro podem variar de acordo com fatores como sazonalidade, condições climáticas, tipo de vegetação e uso da terra na área em questão. Por exemplo, por Silva Junior *et al.* (2021), o aumento da incidência pluviométrica causou um aumento do corpo hídrico do reservatório em 80% para o NDVI e 82% para o SAVI de 2016 a 2021 bem como um aumento da área de vegetação ciliar de 92% para o NDVI e 95% para o SAVI, respectivamente.

Em reservatórios do Semiárido brasileiro, onde as condições climáticas geralmente são mais secas e as coberturas vegetais são menos densas, o comportamento espectral do NDVI apresenta algumas características específicas (Westinga *et al.*, 2020). Durante períodos de estiagem prolongada, é possível que os valores do NDVI sejam mais baixos, indicando uma redução na atividade vegetal das matas ciliares e estresses hídricos (Shimabukuro; Ponzoni, 2019). Em áreas onde predominam vegetações nativas adaptadas ao clima semiárido, foi possível observar uma resposta espectral diferente em comparação com áreas onde a vegetação nativa no entorno do reservatório (Silveira *et al.*, 2018).

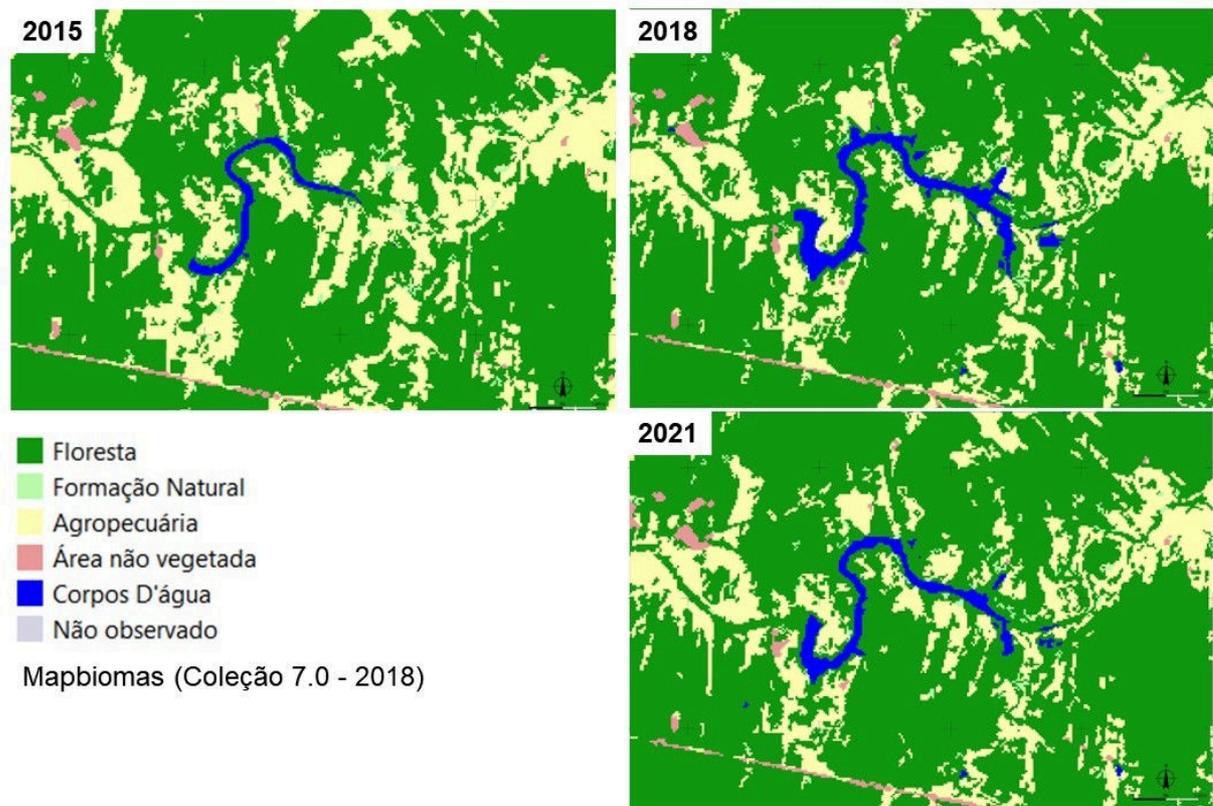
Quando se compararam a configuração verde das datas do NDVI (Figura 9) e o uso e ocupação do solo pelo MapBiomias (Figura 10), detectou-se em ambas as Figuras, a presença marcante de vegetação (pixel com maiores valores) na região superior da bacia do rio Pajeú, também como menores valores do NDVI na região central da bacia. Comprovando a similaridade entre os NDVI's processados e o uso e ocupação do solo pelo MapBiomias. Ainda enfatizando essa afirmativa, Lourenço *et al.* (2021) salientaram que a avaliação das massas d'água e vegetação de bacias hidrográficas, a partir de índices espectrais e classificação do MapBiomias, pode ser utilizada como uma ferramenta complementar para o monitoramento dos recursos hídricos e vegetais.

## 4.2 VALIDAÇÃO DO USO E COBERTURA DO SOLO

O projeto MAPBIOMAS é uma iniciativa brasileira dedicada ao Mapeamento Anual de Cobertura e Uso do Solo do Brasil. Ele é resultado da colaboração de uma rede de especialistas em áreas como sensoriamento remoto, biomas, usos da terra, sistemas de informação geográfica (SIG) e ciência da computação. Esse projeto utiliza recursos de processamento em nuvem e algoritmos classificadores automatizados, que foram desenvolvidos e são operados por meio da plataforma Google Earth Engine. Isso possibilita a criação de uma série histórica de mapas anuais que descrevem a cobertura e o uso da terra em todo o território brasileiro (MAPBIOMAS, 2018).

Com a finalidade de validar as informações obtidas com a distribuição dos pixels de NDVI, foram elaboradas cartas temáticas com o mapeamento de uso do solo fornecido pelo Mapbiomas coleção 7.0-2018 (Figura 10). Por meio da carta foi possível identificar uma presença elevada de áreas de solo exposto (agropecuária e não vegetada), representada por áreas de agropecuária e um crescimento gradativo da área do reservatório ao longo dos anos, corroborando com os dados do NDVI (Figura 9). Gomes *et al.* (2017) e Lima *et al.* (2017) apresentaram aplicações dessa ferramenta para analisar o uso e cobertura dos solos de Petrolândia e Brejinho, Pernambuco, respectivamente, no período de 2000 a 2016. E Almeida *et al.* (2018b), que investigaram a variabilidade da cobertura do solo na bacia hidrográfica do Rio Capibaribe, através do NDVI e a utilização de mapas de cobertura e uso do solo gerados através do MAPBIOMAS da Coleção 2.3.

Figura 10 - Mapeamento de uso e cobertura do solo da área de estudo, através do MapBiomas, para os anos de 2015, 2018 e 2021



Fonte: Mapbiomas (2023).

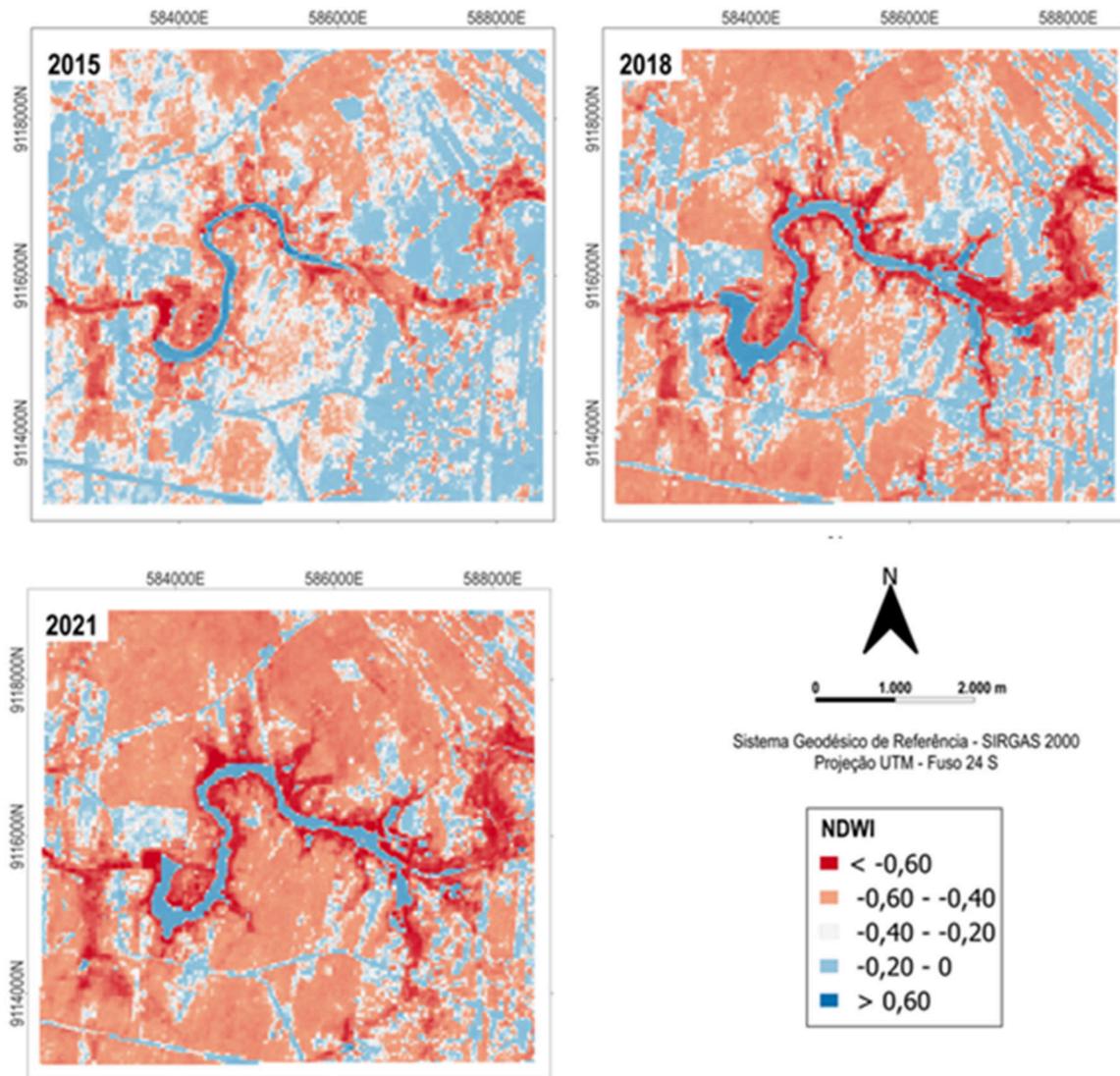
#### 4.3 NDWI

Conforme a Figura 11, foram obtidas as cartas georreferenciadas do sensor OLI, a bordo dos satélites Landsat-8, representando a distribuição espacial do índice NDWI.

Ao analisar os resultados obtidos, as zonas com comportamentos negativos no NDWI foram bem reconhecíveis (entre laranja e vermelho) e, as de comportamentos positivos (azul) representam áreas onde os *pixels* correspondem a água, em que, a área que envolve o reservatório do Jazigo, apresentou uma variação entre 0,0 e 0,6. Para o ano de 2015 por exemplo, observaram-se uma menor quantidade de pixels que corresponderam a água. Foi visto um aumento na área ocupada pelo reservatório que em 2018, apresenta-se como corpo hídrico integrante da região, em seguida à medida que avançam os anos ocorre um aumento de pixels com valores positivos na área, representando um aumento da massa d'água na região. O aumento da massa d'água na região é mais evidente

entre os anos de 2018-2021, onde ambos os índices apresentaram um notável aumento no quantitativo de pixels que variaram de 0,0 até 0,6.

Figura 11 - Cartas imagem representando a distribuição espacial de *pixels* do índice NDWI, do reservatório Jazigo e seu entorno, para os anos de 2015, 2018 e 2021



Fonte: Autores (2023).

Esse comportamento de pixels com valores negativos para os corpos hídricos condiz com estudos de Medeiros *et al.* (2022), que realizaram na região semiárida de Patos-PB, com aplicação de imagens provenientes do satélite do Landsat 8/OLI, avaliando as possíveis mudanças na vegetação sucedidas a partir de diferentes intensidades pluviométricas nos anos de 2014 e 2015. Para o período seco, realizou-se uma análise comparativa entre os anos, no qual os autores encontraram

decréscimo nos valores de NDVI, com resultados máximos variando de 0,28 para 0,24.

O NDWI usa as bandas de comprimento de onda espectral verde e NIR: maximiza a refletância de um corpo de água na banda verde enquanto minimiza a na banda NIR. Como resultado, as características hídricas aumentam os valores positivos do NDWI, enquanto uma suposição comum é que valores nulos ou negativos do NDWI indicam superfícies não-aquáticas (por exemplo, podem revelar a presença de vegetação e solo). Descobriu-se que o NDWI é capaz de identificar pixels de água com bastante precisão e, como varia quase linearmente com a espessura da água líquida, também é um dado relevante para mudanças na extensão das águas superficiais abertas (McFeeters, 1996).

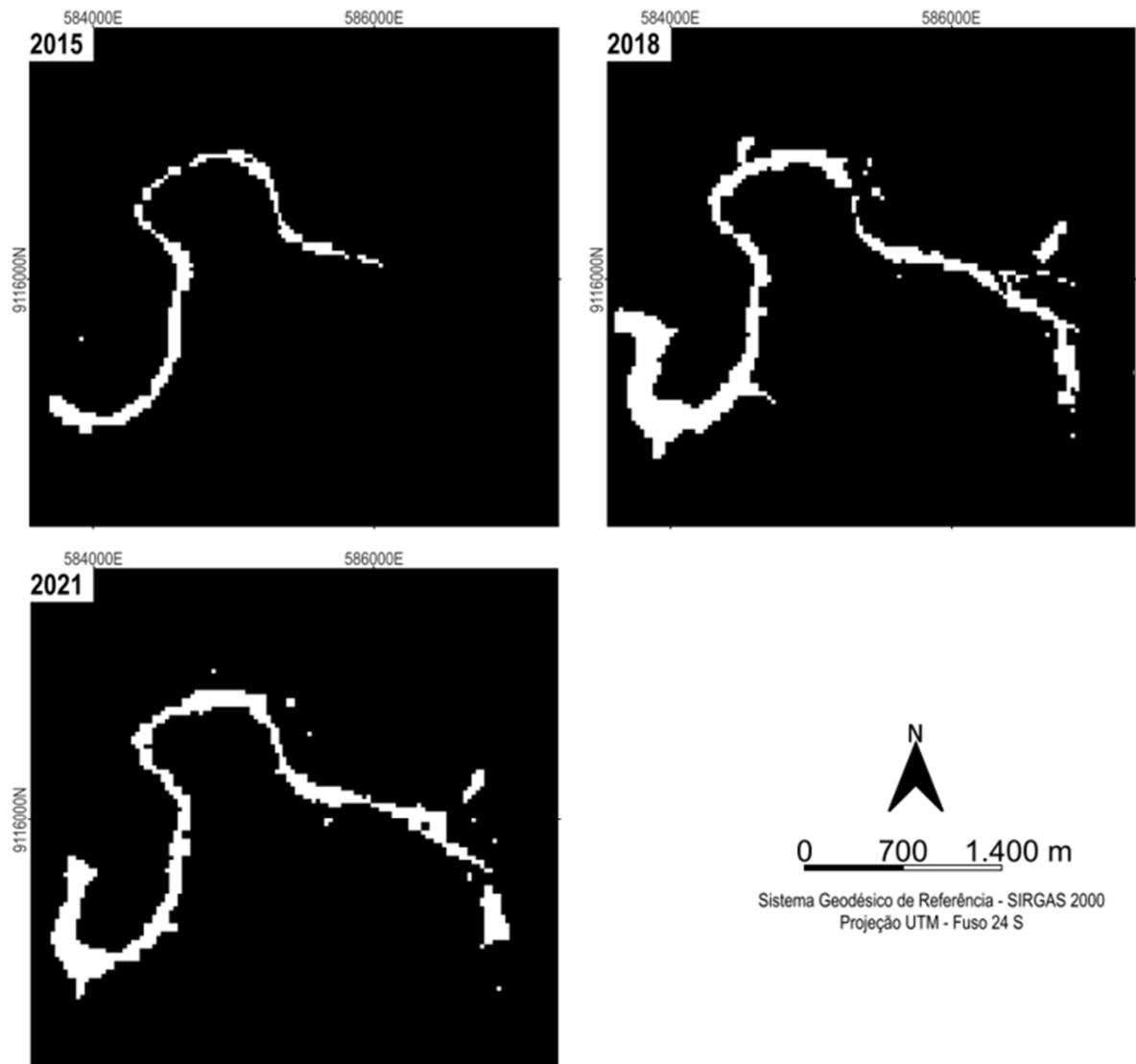
Os resultados apresentados corroboram as descobertas de Pereira, Maganhotto (2016) ao examinar o processo de identificação de corpos d'água por meio de índices espectrais na região do braço do Reservatório de Itaipu, no estado brasileiro do Paraná. De acordo com esses Autores, pode-se afirmar que a detecção e o mapeamento de corpos de água usando índices de água provaram ser eficazes e objetivos. A principal diferença está relacionada ao fato de que esses índices são mais influenciados pelas bandas do infravermelho do que pelas bandas do visível, o que resultaria em uma mistura espectral de pixels.

Leonardo *et al.* (2021), ao conduzir análises desses índices com o objetivo de estimar a área superficial do Reservatório Engenheiro Francisco Sabóia, constataram que o índice MNDWI identificou um aumento na área superficial do reservatório, com valores médios de pixels classificados como água superiores a 0,624.

#### 4.4 MAPEAMENTO ESPAÇO TEMPORAL DA ÁREA SUPERFICIAL DO RESERVATÓRIO

Para a extração da área utilizou-se o processo de binarização separando a presença ou não presença de água, no intuito de separar *pixels* puros de água e não água (vegetação, ocupação urbana e solo exposto), como visualizado na Figura 12.

Figura 12 - Extração por binarização das áreas do reservatório para os anos analisados, pelo NDWI



Fonte: Autor (2023).

Nos mapas resultantes de NDWI com base nos limiares ótimos calculados pela binarização ficou evidenciado que na maioria dos casos, a diferença entre os limiares de segmentação ótimos obtidos pelos dois índices espectrais tem pouco impacto na precisão da extração de água. No entanto, no caso de outubro de 2021, muitos pixels foram classificados fora da classe a qual pertencia como tipos de água usando os limites de segmentação ótimos obtidos pelo algoritmo. No NDWI (Figura 11), o índice que apresentou maiores quantidades, provavelmente teve esta resposta, devido a áreas de solo exposto com umidade ou com presença muito baixa de vegetação. Essa resposta caracteriza a presença de mistura espectral de

*pixels*, uma vez que *pixels* s, foram classificadas como água. Em 2015 e 2018 os índices, variaram em quantidade de *pixels* com a classe água, o que resultou na diferença de área do reservatório. Em 2018, período de maior ganho de área do reservatório, o NDWI apresentou a maior área.

Neste aspecto, foram levantados os valores de áreas superficiais do reservatório ao longo dos anos para o índice analisado, como visto na Tabela 5.

Tabela 5 - Áreas obtidas através do processo de binarização para o Reservatório Jazigo, nas datas estudadas

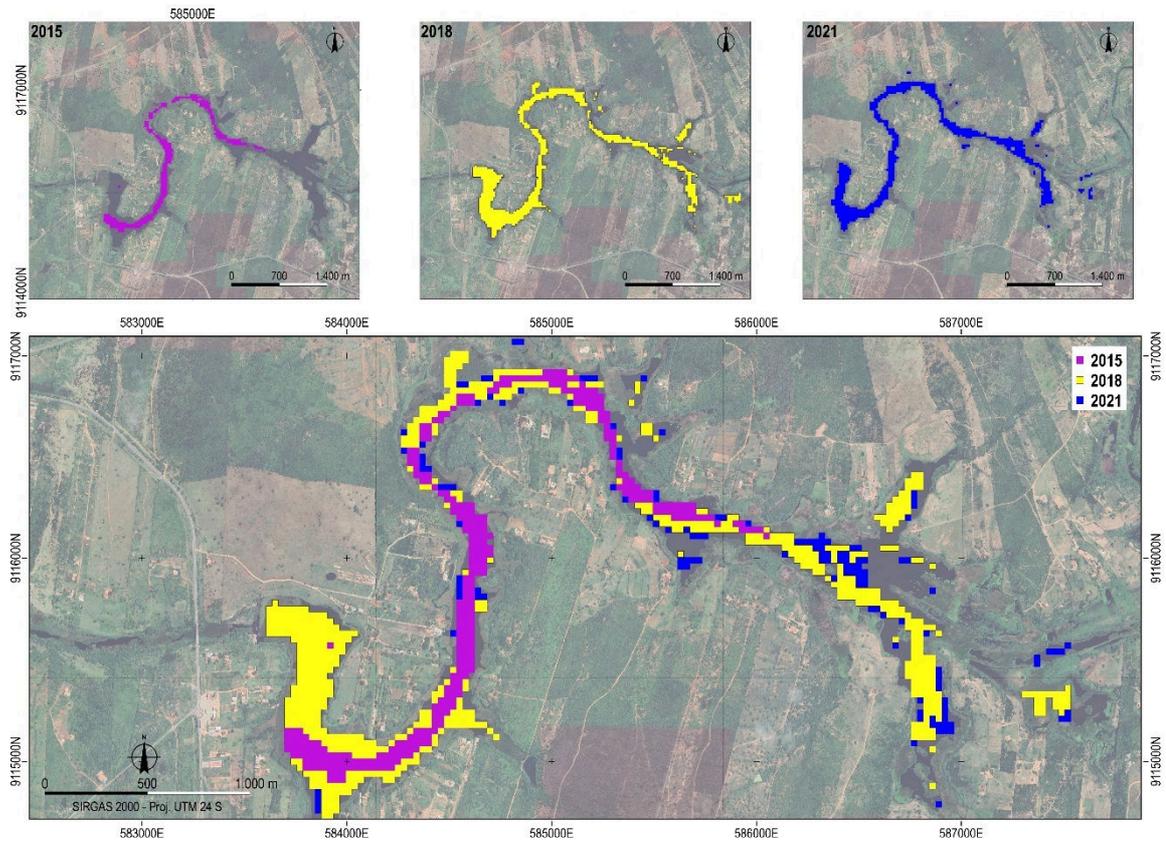
DATA	ÁREAS (km <sup>2</sup> )
04/10/2015	0,2670
28/10/2018	0,4124
12/10/2021	0,3912

Fonte: Autor (2023).

Os resultados apresentados na Tabela 5 evidenciaram o aumento do armazenamento de água na Barragem ao longo dos anos. Observou-se que em 2015 tem-se a menor área superficial do corpo hídrico, em que são identificados através dos *pixels*, trechos das massas de água existentes na área. E quase se equiparando a área nos anos de 2018 e 2021. Analisando os dados de precipitação, pode-se obter uma média de precipitação maior nos últimos anos de análise em relação ao primeiro ano de obtenção dos dados. Isso foi confirmado nos cálculos de áreas de ambos os índices espectrais, que observaram uma variação crescente ao longo do intervalo 2015 - 2021, sendo a precipitação média anual um fator contribuinte para os resultados encontrados.

Neste contexto, foi realizada uma seleção de *pixels* através de Fotointerpretação, com referência, filtrando, *pixels* que representaram a área superficial do corpo hídrico e eliminando *pixels* produto da mistura espectral, como mostrou a Figura 12. Como resultado foi extraído as áreas como mostra a Figura 13.

Figura 13 - Extração das áreas do Reservatório Jazigo ao longo do tempo



Fonte: Autor (2023).

Conforme a Figura 13, pode-se visualizar pixel a pixel a variabilidade espacial do reservatório de Jazigo entre 2015, 218 e 2021. Esse resultado foi obtido também por Almeida *et al.* (2022) com objetivo de caracterizar e espacializar o comportamento da cobertura do uso do solo, especificamente no trecho que corresponde o reservatório Algodões e seu entorno em Ouricuri – PE a partir de imagens de satélites do TM Landsat 5 e OLI Landsat 8 em 2009, 2014 e 2018.

## 5 CONCLUSÃO

Neste estudo, os resultados forneceram a compreensão de padrões espaço-temporais do corpo hídrico do Reservatório do Jazigo e do comportamento das áreas de vegetação do bioma Caatinga, nos anos 2015, 2018 e 2021. A partir da análise da sensibilidade espectral dos índices NDVI e NDWI, através de imagens dos satélites, OLI -Landsat 8. Em que foram extraídas as conclusões a seguir.

Em termos espaciais, houve a identificação de possíveis eventos chuvosos no qual houve aumento da precipitação nos anos posteriores a 2015, o que proporcionou o aumento da área superficial do reservatório e da mata ciliar ao longo dos anos, como também foi possível notar a influência da precipitação em relação a vegetação no período de seca.

O NDWI é o índice que demonstrou maiores valores, provavelmente devido à presença de áreas de solo exposto com umidade reduzida ou com vegetação escassa. Essa situação indica a existência de uma mistura espectral nos pixels, já que alguns deles foram classificados como água. Em 2015 e 2018, os valores dos índices variaram em relação à quantidade de pixels da classe água, o que resultou em diferenças na área do reservatório.

A precipitação registrada no Reservatório Jazigo em outubro de 2021 resultou em um aumento significativo na umidade do solo e na disponibilidade de água para a vegetação circundante. Isso teve um impacto direto na melhoria do NDVI na área. Sensores remotos, como os satélites de observação da Terra, conseguiram detectar esse aumento na atividade vegetal devido à chuva e traduzi-lo em valores mais elevados do NDVI.

A ferramenta MAPBIOMAS mostrou-se um excelente indicador de validação da resposta espectral dos índices por possibilitar um mapeamento com acurácia de uso e cobertura do solo ao longo dos anos, reduzindo assim possíveis erros foto interpretativos que possam se apresentar durante a análise dos índices, suprimindo a lacuna de possíveis amostras de monitoramento in situ.

Em síntese, os índices espectrais mostraram-se com ferramentas eficazes no monitoramento de alterações no cenário da paisagem associadas a reservatórios no semiárido, possibilitando possíveis aplicações para planejamento e tomadas de decisões de ações de gestão de recursos hídricos.

## REFERÊNCIAS

ALI, M.I., DIRAWAN, G.D., HASIM, A.H., ABIDIN, M.R. Detection of Changes in Surface Water Bodies Urban Area with NDWI and NDWI Methods, 2019. *Article in International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology*, June 2019, vol. 9 n. 3, p. 946-951.

ALMEIDA, D.N.O. **Mapeamento temático dos parâmetros físicos a partir de sensoriamento remoto em bacia hidrográfica**. 2018. 69 p. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

ANA. Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH). Disponível em: [http://. ana.gov.br/](http://ana.gov.br/) Acesso: 09/Jul/2023.

APAC. Agência Pernambucana de Águas e Clima. Monitoramento Hidrológico. Disponível em: <http://www.apac.pe.gov.br/monitoramento/> Acesso em: 09 de out. de 2023.

ALSDORF, D .E.; Birkett, C. M.; Dunne, T.; Melack, J.; Hess, L. Water level changes in a large Amazon lake measured with spaceborne radar interferometry and altimetry. **Geophysical Research Letters**.v.28, n.14, p.2671-2674, 2001a.

BARBOSA, H. A.; KUMAR, T. V. L.; PAREDES, F.; ELLIOTT, S.; AYUGA, J.G.. Assessment of Caatinga response to drought using Meteosat-SEVIRI Normalized Difference Vegetation Index (2008–2016). **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, [s.l.], v. 148, p. 235-252, Feb 2019. DOI. 10.1016/j.isprsjprs.2018.12.014

CUNHA, A., ALVALÁ, R., NOBRE, C., CARVALHO, M., 2015. Monitoring vegetative drought dynamics in the Brazilian semiarid region. **Agric. For. Meteorol.**, [S.L.], v.214-215, p.494–505. DOI. 10.1016/j.agrformet.2015.09.010.

EPIPHANIO, J. C. N.; GLERIANI, J. M.; FORMAGGIO, A. R.; RUDORFF, B. F. T. Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijão. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 31, n. 6, p. 445-454, 2014.

FERRIBY, H.; NEJADHASHEMI, A.P.; HERNANDEZ-SUAREZ, J.S.; MOORE, N.; KPODO, J.; KROPP, I.; EESWARAN, R.; BELTON, B.; HAQUE, M.M. Harnessing Machine Learning Techniques for Mapping Aquaculture Waterbodies in Bangladesh. **Remote Sens.** 13, 4890, 2021.

GOMES, S. O., LIMA, V. N., CANDEIAS, A. L. B., SILVA, R. R. Uso e cobertura dos solos de Petrolândia utilizando MAPBIOMAS. **Anais** In: XXVII Congresso Brasileiro de Cartografia, SBC, Rio de Janeiro - RJ, p. 805-808, nov. 2017.

GIL, A. P.; PADOVANI, C. R.; COELHO, A. L. N. Comparação entre NDWI e MNDWI para o mapeamento de áreas inundadas do Pantanal do Taquari. In: **Anais** do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - INPE. Santos, 2019.

HERNDON, K.; MUENCH, R.; CHERRINGTON, E.; GRIFFIN, R. AN Assessment of Surface Water Detection Methods for Water Resource Management in the Nigerian Sahel. **Sensors** 2020, 20, 431.

INPE, **Instituto De Pesquisas Espaciais (Brasil)**. Adamantina, São Paulo. São José dos Campos: INPE, 2023

JACQUES, D. C.; KERGOAT, L.; HIERNAUX, P.; MOUGIN, E.; DEFOURNY, P. Monitoring dry vegetation masses in semi-arid areas with MODIS SWIR bands. **Remote Sensing of Environment**, [s.l.], v. 153, p. 40-49, out. 2014. DOI. 10.1016/j.rse.2014.07.027.

JENSEN, J.R. Sensoriamento Remoto do Ambiente – **Uma Perspectiva em Recursos Terrestres**. São José dos Campos: Parêntese Editora, 2009. 598p.

JIN, G.; DENG, X.; HASAN, S.S.; ZHAO, C.; GIBSON, J. (2018) Hydrological ecosystem services for integrated water resources management. **Ecohydrology**, pp. 361–386.

KNUST, S. S. A. Avaliação das imagens RADARSAT-1 sob diferentes geometrias de observação em aplicação geológica no Vale do Rio Curuçá (Bahia). 146 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2007

LEONARDO, H.R.A.L.; SALGUEIRO, C.O.B.; ALMEIDA, D.N.O.; SANTOS, S.M.; OLIVEIRA, L.M.M.; Sensoriamento Remoto Aplicado na Geoespacialização do Reservatório Poço da Cruz -PE e seu Entorno. **Revista Brasileira de Geografia Física** v.14, n.06, 3592-3607, 2021.

LI, A.; FAN, M.; QIN, G.; XU, Y.; WANG, H. Comparative Analysis of Machine Learning Algorithms in Automatic Identification and Extraction of Water Boundaries. **Appl. Sci.** 2021, 11, 10062.

LIMA, V. N., GOMES, S. O., CANDEIAS, A. L. B., SILVA, R. R. MAPBIOMAS e uso e coberturados solos do município de Brejinho, Pernambuco. **Anais** In: XXVII Congresso Brasileiro de Cartografia, SBC, Rio de Janeiro - RJ, p. 947-951, nov. 2017.

MAGANHOTTO, R. F.; SANTOS, L. J. C. dos; SOUZA, L. C. de P. Miara. M. A.; LEMES, P. H. S. “A aplicação dos Índices de Representação do Relevo como ferramenta de suporte no planejamento ambiental de unidades de conservação”. *Revista Geografar*, v. 8, n. 2, p. 205 – 236, Curitiba, 2016.

MAPBIOMAS. Disponível em < <http://mapbiomas.org>>. Acesso em: Março, 2023

MENESES, P. R., ALMEIDA, T. Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto. Brasília: UNB, 2012.

MCFEETERS, S.K.O. (1996). “O uso do Índice de Água com Diferenças Normalizadas (NDWI) no delineamento de características de águas abertas”. **Revista Internacional de Sensoriamento Remoto**, v. 17, n. 7, p. 1425-1432.

MORAES, M. E. B. Análise da legislação ambiental e das características físicas na ocupação urbana da estância de Campos do Jordão (SP). 148 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de São Carlos/UNESP, São Carlos, 1999

MOREIRA, M. A. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação. São José dos Campos: Editora Com Deus, 2001. 250 p.

MELO, E. T.; SALES, M. C. L.; OLIVEIRA, J. G. B. Aplicação do índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para análise da degradação ambiental da microbacia hidrográfica do riacho dos cavalos, Crateús-CE. In: *Revista RA'E GA*, v.23, Curitiba, Departamento de Geografia – UFPR, 2011. 520-533p. **Caderno de Ciências agrárias**, Minas Gerais, v.11, n.0, p.01-08, Sep 2019. ISSN. 2447-6218.

MORAIS, Y. C. B.; SANTOS, B. O.; LAURENTINO, M. L. S.; SILVA, J. C. B.; GALVÍNCIO, J. D. Análise espaço-temporal e detecção de mudanças da cobertura vegetal no município de Floresta, PE – Brasil, utilizando o NDVI. In: *Simpósio de Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. 15, 2011, Curitiba. **Anais...** São Paulo: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2019, p. 2128-2134.

OLIVEIRA, E.W.N. (2007). “Telhados Verdes para Habitação de Interesse Social: Retenção das Águas Pluviais e Conforto Térmico”. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade do Estado do Rio De Janeiro, 136 p., 2007.

Oularé, S.; Adon, G.C.; Akpa, Y.L.; Saley, M.B.; Kouamé, K.F. & Therrien, R. (2017). Identification Des Zones Potentielles De Recharge Des Aquifères Fracturés Du Bassin Versant Du N'zo (Ouest De La Côte d'Ivoire): Contribution Du SIG Et De La Télédétection. *European Scientific Journal*, 13: 192-217. <https://doi.org/10.19044/esj.2017.v13n36p192>

PRUDNIKOVA, E; SAVIN, I; VINDEKER, G.; GRUBINA, P.; SHISHKONAKOVA, E.; SHARYCHEV, D. Influence of Soil Background on Spectral Reflectance of Winter Wheat Crop Canopy. *Remote Sensing*, [s.l.], v. 11, n. 16, p. 1932-1945, 19 ago. 2019. DOI.10.3390/rs11161932.

ROUSE, J.W.; HASS, J.R., R.H.; SCHELL, J.A.; DERRING, D.W. (1973). "Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation". Prog. Rep. RSC 1978- 1, **Remote Sensing Center**, Texas A&M Univ., College Station, 93p.

SÁNCHEZ, G.C.; DALMAU, O.; ALARCON, T.E.; SIERRA, B.; HERNANDEZ, C. Selection and Fusion of Spectral Indices to Improve Water Body Discrimination. *IEEE Access* 2018, 6, 72952–72961.

SHIMABUKURO, Y. E.; PONZONI, F. J. 2019. **Spectral Mixture for Remote Sensing: Linear Model and Applications**. Springer Remote Sensing/Photogrammetry. São Paulo: Oficina de Textos. 77 p.

SILVA, M. T.; AZEVEDO, P. V.; SILVA, V. P. R.; SILVA, B. K. N.; MARIANO, E. B.; AMORIM, M. R. B. Estimativa da produção de sedimentos na bacia hidrográfica do submédio Rio São Francisco. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, Recife, v.2, p.203–211, Jun 2017. DOI. 10.24221/jeap.2.3.2017.1430.203-211.

SILVEIRA H.L.F.; GALVÃO L.S.; SANCHES I.D.; SÁ, I.B.; TAURA T.A. Use of MSI/Sentinel-2 and airborne LiDAR data for mapping vegetation and studying their relationships with soil attributes in the Brazilian semi-arid region. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 73, p.179–190. 2018. DOI. 10.1016/j.jag.2018.06.016

SILVA JUNIOR, U. J. da; GONÇALVES, R. M. .; OLIVEIRA, L. M. M. de .; SILVA JÚNIOR, J. A. da. Sensibilidade Espectral dos Índices de Vegetação: GNDVI, NDVI e EVI na Mata Ciliar do Reservatório de Serrinha II – PE, Brasil. *Revista Brasileira de Cartografia*, [S. l.], v. 73, n. 1, p. 17–35, 2021. DOI: 10.14393/rbcv73n1-55252.

SOUZA, A. G. S. S.; RIBEIRO NETO, A.; SOUZA, L. L. Soil moisture-based index for agricultural drought assessment: smadi application in pernambuco state-brazil. *Remote Sensing of Environment*, [s.l.], v. 252, p. 112124-112135, jan. 2021. DOI.10.1016/j.rse.2020.112124.

USGS. United States Geological Survey (USGS). Disponível em: <https://www.usgs.gov/> Acesso: 12/Jul/2023.

XIONG, J.; LIN, C.; CAO, Zhigang; H., Minqi; X., K.; CHEN, X.; MA, R. Development of remote sensing algorithm for total phosphorus concentration in eutrophic lakes: conventional or machine learning?. **Water Research**, [S.L.], v. 215, p. 118213-11925, maio 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2022.118213>.

WEN, Z.; ZHANG, C.; SHAO, G.; WU, S.; ATKINSON, P.M. Ensembles of multiple spectral water indices for improving surface water classification. *Int. J. Appl. Earth Obs.* **Geoinf.** 2021, 96, 102278.

WESTINGA, E.; BELTRAN, A. P. R.; BIE, C.A.J.M.; VAN GILS, H. A.M.J.. A novel approach to optimize hierarchical vegetation mapping from hyper-temporal NDVI imagery, demonstrated at national level for Namibia. **International Journal of Applied Earth Observation And Geoinformation**, [s.l.], v. 91, p. 102152-102164, set. 2020.

YU, Z.; DI, L.; RAHMAN, M.S.; TANG, J. (2020). *"Fishpond Mapping by Spectral and Spatial-Based Filtering on Google Earth Engine: A Case Study in Singra Upazila of Bangladesh"*. **Remote Sensing**. 12, pp.2692 - 2700.

ZOU, Z.; XIAO, X.; DONG, J.; QIN, Y.; DOUGHTY, R.B.; MENARGUEZ, M.A.; ZHANG, G.; WANG, J. (2018). *"Divergent trends of open-surface water body area in the contiguous United States from 1984 to 2016"*. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 114-115, pp.3810–3815.