



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

ALEX VINÍCIUS DE MELO VIEIRA

**MONITORAMENTO HIDROLÓGICO EM ÁREAS PRÓXIMAS AO
RESERVATÓRIO MILAGRES – PE A PARTIR DA INTEGRAÇÃO DE DADOS DE
SENSORIAMENTO REMOTO**

RECIFE – PE
2024

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

ALEX VINÍCIUS DE MELO VIEIRA

**MONITORAMENTO HIDROLÓGICO EM ÁREAS PRÓXIMAS AO
RESERVATÓRIO MILAGRES – PE A PARTIR DA INTEGRAÇÃO DE DADOS DE
SENSORIAMENTO REMOTO**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. D. Sc. Leidjane Maria Maciel de Oliveira

Coorientadora: Prof^a. Msc. Débora Natália Oliveira de Almeida

RECIFE – PE

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

Vieira, Alex Vinícius de Melo.

Monitoramento hidrológico em áreas próximas ao Reservatório Milagres - PE a partir da integração de dados de sensoriamento remoto / Alex Vinícius de Melo Vieira. - Recife, 2024.

46 p. : il., tab.

Orientador(a): Leidjane Maria Maciel de Oliveira

Coorientador(a): Débora Natália Oliveira de Almeida

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Civil - Bacharelado, 2024.

Inclui referências.

1. Área superficial. 2. Índices espectrais. 3. MapBiomass. 4. Sensoriamento remoto. I. Oliveira, Leidjane Maria Maciel de. (Orientação). II. Almeida, Débora Natália Oliveira de. (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

ALEX VINÍCIUS DE MELO VIEIRA

**MONITORAMENTO HIDROLÓGICO EM ÁREAS PRÓXIMAS AO
RESERVATÓRIO MILAGRES – PE A PARTIR DA INTEGRAÇÃO DE
DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal de Pernambuco como requisito para a
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Civil.

Aprovado em: **17/04/2024**.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. D. Sc. Leidjane Maria Maciel de Oliveira (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. M. Sc. Débora Natália Oliveira de Almeida (Coorientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. M. Sc. Haylla Rebeqa de Albuquerque Lins Leonardo (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Pesquisador D. Sc. Diego Cezar dos Santos Araujo (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por estar presente e por ter me dado condições de concluir essa graduação. Foram muitas dificuldades ao longo do curso, mas em todos os momentos Ele me deu a direção.

Agradeço a minha família por ser sempre muito solícita em ajudar em todas as situações. Principalmente os meus pais, que nunca deixaram nada me faltar e me incentivaram a estudar e vencer os meus obstáculos por meio da educação. E aos meus irmãos na fé por lembrarem de mim em suas orações.

Um agradecimento especial à professora Leidjane Oliveira, minha orientadora, que se mostrou muito prestativa e demonstrou muita dedicação e amor aos seus discentes nas aulas e nas conversas do dia a dia. Agradeço também a minha coorientadora Débora Almeida, por tudo que me ensinou e pelo tempo que investiu comigo no decorrer da escrita deste trabalho.

Também agradeço a todos os docentes que me acompanharam ao longo do curso e colaboraram para a minha formação acadêmica.

RESUMO

Diante da situação de escassez hídrica no semiárido pernambucano, o desenvolvimento de estratégias de gestão hídrica é essencial, como a construção de reservatórios, sistemas de captação e distribuição de água. O reservatório Milagres, localizado na divisa dos municípios de Salgueiro e Verdejante, foi beneficiado com o Trecho de Integração do Rio São Francisco em 2022. Este estudo tem como objetivo observar o crescimento da área superficial do reservatório Milagres antes e depois da transposição do Rio São Francisco por meio de imagens coletadas pelos sensores-satélite OLI Landsat-8 e Sentinel-2 para os anos de 2016 e 2023, bem como realizar uma análise do uso e ocupação do solo, com dados obtidos na plataforma MapBiomas. Utilizou-se o software QGIS 3.18 Zürich para o processamento das imagens. O estudo demonstrou um crescimento percentual da área urbana de 37% no município de Salgueiro e de 15% no município de Verdejante. As imagens de satélite apontaram um crescimento significativo na área superficial do reservatório Milagres, atingindo 8,1 km² com o Landsat-8 e 8,12 km² com o Sentinel-2.

Palavras-chave: Área superficial; Índices espectrais; MapBiomas; Sensoriamento Remoto.

ABSTRACT

Given the water scarcity situation in the semi-arid region of Pernambuco, the development of water management strategies is essential, such as the construction of reservoirs, water capture, and distribution systems. The Milagres reservoir, located on the border of the municipalities of Salgueiro and Verdejante, benefited from the Integration Section of the São Francisco River in 2022. This study aims to observe the growth of the surface area of the Milagres reservoir before and after the São Francisco River transposition through images collected by the OLI Landsat-8 and Sentinel-2 satellite sensors for the years 2016 and 2023, as well as to perform an analysis of land use and occupation, using data obtained from the MapBiomas platform. The QGIS 3.18 Zürich software was used for image processing. The study demonstrated a percentage growth of 37% in the urban area of Salgueiro and 15% in the municipality of Verdejante. Satellite images showed a significant increase in the surface area of the Milagres reservoir, reaching 8.1 km² with Landsat-8 and 8.12 km² with Sentinel-2.

Keywords: Surface area; Spectral indices; MapBiomas; Remote Sensing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa de municípios da região Semiárida.	10
Figura 2 - Satélite Landsat-8.	14
Figura 3 - Satélite Sentinel-2.	17
Figura 4 - Fluxograma da metodologia.	20
Figura 5 - Área de estudo.	21
Figura 6 - Simplificação da metodologia do MapBiomias.	22
Figura 7 - Precipitação mensal da área de estudo em 2023 e 2016.	24
Figura 8 - Classificação do uso e ocupação do solo.	29
Figura 9 - NDWI e MNDWI do Reservatório Milagres em 2016.	33
Figura 10 - NDWI e MNDWI do Reservatório Milagres em 2023.	35
Figura 11 - Corpo hídrico do reservatório Milagres em 2016.	36
Figura 12 - Corpo hídrico do reservatório Milagres em 2023.	37
Figura 13 - Diferença entre as áreas.	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Bandas espectrais do Landsat-8 - OLI.	16
Tabela 2 - Bandas espectrais do Sentinel-2.	17
Tabela 3 - Características das imagens.	23
Tabela 4 - Dados orbitais das imagens Landsat.	26
Tabela 5 - Dados orbitais das imagens Sentinel.	26
Tabela 6 - Uso e ocupação do solo referente aos municípios de Salgueiro e Verdejante.	30
Tabela 7 - Valores de NDWI e MNDWI do Reservatório Milagres.	31
Tabela 8 - Área do Reservatório Milagres.	38
Tabela 9 - Diferença percentual entre as áreas.	39

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	5
2. OBJETIVOS	8
2.1 Objetivo geral.....	8
2.2 Objetivos específicos.....	8
3. REFERENCIAL TEÓRICO	9
3.1 Características da região Semiárida	9
3.2 Programa de Integração do Rio São Francisco	10
3.3 Bacia Hidrográfica	11
3.4 Relação da vegetação do bioma caatinga e os recursos hídricos no Semiárido	12
3.5 Sensoriamento Remoto.....	13
3.5.1 Landsat-8.....	14
3.5.2 Sentinel-2.....	16
3.5.3 Técnicas de Sensoriamento Remoto para recursos hídricos.....	18
4. METODOLOGIA.....	20
4.1 Área de estudo.....	21
4.2 Caracterização de uso e ocupação do solo a partir do MapBiomas.....	22
4.3 Aquisição de dados	23
4.3.1 Dados orbitais	23
4.3.2 Dados hidrológicos	24
4.4 Parâmetros biofísicos e extração das áreas	25
4.4.1 NDWI.....	26
4.4.2 MNDWI.....	27
4.4.3 Extração de áreas.....	28
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1 Análise de uso e ocupação do solo	29
6. CONCLUSÃO.....	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

1. INTRODUÇÃO

A escassez de água no Semiárido Pernambucano é um fenômeno complexo e preocupante. A região enfrenta desafios significativos devido à irregularidade das chuvas e à alta taxa de evaporação, resultando em déficits hídricos recorrentes. Além disso, a degradação ambiental e algumas lacunas na gestão dos recursos hídricos são apontadas como fatores agravantes para a crise (CARMO e LIMA, 2020). Essa situação tem impactos diretos na qualidade de vida das populações locais, ressaltando a necessidade de políticas públicas eficazes e investimentos em tecnologias de captação e reuso de água para mitigar os efeitos dessa escassez.

Como forma de contornar essa situação, grande parte do volume de água dessa região está armazenada em reservatórios. Portanto, o monitoramento desses reservatórios desempenha um papel fundamental na adoção de estratégias de gestão hídrica (SILVA *et al.*, 2019).

No contexto de um país vasto e diversificado como o Brasil, caracterizado por uma vasta extensão territorial e uma riqueza incomparável de ecossistemas, a utilização de abordagens tradicionais, como drones, aerofotogrametria e softwares especializados, torna-se inviável devido aos custos elevados, demanda de tempo e dificuldades nos resultados obtidos (GEINOVA, 2023).

Diante desses desafios, o Sensoriamento Remoto (SR) emergiu como a solução mais adequada e eficiente para realizar a análise geoespacial em grandes áreas. Nos últimos anos, o SR tem ganhado destaque e tem sido estabelecido como uma ferramenta indispensável, oferecendo uma abordagem acessível, abrangente e precisa para monitorar e mapear as mudanças ambientais em grande escala (BORGES, PACHECO e SANTOS, 2014). Complementarmente, as técnicas de SR são ferramentas de extrema importância, especialmente quando aplicadas na região do Semiárido Nordeste, onde a escassez de recursos hídricos representa um desafio constante (MENDES *et al.*, 2023).

Estudos destacam a escassez de corpos d'água e a variabilidade temporal das fontes hídricas nessas áreas. Segundo Oliveira *et al.* (2018), a identificação e monitoramento de corpos d'água em regiões semiáridas apresentam dificuldades devido à sua sazonalidade e à presença de características naturais, como a intermitência de pequenos cursos d'água. Além disso, conforme apontado por Lima, Silva e Cunha (2020), a presença de vegetação densa e a

topografia acidentada da Caatinga podem interferir na detecção e na análise de corpos d'água por meio de imagens de SR.

Dentre as diversas técnicas no SR, destacam-se os índices espectrais para quantificar a presença de água NDWI e MNDWI, os quais se baseiam na alteração da reflectância da água em comparação com a do solo. Segundo Claudino *et al.* (2022), valores positivos desses índices indicam a presença de água, enquanto valores negativos sugerem sua ausência. Essa abordagem metodológica oferece uma visão mais abrangente e precisa das condições hídricas na região, fornecendo informações valiosas para a gestão e conservação dos recursos naturais locais.

O Índice frequentemente utilizado é o Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI), desenvolvido por McFeeters (1996) (PEREIRA *et al.*, 2019), que tem como finalidade realçar e delinear automaticamente corpos de água por meio da análise de bandas multiespectrais.

O NDWI produz uma imagem na qual os valores dos pixels variam de -1 a 1, com 0 representando o limiar entre áreas que são consideradas água e aquelas que não são. Assim, valores negativos indicam áreas que não são cobertas por água, enquanto valores positivos destacam corpos hídricos (CLAUDINO *et al.*, 2022). Consequentemente, na imagem gerada pelo NDWI, os corpos d'água são evidenciados com maior brilho, enquanto as características do solo e da vegetação são atenuadas (GIL, PADOVANI e COELHO, 2019).

Ling *et al.* (2023) realizaram uma análise espaço-temporal no entorno do lago Qinghai a China, utilizando o NDWI (Índice de Água por Diferença Normalizada) proposto por McFeeters (1996), com imagens dos sensores-satélite TM Landsat 4-5, ETM Landsat 7 SLC-off e OLI/TIRS Landsat 8-9 C2 L2. Os autores concluíram que houve uma redução de área superficial do lago Qinghai entre os anos de 1986 e 2004, seguido de um crescimento contínuo até 2022.

Zhao e O'Loughlin (2023) conduziram um estudo comparativo entre imagens do Sentinel-2 MSI e do Landsat 8 OLI e cinco índices espectrais de água, são eles, o NDWI de McFeeters (1996), MNDWI1, MNDWI2, AWEIsh e AWEInsh. Os pesquisadores concluíram que o Sentinel-2 foi melhor para mapear as diferentes massas de água em relação ao Landsat-8. O MNDWI2 foi o índice de melhor desempenho para o Landsat-8 e o índice de AWEInsh foi o melhor para o Sentinel-2.

Por sua vez, o Índice de Água de Diferença Normalizada Modificado (*Modified Normalized Difference Water Index* – MNDWI) foi concebido por Xu (2006), e teve como

objetivo minimizar a principal limitação do NDWI, a ineficiência em suprimir o ruído proveniente das características das áreas construídas. Este índice utiliza a banda 11 como a reflectância do infravermelho médio, e o MNDWI utilizando a banda 12 como a reflectância do infravermelho médio.

No Brasil, diversas pesquisas foram utilizadas, dentre elas desenvolvida por Almeida (2021), que realizou um estudo no reservatório Poço da Cruz, localizado no semiárido Pernambuco, onde foram utilizados os índices espectrais de água NDWI de McFeeters (1996) e o MNDWI de Xu (2006), as imagens foram coletadas por meio do satélite Landsat-8 OLI. O estudo concluiu que o MNDWI demonstrou um melhor delineamento do corpo do reservatório.

Neste mesmo foco, Roberto *et al.* (2023) analisaram os índices espectrais de água NDWI e MNDWI de McFeeters (1996) e Xu (2006), respectivamente, no reservatório Milagres, nos anos de 2016 e 2022 com as imagens obtidas pelo satélite Sentinel-2A. Os pesquisadores concluíram que o NDWI classificava pixels além do limite do reservatório como água, enquanto o MNDWI demonstrou uma área superficial mais condizente com a realidade das bordas do reservatório.

Em 2022, as águas do Trecho de Integração do Rio São Francisco alcançaram o Reservatório Milagres, localizado em Pernambuco, o qual desempenha um papel crucial não apenas no abastecimento público, mas também na geração de energia para a região. Nesse contexto, o monitoramento geoespacial das áreas ao redor do reservatório assume uma relevância ímpar, uma vez que possibilita a gestão mais sustentável dos recursos hídricos e o planejamento adequado das atividades humanas na região (SOBRAL *et al.*, 2017). É importante destacar que o corpo d'água do reservatório desempenha uma função vital no ciclo hidrológico local, influenciando diretamente a disponibilidade de água para as comunidades circunvizinhas, bem como no uso e ocupação do solo.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é avaliar a distribuição espacial do reservatório Milagres em Pernambuco, a partir de índices espectrais de água NDWI e MNDWI pelos sensores OLI Landsat 8 e Sentinel-2A e comparação geoespacializada com a utilização do MapBiomias Coleção 8.0.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar o uso e ocupação da área de estudo a partir de dados fornecidos pelo MapBiomias Coleção 8.0.
- Analisar a distribuição espacial e temporal dos índices espectrais de água através de imagens multiespectrais em diferentes anos, para investigação das alterações ocorridas na área superficial do reservatório Milagres - PE;
- Comparar as potencialidades dos índices NDWI e MNDWI definidos pelos sensores do Sentinel-2A e Landsat-8.
- Mapear as alterações ocorridas entre os anos de estudo a fim de obter dados quantitativos das variações.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste segmento, será apresentada uma revisão da literatura para descrever algumas características da área de estudo, juntamente com uma definição de Sensoriamento Remoto e suas principais aplicações, sensores utilizados e suas especificidades.

3.1 Características da região Semiárida

A região Semiárida (Figura 1) é caracterizada por um clima árido e uma precipitação pluviométrica limitada, resultando em condições de seca recorrentes e escassez de água (CAVALCANTE, 2023). Este bioma enfrenta desafios significativos em relação à disponibilidade hídrica e à sustentabilidade dos ecossistemas locais.

Estudos como o de Araújo *et al.* (2017) destacam que a vegetação nessa região é adaptada às condições adversas, apresentando espécies xerófitas e resistentes à seca, como cactos e plantas suculentas. A situação hídrica na região semiárida é frequentemente afetada pela variabilidade climática, com períodos de secas prolongadas seguidos por chuvas intensas e irregulares.

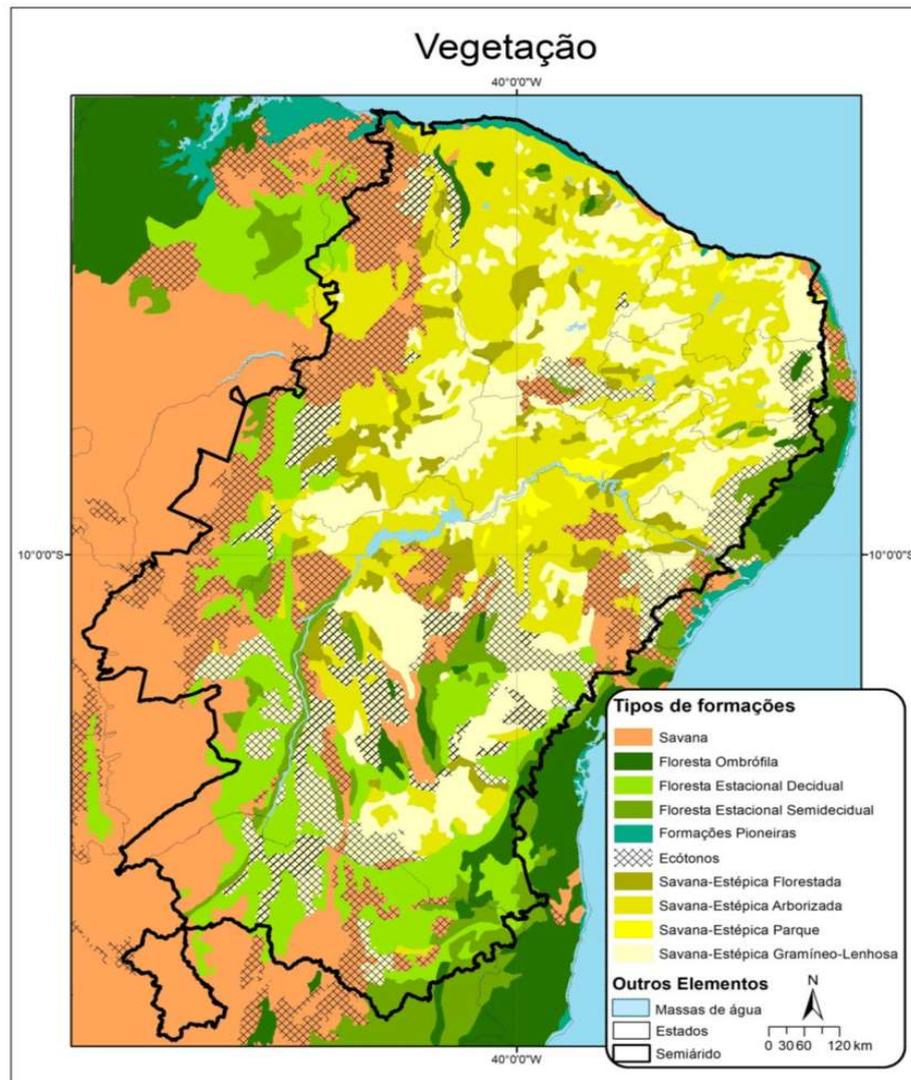
De acordo com Silva *et al.* (2020), a gestão sustentável dos recursos hídricos na região Semiárida é essencial para garantir o abastecimento de água para as comunidades locais, a agricultura e a preservação dos ecossistemas naturais. Além disso, estudos como o de Oliveira, Vieira e Ferreira (2019) ressaltaram a importância da conservação da vegetação nativa e da implementação de práticas agrícolas sustentáveis para mitigar os impactos da desertificação e da degradação do solo nesta região. Em suma, a região Semiárida é um ambiente frágil e vulnerável que requer medidas eficazes de manejo e conservação para garantir sua resiliência e sustentabilidade a longo prazo.

O Semiárido pernambucano é caracterizado por uma rede hidrográfica composta por rios intermitentes, que variam significativamente em termos de volume de água ao longo do ano. Alguns dos principais rios que cortam essa região incluem o Rio São Francisco, o Rio Pajeú, o Rio Moxotó e o Rio Terra Nova, entre outros (APAC, 2024b). O Rio São Francisco é o principal curso d'água da região, desempenhando um papel crucial no abastecimento de água para várias comunidades ao longo do seu percurso (APAC, 2024b).

No entanto, a região semiárida é conhecida por sua baixa precipitação pluviométrica, com uma média anual de chuvas geralmente variando entre 400 mm e 600 mm (ARAÚJO, 2011;

RAMALHO, 2014; COSTA e CORREA, 2019). Essa limitação de chuvas torna os rios da região especialmente sensíveis à variabilidade climática e à pressão exercida pelo uso humano, destacando a importância da gestão sustentável dos recursos hídricos nesses ambientes.

Figura 1 - Mapa de municípios da região Semiárida.



Fonte: Alves (2019) - Base cartográfica: RADAM/IBGE, 2018; SUDENE, 2017.

3.2 Programa de Integração do Rio São Francisco

O Rio São Francisco desempenha um papel relevante na irrigação do semiárido, sendo o principal curso d'água da região, além de estar posicionado em uma posição central do

território brasileiro onde a sua vazão, poderia contribuir para a resolução do problema da seca no Nordeste. Já existiam planos para a transposição do rio desde 1818. No entanto, somente em 2003 o plano de investimento para a implantação do projeto foi aprovado (FERREIRA, 2019). As obras do Programa de Integração do Rio São Francisco (PISF) iniciaram-se somente em 2007 (CASTRO, 2023).

Os anos de 2010 a 2017 foram marcados por um longo período de estiagem no Nordeste, o que levou à redução do volume de água armazenada nos reservatórios, levando alguns corpos hídricos a atingir o nível morto, como o caso do açude Epitácio Pessoa, na Paraíba (BARBOSA *et al.*, 2021). Diante desta crise, foi necessário acelerar as obras dos canais da transposição do Rio São Francisco (MENDES, BEZERRA e BARBOSA, 2023).

Em março de 2017, foi inaugurado o primeiro trecho que beneficiou 390 municípios do Nordeste Setentrional (FERREIRA, 2019), mas somente em 2022 as águas chegaram ao reservatório Milagres.

3.3 Bacia Hidrográfica

A bacia hidrográfica é um sistema complexo de drenagem que desempenha um papel fundamental na regulação dos recursos hídricos e no equilíbrio ambiental de uma região. Conforme descrito por Porto e Porto (2008), ela abrange uma vasta extensão geográfica, sendo responsável por coletar, armazenar e direcionar o escoamento das águas pluviais para um ponto de saída único. Essa rede hidrográfica é composta por um intrincado conjunto de terras, que são drenadas por um rio principal e seus afluentes, conforme observado por Barella *et al.* (2001). Também, nas regiões mais elevadas do relevo, as divisões naturais direcionam o fluxo hídrico, determinando a formação e a delimitação das bacias hidrográficas.

Dentro desse contexto, as águas provenientes das precipitações podem seguir diversos caminhos: algumas fluem superficialmente, formando riachos e rios; enquanto outras infiltram no solo, contribuindo para a recarga dos lençóis freáticos e a formação de nascentes. Essa interação entre as diferentes formas de escoamento e armazenamento de água torna as bacias hidrográficas elementos cruciais para o equilíbrio ecológico e o abastecimento hídrico de diversas regiões (FICAGNA JUNIOR, DIAS e RIBEIRO, 2015).

A bacia hidrográfica Terra Nova, localizada no Sertão de Pernambuco, apresenta características específicas que a tornam um importante objeto de estudo. Ela faz divisa ao norte

com o estado do Ceará, ao sul com os grupos de bacias de pequenos rios interiores 4 e 5 (GI4 e GI5), juntamente com o rio São Francisco ao sul, a leste com a bacia do rio Pajeú e a oeste com a bacia do rio Brígida (APAC, 2024b).

Com uma área de aproximadamente 4.887,71 km², correspondendo a 4,97% da área total do Estado, a bacia do rio Terra Nova abrange doze municípios. Destes, três estão integralmente dentro da bacia: Cedro, Salgueiro e Terra Nova. Dois possuem sua sede na bacia, Serrita e Verdejante, enquanto sete estão parcialmente inseridos são Belém do São Francisco, Cabrobó, Carnaubeira da Penha, Mirandiba, Orocó, São José do Belmonte e Parnamirim (APAC, 2024b). Essa extensa área e a complexa interação entre seus diversos elementos evidenciam a importância da bacia hidrográfica Terra Nova para a região e sua relevância como objeto de estudo para a gestão sustentável dos recursos hídricos.

3.4 Relação da vegetação do bioma caatinga e os recursos hídricos no Semiárido

A Caatinga, um bioma conhecido por seu clima árido e pela escassez de água, enfrenta desafios consideráveis em relação à disponibilidade hídrica. Em áreas onde os recursos hídricos são limitados, a importância da água como recurso vital para a sobrevivência humana torna-se ainda mais evidente. A escassez de água não apenas ameaça a subsistência das comunidades locais, mas também exerce um impacto negativo sobre a agricultura, a fauna e a flora únicas desse ecossistema diversificado. Portanto, garantir o acesso à água nessas regiões torna-se uma necessidade urgente (SILVA *et al.*, 2016).

Para enfrentar esse desafio, são necessárias estratégias eficazes de gestão hídrica, tais como a construção de reservatórios, sistemas de captação e distribuição de água, técnicas de conservação do solo e promoção de práticas agrícolas sustentáveis. Essas medidas são essenciais para assegurar o desenvolvimento sustentável da região e a preservação dos recursos naturais (BRASILEIRO, 2009).

Diante da escassez de recursos hídricos, foram construídos diversos reservatórios para garantir o abastecimento de água na região. Alguns dos reservatórios de destaque na bacia do rio Terra Nova incluem o Reservatório de Sobradinho, o Reservatório de Itaparica (também conhecido como Luiz Gonzaga), o Reservatório de Moxotó, o Reservatório de Xingó, o Reservatório de Três Marias, entre outros (APAC, 2024b). Esses reservatórios desempenham um papel crucial na gestão hídrica da região, fornecendo água para o consumo humano, a

agricultura, a geração de energia e outros usos vitais para o desenvolvimento econômico e social local.

3.5 Sensoriamento Remoto

O Sensoriamento Remoto (SR) é uma técnica que envolve a utilização de sensores, equipamentos de processamento de dados e dispositivos de transmissão de dados instalados em aeronaves, espaçonaves ou outras plataformas. Seu objetivo é estudar eventos, fenômenos e processos que ocorrem na superfície da Terra, analisando as interações entre a radiação eletromagnética em suas diversas manifestações. Essa abordagem fornece informações valiosas para várias aplicações, como o monitoramento ambiental, mapeamento de recursos naturais, planejamento urbano e agricultura de precisão (NOVO, 2010).

O Sensoriamento Remoto permite a coleta de dados de forma eficiente e sem a necessidade de contato direto, por meio de sensores em satélites que coletam as imagens e as enviam para um banco de dados. Seu uso é essencial para diagnosticar alterações antrópicas e naturais da vegetação (LEONARDO *et al.*, 2022). A informação contida nas imagens pode variar de acordo com a resolução dos satélites; aqueles com uma boa resolução oferecem uma maior riqueza de detalhes.

Além disso, o SR desempenha um importante papel para o MapBiomás, fornecendo imagens de satélite que são processadas para criar mapas de cobertura e uso da terra. Esses mapas possibilitam o monitoramento e análise das mudanças ambientais ao longo do tempo, oferecendo informações cruciais para a gestão sustentável dos recursos naturais e o acompanhamento dos impactos das atividades humanas no meio ambiente.

O MapBiomás foi desenvolvido em 2015 através da colaboração de instituições e especialistas de diferentes áreas do conhecimento. A plataforma fornece imagens da cobertura do solo brasileiro e disponibiliza dados desde 1985 (ANJINHO *et al.*, 2021). A iniciativa é fundamental para o entendimento e a tomada de decisões relacionadas à conservação e ao uso sustentável do ambiente.

3.5.1 Landsat-8

O Landsat é uma iniciativa conjunta liderada pelo USGS (*United States Geological Survey*) e pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) para observação da Terra (Figura 2). Este programa representa o sistema de satélites para sensoriamento remoto mais duradouro do mundo, caracterizado por sua resolução moderada. A principal finalidade da série Landsat é capturar imagens das áreas terrestres para monitorar mudanças nessas regiões ao longo do tempo (USGS, 2024).

O Landsat-8 foi lançado em 11 de fevereiro de 2013, mas apenas recebeu esse nome em 30 de maio de 2013, inicialmente conhecido como *Landsat Data Continuity Mission*. Este satélite carrega dois sensores principais: o *Operational Land Imager* (OLI) e o *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). Esses instrumentos permitem a coleta de dados sobre a superfície terrestre, oferecendo informações cruciais para uma variedade de aplicações, incluindo monitoramento ambiental, agricultura, recursos naturais, planejamento urbano e muito mais.

Figura 2 - Satélite Landsat-8.



Fonte: USGS (2024).

Em SR, a reflectância monocromática é uma medida fundamental para entender as características das superfícies terrestres observadas por sensores em satélites ou aeronaves. Ela é influenciada por diversos fatores, incluindo a composição do material da superfície, a textura da superfície, a umidade, a rugosidade e a presença de vegetação. Utiliza-se a reflectância monocromática para interpretar e analisar imagens de sensoriamento remoto e extrair

informações sobre diferentes tipos de cobertura do solo, como vegetação, corpos d'água, áreas urbanas e características geológicas (BENÍCIO, 2018). Ao comparar a reflectância em diferentes bandas espectrais, é possível identificar padrões e tendências que ajudam na caracterização e classificação das superfícies observadas.

O sensor *Operational Land Imager* (OLI) do Landsat-8 apresenta duas novas bandas espectrais em comparação ao Landsat-7 ETM+. Uma delas é especialmente projetada para detectar nuvens cirrus (banda 9, um novo canal no Infravermelho Próximo (NIR)), e a outra para observações da zona costeira (banda 1, um novo canal visível azul profundo). Ele capta dados nas porções visível, NIR e Infravermelho de Onda Curta (SWIR) do espectro eletromagnético, oferecendo resolução espacial pancromática de 15 m e resolução espacial multiespectral de 30 m (USGS, 2024).

A plataforma MapBiomas utiliza imagens de satélite, como as do Landsat, que são capturadas a cada 16 dias. Essas imagens são integradas com dados de diferentes datas e de outros satélites para garantir uma cobertura temporal abrangente. Posteriormente, passam por um processo de validação rigoroso antes de serem disponibilizadas na plataforma GEE (*Google Earth Engine*). Este processo garante a qualidade e confiabilidade das imagens utilizadas para mapear e monitorar as mudanças na cobertura e uso da terra ao longo do tempo.

Já o *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) foi integrado à carga útil do Landsat-8 para continuar a captura de imagens térmicas e suportar aplicações emergentes, como medições da taxa de evapotranspiração para gestão da água. O TIRS tem uma vida útil de design de três anos. Os dados de 100 m do TIRS são combinados com os dados do OLI para criar produtos de dados do Landsat-8 com correção radiométrica, geométrica e correções de terreno em 12 bits. Esses recursos são fundamentais para uma ampla gama de aplicações, desde monitoramento ambiental até gestão de recursos naturais e agrícolas.

A Tabela 1 descreve os valores dos comprimentos das ondas captadas pelo sensor Landsat-8 OLI em micrômetros.

Tabela 1 - Bandas espectrais do Landsat-8 - OLI.

Banda	Comprimento da onda
B1 Azul costeiro	0,43 - 0,45 μm
B2 Azul	0,45 - 0,51 μm
B3 Verde	0,53 - 0,59 μm
B4 Vermelho	0,64 - 0,67 μm
B5 Infravermelho próximo	0,85 - 0,88 μm
B6 Infravermelho médio	1,57 - 1,65 μm
B7 Infravermelho médio	2,11 - 2,29 μm
B8 Pancromática	0,50 - 0,68 μm
B9 Cirrus	1,36 - 1,38 μm

Fonte: Autor / Adaptado de: USGS (2024).

3.5.2 Sentinel-2

O Sentinel-2 é uma missão em órbita polar que disponibiliza imagens multiespectrais de alta resolução para monitoramento terrestre, abrangendo uma ampla gama de áreas, como vegetação, solo, cobertura de água, vias navegáveis interiores e regiões costeiras (Figura 3). Além disso, o Sentinel-2 pode ser utilizado para fornecer informações valiosas em situações de emergência, ajudando em operações de resposta e gestão de desastres naturais (ESA, 2024).

O Sentinel-2A foi lançado em 23 de junho de 2015, seguido pelo Sentinel-2B em 7 de março de 2017. Esses satélites trabalham em conjunto para fornecer uma cobertura espacial e temporal abrangente, permitindo o monitoramento regular e preciso das mudanças ambientais e do uso da terra em escala global. Com sua capacidade de capturar dados de alta resolução em várias faixas espectrais, o Sentinel-2 desempenha um papel crucial em aplicações como agricultura de precisão, gestão de recursos naturais, planejamento urbano e muito mais.

Figura 3 - Satélite Sentinel-2.



Fonte: ESA (2024).

O satélite transporta uma carga útil óptica com 13 bandas espectrais: quatro com resolução espacial de 10 m, seis com resolução de 20 m e três com resolução de 60 m. A largura de varredura orbital do satélite é de 290 km. Ele possui um tempo de revisita de 10 dias no equador quando utilizando um único satélite e de 5 dias com dois satélites, o que resulta em um tempo de revisita de 2-3 dias em latitudes médias, sob condições livres de nuvens. Essas características proporcionam uma cobertura espaço temporal abrangente, permitindo o monitoramento regular e detalhado de áreas específicas ao redor do mundo (ESA, 2024). Os valores dos comprimentos de onda captados pelos sensores do satélite Sentinel-2 estão descritos na Tabela 2:

Tabela 2 - Bandas espectrais do Sentinel-2.

Banda	Comprimento da onda
B2 Azul	0,458 - 0,523 μm
B3 Verde	0,543 - 0,578 μm
B4 Vermelho	0,650 - 0,680 μm
B8 Infravermelho próximo	0,785 - 0,900 μm
B8A Infravermelho próximo	0,855 - 0,875 μm
B11 Infravermelho médio	1,565 - 1,655 μm
B12 Infravermelho médio	2,100 - 2,280 μm

Fonte: Autor / Adaptado de: Zhang *et al.* (2018).

3.5.3 Técnicas de Sensoriamento Remoto para recursos hídricos

As técnicas de sensoriamento remoto para recursos hídricos incluem uma variedade de métodos e abordagens. Isso abrange desde a utilização de imagens de satélite de alta resolução, como as fornecidas pelos satélites Landsat e Sentinel, até a utilização de dados de radar e sensoriamento óptico para detectar mudanças na cobertura da água e na qualidade da água (SOUZA, 2018).

Além disso, técnicas avançadas de processamento de imagens, como a correção atmosférica e a classificação de imagens, são aplicadas para garantir a precisão dos dados coletados. Outras abordagens incluem o uso de dados de sensores de temperatura da superfície da água e de sensores de micro-ondas para monitorar a evaporação e a umidade do solo (NOVO *et al.*, 2005). Essas técnicas são essenciais para entender melhor a distribuição espacial e temporal dos recursos hídricos e para apoiar a tomada de decisões informadas sobre a gestão sustentável desses recursos.

O sensoriamento remoto por imagens de satélite oferece várias vantagens significativas em comparação com outras técnicas de coleta de dados, como medições de campo, sensores em aeronaves, estações pluviométricas terrestres, medições hidrométricas, técnicas de sensoriamento por radar e medições de drones. Enquanto essas outras técnicas podem fornecer dados detalhados em pontos específicos, elas frequentemente enfrentam desafios significativos, como limitações de cobertura espacial, custos operacionais elevados, restrições de acesso e dificuldades logísticas (GEINOVA, 2023).

Por outro lado, as imagens de satélite oferecem uma cobertura espacial abrangente, permitindo a observação de vastas áreas geográficas em uma única passagem. Além disso, os satélites orbitais podem acessar regiões remotas e de difícil acesso, fornecendo dados regulares e consistentes ao longo do tempo. Essa capacidade de coletar informações de forma eficiente e abrangente é especialmente valiosa para o monitoramento de recursos hídricos em grandes bacias hidrográficas ou áreas extensas. Além disso, as imagens de satélite podem ser processadas e analisadas remotamente, reduzindo a necessidade de intervenção humana direta e permitindo uma rápida disseminação de informações para tomada de decisões.

As imagens passam por um processo de processamento que compreende várias etapas importantes. Inicialmente, ocorre projeção cartográfica para o Sistema Geodésico de Referência

– SIRGAS 2000. Em seguida, é realizado o cálculo de radiância para reflectância, permitindo a transformação dos dados brutos em valores de reflectância.

Um passo crucial no processamento das imagens é a correção atmosférica, que é realizada pelo método de subtração de objetos escuros (*Dark Object Subtraction* - DOS), desenvolvido por Chavez Junior (1988). Este método envolve a identificação de áreas escuras na imagem que representam pixels com reflexão zero ou mínima de luz solar devido à presença de sombra ou objetos escuros. Esses valores são selecionados no histograma e, em seguida, subtraídos de cada banda da imagem, corrigindo assim os efeitos atmosféricos e melhorando a qualidade dos dados de reflectância no topo da atmosfera (TOA).

Essas etapas de processamento são essenciais para garantir a precisão e confiabilidade das imagens obtidas, possibilitando uma análise mais precisa e detalhada das características da superfície terrestre. Portanto, o uso de satélites para sensoriamento remoto oferece uma abordagem eficaz e econômica para monitorar e gerenciar recursos hídricos em escala regional e global (GEINOVA, 2023).

4. METODOLOGIA

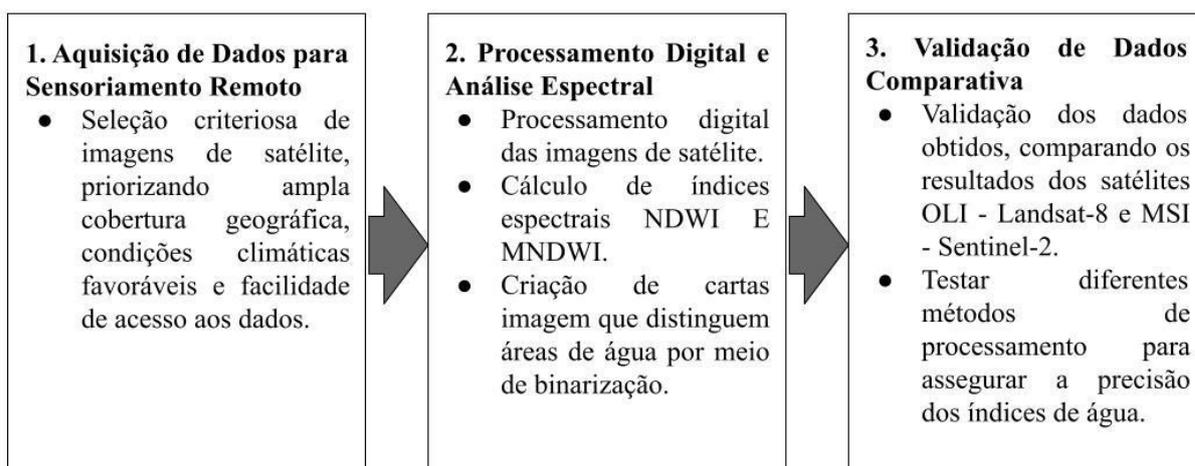
A metodologia adotada neste estudo foi delineada em três etapas distintas, cada uma desempenhando um papel crucial na análise e interpretação dos dados.

A primeira etapa consistiu na aquisição de dados orbitais e hidrológicos relevantes para o estudo em questão. Isso envolve a coleta de informações provenientes de fontes orbitais, como satélites, bem como dados hidrológicos de fontes confiáveis. Esses dados orbitais e hidrológicos formam a base essencial para a análise subsequente.

Na segunda etapa, os dados adquiridos passaram por uma fase de processamento. Onde o foco está na extração e análise dos índices espectrais de água e vegetação, bem como na avaliação do uso e ocupação do solo. Este processo envolve técnicas avançadas de processamento de imagens e análise de dados para extrair informações significativas sobre a cobertura vegetal, recursos hídricos e padrões de uso da terra na área de estudo.

Por fim, a terceira etapa concentra-se na apresentação e interpretação dos resultados obtidos durante as etapas anteriores. Essa interpretação dos resultados ajuda a contextualizar as descobertas dentro do contexto mais amplo do estudo e fornece uma base sólida para conclusões e recomendações futuras. Para a obtenção dos resultados o software livre de georreferenciamento QGIS versão 3.18 Zürich.

Figura 4 - Fluxograma da metodologia.

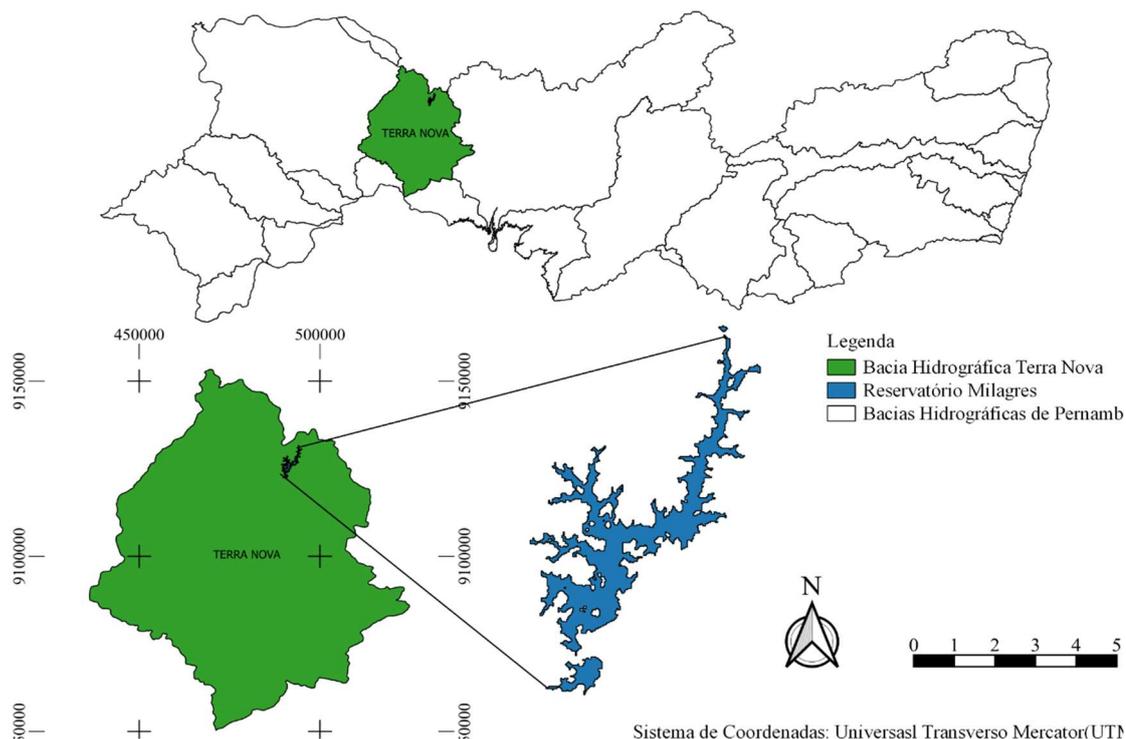


Fonte: Autor (2024).

4.1 Área de estudo

O Reservatório Milagres (Figura 5) encontra-se na região entre os municípios de Salgueiro e Verdejantes em Pernambuco.

Figura 5 - Área de estudo.



Fonte: Autor (2024).

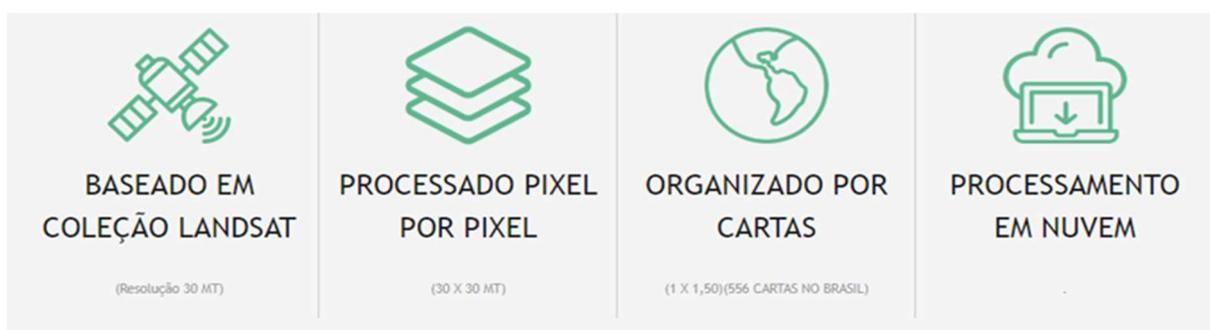
Este corpo hídrico está inserido na Bacia Hidrográfica Terra Nova, abrangendo uma extensão que vai das coordenadas $7^{\circ}54'03''$ sul e $39^{\circ}03'52''$ oeste de longitude até $7^{\circ}55'29''$ sul e $39^{\circ}04'59''$ oeste de longitude (APAC, 2024b). De acordo com informações do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), a Barragem Milagres apresenta uma altura significativa de 39 m, além de possuir a capacidade volumétrica de $91,79 \text{ hm}^3$. Com um coroamento estendendo-se por cerca de 1.050 m de comprimento, este reservatório destina-se primordialmente ao abastecimento humano, desempenhando um papel crucial na oferta de água para a região (SNISB, 2024).

4.2 Caracterização de uso e ocupação do solo a partir do MapBiomias

Com base nas informações da plataforma MapBiomias, todos os mapas anuais de cobertura e uso do solo do MapBiomias são produzidos a partir da classificação "pixel a pixel" de imagens dos satélites Landsat, com resolução de 30 m. Para cada ano foram utilizadas imagens do melhor Landsat disponível, sendo assim: 1985 a 1999 – Landsat 5 / 2000 a 2002 – Landsat 7 / 2003 a 2011 – Landsat 5 / 2012 – Landsat 7 / 2013 a 2017 – Landsat 8 (PROJETO MAPBIOMAS, 2024).

Todo processo é feito com extensivos algoritmos de aprendizagem de máquina (*machine learning*) através da plataforma *Google Earth Engine*, com uma série temporal de mais de 30 anos, que oferece imensa capacidade de processamento na nuvem. Para facilitar a parametrização dos algoritmos e a organização de todas as etapas de processamento utilizam-se as 556 cartas de 1 x 1,50 (lat/long) do IBGE (PROJETO MAPBIOMAS, 2024), sendo exemplificadas na Figura 6.

Figura 6 - Simplificação da metodologia do MapBiomias.



Fonte: Projeto MapBiomias (2022).

Em relação à classificação da infraestrutura urbana na Coleção 8, utilizou-se o mosaico das imagens Landsat do período de 1985 até 2022, e, portanto, considerando uma série histórica de 37 anos, foi aplicada uma classificação automática utilizando o treinamento de amostras.

Para cada ano é montado um mosaico que cobre o Brasil, que será utilizado como fonte de parâmetros para o algoritmo classificar as imagens, onde também é obtido a composição RGB que permite visualizar a imagem de fundo na plataforma MapBiomias. O RGB (*Red, Green and Blue* em inglês, ou seja, vermelho, verde e azul) é um sistema que regula as cores

dos corpos que emitem luz, sendo muito utilizado para visualização de imagens de sensoriamento remoto. Esta composição também é utilizada para a coleta de amostras de treinamento e avaliação da acurácia por interpretação visual.

A partir dos mosaicos de imagens, as equipes de cada bioma e de cada tema produzem um mapa de classe de cobertura e uso do solo. A partir dessa classificação, foi realizado o *download* do bioma Brasil e então realizado o recorte da área de estudo para uma análise temporal entre os anos 2016 e 2022.

4.3 Aquisição de dados

Esta seção enfatiza o processamento das informações orbitais e hidrológicas da área de estudo.

4.3.1 Dados orbitais

Neste estudo, foram coletados dados orbitais provenientes de dois satélites: o Sentinel e o Landsat. A Tabela 3 apresenta as principais características dos satélites Landsat-5, Landsat-8 e Sentinel-2.

Tabela 3 - Características das imagens.

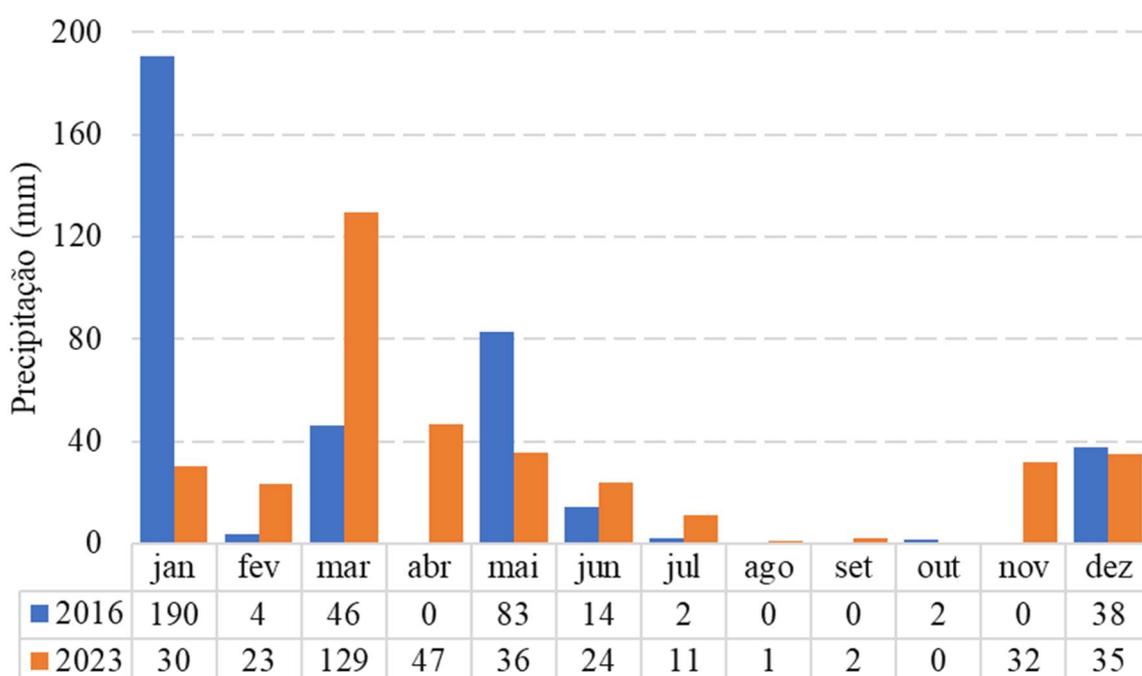
Características	Satélite		
	Landsat-5	Landsat-8	Sentinel-2
Aquisição	18/11/1985 e 15/10/1996	16/11/2009	17/11/2019
Recobrimento espectral	0,450 a 12,500 μm	0,443 a 12,005 μm	0,443 a 2,190 μm
Resolução radiométrica	8 bits	12 bits	12 bits
Resolução espacial	30 m	30 m	10 a 20 m
Resolução temporal	16 dias	16 dias	5 dias
Fonte	<i>United States Geological Survey (USGS)</i>		<i>European Space Agency (ESA)</i>

Fonte: Autor / Adaptado de: USGS, ESA (2020).

4.3.2 Dados hidrológicos

Os dados pluviométricos foram obtidos da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC). Esses dados são fundamentais para compreender o clima local e seus impactos nos processos hidrológicos. A Figura 7 ilustra a precipitação média anual da área de estudo nos anos de 2016 e 2023, com os dados coletados pelo posto hidrológico Salgueiro - PCD de código 348 (APAC, 2024a).

Figura 7 - Precipitação mensal da área de estudo em 2023 e 2016.



Fonte: Autor (2024) / Base de dados: APAC (2024a).

Ao analisar os dados hidrológicos da área de estudo, foi possível comparar a quantidade de chuvas nos anos em questão. Em 2016, registrou-se uma precipitação anual de 378,8 mm, enquanto em 2023, esse valor foi de 369,2 mm. Embora haja uma similaridade entre os números, houve uma diminuição 2,5% na precipitação média anual ao longo desses anos.

Foi observado que tanto em 2016 quanto em 2023, os meses de agosto, setembro e outubro foram caracterizados por uma maior estiagem. Esse padrão torna esse período ideal para o monitoramento geoespacial da área de estudo, pois é durante esses meses que os impactos

da escassez de chuvas podem ser mais evidentes e demandar medidas de gestão e intervenção adequadas.

4.4 Parâmetros biofísicos e extração das áreas

Para calcular a reflectância monocromática das bandas correspondentes do sensor OLI/Landsat-8, é necessário converter para reflectância planetária utilizando o coeficiente de reescalonamento de reflectância fornecido no arquivo de metadados da imagem (MTL file), conforme descrito na Equação 1 (USGS, 2020).

$$\rho'_{\lambda i} = M_{\rho i} * ND_i + A_{\rho i} \quad (1)$$

onde, $\rho'_{\lambda i}$ é a reflectância planetária sem correção de ângulo solar; ND_i é o número digital correspondente a intensidade de pixel de cada banda; $M_{\rho i}$ é o fator multiplicativo de redimensionamento de cada banda e $A_{\rho i}$ é o fator aditivo de redimensionamento de cada banda.

Após o processamento da reflectância, é necessário fazer a correção da mesma a partir do ângulo solar de acordo com a Equação 2 (ARIZZA, 2013).

$$\rho_{\lambda i} = \frac{\rho'_{\lambda i}}{\cos(Z) * \left(\frac{1}{d_{TS}}\right)^2} \quad (2)$$

onde, Z é o ângulo zenital solar obtido com base no ângulo de elevação do Sol - E , uma vez que $Z = 90 - E$; d_{TS} é a distância Terra-Sol.

O processamento das imagens do Sentinel foi feito seguindo o modelo de Zhang et al. (2018), onde a reflectância planetária é calculada a partir da Equação 3.

$$\rho_{\lambda} = \frac{ND}{Quantification Value} \quad (3)$$

Na Tabela 4 e 5 estão listados os parâmetros utilizados no cálculo dos índices, todos eles encontrados nos metadados de cada imagem Landsat e Sentinel, respectivamente.

Tabela 4 - Dados orbitais das imagens Landsat.

Data	Hora (UTM)	E	dTS	Mpi	Api
06/10/2016	12:42:06	64,90305462	0,9995691	0,00002	-0,1
02/10/2023	12:41:54	64,15191569	1,0009599	0,00002	-0,1

Fonte: Autor / Adaptado de: USGS (2023).

Tabela 5 - Dados orbitais das imagens Sentinel.

Data	Hora (UTM)	Quantification Value
01/10/2016	13:06:33	10000
02/10/2023	12:41:54	10000

Fonte: Autor / Adaptado de: ESA (2023).

4.4.1 NDWI

Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI) foi proposto por McFeeters (1996) e processado a partir das imagens coletadas pelos satélites. O NDWI (*Normalized Difference Water Index*) tem valores que variam de -1 a 1. Resultados menores que 0 representa a ausência da cobertura de água, enquanto valores maiores que 0 significam a presença de água.

O NDWI de McFeeters (1996) utiliza bandas do espectro eletromagnético no infravermelho próximo e no verde para realçar corpos de água. Ele é especialmente sensível à presença de água e menos sensível a outros tipos de superfícies, como solo úmido ou vegetação densa. Isso o torna útil para mapear grandes corpos de água e áreas inundadas. Essa expressão é demonstrada na Equação 4 a seguir:

$$NDWI_{MCF} = \frac{\rho_{\lambda GREEN} - \rho_{\lambda NIR}}{\rho_{\lambda GREEN} + \rho_{\lambda NIR}} \quad (4)$$

onde, $\rho_{\lambda NIR}$ representa os valores de reflectância do infravermelho próximo e $\rho_{\lambda GREEN}$ os valores de reflectância na região do vermelho que correspondem, respectivamente, às bandas 8 e 3 para o Sentinel-2 e as bandas 5 e 3 para o Landsat-8.

$$NDWI_{MCF Land} = \frac{B3 - B5}{B3 + B5} \quad (5)$$

$$NDWI_{MCF Sent} = \frac{B3 - B8}{B3 + B8} \quad (6)$$

4.4.2 MNDWI

Xu (2006) propôs uma modificação no índice espectral de águas (NDWI). O MNDWI (*Modified Normalized Difference Water Index*) varia em uma escala de -1 a 1. Valores inferiores a 0 indicam a falta de água, ao passo que valores superiores a 0 denotam a presença de água, o MNDWI revela detalhes mais apurados dos corpos hídricos em comparação ao NDWI.

O MNDWI de Xu (2006) é uma variação do NDWI que utiliza bandas no infravermelho médio e no verde. Ele foi desenvolvido para melhorar a detecção de água em áreas urbanas, onde a presença de construções e superfícies artificiais pode interferir na interpretação dos dados. O MNDWI é eficaz na distinção entre água e superfícies artificiais, tornando-se uma escolha preferida para o mapeamento de corpos d'água em ambientes urbanos. Essa expressão é demonstrada na Equação 7.

$$MNDWI = \frac{\rho_{\lambda GREEN} - \rho_{\lambda SWIR}}{\rho_{\lambda GREEN} + \rho_{\lambda SWIR}} \quad (7)$$

onde, $\rho_{\lambda SWIR}$ representa os valores de reflectância do infravermelho médio e $\rho_{\lambda GREEN}$ os valores de reflectância na região do verde, que correspondem, respectivamente, às bandas 11 e 3 para o Sentinel-2 e as bandas 6 e 3 para o Landsat-8.

$$MNDWI_{Xu Land} = \frac{B3 - B6}{B3 + B6} \quad (8)$$

$$MNDWI_{Xu Sent} = \frac{B3 - B11}{B3 + B11} \quad (9)$$

4.4.3 Extração de áreas

Após o cálculo dos índices espectrais de água, realizou-se a binarização das imagens, distinguindo as áreas aquáticas das não aquáticas, por meio de um raster no qual se podem identificar os valores positivos dos índices espectrais de água. Assim, as regiões onde o NDWI > 0 ou o MNDWI > 0 foram destacadas. Posteriormente, procedeu-se à vetorização dessa imagem binarizada, permitindo a seleção da região de interesse, ou seja, o corpo hídrico. Com essa região selecionada, criou-se um arquivo e a partir dele geramos uma tabela utilizando uma função interna do software QGIS, na qual foi possível calcular a área superficial do corpo d'água.

Este procedimento foi repetido para cada método de índice espectral de água, bem como para cada satélite utilizado no estudo. O índice espectral de água deve demonstrar uma maior disponibilidade hídrica, com o aumento do escoamento superficial após a construção do reservatório. No centro do corpo hídrico, espera-se valores de NDWI mais próximos a 1, e nas bordas, valores positivos menores. Além disso, por meio do processo de binarização do MNDWI espera-se identificar mudanças no comportamento da área superficial do reservatório para períodos de baixa e alta precipitação.

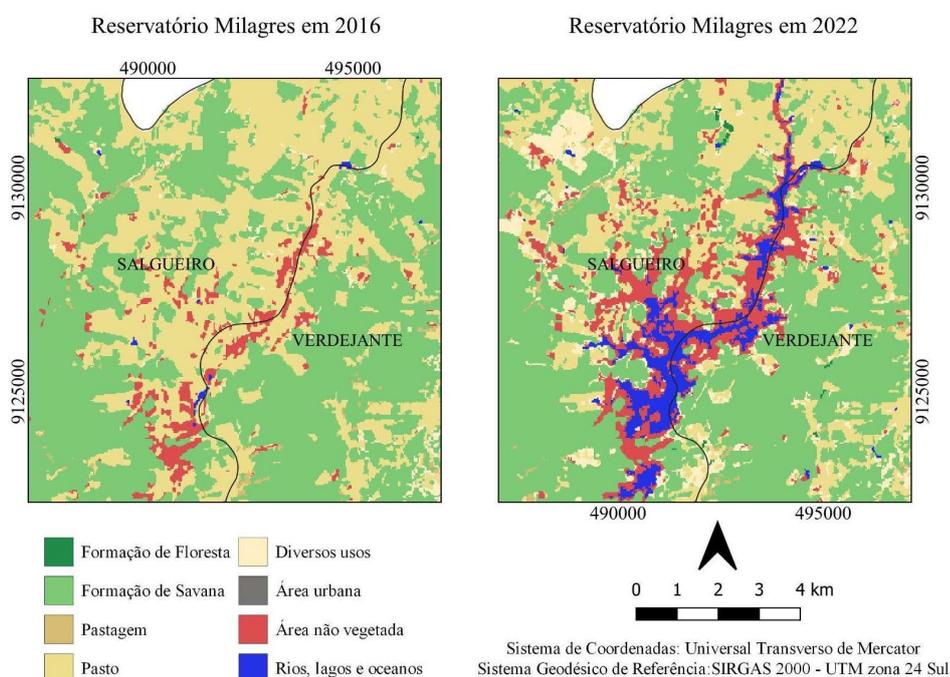
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção mostra os resultados obtidos através da aplicação da metodologia adotada.

5.1 Análise de uso e ocupação do solo

Pode-se observar na Figura 8 as classes de uso e ocupação do solo dos municípios de Salgueiro e Verdejante. As classes do uso da terra dos bairros foram obtidas com base no Projeto MapBiomias, coleção 8.0, para os anos de 2016 a 2022.

Figura 8 - Classificação do uso e ocupação do solo.



Fonte: Autor (2024) / Base de dados: Projeto MapBiomias (2022).

Ao analisar os municípios foram identificadas duas classes de cobertura natural (Formação de Floresta e Formação de Savana) e cinco classes de uso da terra influenciados pelo homem (Pastagem, Pasto, Diversos Usos, Área Urbana, e Áreas não vegetadas), sendo as classes de maior predominância Pastagem abrangendo aproximadamente 27% da área de estudo, e Diversos Usos abrangendo aproximadamente 23% da área. Destacou-se uma maior porcentagem de área urbana nas regiões no entorno da área de estudo.

Evidenciou-se, na Tabelas 6, que entre os anos de 2016 a 2022 ocorreu um aumento significativo na área correspondente à Área Urbana, em 2016 o valor era de 7,38 km² em Salgueiro e 1,15 km² em Verdejante e aumentou para 10,13 km² em Salgueiro e 1,33 km² em Verdejante no ano de 2022, no que se refere a área ocupada por corpos hídricos, indicada pela classe Rios, Lagos e Oceano, observou-se um aumento significativo, no ano de 2016 o valor da área era de 2,43 km² em Salgueiro e 1,66 km² em Verdejante e passou a ser de 9,81 km² e 3,65 km², respectivamente para o ano de 2022.

As classes referentes a áreas com presença de vegetação sofreram uma redução, para o ano de 2016 a área referente a Mosaico de Agricultura e Pastagem, em Salgueiro era de 509,05 km² e passou a ser de 501,92 km² no ano de 2022, para o município de Verdejante passou de 124,89 km² em 2016 para 116,14 km² em 2022.

As áreas classificadas como Pastagem apresentaram valor de 32,56 km² em Salgueiro no ano de 2016, e aumentaram para 308,9 km² no ano de 2022, já para o município de Verdejante, esta área diminuiu de 113,41 km² para 91,13 km², caracterizando um aumento percentual de 849% para Salgueiro e uma redução de 20% para Verdejante. Enquanto a Área Urbana apresentou um aumento percentual de 37% para Salgueiro e 15% para Verdejante.

Tabela 6 - Uso e ocupação do solo referente aos municípios de Salgueiro e Verdejante.

Código	Classe Nome	Salgueiro Área (km ²)			Verdejante Área (km ²)		
		2016	2022	Variação	2016	2022	Variação
3	Formação Florestal	2,19	7,60	247%	1,28	3,56	178%
33	Rios, Lagos e Oceano	2,43	9,81	304%	1,66	3,65	120%
15	Pastagem	32,56	308,90	849%	113,41	91,13	-20%
21	Mosaico de Agricultura e Pastagem	509,05	501,92	-1%	124,89	116,14	-7%
24	Área Urbana	7,38	10,13	37%	1,15	1,33	15%
25	Áreas não vegetadas	20,38	21,27	4%	4,23	8,30	96%

Fonte: Autor (2024).

Em seguida, foi efetuado o processamento das imagens provenientes do Landsat-8 e do Sentinel-2, calculando os índices de água NDWI de McFeeters (1996) e o MNDWI de Xu (2006).

Na Tabela 7, foram descritos os valores máximo, médio e mínimo dos índices de água em cada método calculado.

Tabela 7 - Valores de NDWI e MNDWI do Reservatório Milagres.

Imagem		Média	Desvio Padrão	
Landsat	02/10/2023	NDWI	-0,280	0,2133
		MNDWI	-0,394	0,2942
	06/10/2016	NDWI	-0,283	0,0277
		MNDWI	-0,425	0,0365
Sentinel	05/10/2023	NDWI	-0,207	0,0806
		MNDWI	-0,355	0,1211
	01/10/2016	NDWI	-0,247	0,0352
		MNDWI	-0,458	0,0435

Fonte: Autor (2024).

De acordo com os dados hidrológicos coletados, os meses de maior precipitação na área de estudo foram janeiro de 2016 e março de 2023. Nos dois anos, de agosto a outubro, observou-se uma baixa precipitação, a ponto de não ter dados de precipitação em alguns desses meses. O estudo evidenciou no mês de outubro, caracterizado por um período de estiagem no Reservatório Milagres.

A partir da metodologia aplicada foram geradas cartas imagens da área em estudo, nas Figuras 9 e 10, é possível observar os índices espectrais de água NDWI de McFeeters (1996) e MNDWI de Xu (2006) e sensores nos anos de 2016 e 2023, respectivamente.

Os resultados condizem com Leonardo *et al.* (2023) quando os autores pesquisaram uma minuciosa comparação entre as imagens obtidas pelos satélites Landsat e Sentinel, empregando os índices NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) e NDWI (Índice de Água por Diferença Normalizada) propostos por McFeeters (1996), na área adjacente à barragem de

Serrinha II, durante os anos de 2016, 2019 e 2022. Seu estudo abordou não apenas a análise das imagens, mas também a interpretação dos resultados, visando entender as diferenças na cobertura vegetal e na presença de água ao longo do tempo. Os resultados obtidos foram de grande relevância, revelando uma discrepância significativa na área capturada pelo Sentinel em relação ao Landsat, especialmente nos anos de 2016 e 2019.

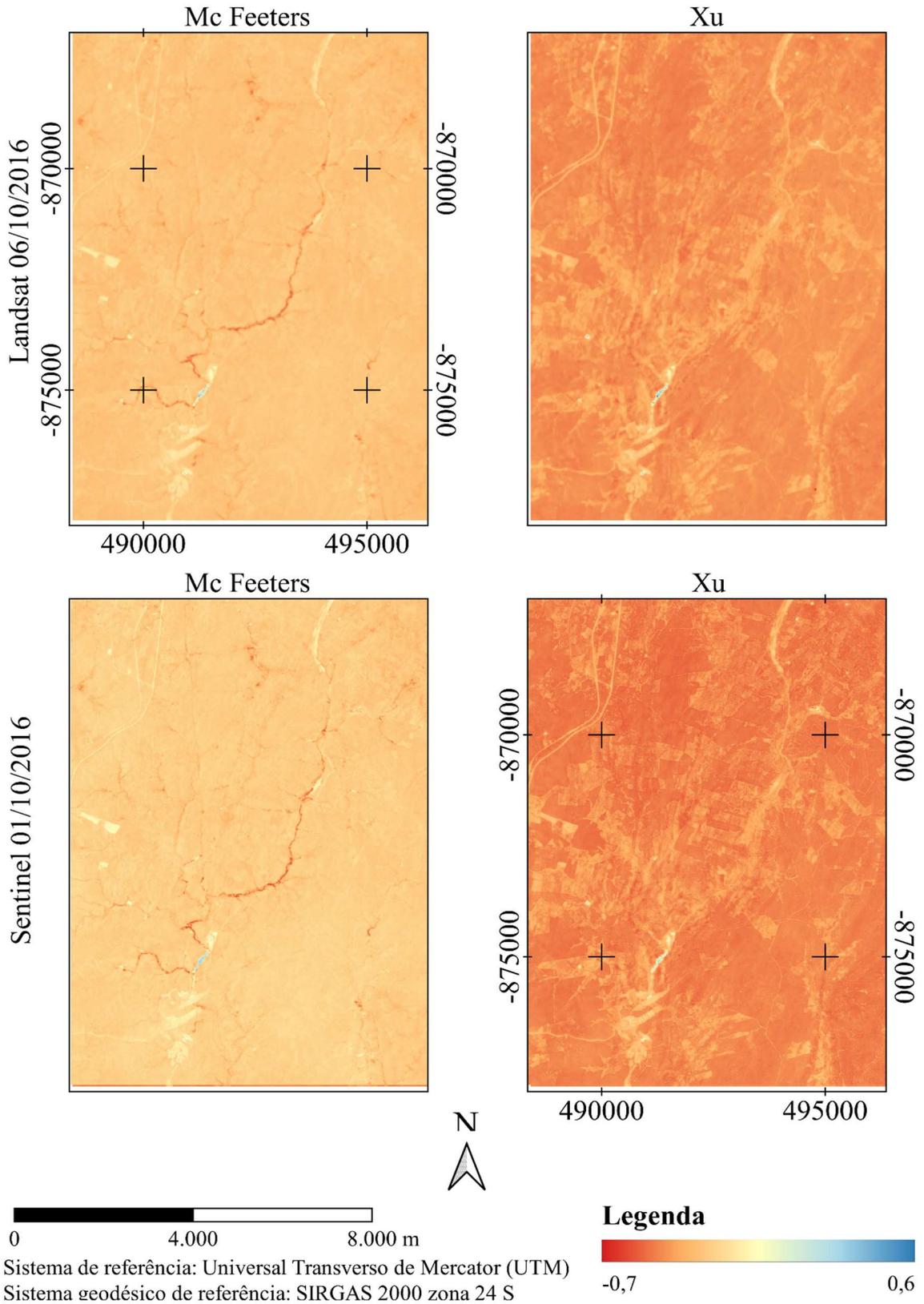
De maneira similar, Almeida *et al.* (2023) empreenderam uma investigação detalhada sobre o comportamento espectral do NDWI de McFeeters (1996) na região próxima a Petrolina - PE, durante os anos de 2009 e 2018. Utilizando imagens do TM Landsat-5 e do OLI Landsat-8, os pesquisadores exploraram a consistência dos valores do NDWI ao longo do tempo. Seus achados revelaram uma predominância de valores negativos para o NDWI em ambos os anos estudados, apontando para possíveis padrões de variação na cobertura hídrica da área ao longo do tempo, onde condiz com os resultados obtidos nesta pesquisa.

Analisando as Figuras 9 e 10, as zonas com coloração avermelhada ou alaranjada são regiões com menor presença de água, enquanto as regiões mais azuladas correspondem à *pixels* de água. Já nas imagens, percebe-se a pequena área superficial no ano de 2016 e o seu considerável aumento em 2023.

Por fim, Rosa *et al.* (2023) contribuíram com uma análise abrangente dos parâmetros biofísicos no município de Belo Jardim. Por meio da utilização de imagens do satélite Landsat-8 nos anos de 2015 e 2020 e do índice de McFeeters (1996), os pesquisadores identificaram uma redução significativa de cerca de 70% na área alagada. Essa diminuição substancial foi atribuída a uma seca prolongada que afetou o município em anos anteriores, destacando a importância da monitorização contínua dos recursos hídricos e dos ecossistemas locais para uma gestão sustentável do meio ambiente. Essa configuração de reduzido espelho de água também foi vista nesta pesquisa no Reservatório Milagres em 2016 (Figura 9).

Por fim, Malinconico *et al.* (2020) utilizaram os índices de Gao (1996) e McFeeters (1996) para examinar a área superficial na bacia do Rio Capibaribe nos anos de 2015, 2017 e 2019. As imagens, provenientes do sensor Landsat-8 OLI, permitiram aos autores concluir que o NDWI de Gao apresentou maior sensibilidade na detecção de variações de umidade, enquanto o NDWI de McFeeters (1996) se destacou pela precisão na delimitação da forma do rio, fato observado nesta pesquisa no Reservatório Milagres.

Figura 9 - NDWI e MNDWI do Reservatório Milagres em 2016.



Fonte: Autor (2024) / Base de dados: USGS (2023), ESA (2023).

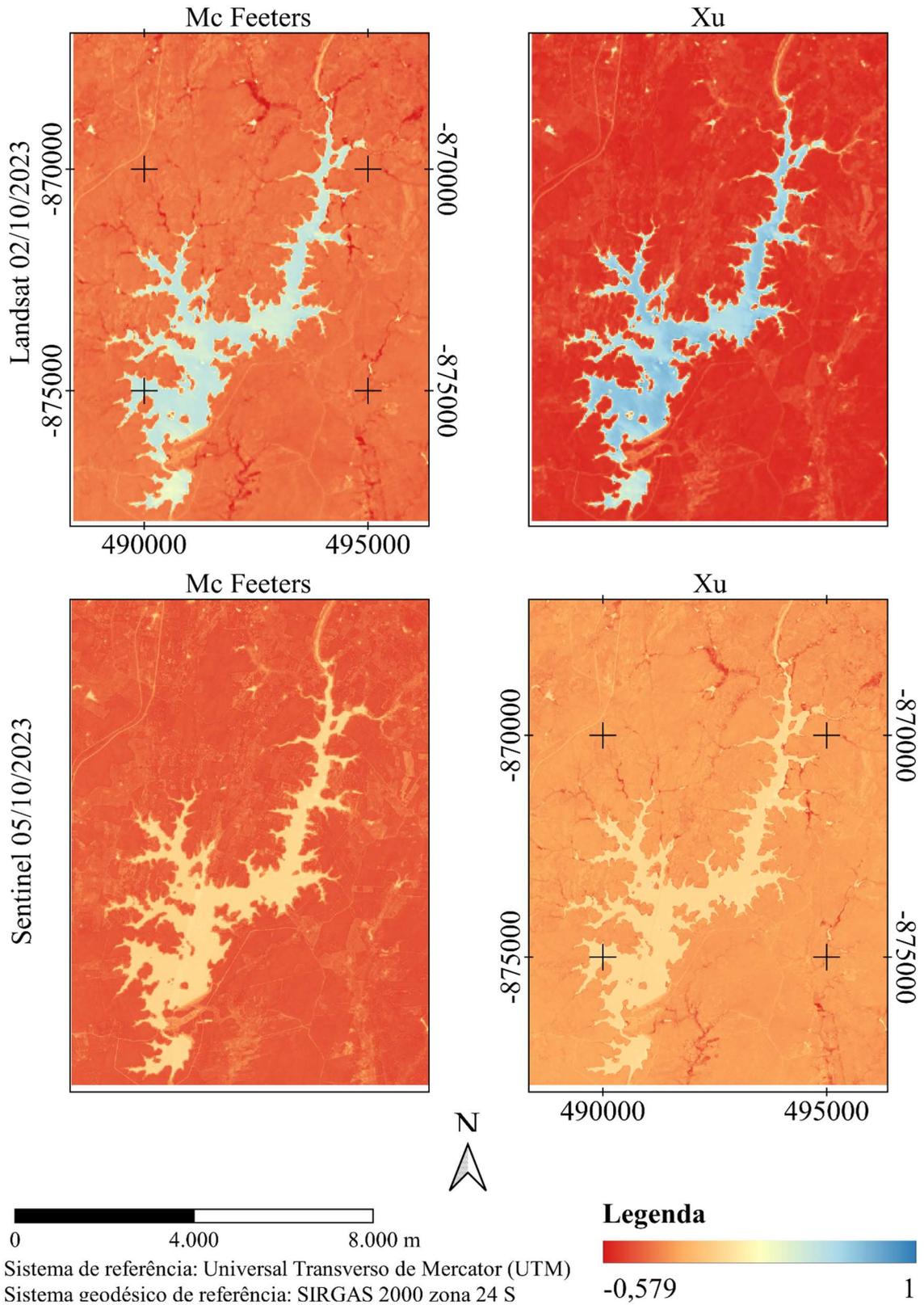
Soares *et al.* (2023) realizaram um estudo abrangente sobre a dinâmica hídrica do reservatório Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves, localizado no Rio Grande do Norte. Para isso, os pesquisadores empregaram o índice modificado de Xu (2006) no processamento das imagens obtidas pelo satélite Landsat-8 OLI. Durante o período investigado, que compreende os anos de 2013, 2014, 2015, 2017, 2018, 2019 e 2020, observou-se uma diminuição contínua da área superficial do reservatório de 2013 a 2017, seguida por um crescimento subsequente. Esses resultados estão em concordância com os dados pluviométricos analisados no estudo, os quais indicaram uma redução na precipitação até o ano de 2017, seguida por um aumento a partir de 2018.

Por outro lado, Xavier e Silva (2023) conduziram uma avaliação do nível da água no reservatório de Furnas, situado entre os municípios São João da Barra e São João Batista do Glória, em Minas Gerais, utilizando tecnologias de sensoriamento remoto. Os pesquisadores processaram imagens adquiridas dos satélites Landsat-7 e Landsat-8 e aplicaram o modelo proposto por Xu (2006) para analisar os índices espectrais de água. Essa análise permitiu acompanhar a evolução da área superficial do reservatório ao longo dos anos, chegando inclusive a identificar um estado de crise hídrica no ano de 2023. Observa-se também esse resultado de plena visualização dos espelhos de água, quando comparadas as Figura 9 e 10.

Em um estudo comparativo, Andrade (2019) investigou os índices de McFeeters (1996) e de Xu (2006) utilizando imagens do Sentinel-2 na bacia hidrográfica do Rio Traipu, em Alagoas. A autora obteve resultados variados para o NDWI de McFeeters (1996), variando de 0,002 a 0,2115, e para o índice de água modificado de Xu (2006), variando de 0,0001 a 0,2497. Concluiu-se que o MNDWI apresentou desempenho superior ao NDWI em relação à identificação dos valores de pixel correspondentes à água, onde observa-se nessa pesquisa com melhor delineamento da área hídrica na Figura 10.

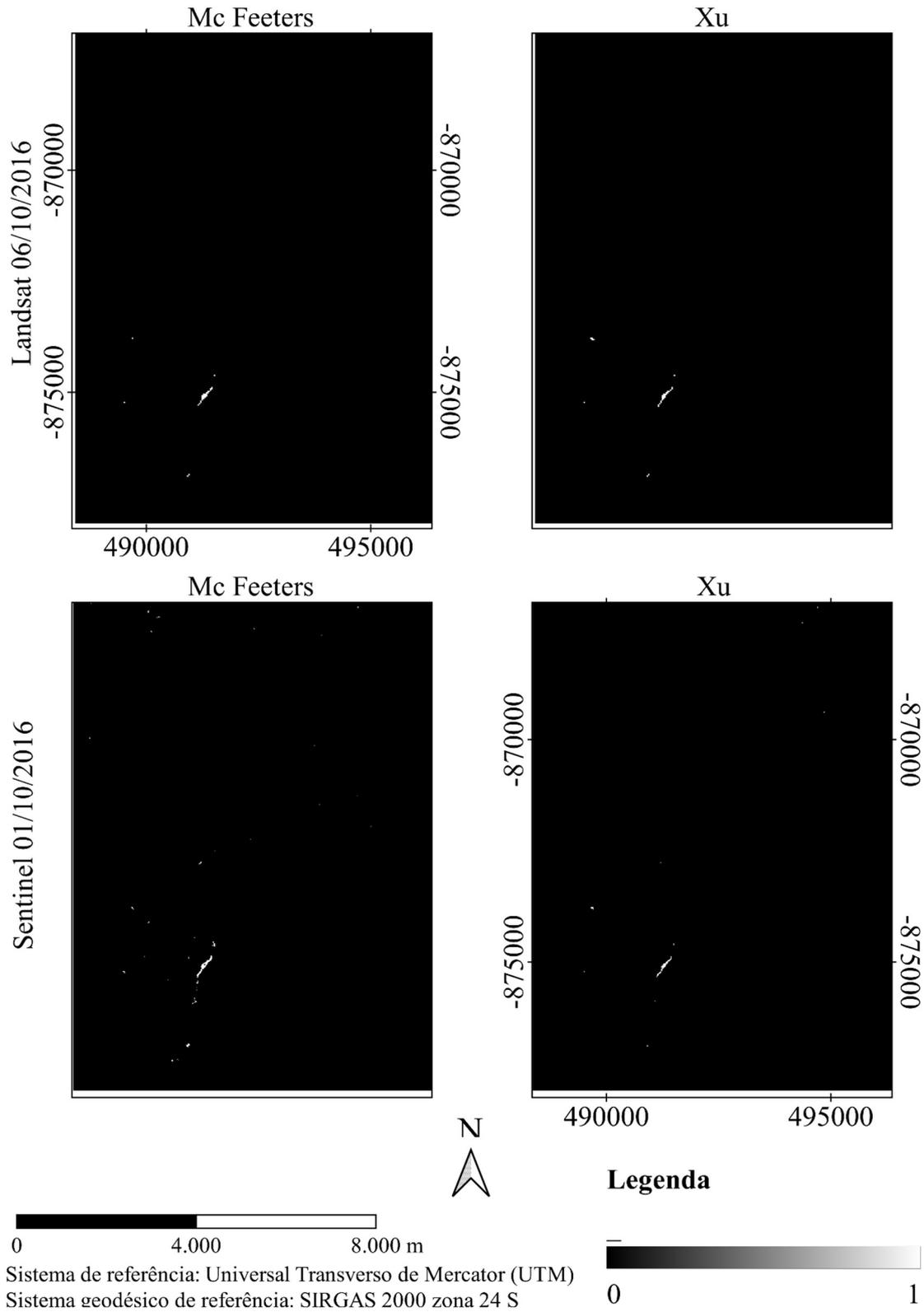
Enquanto o índice de Xu (2006) demonstrou uma média de 0,2497 para o valor do pixel de água, o de McFeeters (1996) revelou uma média de 0,2142. Esses estudos destacam a importância de compreender as particularidades de cada índice para sua aplicação em diferentes contextos. Enquanto alguns índices são mais adequados para delimitar o leito do corpo hídrico, outros se destacam na detecção de variações de umidade. Essa diversidade de abordagens ressalta a necessidade de escolher o índice mais apropriado para os objetivos específicos no estudo, considerando o ambiente e os fenômenos hidrológicos em análise. Nas Figuras 11 e 12 estão representadas as imagens binarizadas de 2016 e 2023.

Figura 10 - NDWI e MNDWI do Reservatório Milagres em 2023.



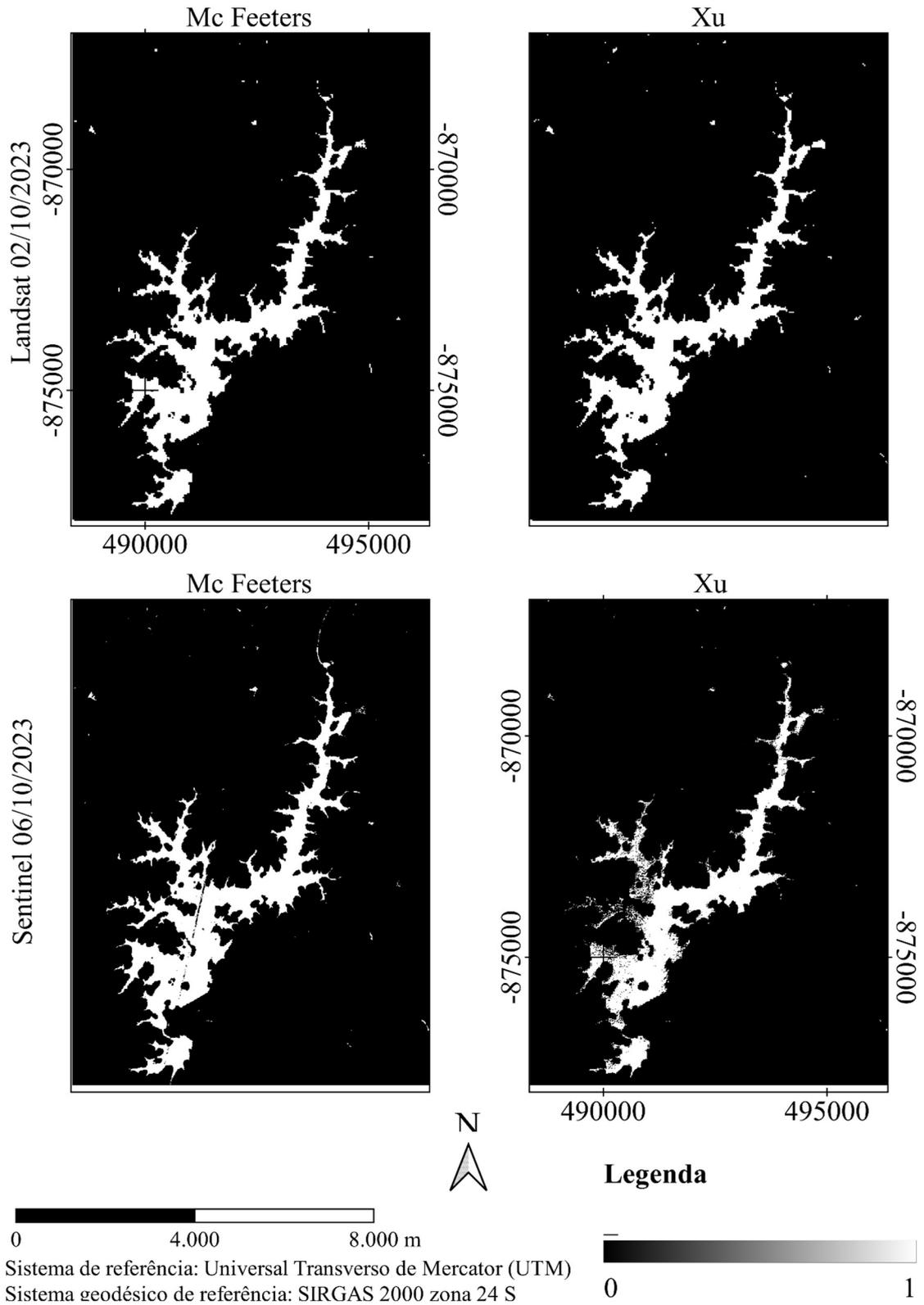
Fonte: Autor (2024) / Base de dados: USGS (2023), ESA (2023).

Figura 11 - Corpo hídrico do reservatório Milagres em 2016.



Fonte: Autor (2024) / Base de dados: USGS (2023), ESA (2023).

Figura 12 - Corpo hídrico do reservatório Milagres em 2023.



Fonte: Autor (2024) / Base de dados: USGS (2023), ESA (2023).

As áreas foram obtidas na binarização das imagens, delimitando bem as regiões de ‘água’ e de ‘não água’, com seus limites bem definidos, a imagem é vetorizada e posteriormente, a área correspondente ao corpo hídrico é selecionada, a partir da forma do corpo hídrico é criada uma tabela que calcula as dimensões dessa área selecionada.

Na Tabela 8 estão listadas as áreas superficiais obtidas por meio de cada método de cálculo de índice espectral de água e por satélite utilizado. Na Figura 13, estão delineadas as áreas obtidas por meio de cada índice de água, assim como a diferença percentual entre elas.

Tabela 8 - Área do Reservatório Milagres.

Imagem		Área (km²)	
Landsat	02/10/2023	NDWI	7,909212
		MNDWI	7,960554
	06/10/2016	NDWI	0,018915
		MNDWI	0,014412
Sentinel	05/10/2023	NDWI	8,158011
		MNDWI	5,742283
	01/10/2016	NDWI	0,032763
		MNDWI	0,019816

Fonte: Autor (2024).

Destaca-se a diferença entre os valores percentuais do crescimento da área superficial do corpo hídrico do reservatório, a alta resolução do sensor possibilitaria uma maior capacidade de discriminação dos pixels, permitindo uma avaliação mais precisa e resultados mais acurados. O Sentinel apesar de ter uma resolução maior, entrega resultados distantes da realidade. Para esse estudo, as imagens provenientes do sensor-satélite OLI Landsat-8 entregam valores mais confiáveis e resultados mais próximos da realidade. O crescimento da área superficial do corpo hídrico varia de acordo com o índice empregado. A Tabela 9 apresenta o crescimento da área superficial do corpo hídrico em porcentagem, detalhadas para cada índice e sensor utilizado.

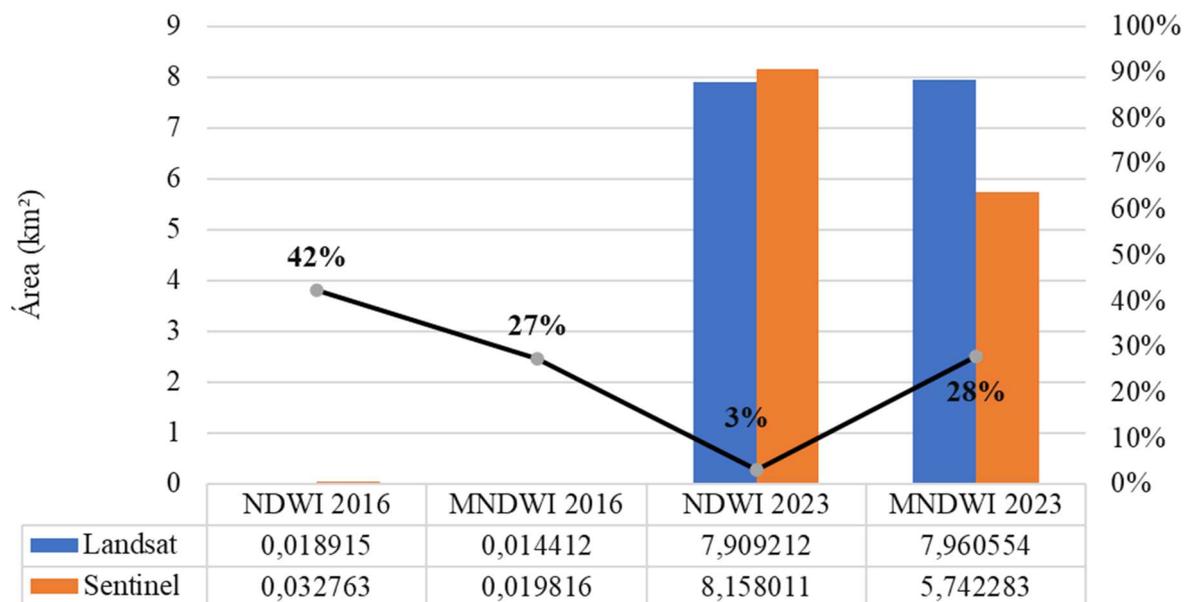
Tabela 9 - Diferença percentual entre as áreas.

	NDWI	MNDWI
Landsat	4.081,44%	55.135,60%
Sentinel	24.820,61%	28.878,01%

Fonte: Autor (2024).

Embora a precipitação média anual em 2023 tenha sido similar à de 2016, nota-se uma diminuição na média anual de precipitação, o que implica numa aparente contradição. No entanto, o fator que contribui para o significativo crescimento da área superficial do Reservatório Milagres foi a inauguração do Trecho de Integração do Rio São Francisco em 2022.

Figura 13 - Diferença entre as áreas.



Fonte: Autor (2024).

6. CONCLUSÃO

Os dois sensores identificaram um aumento significativo na área dos corpos hídricos, o Landsat indicou um aumento médio considerando os anos de 2016 e 2023 através dos índices NDWI (7,72 km²) e MNDWI (7,95 km²). Já o satélite Sentinel detectou um crescimento de 8,12 km² com o NDWI e 5,72 km² com o MNDWI.

Constata-se, portanto, a eficácia da delimitação dos corpos hídricos por meio das tecnologias de sensoriamento remoto. A análise desses estudos evidencia a relevância do sensoriamento remoto para o monitoramento ambiental, destacando a aplicação de diferentes índices espectrais e a utilização de imagens de satélite de diferentes fontes.

A combinação de tecnologias como NDWI e MNDWI, juntamente com o uso de dados de múltiplos sensores-satélite, possibilita uma compreensão mais abrangente e precisa das mudanças hidrológicas em diversas regiões, contribuindo para a gestão sustentável dos recursos hídricos. Essas abordagens representam avanços significativos no campo do monitoramento geoespacial e demonstram o potencial do sensoriamento remoto para auxiliar na tomada de decisões relacionadas ao meio ambiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, D. N. O. **Geotecnologia como ferramenta para delimitação de corpos hídricos no semiárido do Brasil**. 2021. 59 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) - Centro de Tecnologias e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2021.
- ALMEIDA, D. N. O.; MENEZES, R. B. G. G.; LEONARDO, H. R. A. L.; NEVES, R. B. R.; CABRAL, G. L.; PAIVA, A. L. R.; OLIVEIRA, L. M. M.; SANTOS, S. M. Caracterização do comportamento espectral do NDWI e albedo na região geográfica imediata de Petrolina - PE. **Anais do XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2023.
- ALVES, G. A formação das paisagens Sertanejas no tempo e no espaço. **Sertão, sertões: repensando contradições, reconstruindo veredas**, p. 98-113, 2019.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Sistema de Informações Hidrológicas**. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br>. Acesso em: janeiro de 2024.
- ANDRADE, A. B. S. **Utilização dos índices NDWI e MNDWI na detecção de corpos hídricos em imagens Sentinel -2 na bacia hidrográfica do Rio Traipu - Alagoas**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia da Agrimensura) - Centro de Ciências Agrárias - CECA, Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2019.
- ANJINHO, P. S.; BOLLELI, T. M.; BUENO, L. O.; PARIZOTTO, D.; SANTOS, A. R.; RUEZENNE, C. B.; VALADÃO, C. C.; BARBOSA, M. A. G. A.; ROQUE, R. C.; MAUAD, F. F. Acurácia dos dados de cobertura do solo do projeto MapBiomias: Estudo de caso de uma pequena bacia hidrográfica de cabeceira. **Anais do XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2021.
- APAC. **Agência Pernambucana de Águas e Clima**. Histórico de Chuvas. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/>. Acesso: janeiro de 2024a.
- APAC. **Agência Pernambucana de Águas e Clima**. Bacias Hidrográficas. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/>. Acesso: janeiro de 2024b.
- ARAÚJO, E. L.; SANTOS, A. L. G.; MELO, A. L.; ALMEIDA-CORTEZ, J. S.; ALBUQUERQUE, U. P. E. L. Floristic and phytosociological study in the Caatinga of Pernambuco, Brazil. **Acta Botanica Brasilica**, 31(3), p. 366-377, 2017.
- ARAÚJO, S. M. S. A região semiárida do nordeste do Brasil: Questões ambientais e possibilidades de uso sustentável de recursos. **Revista Rios Eletrônica**. Ano 5, n. 5, p. 90-98, 2011.
- ARIZZA, A. **Descripción y Corrección de Productos LandSat 8 LDCM (LandSat Data Continuity Mission), versión 1.0**. Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF): Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Colombia, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.21308.44167>. Acesso em: fevereiro de 2024.
- BARBOSA, J. E. L.; SEVERIANO, J. S.; CAVALCANTE, H.; LUCENA-SILVA, D.; MENDES, C. F.; et al. Impacts of inter-basin water transfer on the water quality of receiving reservoirs in a tropical semi-arid region. **Hydrobiologia - The International Journal of Aquatic Sciences**, vol. 848, n. 3. 2021.

BARELLA, W.; PETRERE JR, M.; SMITH, W. S.; MONTAG, L. F. A. **As relações entre as matas ciliares, os rios e os peixes.** Disponível em: RODRIGUES, R. R.; FILHO, H. F. L. (Org.). **Matas ciliares: conservação e recuperação**, 2. ed. São Paulo: EDUSP, p. 187-208, 2001.

BENÍCIO, P. C. N. **Análise de dados Aster e Topodata usando índices físicos.** 2018. 64 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) - Centro de Tecnologias e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

BORGES, G. M.; PACHÊCO, A. P.; SANTOS, F. K. S. Sensoriamento Remoto: Avanços e perspectivas. **Revista Geografia (UFPE)**, 2014. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/revistageografia/article/view/229116>. Acesso em: fevereiro de 2024.

BRASILEIRO, R. S. Alternativas de desenvolvimento sustentável no semiárido nordestino: da degradação à conservação. **Scientia Plena**, vol. 5, n. 5, 2009. Disponível em: <https://www.scientiaplena.org.br/sp/article/view/629>. Acesso em: janeiro de 2024.

CARMO, M. V. N. S.; LIMA, C. H. R. Caracterização Espaço-Temporal das Secas no Nordeste a partir da Análise do Índice SPI. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 35, pp. 233-242, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0102-7786352016>. Acesso em: março de 2024.

CASTRO, C. N. Transposição e revitalização do São Francisco: memória de uma agenda de pesquisa. **Boletim regional, urbano e ambiental**, 30, pp. 41-49, 2023. Disponível em: DOI: <http://dx.doi.org/10.38116/brua30art3>. Acesso em: março de 2024.

CAVALCANTE, C. A. S. **Classificação das águas para fins de irrigação em área de produtores agroecológicos de Mossoró/RN.** 2023. 36 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) - Departamento de Ciências Agrônômicas e Florestais, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2023.

CHAVEZ JUNIOR, P. S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, 1988. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90019-3](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(88)90019-3). Acesso em: dezembro de 2023.

CHEN, G., *et al.* Integrating Hydrological Data and Remote Sensing Techniques for Sustainable Water Resource Management in the Milagres Reservoir Basin. **Water Management**, 38, p. 123-137. 2021.

CLAUDINO, C. M. A.; COELHO, V. H. A.; FARIAS, V. E. M.; ALMEIDA, A. A. R. D.; SOUSA, B. G. Análise dos impactos da transposição do rio São Francisco a partir do NDWI utilizando a plataforma GEE. **Anais do XVI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste 15º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa**, 2022.

COSTA, A. L. N.; CORREA, W. S. C. Temperatura de superfície Celsius do sensor TIRS/Landsat-8: metodologia e aplicações. **Revista Geográfica Acadêmica**, vol. 7, n. 1, p. 31-45, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.18227/1678-7226rga.v7i1.2996>. Acesso em: março de 2024.

EMBRAPA. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.** Disponível em: <https://www.embrapa.br/> Acesso em dezembro de 2023.

ESA. **European Space Agency.** Landsat. Disponível em: <https://earth.esa.int/eogateway/missions/> Acesso em dezembro de 2023.

- FERREIRA, J. G. A transposição das águas do Rio São Francisco na resposta à seca do Nordeste brasileiro. Cronologia da transformação da ideia em obra. **Campos Neutrais – Revista Latino-Americana de Relações Internacionais**, vol. 1, n. 2, p. 53-72. 2019.
- FICAGNA JUNIOR, E. B.; DIAS, W. R.; RIBEIRO, E. S. Funcionamento hídrico da cobertura pedológica de uma cabeceira de curso d'água afluente do rio São Lourenço em Campo Verde – MT. **Biodiversidade**, vol. 14, n. 1, p. 31, 2015.
- GAO, B. C. NDWI - A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space. **Remote Sensing of environment**, 58(3): p. 257-266, 1996. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3). Acesso em: novembro de 2023.
- GARCIA, F.; et al. Assessing the Impact of Seasonal Precipitation on Water Indices in the Milagres Reservoir Catchment. **Water Resources Research**, 28, p. 789-802. 2019.
- GEINOVA. Disponível em: <https://geoinova.com.br/>. Acesso em: dezembro de 2023.
- GIL, A. P.; PADOVANI, C. R.; COELHO, A. L. N. Comparação entre NDWI e MNDWI para o mapeamento de áreas inundadas no pantanal do Taquari. **Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Santos, 2019.
- GONZAGA, E. P.; SANTOS, V. V.; NICÁCIO, R. M. Análise do comportamento do NDVI e NDWI em períodos de diferentes intensidades pluviométricas no Sertão alagoano. **Anais do XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR**, p. 1736-1743, Curitiba, 2011.
- JOHNSON, E.; BROWN, D. Response of Spectral Water Indices to Drought Conditions: A Study in the Milagres Reservoir Area. **Remote Sensing Letters**, 15, p. 210-225, 2020.
- LEONARDO, H. R. A. L.; MAIA, F. M. A.; PAIVA, A. L. R.; OLIVEIRA, L. M. M.; SANTOS, S. M. Análise da Variabilidade Vegetativa na Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú. **Anais do XVI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste 15º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa**, 2022.
- LEONARDO, H. R. A. L.; ALMEIDA, D. N. O.; CABRAL, G. L.; NEVES, R. B. R.; OLIVEIRA, L. M. M.; PAIVA, A. L. R.; SANTOS, S. M. Análise comparativa dos satélites Sentinel e Landsat a partir dos índices NDVI e NDWI na barragem de Serrinha II. **Anais do XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2023.
- LIMA, G. F. S.; SILVA, J. M. O.; CUNHA, A. P. Use of remote sensing techniques to identify water resources in the Caatinga biome. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 13, p. 2329-2341, 2020.
- LING, X.; TANG, Z.; GAO, J.; LI, C.; LIU, W. Changes in Qinghai Lake Area and Their Interactions with Climatic Factors. **Remote Sens.** 16, p. 129, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs16010129>. Acesso em: dezembro de 2023.
- MALINCONICO, C. H. S.; SILVA JÚNIOR, U. J.; SILVA JÚNIOR, A. J.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; OLIVEIRA, L. M. M. Índices espectrais por sensoriamento remoto na bacia do Rio Capibaribe para configurações hídrica e vegetal. **Anais do XV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, 2020.
- MCFEETERS, S. K. The use of Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **Int. J. Remote Sensing**, 16-17, p. 1425-1432, 1996.

MENDES, C. F.; BEZERRA, N. S.; BARBOSA, J. E. L. Avaliação da qualidade da água em reservatório do Semiárido após recebimento da água da Transposição do Rio São Francisco. **Anais do XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2023.

MENDES, K. G. V.; SILVA, N. M. M.; TENÓRIO, C. L. G.; SOUSA, J. W. G.; COELHO, V. H. R.; SILVA, A. M.; FARIAS, C. W. L. A.; SILVA, R. M.; ALMEIDA, C. N.; BERTRAND, G. F.; SILVA, J. F. C. B. C. Mapeamento automático de um índice de água com dados de sensoriamento remoto orbital para um reservatório do semiárido paraibano. **Anais do XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2023.

NOVO, E. L. M. Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações. 4ª ed. 363 f. **São Paulo: Blucher**, 2010.

NOVO, E. M. L. M.; FERREIRA, L. G.; BARBOSA, C.; CARVALHO, C.; SANOV, E. E.; SHIMABUKUROV, Y.; HUETE, A.; POTTER, C.; ROBERTS, D. A.; HESS, L. L.; MELACK, J. J.; YOSHIKAWA, H.; KLOOSTER, S.; KUMAR, V.; MYNENIX, R.; RATANA, P.; DIDAX, K.; MIURA, T. Advanced remote sensing techniques for global changes and Amazon ecosystem functioning studies. **SciELO - Brasil. Projeto LBA Acta Amazônica**, 35 (2), 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0044-59672005000200016>. Acesso em: março de 2024.

OLIVEIRA, A. S.; VIEIRA, C. A.; FERREIRA, L. G. Land use and land cover changes in the Caatinga biome using supervised classification of Landsat images. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 12(6), p. 2198-2211, 2019.

OLIVEIRA, L. S.; SILVA, T. G. F.; PARENTE, A. K. C. Detection and monitoring of water bodies in semi-arid regions using satellite images: A case study in the northeast of Brazil. **IEEE Latin America Transactions**. 16, p. 53-59, 2018.

PEREIRA, L. E.; AMORIM, G.; GRIGIO, A. M.; FILHO, A. C. P. Análise Comparativa entre Métodos de Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI) em Área Úmida Continental. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**. vol. 41, p. 654-662, 2018. Disponível em: http://dx.doi.org/10.11137/2018_2_654_662. Acesso em: março de 2024.

PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos Avançados**, [S.L.], vol. 22, n. 63, p. 43-60, 2008. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-40142008000200004>. Acesso em: janeiro de 2024

PROJETO MAPBIOMAS – **Coleção 8.0 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil**. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/>. Acessado em: março de 2024.

RAMALHO, M. F. J. L. A fragilidade ambiental do nordeste brasileiro: o clima semiárido e as imprevisões das grandes estiagens. **Sociedade e Território**. vol. 25, nº2, p. 104-115, 2013. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/sociedadeeterritorio/article/view/3629>. Acesso em: março de 2024.

ROBERTO, J. V. A.; SILVA JÚNIOR, U. J.; SILVA JÚNIOR, J. A.; PAIVA, A. L. R.; OLIVEIRA, L. M. M.; SANTOS, S. M. Monitoramento da área superficial do reservatório Milagres - PE, por meio da sensibilidade espectral dos índices de água: NDWI e MNDWI. **Anais do XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2023.

ROSA, R. B.; ARAÚJO, S. D. S.; RODRIGUES JUNIOR, J. C.; SILVA, J. R. L.; RODRIGUES, J. C.; SILVA, S. S. Análise multitemporal de parâmetros biofísicos do município de Belo Jardim, com uso de geotecnologias. **Anais do XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2023.

SILVA, C. V. S.; SILVA, J. L. B.; MOURA, G. B. A.; LOPES, P. M. O.; NASCIMENTO, C. R.; SILVA, L. C. Monitoramento da cobertura vegetal por sensoriamento remoto no semiárido brasileiro através de índices de vegetação. **Nativa**, Sinop, v. 7, n. 6, p. 708-717. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v7i6.7646>. Acesso em: março de 2024.

SILVA, J. A.; SILVA, D. M.; OLIVEIRA, W. G.; ARAÚJO, J. G.; LIMA, R. A. Hydrological modeling applied to water resources management in a semi-arid basin. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, 30, 100710, 2020.

SILVA, M. A. M.; FRUTUOSO, M. N. M. A.; RODRIGUES, S. S. F. B.; NOGUEIRA, R. J. M. C. Fatores socioambientais influenciados pela seca na conservação da caatinga. **HOLOS**, Ano 32, Vol. 4, p. 245. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.15628/holos.2016.4175>. Acesso em: março de 2024.

SMITH, A.; JOHNSON, B.; BROWN, C. Understanding the Seasonal Variation of Precipitation in the Milagres Reservoir Region. **Journal of Hydrology**. 42, p. 567-580, 2018.

SNISB. **Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens**. Consultar Barragem. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/portal-snisb/consultar-barragem/> Acesso: fevereiro de 2024.

SNIRH. **Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos**. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/> Acesso: dezembro de 2023.

SOARES, D. R.; MENEZES, R. B. G. G.; SILVA JÚNIOR, J. A.; SALGUEIRO, C. O. B.; SOUZA, Í. Q. M.; PAIVA, A. L. R.; SANTOS, S. M.; OLIVEIRA, L. M. M. Sensoriamento remoto aplicado na dinâmica hídrica de reservatório no Rio Grande do Norte. **Anais do XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2023.

SOBRAL, M. C.; LOPES, H.; CANDEIAS, A. L.; MELO, G.; GUNKEL, G. Geotecnologias na gestão de reservatórios: uma revisão e uma proposta de integração. **Eng Sanit Ambient**, v.22 n.5, p. 841-852, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522017111054>. Acesso em: março de 2024.

SOBREIRO, J. F. F.; STRETHEL, A. S.; SILVA, T. S. T. Análise comparativa de produtos geoespaciais para monitoramento de precipitação em uma região montanhosa tropical. **Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**, Campinas, 2017, Unicamp, 2017.

SOUZA, G. F. **Geotecnologias no monitoramento de bacias hidrográficas por indicadores ambientais**. 2012. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

USGS. United States Geologic Survey. **Catálogo USGS**. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: dezembro de 2023.

XAVIER, L. A. S.; SILVA, T. F. G. Avaliação da variação do nível de água do reservatório de Furnas (MG) por meio de imagens de Sensoriamento Remoto. **Anais do XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2023.

XU, H. Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 14, p. 3025-3033, 2006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/01431160600589179>. Acesso em: novembro de 2023.

ZHANG, H. K.; ROY, D. P.; YAN, L.; LI, Z.; HUANG, H; VERMOTE, E.; SKAKUN, S.; ROGER, J. Characterization of Sentinel-2A and Landsat-8 top of atmosphere, surface, and nadir BRDF adjusted reflectance and NDVI differences. **Remote Sensing of Environment**, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.031>. Acesso em: fevereiro de 2024.

ZHAO, M.; O'LOUGHLIN, F. Mapping Irish Water Bodies: Comparison of Platforms, Indices and Water Body Type. **Remote Sens.** 15, p. 3677, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs15143677>. Acesso em: março de 2024.