UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO CENTRO DE TECNOLOGIA
E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
MESTRADO PROFISSIONAL EM REDE NACIONAL EM GESTÃO
E REGULAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS (PROFÁGUA)

KLEBER JOSÉ PINHEIRO LINS

ANALISE ESPAÇO TEMPORAL DOS RESERVATÓRIOS NO ÂMBITO DO EIXO LESTE DO PISF.

RECIFE
2024

KLEBER JOSÉ PINHEIRO LINS

ANALISE ESPAÇO TEMPORAL DOS RESERVATÓRIOS NO ÂMBITO DO EIXO LESTE DO PISF.

Dissertação apresentada ao programa de Mestrado Profissional em rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ProfÁgua), como requisito para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos.

Área de concentração: Gestão e Regulação de Recursos Hídricos

Orientadora: Profa. Dra. Suzana Montenegro.

Coorientador: Prof. Diego Cezar dos Santos Araujo

RECIFE

2024

. Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Lins, Kleber José Pinheiro.
Análise espaço temporal dos reservatórios no âmbito do eixo leste do PISF / Kleber José Pinheiro Lins. - Recife, 2024.
67f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, 2024.
Orientação: Suzana Montenegro.
Coorientação: Diego Cezar dos Santos Araujo.
Inclui referências.

1. Índices Espectrais; 2. Índices de Vegetação; 3. Reservatórios. I. Montenegro, Suzana. II. Araújo, Diego Cezar dos Santos. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

KLEBER JOSÉ PINHEIRO LINS

ANALISE ESPAÇO TEMPORAL DOS RESERVATÓRIOS NO ÂMBITO DO EIXO LESTE DO PISF

Dissertação apresentada ao programa de Mestrado Profissional em rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ProfÁgua), como requisito para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos.

Aprovado em: 30/09/2024.

BANCA EXAMINADORA

_____
Profa. Dra. Suzana Montenegro (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

_____
Profa. Dra Leidjane Maria Maciel de Oliveira (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

_____
Profa. Dra Rochele Sheila Vasconcelos (Examinador Externo)
Universidade Federal da Paraíba - UFPB

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, em especial a minha esposa, minha mãe e aos meus filhos além da minha orientadora e à banca avaliadora, que participaram ativamente no desenvolvimento desse trabalho de conclusão de curso com suas sugestões e compartilhamento de ideias. O êxito na conclusão desta pesquisa não seria o mesmo sem a vossa participação. Gratidão eterna a todos os professores que tive durante o curso.

AGRADECIMENTOS

A minha esposa, Micherllaynne Lins, minha mãe, Maria das Graças e aos meus filhos, Victor Hugo Lins, Joana Lins e Arthur Lins, que me incentivaram nos momentos difíceis e compreenderam a minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho.

RESUMO

O Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF) em Pernambuco é uma obra de infraestrutura hídrica grande importância para a região, que visa garantir o abastecimento de água para a população, além de possibilitar o desenvolvimento de áreas rurais e a irrigação de terras. Por outro lado, o projeto tem um grande impacto econômico, social e ambiental, além de envolver uma ação antrópica intensiva desde seu estágio inicial até a implementação efetiva. Diante da ampla extensão territorial e dos impactos da obra, o sensoriamento remoto surge como uma alternativa viável para o estudo e análise da dinâmica espaço-temporal nas áreas afetadas pelo sistema. Essa tecnologia permite extrair informações sobre alterações na paisagem, auxiliando na tomada de decisões e na gestão de recursos hídricos. Este estudo tem como objetivo o uso de cenas Landsat-8 *Operational Land Imager* (OLI) e os índices espectrais Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI) para o monitoramento da vegetação ao redor de onze reservatórios do sistema PISF em Pernambuco, antes e após a recarga hídrica, nos anos de 2017 e 2023, respectivamente, bem como para a extração da área do espelho d'água. Observou-se, de maneira geral, que os valores de NDVI em 2023 aumentaram consideravelmente em comparação aos de 2017 para todos os reservatórios e suas áreas circundantes, enquanto os valores de NDWI não apresentaram variações significativas, porém ambos os índices foram sensíveis ao regime de chuvas na região. O NDWI demonstrou ser eficaz na delimitação dos corpos hídricos dos reservatórios, permitindo observar estatisticamente e visualmente a dinâmica do sistema hídrico, além de facilitar a extração da área dos corpos d'água, que, em geral, foram maiores em 2023. O maior valor de NDVI foi observado na Barragem Campo, com 0,60±0,16, enquanto o menor valor foi registrado na Barragem Areias, com 0,16±0,08. O NDWI apresentou, predominantemente, valores positivos nos corpos hídricos, variando entre 0,3 e 0,6. Assim, é possível inferir que o sensoriamento remoto pode atuar como uma ferramenta eficaz para o monitoramento da dinâmica do ambiente físico em grandes sistemas de obras hídricas, analisando as alterações nos índices espectrais.

PALAVRAS-CHAVE: Índices Espectrais. Índices de Vegetação. Reservatórios

ABSTRACT

The São Francisco River Integration Project (PISF) in Pernambuco is a water infrastructure project of great importance for the region, which aims to guarantee water supply for the population, in addition to enabling the development of rural areas and land irrigation. On the other hand, the project has a great economic, social and environmental impact, in addition to involving intensive human action from its initial stage to effective implementation. Given the wide territorial extension and impacts of the work, remote sensing emerges as a viable alternative for the study and analysis of space-time dynamics in the areas affected by the system. This technology allows you to extract information about changes in the landscape, helping in decision-making and water resources management. This work uses the Earth observation satellite-sensor system Landsat 8 – Operational Land Imager (OLI) to generate spectral indices: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Normalized Difference Water Index (NDWI). These indices are used to monitor the vegetation around eleven reservoirs of the PISF system in Pernambuco, before and after water recharge, in the years 2017 and 2023, respectively, as well as for the extraction of the water surface area. It was observed, in general, that the NDVI values in 2023 increased considerably compared to those in 2017 for all reservoirs and their surrounding areas, while the NDWI values did not show significant variations, however both indices were sensitive to the water regime. rainfall in the region. The NDWI proved to be effective in delimiting water bodies from reservoirs, allowing statistical and visual observation of the dynamics of the water system, in addition to facilitating the extraction of the area of water bodies, which, in general, were larger in 2023. The highest value of NDVI was observed at Campo Dam, with 0.60±0.16, while the lowest value was recorded at Areias Dam, with 0.16±0.08. The NDWI predominantly presented positive values in water bodies, varying between 0.3 and 0.6. Thus, it is possible to infer that remote sensing can act as an effective tool for monitoring the dynamics of the physical environment in large water works systems, analyzing changes in spectral indices.

KEYWORDS: Spectral Indices. Vegetation Indexes. Reservoirs

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Objetivos do desenvolvimento sustentável 17

Figura 2 - Bacia do Rio Moxotó 27

Figura 3 - Bacia do Rio Pajeú 28

Figura 4 – Perfil esquemático da infraestrutura hídrica do Eixo Leste do PISF 29

Figura 5. Fluxograma com as etapas de processamento. 32

Figura 6. Barragem Areias 36

Figura 7. Barragem Bagres 38

Figura 8. Barragem Barreiros 39

Figura 9. Barragem Braúnas 41

Figura 10. Barragem Cacimba Nova 43

Figura 11. Barragem Campos 44

Figura 12. Barragem Copiti 46

Figura 13. Barragem Mandantes 48

Figura 14. Barragem Moxotó 50

Figura 15. Barragem Muquém 51

Figura 16. Barragem Salgueiro 52

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Anexo I: Matriz de Classificação, conforme Resolução nº 236/2017 da ANA 25

Quadro 2 – Identificação, classificação de risco da vigência dos PSBs dos reservatórios do Eixo Leste do PISF 25

Quadro 3 – Relação dos reservatórios do Eixo Leste do PISF 30

Quadro 4 – Bandas do OLI e TIRS Landsat 8 30

Quadro 5 - Batimetria dos reservatórios nos períodos de enchimento e 2023. 34

Quadro 6. Área do corpo hídrico das barragens antes e após a implementação do eixo PISF 54

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Precipitação mensal em Custódia (Posto - 147). Período 2017/2018 33

Gráfico 2- Precipitação mensal em Custódia (Posto - 147). Período 2023 33

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA Agência Nacional de Águas
APAC Agência Pernambucana de Águas e Climas
CE Ceará
CBDB Comitê Brasileiro de Barragens
CODEVASF Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba
CORSH Reservatórios e Sistemas Hídricos
DNOCS Departamento Nacional de Obras Contra a Seca
ISE Inspeção de Segurança Especial
ISR Inspeções de Segurança Regular
IOCS Inspetoria de Obras contra as Secas
MIDR Ministério de Integração e Desenvolvimento Regional
ND Número Digital
NDVI Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index)
NDWI Índice de Água de Diferença Normalizada (Normalized Difference Water Index)
ODS Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OECD Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ONU Organização das Nações Unidas
PE Pernambuco
PB Paraíba
PISF Projeto de Integração do São Francisco
PNRH Política Nacional de Recursos Hídricos
PNSB Plano Nacional de Segurança de Barragem
PNSH Plano Nacional de Segurança Hídrica
PNSH Plano Nacional de Segurança Hídrica
PPA Plano Plurianual
RPSB Revisão Periódica de Segurança de Barragem
RN Rio Grande do Norte
SAR Sistema de Acompanhamento de Reservatórios
SGIB Sistema de Gestão do Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional
PAE Plano de Ação de Emergência
PSB Planos de Segurança de Barragens
SIG Sistemas de Informações Geográficas
SNIRH Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
SIRGAS Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SOE Superintendência de Operações e Eventos Críticos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO **12**

2.OBJETIVO **14**

2.1 OBJETIVOS ESPECIFICOS 14

3 REFERENCIAL TEÓRICO **14**

3.1 ACESSO À ÁGUA 15

3.1.1 Segurança hídrica segundo políticas públicas 16

3.2 RESERVATÓRIOS E BARRAGEM 18

3.3 CONDICIONANTES PARA OUTORGA DE USO DA ÁGUA PARA BARRAMENTO 19

3.4 CARACTERISTICAS FISIOGRÁFICAS DO SERTÃO PERNAMBUCANO 21

3.5 GESTÃO NOS RESERVATÓRIOS DO PISF 23

3.6 3.6 SENSORIAMENTO REMOTO DE RESERVATÓRIOS 28

4 METODOLOGIA **27**

4.1 ÁREA DE ESTUDO 27

4.2 OBTENÇÃO DE DADOS ESPACIAIS 30

4.3 ÍNDICES ESPECTRAIS (NDVI e NDWI) 31

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES **32**

6 CONCLUSÃO **55**

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **56**

1 INTRODUÇÃO

O acesso à água é um direito de toda população e dever do Estado. O exercício desse direito necessita da atuação do Estado, garantindo o alcance à água potável e regular, bem como de ações individuais concernentes ao uso desse importante líquido de forma racional e sustentável. Em tempos de escassez, não mais se conjectura o seu tratamento como um recurso natural renovável, ilimitado (Morlin; Euzébio, 2018). De Lima e Granziera (2018) consideram a água como sendo o bem mais relevante do século XXI, estando sendo ameaçada de escassez em todo o mundo, constituindo um dos maiores problemas do milênio.

Com o crescente aumento da população, o uso irregular dos recursos hídricos, como irrigações irregulares, ineficiência de sistemas de tratamento de água, despejos de lixo e desperdício de água pela população, evidenciou um alerta nacional. Antes, a água era conceituada como sendo um recurso ilimitado, sendo considerado, hoje, como um bem escasso, necessitando uma utilização planejada e cuidadosa, sob sanções de ocorrer prejuízos ao meio ambiente, à saúde pública e ao próprio recurso hídrico (DE Lima; Granziera, 2018).

O cenário atual dos recursos hídricos sinaliza a necessidade de uma melhor gestão hídrica. Admitir, verificar e relatar o valor da água, assim como introduzi-lo na tomada de decisões, são atividades indispensáveis para obter uma gestão sustentável e igualitária dos recursos hídricos, visando alinhar a sua gestão com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável (ONU, 2015).

Azevêdo et al. (2012) evidenciam que o Semiárido do Nordeste brasileiro abrange uma conjuntura de escassez e intermitência de precipitação pluviométrica, em virtude de fatores climáticos e geológicos, que intensificam os efeitos das secas na região, trazendo desafios à gestão dos recursos hídricos.

Os reservatórios estudados foram Areias, Braúnas, Mandantes, Salgueiro, Muquém, Cacimba Nova, Bagres, Copiti e Moxotó, Barreiros e Campos, todos eles pertencentes ao eixo leste da Transposição do Rio São Francisco – PE onde a construção dos reservatórios foi iniciada no ano 2007, com plena finalização e início das operações em 2017. Estes reservatórios têm como relevância acumular e fornecer adequadamente água às regiões. Nesse

sentido, a aplicação do sensoriamento remoto pode facilitar o monitoramento desses reservatórios, espacialmente e temporalmente.

Atualmente, o sensoriamento remoto é uma das principais ferramentas que pode contribuir com a gestão dos recursos hídricos e auxiliar na tomada de decisão, sendo uma importante fonte geradora de informações, alimentando bancos de dados geográficos agregados em um sistema de informação geográfica com o propósito de analisar as fragilidades dos ambientes naturais e antropizados (Liu et al., 2023). A utilização de técnicas de processamento de imagem para aquisição de dados tem sido empregada em estudos ambientais e podem auxiliar na gestão dos reservatórios e barragens, como por exemplo em He et al., (2021) que utilizou imagens Landsat-8 e técnicas de redes neurais para o monitoramento da qualidade de água no reservatório Dashahe, na China. Leonardo et al., (2021) avaliaram as variações temporais geoespacializadas do uso e ocupação do solo, vegetação e área superficial do espelho d'água do reservatório de Poço da Cruz, em Pernambuco, em uma perspectiva espectro temporal utilizando imagens datadas de 2000, 2013 e 2020, aplicando os índices espectrais MNDWI, NDWI, SAVI, IAF, dos sistemas sensores TM Landsat 5 e OLI Landsat 8, e ferramentas do projeto MapBiomas.

Almeida et al., (2023) utilizou técnicas de sensoriamento remoto para delimitar a área hídrica do reservatório Poço da Cruz, localizado em Ibimirim, Pernambuco, região semiárida do Brasil, com modelagem baseada em imagens multiespectrais do satélite Landsat 8/OLI de 2015 a 2020, e relacioná-la com dados de precipitação média dos satélites Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station (CHIRPS). Malinconico (2022) utilizou os indices espectrais NDVI, NDWI e MNDWI utilizando imagens dos satélites Landsat 5 e OLI-Landsat 8, no município de Serra Talhada no sertão do estado de Pernambuco para análise espacial no entorno de reservatórios. Ainda utilizando imagens Landsat, Sousa et al., (2022) realizaram uma análise multitemporal do espelho d'água do Açude Jaburu, localizado nos municípios de Ubajara e Tianguá, Ceará, nos anos de 2013 a 2020. Para isto, foi aplicado o índice Normalizado por Diferença de água (NDWI).

Jiang et al. (2020) implementaram o índice SWI (Índice de Água Sentinel-2) para a identificação de corpos de água em reservatórios da China a partir de imagens de sensoriamento remoto do satélite sentinel-2. Khalid et al., (2021)

utilizou diferentes índices espectrais para a espacialização do entorno de reservatórios de água no no Planalto Tibetano Ocidental. Almouctar et al. (2021) examinaram mudanças espaço-temporais do índice de vegetação de diferença normalizada (NDVI) na bacia do Korama (Zinder do Sul do Níger) de 2000 a 2018, e sua correlação com fatores climáticos utilizando conjuntos de dados NDVI-MODIS.

Nesta perspectiva, o objetivo deste estudo é analisar o cenário temporal das alterações que ocorreram no período dos enchimentos dos reservatórios em 2017 (fase inicial de enchimento), e no ano de 2023 (registro mais recente disponível), utilizando as ferramentas de sensoriamento remoto com uso de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e os índices radiométricos de vegetação e água NDVI e NDWI ao longo dos reservatórios do eixo Leste da Transposição do Rio São Francisco. Espera-se, com este trabalho, contribuir para a sustentabilidade socioambiental e econômica do Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF), favorecendo a proposição de diretrizes que se alinhem à finalidade dos instrumentos de gestão dos recursos hídricos.

2. OBJETIVOS

Este estudo tem como objetivo analisar a distribuição temporal e espacial dos parâmetros físicos mediante uso de imagens multiespectrais em diferentes anos; verificar as alterações ocorridas nos reservatórios do sistema PISF;

2.1 OBJETIVOS ESPECIFICOS

I. Avaliar as relações e a sensibilidade entre os índices espectrais NDVI e o NDWI no entorno dos reservatórios nos períodos antes e após enchimento, nos anos de 2017 e 2023.

II. Analisar a extração da área do corpo hídrico dos reservatórios por meio do limiar de NDWI nos dois períodos analisados.

III. Mapear as alterações espaciais no entorno dos reservatórios do sistema PISF para a análise estatísticas nos dois períodos analisados.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta revisão disserta uma investigação teórica, realizada na literatura concernente ao estudo, desenvolvendo questões associadas aos recursos hídricos desde o enchimento, em fevereiro de 2017 até agosto de 2018 e o ano de 2023, do eixo leste do PISF. Dessa forma, é possível uma melhor compreensão dos processos naturais e antropogênicos ocorridos naquela região.

3.1 ACESSO À ÁGUA

A distribuição da precipitação no Nordeste do Brasil é bastante irregular, tanto no espaço quanto no tempo, o que contribui significativamente para o problema da seca na região. A maior parte do interior da região Nordeste é caracterizada pelo clima semiárido, que recebe baixos volumes de chuva (menos de 800 mm por ano em algumas áreas). O Sertão nordestino, por exemplo, enfrenta longos períodos de estiagem, com a maioria das chuvas concentradas em poucos meses do ano (geralmente entre fevereiro e maio) (Alves et al. 2022).

A distribuição espacial da precipitação no Nordeste é muito desigual. Enquanto as áreas litorâneas recebem quantidades consideráveis de chuva devido à influência dos ventos úmidos do Oceano Atlântico, o interior, especialmente o Sertão, sofre com a irregularidade das chuvas. Esse padrão aumenta o contraste entre zonas úmidas e secas, exacerbando problemas como a falta de água e a desertificação. Além disso, o El Niño tende a reduzir as chuvas, enquanto a La Niña pode aumentar as precipitações em algumas partes da região. Esse comportamento irregular aumenta a vulnerabilidade da agricultura e dos recursos hídricos na região (Silva et al., 2020).

A seca no Nordeste é um problema recorrente que tem impactos profundos na economia, no meio ambiente e nas condições de vida da população. As irregularidades da precipitação tornam difícil o manejo sustentável da água, prejudicando a agricultura, que é majoritariamente de sequeiro (dependente das chuvas). Além disso, as secas prolongadas afetam os reservatórios de água, limitando o abastecimento nas zonas urbanas e rurais (Silva et al., 2020). O direito ao acesso à água surge em 2010, por meio da Resolução nº 64/292 da ONU (Organização das Nações Unidas), que legitima o

direito à água limpa e potável, além do direito ao saneamento como essencial para o usufruto de todo ser humano (ONU, 2015). Cavalcanti (2015) reafirma que considera a água um bem econômico e social, devendo primeiramente satisfazer as necessidades básicas humanas. Riva (2016) cita que no Brasil, pela Constituição Federal, o direito a água ainda não é reconhecido, mas falta implementação da lei.

Igualmente, a Lei Federal nº 9.433/1997, no Art. 1º, discorre sobre a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) se baseando em fundamentos como a água sendo um bem de domínio público, sendo um recurso natural limitado, dotado de valor econômico e que, em caso de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos seria o consumo humano e dos animais. Além disso, destaca que a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas, a bacia hidrográfica como sendo a unidade territorial para a implementação da PNRH e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, sendo descentralizada e composta com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades.

3.1.1 Segurança hídrica segundo políticas públicas

A definição de segurança hídrica se deu início em meados de 1990, porém apenas em 2000 a temática passou a ser objeto de um maior número de estudos, principalmente a partir de 2009 (Backker, 2012).

A Lei Federal 9433/1997, no Brasil, no qual institui a PNRH, e suas leis estaduais, trazem embutida a concepção de segurança hídrica. Todavia, a partir de 2014 este conceito conseguiu notória relevância no país decorrente da crise hídrica vivenciada pelas capitais do Sudeste brasileiro. De acordo com a Agenda 2030 da ONU, a segurança hídrica também é o objetivo central da PNRH pela Lei nº 9433 de 1997. O escopo da Agenda 2030 é eliminar a pobreza e resguardar o planeta. Nesta Agenda estão contidos 17 objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS). Os atos para aumentar a segurança hídrica brasileira estão em concordância com a Agenda 2030, particularmente o objetivo 6.

Figura 1 - Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Fonte: (ONU, 2015)

O objetivo 6 do Desenvolvimento Sustentável (ODS) determina que, até 2030, é preciso minimizar a liberação de produtos químicos e materiais perigosos, melhorar a qualidade da água, reduzir a poluição, eliminar despejo e reduzir pela metade a proporção de águas residuais não tratadas, aumentar substancialmente a eficiência do uso da água em todos os setores e assegurar retiradas sustentáveis e o abastecimento de água doce para enfrentar a escassez de água, apoiar e fortalecer a participação das comunidades locais, para melhorar a gestão da água e do saneamento, reduzir substancialmente o número de pessoas que sofrem com a escassez de água, aumentar substancialmente a reciclagem e reutilização de água, entre outras segundo a ODS.

Pode-se observar que o conceito de segurança hídrica pretende garantir a acessibilidade de água para vários fins, protegendo os seres humanos de eventos hidrológicos extremos. A Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico - OECD (2015) evidencia que a segurança hídrica deve ter um propósito, uma estratégia necessária para fundamentar o crescimento econômico da população.

De acordo com o Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH), foi preciso uma análise criteriosa em todo território nacional, cuja metodologia foi desenvolvida com dados provenientes de vários estudos preliminares da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e órgãos do segmento com alto grau de detalhamento. Também foi realizado em paralelo um vasto

inventário de planos, estudos, projetos e obras existentes em diversas fases de implementação e planejamento identificados junto a órgãos e entidades federais e estaduais envolvidos em recursos hídricos. No estudo de Costa (2019), um dos primeiros instrumentos de planejamento do governo brasileiro no que diz respeito à segurança hídrica como política pública definida, o Plano Plurianual (PPA) 2016-2019, estabelece em suas diretrizes estratégicas a “Promoção da segurança hídrica, com investimentos em infraestrutura e aprimoramento da gestão e da conservação da água”.

O método da revisão do PPA 2016-2019 para criação do PPA 2020-2023, decorreu no mesmo período da publicação do PNSH e da produção do planejamento estratégico do Ministério de Integração e Desenvolvimento Regional - MIDR, que expandiu a segurança hídrica incorporando o saneamento aos seus processos, definindo Indicadores de Segurança Hídrica (Figueiredo, 2020). Conforme a ANA, o PNSH integra o programa de gestão de recursos hídricos como instrumento básico dos objetivos da PNRH, que estabelece a necessidade de garantir à atual e às futuras gerações a adequada disponibilidade de água e de atuar na prevenção contra eventos hidrológicos críticos, que são atribuições específicos ao sistema do PISF (ANA, 2019).

> Conforme o Ministério de Integração e Desenvolvimento Regional (MIDR), o Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional (PISF), intitulado de Projeto de Integração do Rio São Francisco, surge como uma ferramenta para diminuir o grande problema de escassez hídrica de mais de doze milhões de individuos do Semiárido nordestino, tendo como premissa aumentar a segurança hídrica em 390 municípios dos estados de Pernambuco (PE), Ceará (CE), Paraíba (PB) e Rio Grande do Norte (RN) levando água por canais em contudos livres da bacia do rio São Francisco (MDR, 2019a).
>
> Sua principal função não será fornecer grandes volumes de água ininterruptamente para perenizar os cursos de água, mas diminuir o risco de desabastecimento da população beneficiada, possibilitando assim que os estados atendidos façam uma gestão mais eficiente e menos conservadora dos seus estoques de recursos hídricos.

3.1 RESERVATÓRIOS E BARRAGEM

Os reservatórios são relevantes construções artificiais com diversos usos múltiplos. São ecossistemas aquáticos de grande relevância estratégica, uma vez que são utilizados para diversos usos que interferem na qualidade da água, nos mecanismos de funcionamento e na sucessão das comunidades aquáticas nos rios e bacias hidrográficas (Tundisi & Tundisi, 2008).

A gestão hídrica em Pernambuco iniciou-se em meados de 1900, ao longo da construção de reservatórios para atender os períodos de carência de água.

De acordo com Silva (2018), a criação da Inspetoria de Obras contra as Secas (IOCS), em 1909, pioneira instituição federal a pesquisar sobre a problemática da região do semiárido brasileiro, iniciou o aparato institucional para prática do combate às secas. Por volta de 1945, o IOCS foi alterado para Departamento Nacional de Obras Contra a Seca (DNOCS), “convertendo-se em autarquia federal, com mais eficiência na base técnica”.

De acordo com o Comitê Brasileiro de Barragens, as barragens são consideradas barreiras artificiais com intuito de reter água, com a finalidade de armazenar e controlar, podendo ser desde pequenos maciços de terra a grandes estruturas de concreto. A construção dessas estruturas promove vários benefícios, dentre eles o abastecimento de água, irrigação, regularização de vazões, navegação interior, paisagismo e urbanismo, dessedentação, dentre outros (Morais, 2019).

A Lei 12.334/2010 define uma barragem como qualquer estrutura em um curso permanente ou temporário de água com a finalidade de contenção ou acumulação de água, incluindo o barramento e suas estruturas (Bizawu; Moreira, 2017). Massad (2010), ressalta que um projeto de barragem de terra deve pautar-se em dois princípios básicos: a segurança e a economia, tendo como principal princípio a economia. Enfatiza, ainda, que a segurança de uma barragem deve ser garantida quanto ao transbordamento, *piping*, ruptura dos taludes, efeito das ondas e da erosão.

3.3 CONDICIONANTES PARA OUTORGA DE USO DA ÁGUA PARA BARRAMENTO

A água desempenha diversas funções, desde o atendimento das necessidades básicas humanas e animais até a manutenção dos ecossistemas, além de ser um insumo essencial na maioria dos processos produtivos. Devido ao seu caráter indispensável à vida, é crucial regulamentar o seu uso através de legislação específica e uma atuação efetiva do poder público. No Brasil, os usos da água foram regulados pela Lei Federal n° 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Esta lei, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, trouxe avanços em relação ao Código de Águas de 1934 - Decreto n° 24.643, que visava permitir ao poder público controlar e incentivar o uso racional e aproveitamento das águas (ANA, 2013).

A Agência Nacional de Águas (ANA), uma entidade federal responsável pela implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e parte integrante do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, tem entre suas competências a emissão de outorgas de direito de uso de recursos hídricos em corpos d'água sob domínio da União, conforme as disposições da Lei n° 9.984, de 17 de julho de 2000. O Art. 1º Estabelece as condições gerais para os atos de outorga preventiva e de direito de uso de recursos hídricos sob domínio da União emitidos pela Agência Nacional de Águas (ANA) e dar outras providências (ANA, 2017).

A lei determina que os usuários devem manter atualizados, no Sistema Federal de Regulação de Usos – Regla, os dados administrativos do empreendimento para fins de comunicação com a ANA. Além disso, os usuários devem implantar as interferências nos corpos d'água, conforme estabelecido nos atos de outorga (captações, lançamentos, tanques-rede), levando em consideração as flutuações de nível e características locais do corpo hídrico no ponto de interferência. As coordenadas geográficas são utilizadas pela ANA nas análises para a realização do balanço qualiquantitativo dos usos de recursos hídricos. O usuário também deve adequar a qualidade da água captada aos padrões exigidos, monitorar e registrar os volumes mensais, e enviar a Declaração de Uso de Recursos Hídricos (DAURH) em conformidade com a Resolução ANA nº 603, de 26 de maio de 2015, quando o uso dos recursos hídricos outorgados estiver sujeito às exigências estabelecidas em resoluções específicas (ANA, 2013).

No caso das obrigações para outorga de barramento, o Art. 6º estabelece que os titulares de outorgas para barramentos, enquadrados na Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que institui a Política Nacional de Segurança de Barragens e são fiscalizados pela ANA conforme o art. 5º da referida lei, devem prover os recursos necessários para garantir a segurança da barragem; Para novos empreendimentos, elaborar o projeto final conforme construído; Organizar e manter em bom estado de conservação as informações e documentação referentes ao projeto, construção, operação, manutenção, segurança e, quando aplicável, desativação da barragem; Informar à ANA qualquer alteração que possa reduzir a capacidade de descarga da barragem ou comprometer sua segurança; Manter registros dos níveis dos reservatórios, com a respectiva correspondência em volume armazenado, bem como das características químicas e físicas do fluido armazenado. Além disso, a lei estabelece que o empreendedor deve cumprir os regulamentos emitidos pela ANA relacionados à segurança de barragens e informar imediatamente à ANA e à Defesa Civil sobre qualquer anomalia ou não conformidade que implique em risco imediato à segurança do barramento, afete sua capacidade normal de operação, ou coloque em risco a população a jusante (ANA, 2017).

3.4 CARACTERISTICAS FISIOGRÁFICAS DO SERTÃO PERNAMBUCANO

A região do semiárido Pernambucano é susceptível a extensos períodos de secas, com um regime pluviométrico intermitente e irregular. A escassez de água é uma das principais problemáticas dos munícipios e um grande empecilho para o desenvolvimento socioeconômico dos mesmos. A falta de aperfeiçoamento de técnicas bem elaboradas para irrigação somada à irregularidade do ciclo hidrológico possibilita alterações consideráveis na superfície vegetal destes locais, assim, o próprio ciclo pode ser acometido, causando mais alterações negativas (Vasconcelos et al., 2016).

Os principais tipos de vegetação encontrados no Nordeste são as florestas úmidas, florestas fluviais, cerrados, caatingas, florestas (brejos) de altitude (Fernandes; Queiroz, 2018). Na região do Sertão pernambucano, dois tipos de vegetações são encontrados, a caatinga, como sendo de maior extensão, no qual a vegetação é predominantemente xerófila, e os brejos de

altitude, vegetação florestal perenifólia situada em manchas no topo ou nas vertentes superiores de alguma serra (Marques, 2024). Porém, muito pouco se sabe a respeito da flora e vegetação dos brejos de altitude e suas relações com as caatingas limítrofes.

A vegetação do sertão nordestino está intimamente relacionada com as condições climáticas da região, especialmente com a ocorrência de secas. Essa região faz parte da Caatinga, o único bioma exclusivamente brasileiro, que se caracteriza por sua adaptação a climas semiáridos. A vegetação da Caatinga é predominantemente xerófita, ou seja, adaptada para sobreviver em ambientes secos com pouca disponibilidade de água, muitas plantas possuem folhas reduzidas (como os cactos) ou até mesmo caem durante a estação seca, o que reduz a perda de água por transpiração. Algumas espécies, como o mandacaru e o xique-xique, armazenam água em seus caules para suportar períodos de estiagem e outras plantas da Caatinga têm raízes profundas para buscar água em camadas mais profundas do solo, ou são muito espalhadas, cobrindo grandes áreas em busca de água (Rabelo, 2022).

Grande parte da vegetação do sertão é caducifólia, ou seja, perde suas folhas durante a estação seca para reduzir a evapotranspiração. Isso é uma estratégia de sobrevivência em resposta à seca prolongada e à baixa disponibilidade hídrica. Muitas plantas da Caatinga possuem espinhos, que não só protegem contra herbívoros, mas também minimizam a área de superfície exposta ao sol e à perda de água. A cutícula espessa nas folhas e caules também ajuda a reduzir a transpiração (Marques, 2024).

A vegetação do sertão desenvolveu mecanismos de sobrevivência que a tornam extremamente resiliente às condições de seca, comuns na região. A seca no Nordeste brasileiro, especialmente no Sertão, é um fenômeno recorrente, causado pela irregularidade e escassez das chuvas, combinada com altas temperaturas e intensa evapotranspiração. No entanto, mesmo com essas adaptações, a vegetação do sertão é extremamente vulnerável às secas mais prolongadas. Durante secas severas, o bioma sofre grandes perdas de biodiversidade, o que afeta diretamente as comunidades humanas que dependem dessa vegetação para a agricultura, pecuária e outras atividades econômicas. A degradação da vegetação pode acelerar processos de

desertificação e diminuir a capacidade do solo em reter água, piorando as condições de seca (Ramos et al. 2020).

3.5 GESTÃO NOS RESERVATÓRIOS DO PISF

Os procedimentos do Decreto nº 5.995/2006, que concebe o Sistema de Gestão do Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional (SGIB), impõe em seus objetivos promover a sustentabilidade da operação referente a infraestrutura hídrica; garantir a gestão integrada, descentralizada e sustentável dos recursos hídricos disponibilizados; viabilizar a melhoria nas condições de abastecimento d'água na área de influência do PISF; induzir o uso eficiente dos recursos hídricos disponibilizados pelo PISF pelos setores usuários e, a coordenação e execução do sistema (BRASIL, 2006).

O Decreto ainda determina à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) a qualificação de regular a água aduzida; a Operadora Federal – Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (CODEVASF), à operação e à manutenção da infraestrutura decorrente do PISF, tendo as operadoras estaduais responsáveis pela operação e manutenção da infraestrutura dos sistemas estaduais interligados ao PISF. O Eixo Leste se desenvolve da sua captação no reservatório de Itaparica em Floresta - PE, com 217 km de extensão, e desagua no rio Paraíba (Riacho do Mulungu), em Monteiro - PB, deixando parte da vazão em onze reservatórios e nas bacias de Moxotó e Pajeú (ANA, 2020).

Para o controle de vazão nos reservatórios, a outorga de direito de uso da água preconiza a instalação de equipamentos de monitoramento nos pontos de captação, além de medição de nível nos reservatórios do sistema PISF. As informações de monitoramento alimentam o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) (ANA, 2020), que é um dos instrumentos de gestão previsto na PNRH.

O PISF é composto de várias estruturas hídricas, formando os reservatórios estratégicos que têm função essencial para o sistema hídrico, pois desempenham papel importante na regularização da vazão da água, garantindo sempre a oferta hídrica. Também são indispensáveis para a gestão de recursos hídricos, pela capacidade de armazenamento e controle da vazão da água

necessária para atendimento de diversos usos consuntivos (Ferreira et al., 2018). Os 11 reservatórios do PISF localizados no Eixo Leste são classificados como estratégicos, devido à capacidade de armazenamento superior a 10 hm³ e por sua posição estratégica na região de beneficiamento do PISF.

Foi criado em 2013 o Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR) que concebe um sistema operacional com o intuito de reunir os dados de operação dos reservatórios do Brasil, tendo a Coordenação de Acompanhamento de Reservatórios e Sistemas Hídricos (CORSH) da Superintendência de Operações e Eventos Críticos (SOE), da ANA.

Inaugurado em 2014, o SAR contempla uma plataforma que permite, de forma prática, o acompanhamento da operação dos principais reservatórios do Brasil. Sendo hoje, a principal fonte de informação acerca das condições de operação desses reservatórios.

É de competência da ANA a regulação e fiscalização da prestação do serviço de adução de água do PISF, integrante do sistema de gestão do PISF, tendo como principais ações regulamentar os aspectos econômico-financeiros, fiscalizar os serviços de adução da água, a segurança de barragens implantadas e os usos dos recursos hídricos do sistema. Além de acompanhar as atividades do Conselho Gestor do PISF no âmbito do governo federal.

A CODEVASF (Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba), é a responsável pela operação e manutenção da infraestrutura, desde os canais de aproximação no rio São Francisco até os pontos de entrega. Como serviço às normas de segurança de barragens, devido ao elevado risco atrelado ao barramento de água e à operação de regularização desses reservatórios, são analisadas as condições atuais dos reservatórios do PISF, categorizando as possíveis dificuldades para atendimento à legislação que possam comprometer a governança do sistema, com a finalidade de apresentar diretrizes de controle e segurança dessas estruturas.

Os dados sobre segurança de barragens foram expostos através das análises dos Planos de Segurança de Barragens (PSB) dos reservatórios integrantes do Eixo Leste do PISF. Cada reservatório possui seu próprio PSB, de acordo com o Plano Nacional de Segurança de Barragem (PNSB). A classificação dos reservatórios ocorre de acordo com a matriz de classificação constante no Anexo I da Resolução nº 236/2017 da ANA (Quadro 1), de acordo

com a categoria de risco e o dano potencial abrangendo o reservatório, onde é estabelecida a necessidade de elaboração do Plano de Ação de Emergência (PAE), a periodicidade das Inspeções de Segurança Regular (ISR), as situações em que deve ser realizada obrigatoriamente Inspeção de Segurança Especial (ISE) e a periodicidade da Revisão Periódica de Segurança de Barragem (RPSB).

Quadro 1 – Matriz de Classificação, conforme Resolução nº 236/2017 da ANA, no Anexo I.

Categoria de risco	**Dano potencial associado**		
	Alto	**Médio**	**Baixo**
Alto	A	B	C
Médio	A	C	D
Baixo	A	D	D

Fonte: ANA (2017b).

Art. 18° A periodicidade da RPSB é definida em função da Matriz de Classificação, sendo: I- Classe A: a cada 5 (cinco) anos; II- Classe B: a cada 7 (sete) anos; III- Classe C: a cada 10 (dez) anos; IV- Classe D: a cada 12 (doze) anos. Os relatórios de ISR devem ser realizados todos os anos, com exceção dos reservatórios enquadrados na Classe D da matriz de classificação, sendo esses relatórios elaborados bianualmente.

De acordo com as análises realizadas nos PSB dos reservatórios componentes do PISF, pode-se evidenciar que todos os reservatórios dos eixos estruturantes são classificados quanto ao Dano Potencial Associado como “Alto”, classificando essas estruturas como “Classe A” que obriga, conforme a Resolução nº 236/2017, a RPSB a cada 5 anos.

O Quadro 2 a seguir demonstra a classificação dos reservatórios, bem como a situação da vigência dos respectivos PSBs instalados.

Quadro 2 – Identificação, classificação de risco da vigência dos PSBs dos reservatórios do Eixo Leste do PISF

Reservatório	Código SNISB (ANA)	Dano Potencial Associado	Categoria de Risco	Classe do Reservatório	Tipo Barragem	Entidade Fiscalizadora	Vigência do PSB
AREIAS	100	Alto	Baixo	A	TH	ANA	MARÇO / 2026
BRAUNAS	101	Alto	Baixo	A	TH	ANA	MARÇO / 2026
MANDANTES	102	Alto	Baixo	A	TH	ANA	MARÇO / 2026
SALGUEIRO	103	Alto	Baixo	A	TH	ANA	MARÇO / 2026

MUQUÉM	104	Alto	Médio	A	TH	ANA	MARÇO / 2026
CACIMBA NOVA	105	Alto	Alto	A	TH	ANA	MARÇO / 2026
BAGRES	106	Alto	Médio	A	TH	ANA	MARÇO / 2026
COPITI	107	Alto	Médio	A	TH	ANA	MARÇO / 2026
MOXOTÓ	108	Alto	Médio	A	TH	ANA	MARÇO / 2026
BARREIRO	109	Alto	Baixo	A	TH	ANA	JUNHO / 2026
CAMPOS	110	Alto	Médio	A	TH	ANA	MARÇO / 2026

Fonte: O autor (2023).

*TH – Terra Homogênea

SENSORIAMENTO REMOTO DE RESERVATÓRIOS

A partir das diferentes bandas espectrais presentes nos sensores com média resolução espacial é possível criar diferentes imagens que representam os índices espectrais. Esses índices são combinações de reflectância de superfície em dois ou mais comprimentos de ondas que podem destacar a presença de alguns objetos de interesse.

De acordo com Farias et al. (2017), a utilização de técnicas de Sensoriamento Remoto com o objetivo de monitorar o comportamento hídrico associado à variação da cobertura vegetal encontra-se cada vez mais habitual no cenário mundial. Visto que o Sensoriamento Remoto permite a análise dos parâmetros espectrais da vegetação e dos biofísicos da paisagem, de acordo com Silva et al. (2019a), ocasionando a disseminação de pesquisas de uso do solo, propiciando o fornecimento de informações atuais e contribuindo com o diagnóstico de ocupações e parâmetros biofísicos.

De acordo com Francisco (2010), diversas técnicas foram analisadas com o intuito de se definir qualitativamente e quantitativamente o estado da vegetação a partir de imagens de satélites. O índice de vegetação foi então desenvolvido com a finalidade de diminuir o número de parâmetros presentes nas medidas multiespectrais. Esses índices têm sido usados na estimativa de diversos parâmetros da vegetação (Costa Filho et al., 2007), como a quantidade de biomassa verde (Elvidge & Lyon, 1985). Contudo, embora vários índices vegetativos existam, o mais utilizado e conhecido é o denominado índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) proposto por Rouse em 1973,

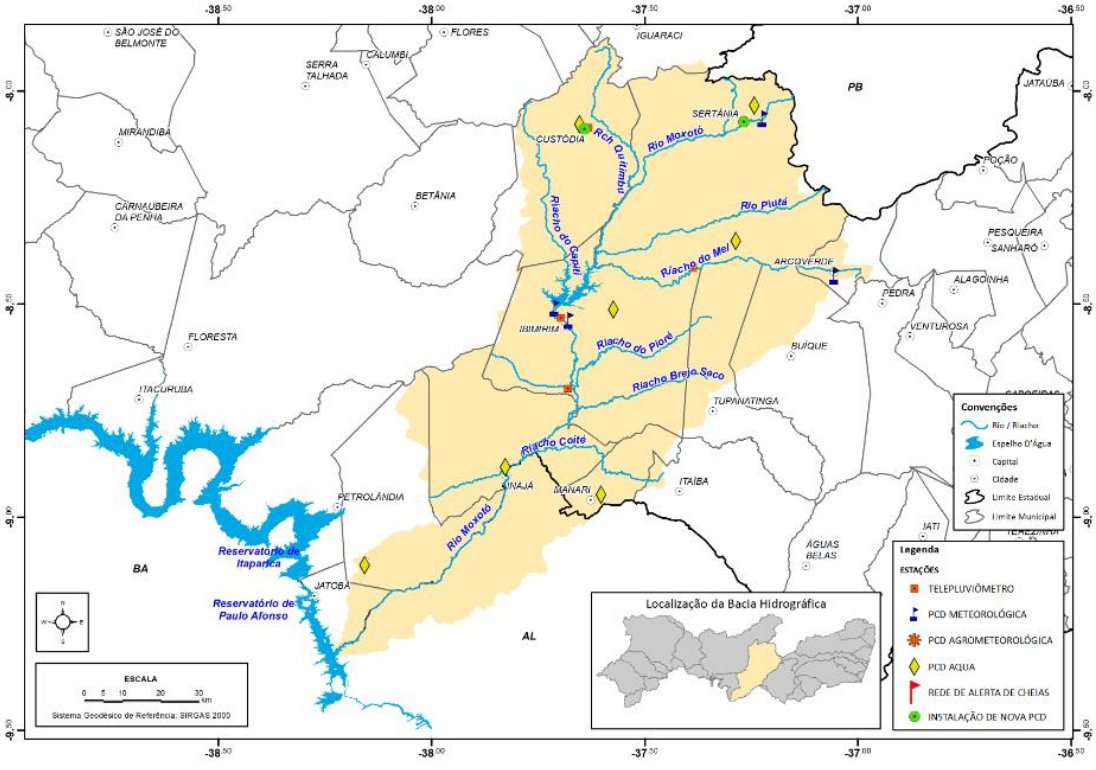
permitindo o monitoramento da densidade e do estado da vegetação verde sobre a superfície terrestre (Costa Filho et al., 2007).

4 METODOLOGIA

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

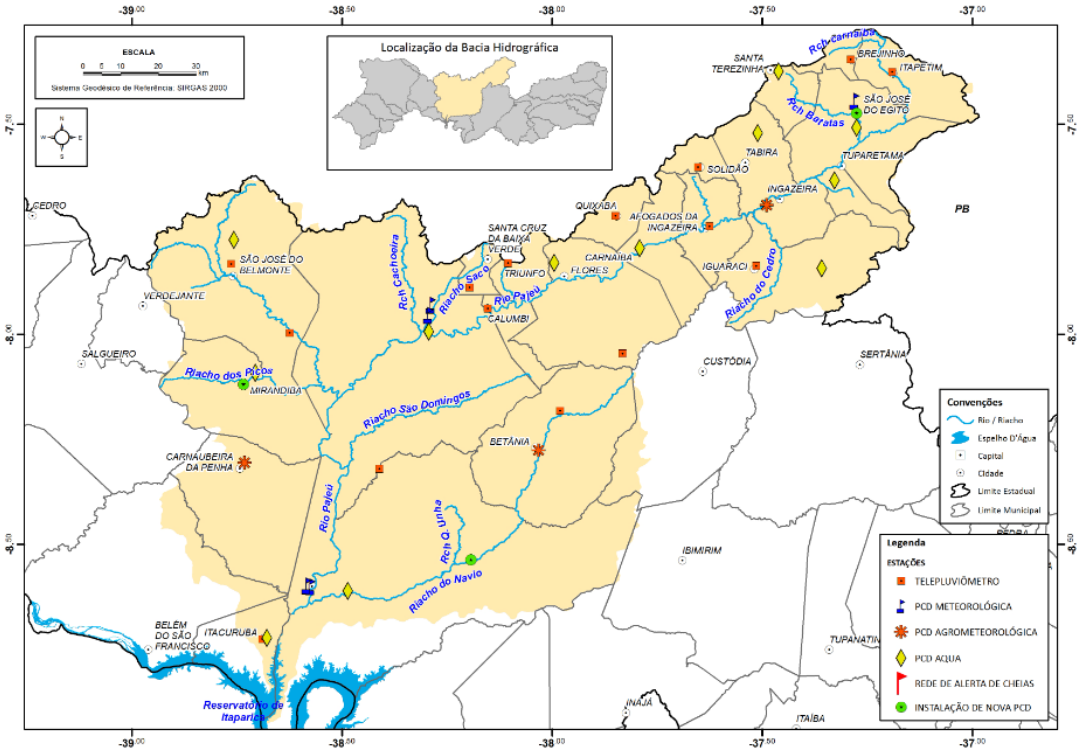
A área de estudo correspondente aos reservatórios das Barragens Areias, Barreiros, Braúnas, Campos, Mandantes, Moxotó percetencentes a bacia do Rio Moxotó e as barragens de Bragres, Camcimba Nova, Muquém e Salgueiro pertencentes a bacia do Rio Pajeú que que abrangem 12 municípios, pode ser observada nas Figuras 3 e 4 (APAC, 2023).

Figura 2 - Bacia do Rio Moxotó



Fonte: APAC (2023).

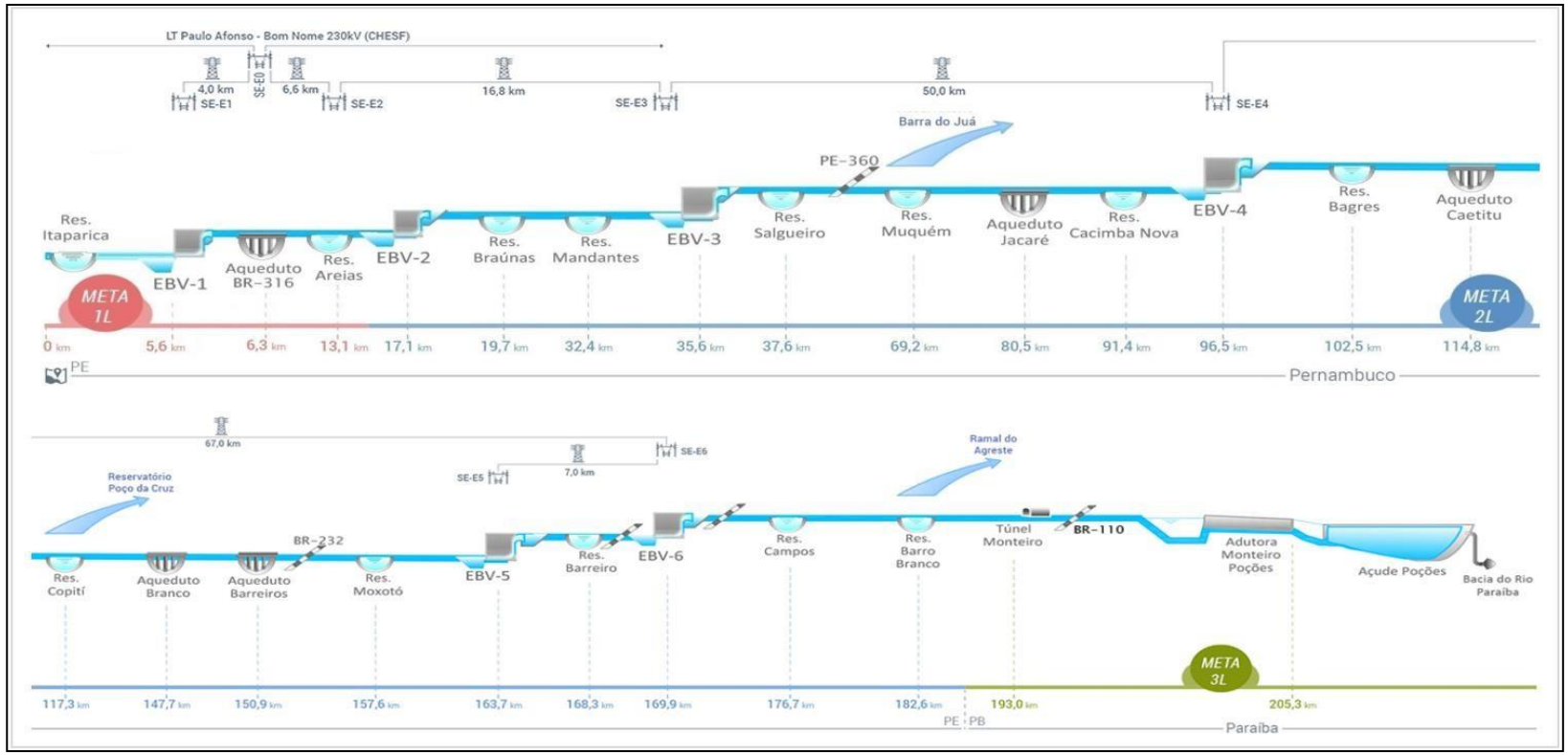
Figura 3 - Bacia do Rio Pajeú



Fonte: APAC (2023).

Para o estudo, foram selecionados os reservatórios do Eixo Leste da Transposição do Rio São Francisco, com 217 km de extensão. As estruturas captam água do Rio São Francisco que vão perenizar os rios existentes na região (ANA, 2021). O Eixo Leste inicia sua extensão no reservatório de Itaparica na cidade de Floresta - PE até o Rio Paraíba na cidade de Monteiro - PB. A Figura 4 e Tabela 1 apresentam o perfil esquemático da infraestrutura hídrica do eixo leste do PISF, seguindo o caminho das águas e seus respectivos reservatórios.

Figura 4 – Perfil esquemático da infraestrutura hídrica do Eixo Leste do PISF.



Fonte: Adaptado de MDR (2021e).

Quadro 3 – Relação dos reservatórios do Eixo Leste do PISF.

RESERVATÓRIOS	Código do Reservatório
Reservatório Areias	2104
Reservatório Braúnas	2105
Reservatório Mandantes	2106
Reservatório Salgueiro	2107
Reservatório Muquém	2108
Reservatório Cacimba Nova	2109
Reservatório Bagres	2110
Reservatório Copiti	2111
Reservatório Moxotó	2112
Reservatório Barreiros	2113
Reservatório de Campos	2114

Fonte: Autor (2023).

4.2 OBTENÇÃO DE DADOS ESPACIAIS

Para o desenvolvimento desta pesquisa foi utilizado o Sistema de Informação Geográfica (SIG), com apoio de software de acesso livre QGis, permitindo gerar dados espaciais de determinada região geográfica.

Para este estudo, duas cenas do satélite Landsat 8 de orbita/ponto (216/066), foi adquirida nas datas de 26 de novembro de 2017 e 15 de julho de 2023, através do portal Earth Explorer do United States Geological Survey (USGS) (https://earthexplorer.usgs.gov/) correspondente ao período seco e chuvoso na região. A imagem obtida possui pré-processamento baseado na correção pelo terreno Nível 1 (L1T) e georreferenciada usando o Datum SIRGAS2000. O quadro 1 apresenta as bandas e os dados de comprimento de onda (μm) das imagens do satélite OLI Landsat 8 utilizadas nesta pesquisa (Quadro 4).

Quadro 4. Bandas do OLI e TIRS Landsat 8

Bandas Espectrais	Resolução Espectral (μm)
B3 (verde)	0,533 - 0,590

B4 (vermelho)	0,636 - 0,673
B5 (infravermelho próximo)	0,851 - 0,879
B6 (infravermelho médio)	1,566 - 1,651

Fonte: Adaptado de (USGS, 2019; EMBRAPA, 2019; INPE, 2019

A calibração radiometria necessária para as bandas Landsat-8 foi realizado o pré-processamento com a ferramenta de calculadora raster do software QGIS que converteu os pixels das bandas do número digital (ND) em refletância do topo da atmosfera (TOA) através da equação 1. O cálculo usa todas as informações necessárias da conversão para o arquivo de metadados MTL do Landsat.

$$\rho_{\lambda}' = M_{\rho} Q_{cal} + A_{\rho} \quad (1)$$

Onde o ρ_{λ}' é a reflectância planetária TOA para cada banda do Landsat, sem correção para ângulo solar. M_{ρ} é o fator de redimensionamento multiplicativo específico da banda dos metadados (REFLECTANCE_MULT_BAND_x, onde x é o número da banda), A_{ρ} é o fator de redimensionamento aditivo específico da banda dos metadados (REFLECTANCE_ADD_BAND_x, onde x é o número da banda) e o Q_{cal} é a banda espectral em escala de pixels em (ND).

4.2 ÍNDICES ESPECTRAIS (NDVI e NDWI)

O NDVI é expresso em uma escala que varia de -1 a +1. Os valores negativos representam os corpos de água, em que as reflectâncias na região do infravermelho próximo são inferiores às da região do visível. Para outros alvos, o NDVI varia de 0 a 1. Os valores mais altos são vinculados à copa de vegetação devido a grande diferença nas refletâncias das regiões espectrais. Em contraste, valores próximos de zero indicam a ausência de vegetação, levando a menores valores de reflectância de diferença em ambos os espectros de infravermelho vermelho e próximo., de acordo com a equação 1 (Di Pace et al., 2008).

$$NDVI = \frac{\rho_{IVp} - \rho_{V}}{\rho_{IVp} + \rho_{V}} \quad (1)$$

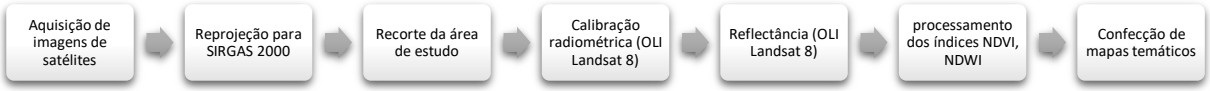
Onde ρ_{IVp} é a reflectância da banda do infravermelho próximo (Banda 5) e ρ_V é a reflectância da banda do vermelho (Banda 4).

Proposto por Gao (1996) o Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI), manipulando as bandas do infravermelho próximo e do infravermelho médio, correlaciona com o conteúdo de água nos vegetais para acompanhar as alterações na biomassa e nos estresses de umidade das plantas, permitindo revelar remotamente a presença de água líquida na vegetação e a localização do manancial hídrico na paisagem georreferenciada. Mcfeeters (1996) avaliou o NDWI, tendo como objetivo realçar automaticamente as águas abertas através da operação de bandas multiespectrais. O método é uma variação do NDVI e combina as bandas verde e infravermelho próximo.

$$NDWI = \frac{(\rho_{IVp} - \rho_{IVm})}{(\rho_{IVp} + \rho_{IVm})} \quad (2)$$

Onde ρ_{IVm} é a reflectância da banda do infravermelho médio (Banda 6). A figura 5 mostra o fluxograma com as etapas de processamento, desde a aquisição das imagens de satélite até a elaboração dos mapas.

Figura 5. Fluxograma com as etapas de processamento.



Fonte: Autor (2023).

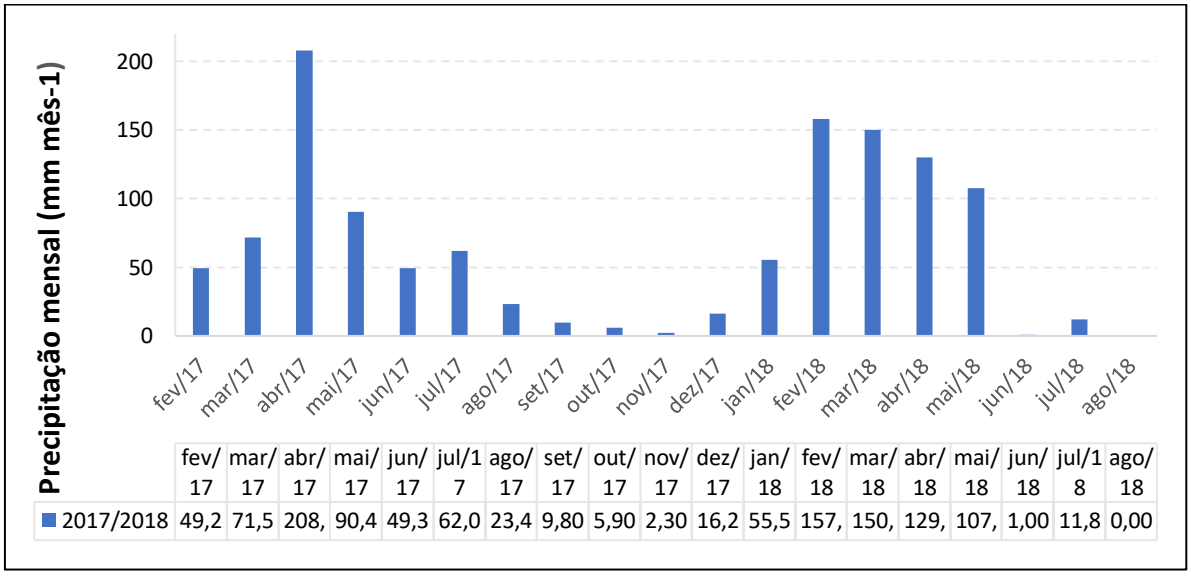
Para caracterização climática, foram utilizados dados de precipitação pluviométrica do posto identificado com código 147, na cidade de Custódia – PE, onde possui dados diários sem problemas de consistência e operado pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No Gráfico 1, pode-se observar os dados de precipitação mensal, obtidos no posto pluviométrico, no período do enchimento (2017 e 2018) e, no Gráfico 2,

a precipitação mensal do ano de 2023. No ano de 2017, a precipitação anual foi de 588 mm e em 2018 obteve-se o valor de 611,3 mm, onde foi observado um maior volume precipitado no ano de 2018, com maiores precipitações nos meses de fevereiro, março, abril e maio, enquanto no ano de 2017, as chuvas se concentraram em maior volume no mês de abril.

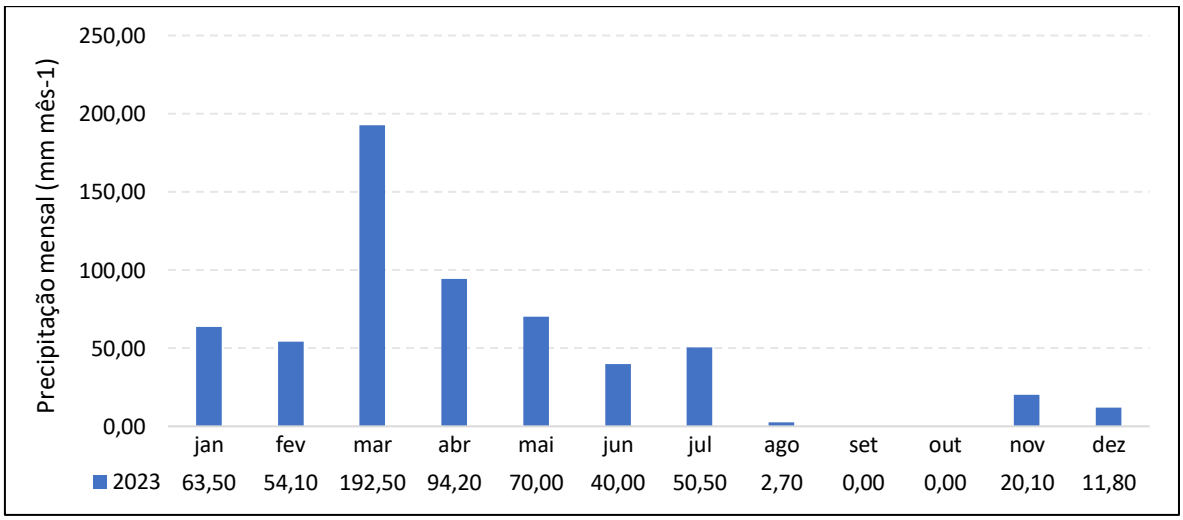
Gráfico 1: Precipitação mensal em Custódia – PE (Posto - 147), nos anos de 2017 e 2018.



	fev/17	mar/17	abr/17	mai/17	jun/17	jul/17	ago/17	set/17	out/17	nov/17	dez/17	jan/18	fev/18	mar/18	abr/18	mai/18	jun/18	jul/18	ago/18
2017/2018	49,2	71,5	208,	90,4	49,3	62,0	23,4	9,80	5,90	2,30	16,2	55,5	157,	150,	129,	107,	1,00	11,8	0,00

Fonte: APAC2023).

Gráfico 2: Precipitação mensal em Custódia – PE (Posto - 147), no ano de 2023.



	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
2023	63,50	54,10	192,50	94,20	70,00	40,00	50,50	2,70	0,00	0,00	20,10	11,80

Fonte: APAC 2023).

O reservatório de Areias, teve seu enchimento em fevereiro de 2017 e neste período foi possível observar uma menor precipitação comparado ao mesmo mês do ano de 2023. No mês do enchimento, ocorreu um volume de

49,2 mm enquanto em fevereiro de 2023, apenas 54,10 mm, dessa forma é possível constatar que precipitação teve pouco impacto na dinâmica de enchimento do reservatório.

Os reservatórios de Bagres, Barreiros e Cacimba Nova, tiveram seu enchimento concluído nos meses de outubro e novembro de 2017, que coincidiram com um pequeno volume de precipitação de 8,2 mm, ou seja, quase não choveu naquele período. O Reservatório de Braúnas, teve seu enchimento concluído em julho de 2017 e, de acordo com os dados da APAC, o volume de precipitação foi de 62 mm, enquanto no mesmo mês de 2023 foi de 50,5 mm, o que pode estar relacionado pela influência da evaporação e da evapotranspiração.

A batimetria, medição da profundidade do reservatório, é expressa cartograficamente por curvas batimétricas unindo pontos da mesma profundidade com equidistâncias verticais, à semelhança das curvas de nível topográficas. Nos reservatórios estudados foram evidenciados, nos respectivos Planos de Segurança de Barragens (PSB), volume IV, protocolados no MIDR e apresentado no quadro 5.

Quadro 5: Batimetria dos reservatórios nos períodos de enchimento e 2023.

RESERVATÓRIO	VOLUME NO ENCHIMENTO (MILHÕES M³)	VOLUME EM 2023 (MILHÕES M³)
AREIAS	7,46	7,76
BRAÚNAS	14,2	15,44
MANDANTES	3,81	3,80
SALGUEIRO	4,49	4,43
MUQUÉM	3,18	3,04
CACIMBA NOVA	2,77	2,79
BAGRES	2,50	2,21
COPITI	6,32	6,36
MOXOTÓ	1,49	1,44

BARREIRO	3,58	2,76
CAMPOS	1,49	5,01

Fonte: PSB – MIDR, adaptado pelo autor.

Após a análise da distribuição da precipitação, a figura 6 mostra a diagrama de imagens sob visualização RGB em cores naturais bem como os índices espectrais (NDVI e NDWI) para a barragem de Areias.

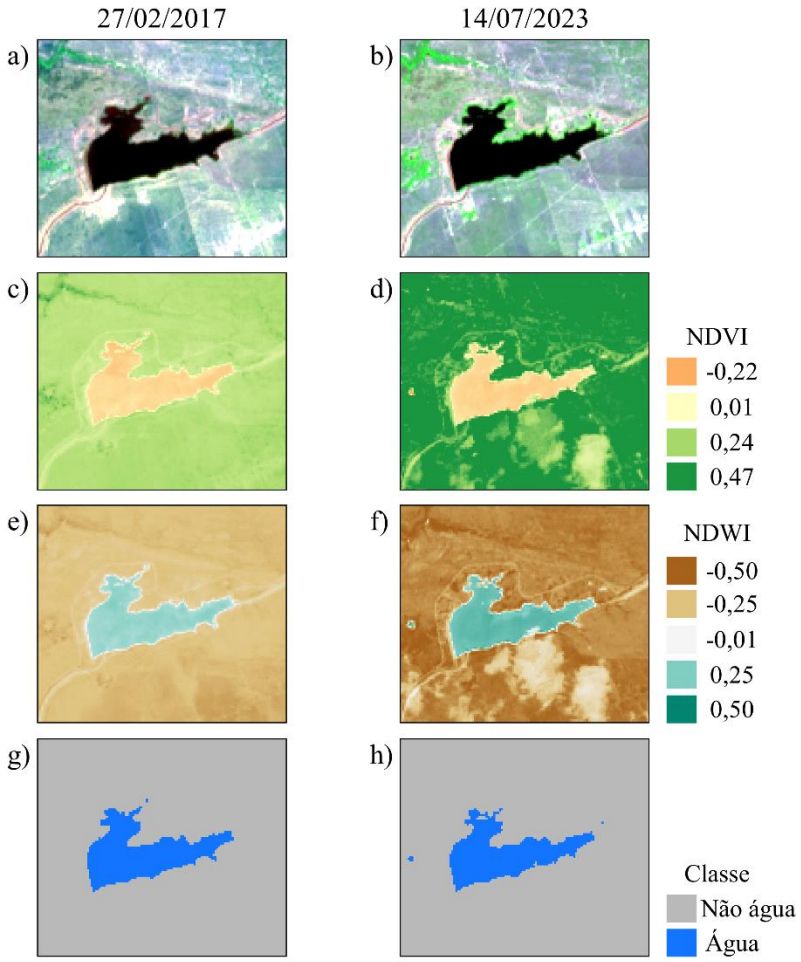
Observa-se um aumento nos valores de NDVI no entorno da barragem, onde em 2017 obteve um valor médio de 0,16 e em 2023 de 0,41 (Figura 6C e 6D), embora ambas as datas apresentem alta homogeneidade, demonstrado nos valores de desvio padrão de 0,08 e 0,18 respectivamente. No geral, no corpo hídrico, os valores de NDVI verificados foram negativos, o que é esperado para corpos hídricos. Apesar do aumento dos valores de NDVI, não é possível afirmar que houve um aumento da atividade da vegetação em virtude de atividade antrópica (agricultura), pois, esse fenômeno pode estar relacionado a eventos de precipitação próximos à data do imageamento do alvo, chegando a aproximadamente 20 mm nos últimos quinze dias que antecedem o imageamento da cena, uma vez que a vegetação da caatinga possui uma forte correlação com os índices pluviométricos.

Gomes et al. (2023) observaram que a precipitação afeta diretamente a disponibilidade de água no solo. Portanto, há uma relação importante entre a quantidade de chuva recebida em uma área e o NDVI. Em geral, em áreas com maior precipitação, a vegetação tende a ser mais densa e saudável, resultando em valores mais altos de NDVI. Isso ocorre porque a água é um recurso essencial para o crescimento das plantas, e em regiões onde há uma quantidade suficiente de chuva, as plantas podem prosperar e aumentar sua biomassa, como visto em Sousa et al., (2023) onde os autores indicam que o aumento da precipitação em bacias hidrográficas ocasiona uma alta variação na dinâmica da vegetação no semiárido brasileiro.

Visivelmente o NDWI não apresentou variações significativa em sua distribuição espacial para ambos os anos, ou seja, os entornos da barragem obtiveram baixos valores, enquanto os corpos hídricos obtiveram altos valores (Figura 6E e 6F). Essa afirmação é justificada pelos valores de desvio padrão

relativamente próximos ($NDWI_{2017}$: -0,24±0,14; $NDWI_{2023}$: -0,36±0,22). Além disso, o corpo hídrico da barragem, espacialmente, também não sofreu alterações importantes, mantando-se sua forma, mostrando assim, a estabilidade da vazão de entrada e saída de água da barragem. A área do corpo hídrico não apresentou mudanças significativas do período seco para o chuvoso, -apresentado uma variação de 0,21 km², o que pode estar relacionado a recarga de água com regime constante no reservatório através do sistema PISF.

Figura 6. Barragem Areias



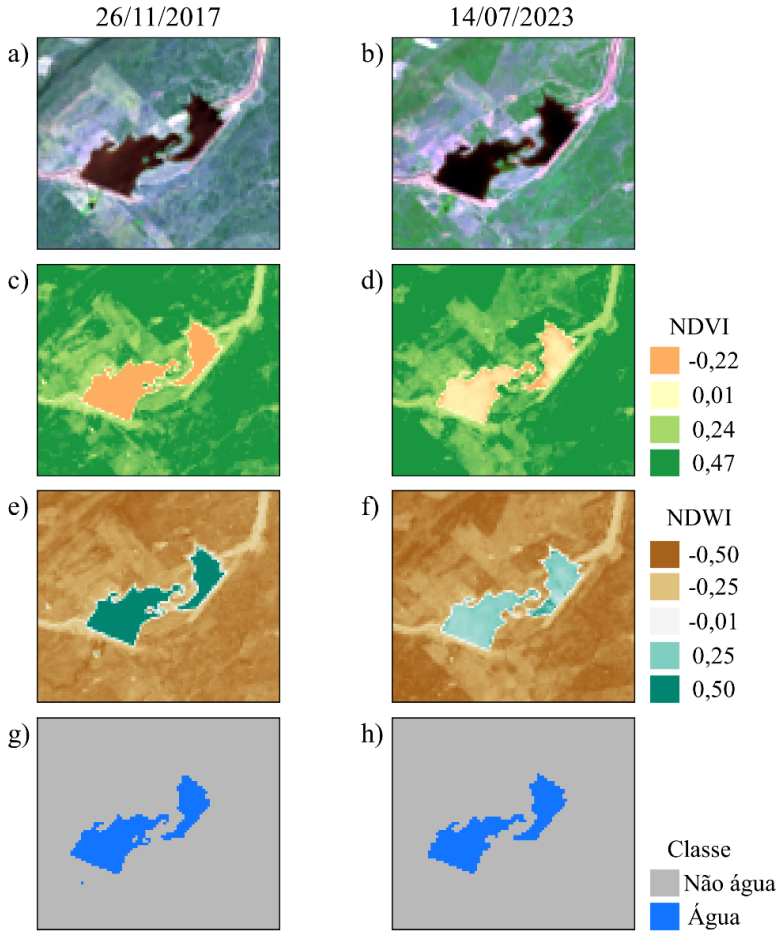
Fonte: Autor (2023).

A figura 7C e 7D, Barragem Bagres, mostra a distribuição espacial de NDVI com pequenas variações tanto nos valores de NDVI, quanto na detecção de mudanças. Ambos aos anos foram marcados com altos valores de NDVI e desvio padrão estável ($NDVI_{2017}$: 0,44±0,14; $NDVI_{2023}$: 0,51±0,14). Por outro lado, o corpo hídrico da barragem mostrou uma dispersão significativa nos

valores de NDVI e, em 2017, apresentou valores concentrados abaixo de -0,22, enquanto em 2023, foi observado valores próximos a zero. Esse comportamento pode estar relacionado a composto orgânicos e de sólidos em suspensão na cobertura superficial da água que alteram os valores de NDVI.

O NDWI, apresentou um comportamento semelhante ao NDVI, com valores ($NDWI_{2017}$: -0,43±0,13; $NDWI_{2023}$: -0,47±0,10) (Figura 7E e 7F). Esses valores mostram a baixa variação espacial no entorno de barragens no semiárido, e a alteração espectral provavelmente causada pelo ângulo de imageamento ou compostos na superfície aquática. Esse comportamento também foi observado em Brito et al. (2022), onde os parâmetros de transparência, clorofila e turbidez na água na barragem Rio Doce em Minas Gerais alteraram os valores de NDVI e NDWI, sendo constatado que esses índices foram bons indicadores de qualidade da água a partir de estimativas implementadas com uso de bandas espectrais Landsat-8. A área do corpo hídrico varrições entre 0,61 km² e 0,56 km² do período seco para o chuvoso, mostrando uma pequena variação. Dutra et al. (2020), mostrou o mesmo comportamento observado neste estudo, onde os autores observaram no estado de Minas Gerais, as regiões com valores de NDVI abaixo de zero correspondem a áreas sem vegetação, enquanto regiões com valores acima de 0,6 indicam áreas com vigor vegetativo muito alto. Estudos similares foram corroborados por Patil et al. (2024) na região da bacia do rio Paraopeba.

Figura 7. Barragem Bagres



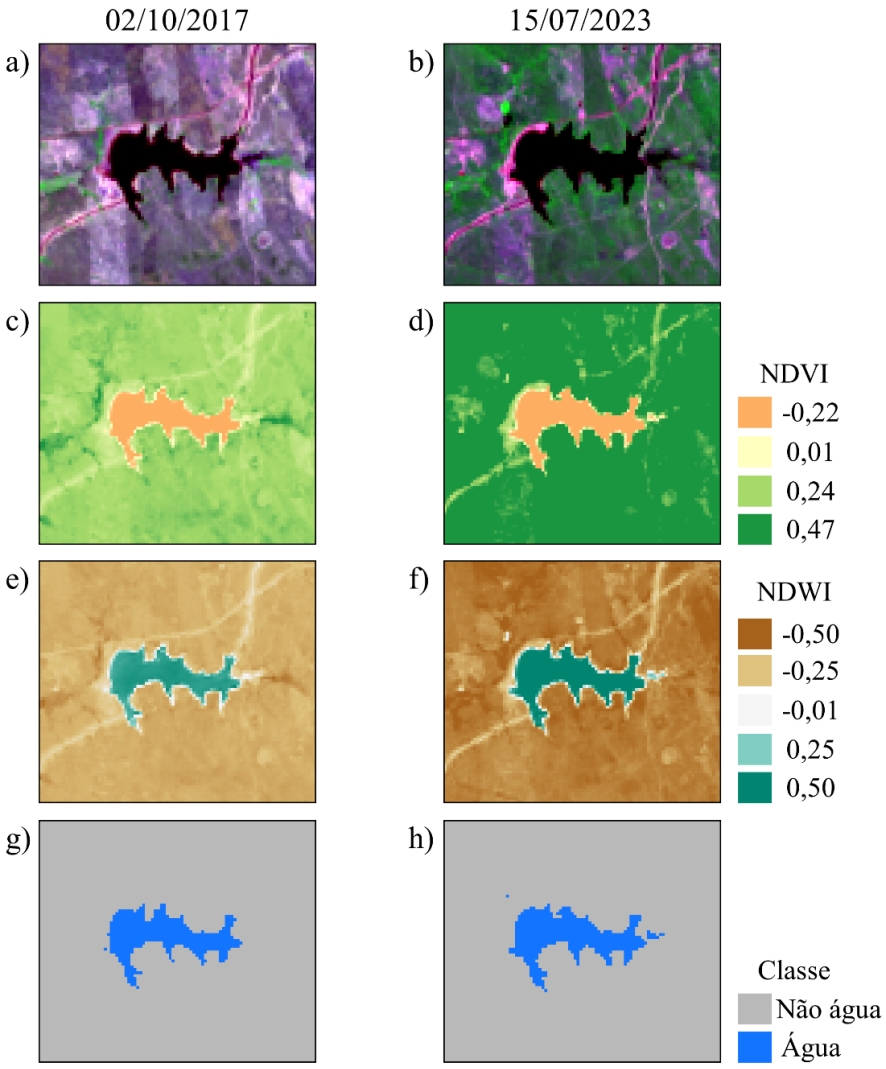
Fonte: Autor (2023)

Na barragem de Barreiros, o NDVI apresentou uma tendência de aumento do valor médio de 2017 para 2023, passando de 0,23 para 0,55; por outro lado, não apresentou clara variação no uso e cobertura do solo, observado por fotointerpretação das cenas em composição colorida. Já no corpo hídrico, em ambas as datas, os valores médios de NDWI foram negativos, concentrados entre -0,2 e -0,3 para 2017 e 2023, respectivamente. A linha do conduto, localizada no setor transversal do reservatório, da transposição foi bem destacada no NDVI e no NDWI, como esperado, com baixos valores no NDVI e valores de NDWI levemente mais altos, como visto na Figura 8.

A área de recurso hídrico, delineada com auxílio do NDWI, mostrou alta homogeneidade, concentrados com valores negativos. Já na área de entorno do corpo hídrico, foram observados valores positivos com o delineamento da borda bastante definida na relação dicotona entre as feições de água e não água. Em relação à estatística descritiva, os valores de média e desvio padrão foram

$NDWI_{2017}$: -0,32±0,09; $NDWI_{2023}$: -0,46±0,14. A variação temporal entre as áreas do corpo hídrico foi de apenas 0,07 km², mostrando uma estabilidade entre o período seco e chuvoso. Anjos et al. (2017), ao pesquisarem a Barragem Capoeira – PB, concluíram que o NDWI pode ser aplicado para delinear os espelhos d'água de reservatórios, pois elimina simultaneamente a interferência da vegetação e do solo. Isso comprova a efetividade desta pesquisa no delineamento dos corpos hídricos das barragens do PISF. Nesse sentido, Lima (2020) observou que tanto o NDWI quanto o NDVI foram eficazes quando analisados sob a perspectiva da precipitação pluviométrica, contribuindo para o entendimento da dinâmica espacial local.

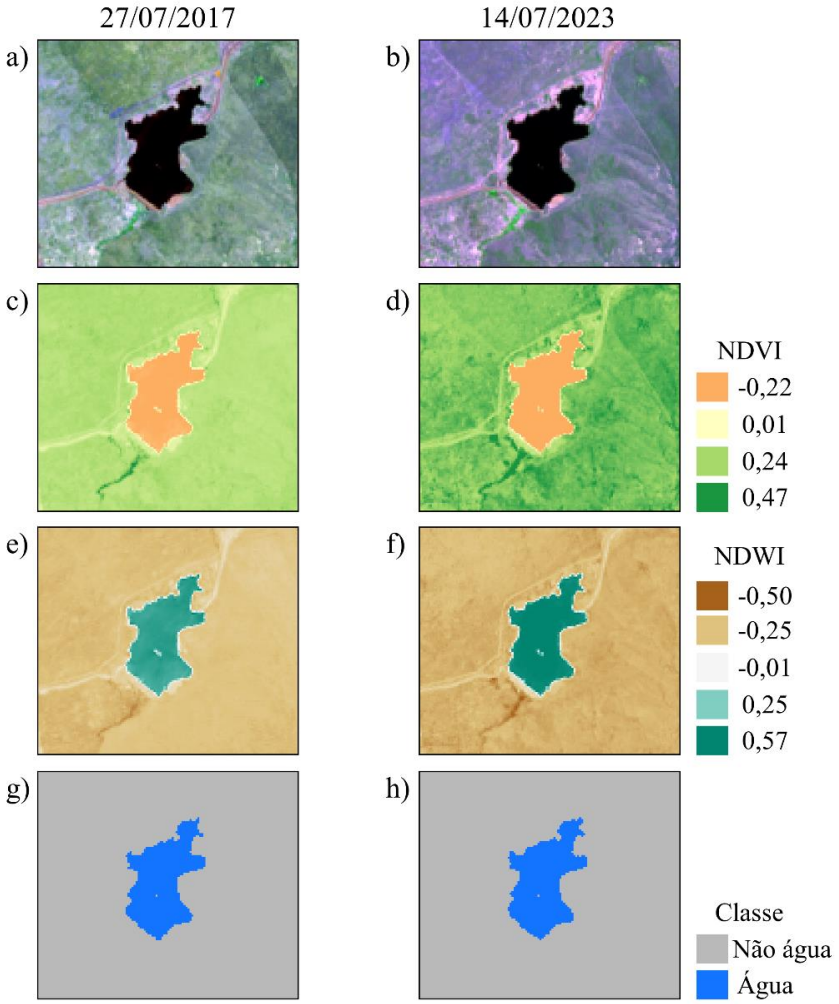
Figura 8. Barragem Barreiros



Fonte: Autor (2023).

Os índices na Barragem Braúnas mostram alta estabilidade nos valores de pixel, com boa caracterização do corpo hídrico, embora com poucas variações no entorno da barragem. Essas afirmações podem ser quantificadas nos valores de média e desvio padrão: $NDVI_{2017}$: 0,17±0,09; $NDVI_{2023}$: 0,28±0,14; $NDWI_{2017}$: -0,24±0,15; $NDWI_{2023}$: 0,28±0,14. No geral, nesta barragem ambos os índices mostraram bom resultado na detecção dos alvos, com um comportamento correspondente ao tipo do alvo imageado. A Braúnas apresentou uma variação percentual na área do corpo hídrico de 5%, mostrando, assim como as outras barragens, uma estabilidade. Dados semelhantes aos de Borelli et al. (2023) em pesquisa realizada na bacia hidrográfica do rio Sucuru, no sudoeste da Paraíba, constataram um NDVI médio de 0,25 no período seco e de 0,61 no período chuvoso. Por outro lado, em um estudo realizado por Barbosa et al. (2021), que aplicaram diferentes índices de vegetação ao longo do ano de 2016, verificou-se que o NDVI variou entre -0,05 e 0,4, confirmando os resultados deste estudo, onde o valor máximo foi de 0,47 durante o período chuvoso.

Figura 9. Barragem Braúnas



Fonte: Autor (2023)

Para Cacimba Nova, as imagens de índices espectrais permitiram a visualização da barragem praticamente seca no período de 2017. O NDVI, neste ano, apresentou valores equiparados a solo exposto. Além disso, em 2017 a vegetação no entorno na barragem apresentou uma pequena variação espacial com baixos valores de NDVI; em contrapartida, em 2023, o NDVI apresentou valores relativamente altos. Essa variação pode ser vista nos valores de média e desvio padrão da cena sendo $NDVI_{2017}$: 0,22±0,05; $NDVI_{2023}$: 0,49±0,13. Em 2023, já foi possível observar o corpo hídrico da barragem, com valores de NDVI negativos como visto na Figura 10.

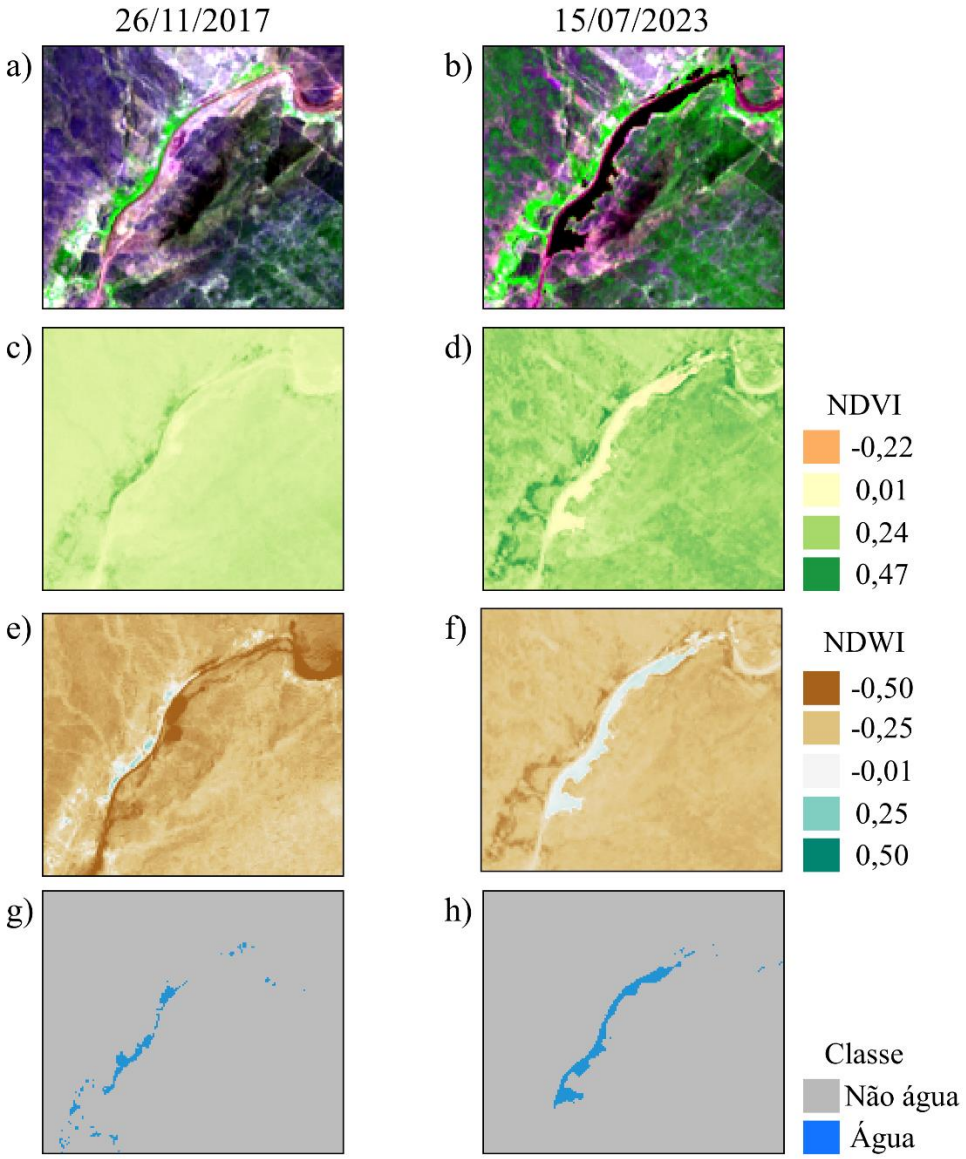
A falta de água na barragem foi responsável por uma homogeneidade nos valores de NDWI em 2017, sendo demostrada pelo baixo valor de desvio padrão $NDWI_{2017}$: -0,29±0,04. Já em 2023, o NDWI mostrou um comportamento inverso ao ano de 2017, sendo impulsionado com o aparecimento de pixels de água no

corpo da barragem, com uma estatística descritiva de $NDWI_{2023}$: -0,45±0,12 e valores positivos concentrados em aproximadamente 0,30 na parte de água.

No geral os índices NDVI e NDWI conseguiram identificar o corpo hídrico da barragem. Em 2017, o NDVI conseguiu um bom rendimento em mostrar o empreendimento da barragem, concentrado em valores negativos. Por outro, lado em 2023, houve uma distribuição de pixels com valores negativos e próximos a zero, com ausência de detecção dos elementos da paisagem visíveis em 2017. Além disso, o desvio padrão ficou acima do valor d média no segundo ano, sendo: $NDVI_{2017}$: -0,18±0,05; $NDVI_{2023}$: -0,05±0,1, resultado causado pela presença de valores mais altos na região hídrica

O limiar adotado ao NDWI não foi capaz de detectar o corpo hídrico com precisão, havendo subestimações, provavelmente relacionado à reflectância do solo na água, que comprometeu a detecção do alvo. Com isso, foi detectado um aumento do corpo hídrico do período seco para o período chuvoso passando de 0,204 km² para 0,492 km², que pode estar relacionado a diversos fatores, como ao aumento de vazão neste reservatório e aumento dos índices pluviométricos além da diminuição do consumo. Os valores mais baixos de NDVI são encontrados em solos com pouca vegetação, pois a reflexão do solo é alta, resultando em menores valores na faixa do infravermelho próximo e altos na faixa vermelha, o que consequentemente gera valores baixos de NDVI. Gandhi et al. (2015) destacam que o NDVI tem sido amplamente utilizado para analisar a relação entre a variabilidade espectral e as mudanças nas taxas de crescimento da vegetação, bem como para detectar alterações na cobertura vegetal.

Figura 10. Barragem Cacimba Nova

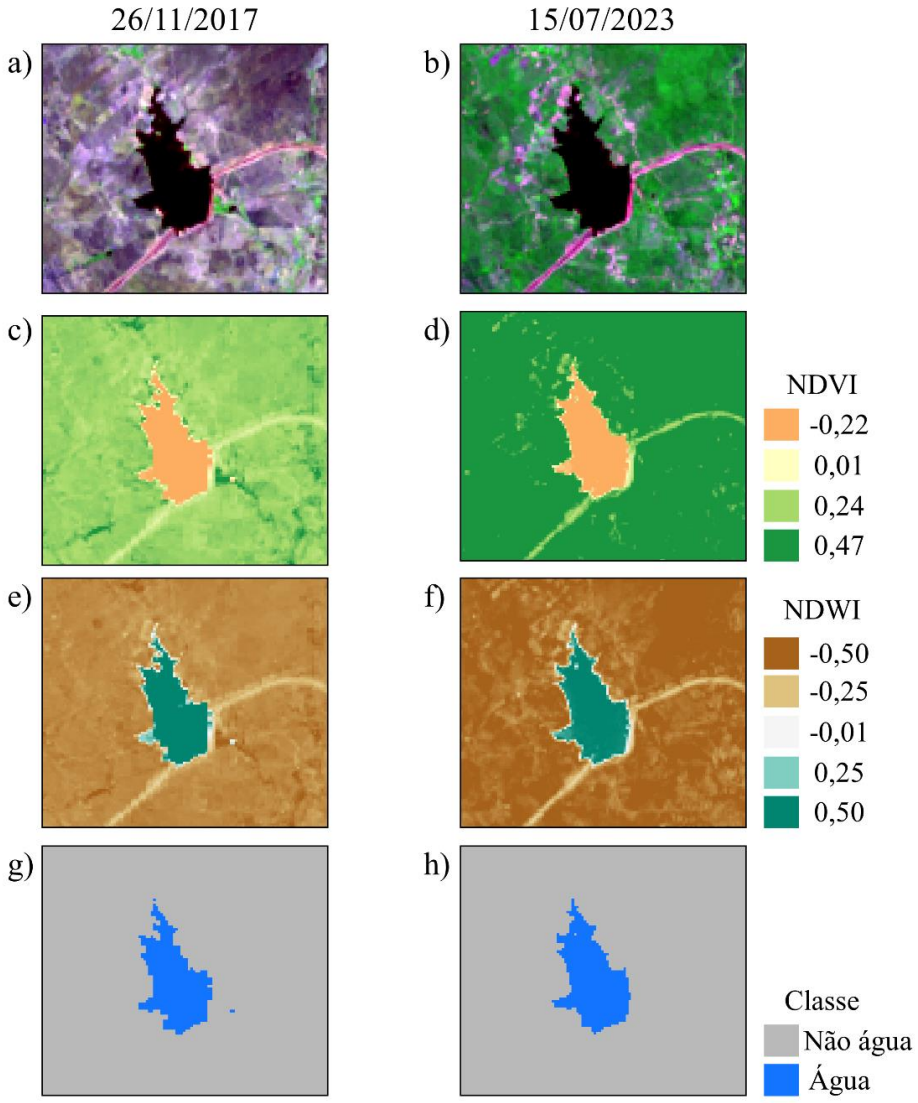


Fonte: Autor (2023).

Os índices NDVI e NDWI mostraram bom desempenho da detecção do corpo hídrico na barragem Campos, com a água se sobressaindo abruptamente dos pixels do entorno, como mostra a Figura 11. Além disso, ambos os índices mostraram alta variação espacial nos valores de pixels em cada ano, fato verificado nos valores de média e desvio padrão, $NDVI_{2017}$: 0,24±0,13; $NDVI_{2023}$: 0,60±0,16; $NDWI_{2017}$: -0.41±0.17; $NDWI_{2023}$: -0.50 ±0,16. Esses valores mostram um aumento de 40% do NDVI de 2017 a 2023, enquanto o NDWI decresceu 18% considerando o valor médio de todo o recorto e não apenas da área hídrica. Foi detectado um aumento do corpo hídrico do período seco para o período chuvoso

passando, de 0,693 km² para 0,768 km², mostrando que a classificação do NDWI foi bastante efetiva na detecção da área superficial para esta barragem. Esse comportamento também foi observado nos estudos de Rodrigues et al. (2023), onde índices espectrais foram utilizados para detectar alterações na vegetação na região sudeste do estado de Goiás. Através do NDVI, observaram mudanças significativas nos valores após alterações no uso e cobertura do solo em uma área de mineração.

Figura 11. Barragem Campos



Fonte: Autor (2023).

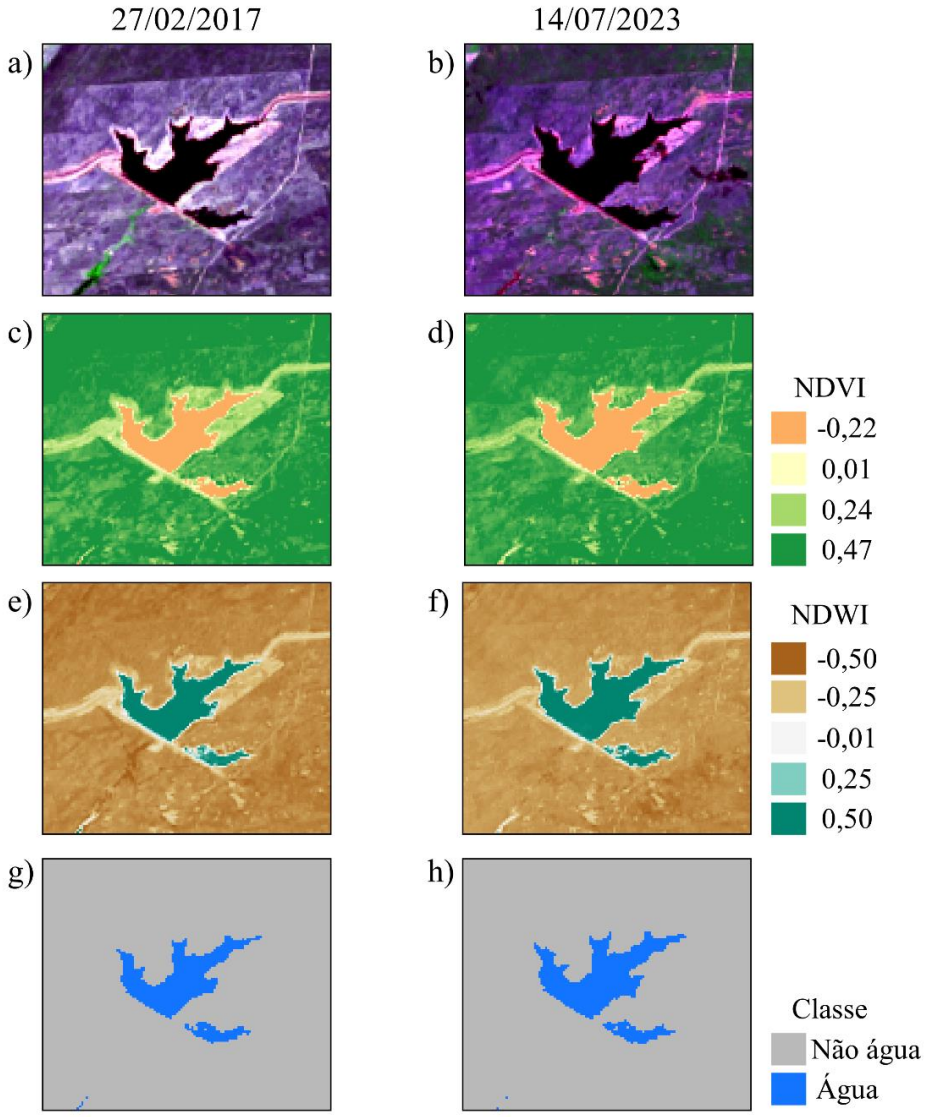
As análises dos índices espectrais na barragem Copiti (Figura 13) mostraram uma boa representação da distribuição espacial, principalmente na detecção do corpo hídrico. Por outro lado, de 2017 a 2023, os índices também mostraram baixa variabilidade espacial, com valores de média semelhantes e

inclusive com altos valores de NDVI e baixos de NDWI, como esperado. Os valores das estatísticas descritivas foram: $NDVI_{2017}$: 0,43±0,13; $NDVI_{2023}$: 0.44±0,14; $NDWI_{2017}$: -0.42±0,13; $NDWI_{2023}$: -0.39±0.16. Houve aumento de 12% na área superficial do corpo hídrico.

Visualmente, o NDVI mostrou alta sensibilidade nos valores dos pixels entre o período seco e o chuvoso, com tons verdes mais evidentes no período chuvoso, refletindo o aumento significativo nos valores médios. Conforme o estudo de Alves (2016), isso se relaciona à época de imageamento da região, que corresponde ao período de precipitações mínimas, e à vegetação local, composta por Caatinga caducifólia arbustiva, caracterizada pela queda das folhas no período seco (agosto a dezembro). Gameiro et al. (2016) avaliaram a cobertura vegetal em Jaguaribe, CE, utilizando índices de vegetação e revelaram que a variabilidade vista nos períodos secos e úmidos pode estar relacionado a perdas de vegetação natural para a agricultura.

Os resultados apresentados corroboram as descobertas de Maganhotto (2016), que examinou 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 d'água usando índices de água provaram ser eficazes e objetivos. Assim como nas análises das barragens neste estudo, a principal diferença está relacionada ao fato de que esses índices são mais influenciados pelas bandas do infravermelho do que pelas bandas do visível, resultando em uma mistura espectral de pixels.

Figura 12. Barragem Copiti



Fonte: autor (2023)

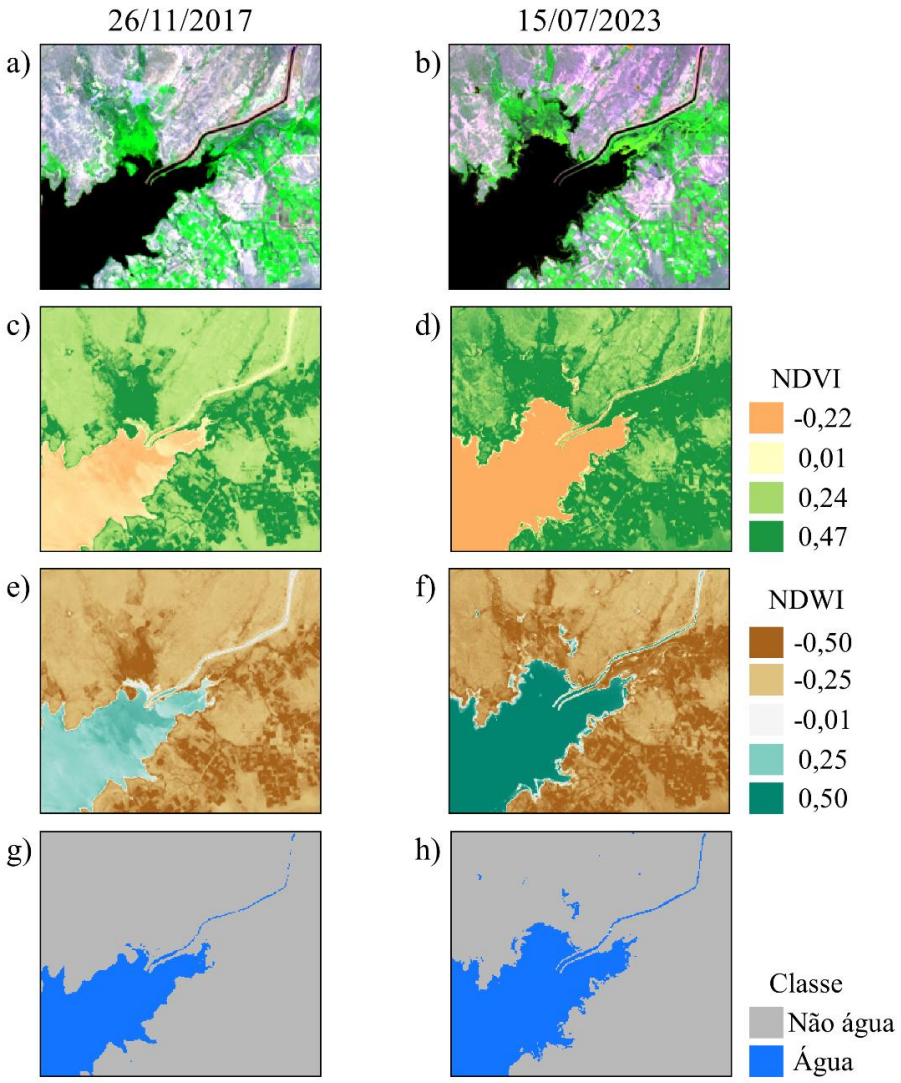
A barragem Mandantes possui um extenso corpo hídrico presente no recorte da imagem e em seu entorno, plantações irrigadas de frutíferas e agricultura familiar (Sousa et al. 2022). Essas plantações são perceptíveis por feições de altos valores de NDVI vistos para os anos de 2017 e 2023 variando entre 0,6 e 0,7. Por outro lado, apresentaram valores de média e desvio padrão próximos, mostrando que na área não houve variações no uso e cobertura do solo ($NDVI_{2017}$=0.21±0.17; $NDVI_{2023}$=0.25±0.30).

Em relação ao NDWI, o índice foi capaz de separar com precisão a parte de água e não água, porém em 2023 esta separabilidade visualmente se mostrou mais evidente, com valores de pixels de água acima dos 0,3, enquanto em 2017, valores de pixels próximos a 0 (zero) como mostra a Figura 14. As áreas

agrícolas foram realçadas no NDWI, com pixels negativos em ambos os anos. Por outro lado, na cobertura do solo, ambos os anos apresentaram uma estabilidade significativa com pixels negativos variando entre (0,2~0,3). Em relação a estatística descritiva mostraram valores estáveis proporcionalmente ao NDVI sendo ($NDWI_{2017}$= -0,26±0,21; $NDWI_{2023}$= -0.21±0.38).

A Barragem Mandantes parcialmente mostrou um acréscimo de aproximadamente 5 km² na área superficial do corpo hídrico no trecho em análise, do período seco para o chuvoso, o que já era esperado devido ao fato de a barragem ser um ponto importante de recebimento de água após a obra de transposição. Nesse contexto Carvalho (2023) observou no município de Serra Talhada, Pernambuco que o NDWI no geral, 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.

Figura 13. Barragem Mandantes



Fonte: autor (2023)

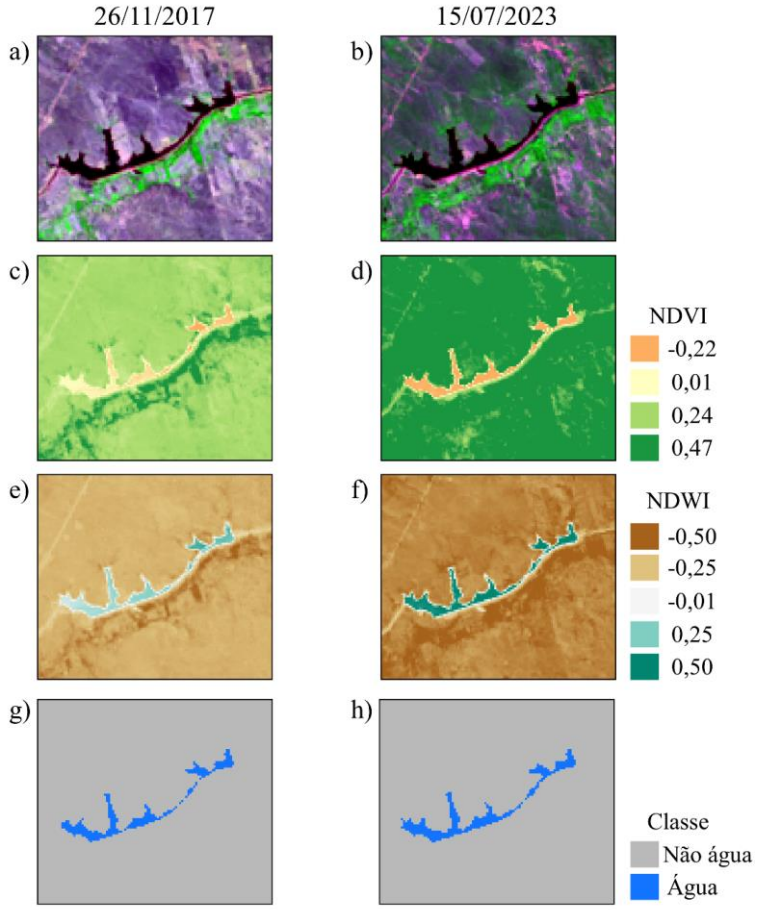
No NDVI em 2017, a vegetação de Caatinga predomina a área de estudo com valores de NDVI positivos e estáveis, porém é possível observar pixels de NDVI com valores um pouco mais altos de aproximadamente 0,45, que pode estar relacionado a atividade fotossintética da vegetação diante do material orgânico presente no solo da barragem. Por outro lado, ainda em 2017 foi visto que o NDVI na água possui valores positivos próximos a 0, visto que a resposta espectral deste corpo hídrico pode ter sido afetada pela luz do solo submerso. Já em 2023, o entorno da barragem mostrou valores de NDVI acima de 0,4 bastante homogêneo, por outro lado, o corpo hídrico mostrou pixels de negativos. No geral os valores de NDVI apresentou um aumento de

aproximadamente 47% em relação a média, como pode ser visto na descrição estatística, sendo $NDVI_{2017}$: 0,24±0,06; $NDVI_{2023}$: 0,51±0,11.

A região relacionada aos recursos hídricos, analisada através do NDWI, exibiu uma notável uniformidade, com uma predominância de valores negativos visto na figura 14. Contrastando essa observação, a superfície da água revelou valores predominantemente positivos, onde uma fronteira bem definida se estabeleceu entre as áreas aquáticas e não aquáticas. Quanto à análise estatística, os valores médios e desvios padrão foram os seguintes: $NDWI_{2017}$ apresentou uma média de -0,32 com um desvio padrão de 0,06, enquanto o $NDWI_{2023}$ exibiu uma média de -0,45 com um desvio padrão de 0,1.

A distribuição espacial do corpo hídrico, também interfere no processo de deteção da área superficial, isso pode ser visto na barragem Moxotó. Devido a sua forma mais estreita a precisão espacial da imagem pode ter contribuído para subestimação de pixels de água em ambos os periódicos, com variação pequena, chegando a 0,5 Km^2 0,04 Km^2. Abreu et al. (2020) comprovaram que foi possível utilizar a extração automatizada para a extração de corpo hídrico através do NDWI podendo ser usado em diversos campos de atuação e como um indicador de estresse ambiental, como exemplificado num trecho do Rio Paranapanema, onde os autores observaram uma perda de uma área de 189,4033 km^2.

Figura 14. Barragem Moxotó



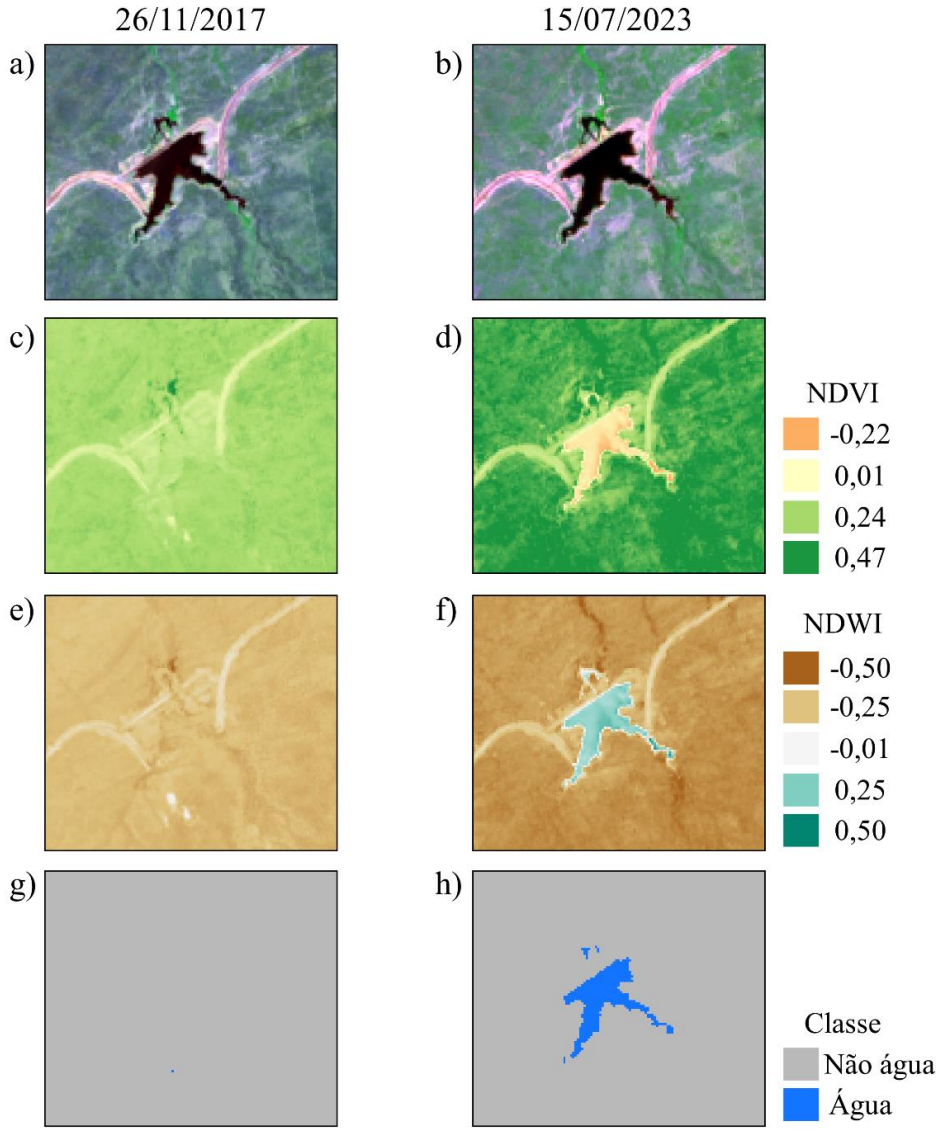
Fonte: Autor (2023)

O NDVI e o NDWI mostraram o delineamento da transposição para ambos os anos, com destaque para o ano de 2023. Em 2017, a barragem encontra-se sem água, resultando numa alta homogeneidade para o NDVI e NDWI, comprovado nos valores de desvio padrão $NDVI_{2017}$: 0,23±0,03; $NDVI_{2023}$: 0,4±0,08; $NDWI_{2017}$: -0,3±0,03; $NDWI_{2023}$: -0,4±0,07. A Barragem Muquém recebeu incialmente as águas no rio são Francisco após o ano de 2017, por isso, como esperado não foi possível extrair o corpo d'agua, já em 2023, após o seu enchimento, já foi possível detectar água, mostrando uma área superficial de 0,49 Km².

Esses resultados estão de acordo com Macedo (2019), que estimou os índices de vegetação na unidade de conservação do Parque Estadual das Carnaúbas, Ceará, em 2018. Macedo obteve valores máximos de NDVI de 0,58 para o período úmido, destacando que essa característica se deve à presença

de umidade, que causa variações nos índices. Capoane et al. (2021), ao avaliar o comportamento da vegetação através do NDVI em pequenos reservatórios na bacia hidrográfica do Rio Guariroba nos anos de 2019 e 2020, apresentaram resultados com valores de NDVI elevados no período chuvoso e menores no período seco. Isso evidencia a diminuição da vegetação densa nos primeiros meses do ano e o aumento das áreas desprovidas de vegetação devido à falta de chuva.

Figura 15. Barragem Muquém

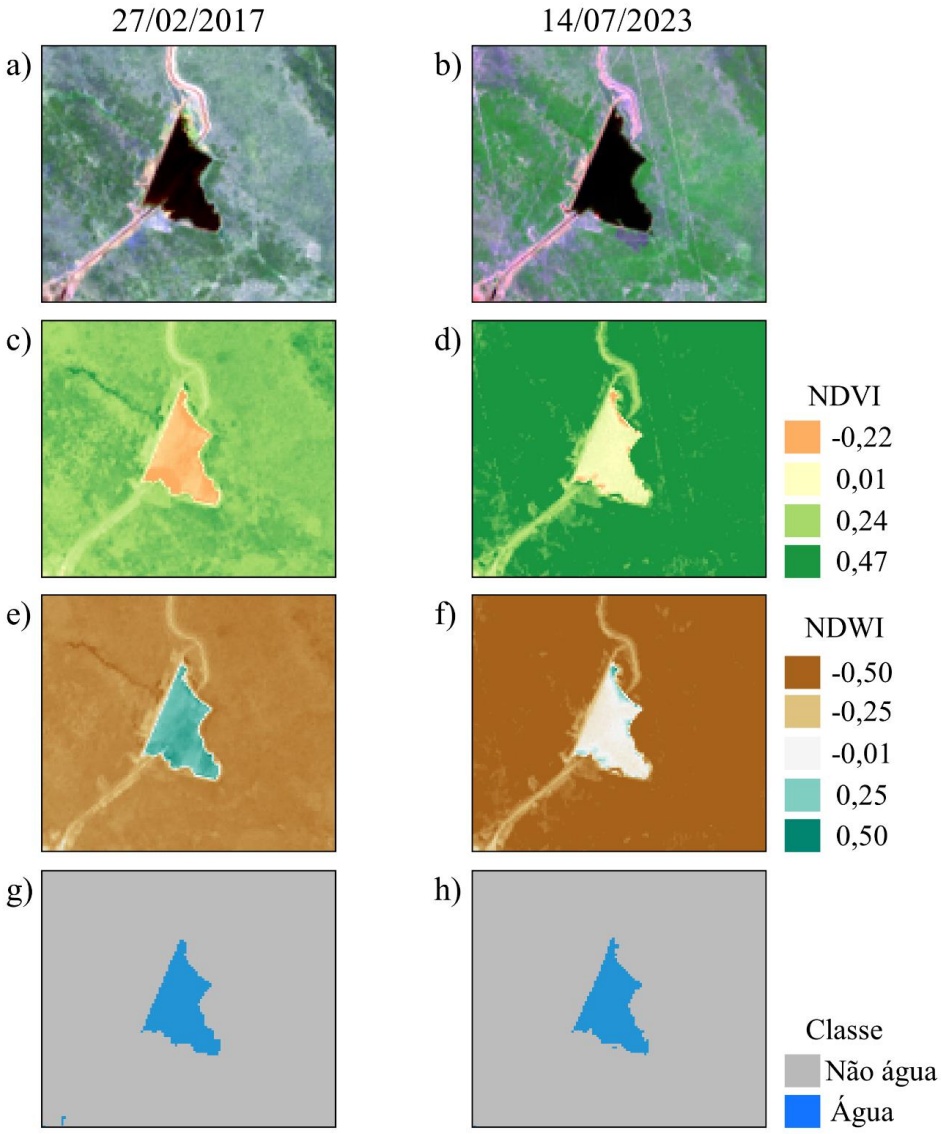


Fonte: autor (2023)

Os indicadores apresentados relativos à Barragem Salgueiro revelaram uma estabilidade considerável nos valores dos pixels, refletindo uma

caracterização sólida do corpo d'água, embora com poucas flutuações na área circundante da barragem (Figura 16). As informações quantitativas associadas a média e desvio padrão são as seguintes: NDVI em 2017: Média de 0.26 com desvio padrão de 0,07; em 2023: Média de 0,5 com desvio padrão de 0,12. O NDWI em 2017: Média de -0,24 com desvio padrão de 0,15; em 2023: Média de -0,59 com desvio padrão de 0,1. De maneira geral, esses índices proporcionaram uma detecção eficaz dos alvos na Barragem, demonstrando um comportamento congruente com o tipo de alvo presente na imagem. A Barragem Salgueiro também mostrou uma estabilidade na área do corpo hídrico, onde no período seco foi obtido um valor de 0,756 Km² e no período chuvoso foi de 0,8 Km².

Figura 16. Barragem Salgueiro



Fonte: autor (2023)

Esses resultados corroboram com os encontrados em Carvalho (2023), que utilizou o NDVI e NDWI para extração de informações espaciais usando imagens Landsat-8 no Reservatório do Jazigo, inserido na Bacia do Pajeú, no Semiárido pernambucano. O autor verificou que, apesar do bom rendimento dos índices, o NDVI mostrou menor precisão na detecção de áreas de pastagem em relação ao NDWI, que em alguns pixels apresentou valores relacionados a falsos positivos. Maganhotto (2016) examinou o processo de identificação de corpos d'água por meio de índices espectrais na região do braço do Reservatório de Itaipu, no estado do Paraná. De acordo com o autor, pode-se afirmar que a detecção e o mapeamento de corpos d'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 pode resultar em problemas de detecção. Soares (2023) observou que os índices NDVI e NDWI obtiveram um bom desempenho na análise espaço-temporal no entorno de reservatórios da bacia hidrográfica do Rio Brígida. Por outro lado, a autora ressalta que não houve variações significativas nos valores dos índices entre 1990 e 2022.

Foi observado que, mesmo no ano chuvoso, os valores para a vegetação no índice NDVI ainda foram relativamente baixos, variando entre 0,3 e 0,5, com desvio padrão de aproximadamente 0,2. Esse comportamento pode estar relacionado ao fenótipo da vegetação do semiárido, que é naturalmente adaptada a este tipo de ambiente e, mesmo no período chuvoso, tende a apresentar valores moderados de NDVI. Além disso, a saúde dessa vegetação é fortemente influenciada pelo regime de precipitação, ou seja, qualquer variação no regime de chuvas pode alterar consideravelmente o vigor da vegetação, modificando bruscamente os valores dos índices de vegetação. Gomes (2019) analisou a correlação entre a dinâmica da vegetação, medida pelo NDVI, e a precipitação na região do Alto Curso do Rio Paraíba, observando correlações acima de 0,7 tanto no período seco quanto no chuvoso. Santos (2023), por sua vez, observou que as precipitações afetaram as mudanças na vegetação no bioma Caatinga, e a relação entre NDVI e precipitação foi alta, especialmente porque a vegetação mostrou maior sensibilidade nos meses de menor

precipitação. O Quadro 6 mostra ás áreas dos corpos hídricos das barragem antes e depois da implementação do eixo PISF.

A maioria das barragens apresentou um aumento na área dos corpos hídricos após a implementação da obra de transposição do Rio São Francisco, com destaque para a Barragem Mandantes, que teve o maior incremento absoluto, e para a Barragem Cacimba Nova, que apresentou o maior crescimento percentual. Apenas a Barragem Bagres teve uma pequena redução na área após o enchimento. Esses resultados sugerem uma expansão significativa da capacidade hídrica nas barragens envolvidas no projeto.

Quadro 6. Área do corpo hídrico das barragens antes e após a implementação do eixo PISF.

Barragens	Área (Km²) antes do enchimento (2017)	Área (Km²) após o enchimento (2023)
Barragem Areias	1,32	1,53
Barragem Bagres	0,61	0,56
Barragem Barreiros	0,46	0,51
Barragem Braunas	1,21	1,23
Barragem Cacimba nova	0,204	0,492
Barragem Campos	0,693	0,768
Barragem Copoti	0,92	1,12
Barragem Mandantes	16,35	21,48
Barragem Moxotó	0,32	0,35

Fonte: Autor (2024)

O NDWI foi o principal índice utilizado para a extração do corpo hídrico dos reservatórios, fornecendo informações essenciais para a gestão e regulação dos recursos hídricos na região. Apesar do bom desempenho do NDWI, seu uso deve ser feito com cautela. Neste estudo, constatou-se que o NDWI não apresentou variações significativas entre as diferentes classes de cobertura da terra no entorno dos reservatórios, indicando que seu uso é mais relevante para análises de massas d'água de diferentes tamanhos. Além disso, o índice mostrou-se sensível a variações nas bordas dos corpos hídricos. Soares (2023) demonstrou que o NDWI foi importante para a análise da dinâmica dos corpos hídricos em reservatórios de Pernambuco ao longo de uma longa série temporal.

Utilizando imagens Sentinel-2, Cardoso et al. (2024) apresentaram resultados satisfatórios para a identificação e delimitação de corpos d'água nos reservatórios da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira, na Bahia. No entanto, os resultados obtidos sugerem que a alta resolução espacial não substitui a aplicação de um índice mais eficiente, uma vez que o NDWI identificou sistematicamente uma menor proporção de áreas alagadas quando comparado a outros índices.

Lima (2021), aplicando o NDVI no bioma Caatinga para estimar o estoque de carbono e a biomassa acima do solo, observou que na estação chuvosa ocorre um pico de reflectância na região do infravermelho devido à interação com a clorofila. No entanto, na estação seca, esse pico não ocorre, pois, as árvores perdem suas folhas. Em termos de quantificação e caracterização quantitativa das características da cobertura vegetal, o NDVI é um indicador inteiramente relacionado ao crescimento da vegetação e à distribuição espacial. Devido ao seu cálculo simples, fácil acesso aos parâmetros de cálculo e ampla faixa de monitoramento, é possível quantificar o crescimento das plantas com biomassa, a cobertura vegetal e o índice de área foliar (Capoane et al. 2021).

No geral, é possível observar que a combinação do NDVI e do NDWI para análises espaciais no entorno de infraestruturas de recursos hídricos no semiárido é um parâmetro importante que pode apoiar fortemente os gestores na tomada de decisões em diversas frentes, como a análise socioambiental e territorial antes e após a construção de empreendimentos. A observação temporal dupla por imagens de satélite do sistema PISF permitiu verificar que o empreendimento causou mudanças espaciais em seu entorno, somadas à influência do regime de chuvas, como, por exemplo, o aumento do vigor vegetativo, apesar da maior ação antrópica, evidenciada pelo aparecimento de áreas de pastagem e agricultura.

5 CONCLUSÃO

A pesquisa buscou, através de uma análise temporal dos anos de 2017, 2018, e em 2023, dos 11 reservatórios do eixo leste do Projeto de Integração do Rio São Francisco, evidenciar as mudanças antrópicas para assim propor diretrizes contributivas aos principais órgãos envolvidos no Projeto. Os

mapeamentos foram possíveis utilizando técnicas de sensioramento remoto orbital, considerando que os reservatórios possuem uma extensa área territorial. A posição geográfica, dos reservatórios em questão, preconiza ainda mais a importância do uso de sensoriamento remoto nos modelos de monitoramento e gestão dos ambientes naturais e antrópicos, levando em consideração a possibilidade de ocorrer mudanças nas formações vegetais em uma área definida pela complexidade das diferenciações de tipos florestais.

Os índices NDVI e o NDWI demonstraram bom desempenho na detecção dos alvos presentes nas barragens e em seu entorno, especialmente na análise da dinâmica da vegetação e dos recursos hídricos, considerando a resposta espectral nas diferentes estações climáticas. Além disso, o NDWI possibilitou a extração quantitativa do corpo hídrico superficial das barragens com precisão de 30 m, permitindo o monitoramento espaço-temporal, essencial para a gestão de recursos hídricos.No contexto desta pesquisa, o uso dos índices NDVI e NDWI evidenciou mudanças nos índices de paisagem e vegetação com base em valores médios, os quais podem ser utilizados pelas partes interessadas na formulação de políticas e no estabelecimento de programas destinados a mitigar riscos de desastres decorrentes de alterações na superfície terrestre, com fins de análise e monitoramento dos sistemas ambientais envolvidos.

Essas estimativas mostraram-se relevantes ao revelar um padrão de dinâmica espacial nos períodos anterior e posterior ao PISF, evidenciando que a obra impactou diretamente a paisagem no entorno das barragens, ocasionados principalmente pela influência da precipitação, mudanças do uso e ocupação do solo e o aumento dos cultivos agrícolas. No entanto, é importante destacar que o comportamento espectral da vegetação e, principalmente, do corpo hídrico das barragens pode ter sido influenciado por vários fatores, como o ângulo solar no momento do imageamento da cena Landsat e elementos em suspensão na água, que afetam os valores dos pixels dos índices espectrais.

Outra limitação encontrada na extração dos corpos hídricos é que o limiar adotado pode ter sofrido problemas de mistura espectral nas bordas e em pixels isolados ao redor das barragens, causados por elementos escuros nas imagens, como topografia, sombra de nuvens ou pequenos lagos. Assim, o método de análise espaço-temporal pode ser utilizado para monitorar ou controlar as

condições ambientais, permitindo que programas apropriados sejam recomendados como medidas preventivas e estratégicas para mitigar o risco de desastres. Os resultados obtidos por meio do sensoriamento remoto podem ajudar a analisar e estudar as mudanças futuras, além de encontrar soluções para superar problemas potenciais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, Wellington Wagner Nunes; CALDEIRA, Carlos Rodrigo Tanajura; CALDEIRA, Mayara Cobacho Ortega; GRAÇA, Alan José Salomão; VICTORINO. Extração vetorial automática de corpos hídricos a partir de imagens orbitais, utilizando a linguagem python sobre o rio paranapanema. **Brazilian Journal of Development**, [S.L.], v. 6, n. 5, p. 24418-24439, 2020. Brazilian Journal of Development. http://dx.doi.org/10.34117/bjdv6n5-045.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA. **Sistema de Acompanhamento de Reservatórios**, SAR. ANA, 2020. Disponível em: https://www.ana.gov.br/sarportal/nordeste-modulo4.html?codigo=12243. Acesso em: 28 out. de 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA. **Plano Nacional de Segurança Hídrica**. Brasília, ANA. 2019. 112 p. Disponível em: <https://arquivos.ana.gov.br/pnsh/pnsh.pdf>. Acesso em: 30 de maio 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA. **Sobre a ANA**. 2019. Disponível em http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/acesso-a-informacao/institucional/sobre-a-ana. Acesso em novembro de 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA. **Manual de procedimentos técnicos e administrativos de outorga de direito de uso de recursos hídricos**. 2013.Disponivel em: https://bibliotecadigital.economia.gov.br/bitstream/123456789/433/1/Manual%20Outorga%20ANA%202013.pdf. Acesso em julho de 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA. **RESOLUÇÃO No 1.941, DE 30 DE OUTUBRO DE 2017**. (2017). Disponível em: Arquivos.ana.gov.br. https://arquivos.ana.gov.br/_viewpdf/web/?file=/resolucoes/2017/1941-2017.pdf. Acessado em: 29/06/2024

AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA - APAC**. Monitoramento Hidrológico.** APAC, 2020. Disponível em: http://www.apac.pe.gov.br/monitoramento/. Acesso em: out. de 2023.

ALMOUCTAR, Mohamed Adou Sidi; WU, Yiping; KUMAR, Amit; ZHAO, Fubo; MAMBU, Koroma John; SADEK, Mohammed. **Spatiotemporal analysis of vegetation cover changes around surface water based on NDVI: a case study in korama basin, southern zinder, nig**er. Applied Water Science, [S.L.], v. 11, n. 1, p. 68, 7 dez. 2020. Springer Science and Business Media LLC.

ALVES, Jamille Evangelista; GONÇALVES, Thiago dos Santos; NASCIMENTO, Sérgio Augusto de Morais. **Precipitação na Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira, Nordeste do Brasil: tendências e variabilidade (1970-2020). Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi - Ciências Naturais**, [S.L.], v. 17,

n. 2, p. 527-542, 16 set. 2022. Boletim do Museu Paraense Emilio Goeldi. http://dx.doi.org/10.46357/bcnaturais.v17i2.841.

ALBUQUERQUE, A. M., SILVA, S. B., SALES, M. C. L. Aplicação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para Análise da Degradação Ambiental da Área de Influência Direta do Açude Castanhão. **Revista da Casa da Geografia de Sobral (RCGS).** 2019.

ALMEIDA, Debora Natália Oliveira de; ARAðJO, Diêgo Cezar dos Santos; SOARES, Débora Rodrigues; MAIA, Francisco Marcelo de Alencar; MONTENEGRO, Suzana Maria Gico Lima; SANTOS, Sylvana Melo dos; OLIVEIRA, Leidjane Maria Maciel de. **Delimitation of water areas using remote sensing in Brazil's semiarid region**. Revista Brasileira de Ciências Ambientais, [S.L.], v. 58, n. 1, p. 20-29, 2023. Zeppelini Editorial e Comunicacao. http://dx.doi.org/10.5327/z2176-94781524.

ALVES, T. L. B. **Avaliação do nível de degradação das terras (desertificação) no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba**. 143f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais). Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2016.

ANJOS, D. M.; SOARES, D. M. A.; SIMÕES, E. M.; LEITE, A. C. C. P.; RAMOS, T. M.; BAKKE, I. A. Temporal analysis of water volume at Capoeira Reservoir Mãe d'Água, Paraíba, Brazil. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 12, n. 1, p. 138-142, 2017.

AZEVÊDO, A.C de et al. **Avaliação de políticas públicas para o desenvolvimento regional/local: o caso do programa água doce no semiárido paraibano.** Dissertação do Mestrado em Desenvolvimento Regional – MDR. Universidade Estadual da Paraíba. 2012.

BARBOSA, R. B. G.; RIBEIRO, G. N.; FRANCISCO, P. R. M.; ARRUDA, D. A.; ALMEIDA, R. S.; LEITE, N. M. G. Geotecnologias aplicadas ao estudo da cobertura vegetal em bacia hidrográfica: uso do software "R". **Revista Geama**, v.7, n.1, p.34-43, 2021.

BAKKER, K., **Water security: research challenges and opportunities: Science**, n.337, v.6097, p. 914-915. 2012.

BIZAWU, K.; MOREIRA, R.L. Licenciamento ambiental e a política nacional de segurança de barragem Lei 12.334/2010. **Revista Jurídica**, v. 3, n. 48, p. 271-298, 2017.

BORELLI, Julia Hubner et al. COMPARAÇÃO ENTRE AS FARINHAS BRASILEIRAS E ARGENTINAS: ANÁLISE DE UMIDADE, QUEDA E ALVEOGRAFIA. **agrOCiências**, p. 6, 2023.

BRASIL. Lei nº 9.433, de janeiro de 1997. **Institui a política nacional de recursos hídricos, cria o sistema nacional de gerenciamento de recursos hídricos**. Disponível em: www.planalto.gov.br. Acesso em: 30 novembro 2023.

BRASIL. Resolução ANA n° 236, de 30 de janeiro de 2017. Brasília, DF: 2017.
BRASIL. **Decreto n° 5.995/2006 que institui o Sistema de Gestão do Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional – SGIB.** 2006.

CAPOANE, Viviane. Mapeamento dos pequenos reservatórios e análise dos impactos ambientais associados na Bacia Hidrográfica Do Córrego Guariroba, Campo Grande - Ms. **Geo Uerj**, [S.L.], n. 39, p. 100, 27 dez. 2021. Universidade de Estado do Rio de Janeiro. http://dx.doi.org/10.12957/geouerj.2021.51688.

CARDOSO, S. B.; CUNHA, C. F. da; ENGELBRECHT, B. Z.; CHANG, H. K. Detecção e delimitação de pequenos reservatórios na Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira, Bahia, utilizando imagens multiespectrais. **Holos Environment**, [S. l.], v. 20, n. 4, p. 458–475, 2020. DOI: 10.14295/holos.v20i4.12391. Disponível em: https://cea-unesp.org.br/holos/article/view/12391.

CARVALHO, José Renato Bezerra de. **Dinâmica espaço-temporal do reservatório Jazigo e vegetação no entorno através do NDVI e NDWI – Serra Talhada / PE**. 2023. 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.

COSTA FILHO, J. F. DA; FRANCISCO, P. R. M.; ANDRADE, M. V. DE; SILVA L. DA; DANTAS, R. L. Estimativa do índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) na microrregião de Sousa-PB utilizando imagens do CBERS-2. In: **Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 15, Aracaju-SE. Anais.** Aracaju, 2007.

COSTA, C.A. **Governança federativa em políticas de infraestrutura de segurança hídrica nas bacias receptoras do projeto de integração do São Francisco: uma abordagem pelo lado da oferta**. Escola Nacional de Administração Pública (Enap), Brasília, 2019. Disponível em: <https://repositorio.enap.gov.br/handle/1/4001>. Acesso em: 20 de dezembro 2023.

COSTA, C.A. **Governança federativa em políticas de infraestrutura de segurança hídrica nas bacias receptoras do projeto de integração do São Francisco: uma abordagem pelo lado da oferta.** Monografia-TCC. Escola Nacional de Administração Pública (Enap). p. 1-26. 2019.

DE BRITO, H.C et al. Uso de sensoriamento remoto para monitoramento de parâmetros de qualidade de água no rio doce, Minas Gerais, Brasil. 2022.

DE LIMA, M.I.L.S.; GRANZIERA, M.L.M. Direito humano à água e a perspectiva econômica para a sustentabilidade hídrica. **Revista do CNMP**, n. 7, p. 13-36, 2018.

DI PACE, F. T. et al. Mapeamento do saldo de radiação com imagens Landsat 5 e modelo de elevação digital. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, p. 385-392, 2008.

DUTRA, Débora Joana; ELMIRO, Marcos Antônio Timbó. Avaliação de índices espectrais obtidos com imagens Sentinel-2 e Landsat 8 Antes e após rompimento da Barragem da Mina Do Feijão, Brumadinho – MG. **Geosciences = Geociências,** [S.L.], v. 39, n. 2, p. 517-523, 17 jul. 2020. UNESP - Universidade Estadual Paulista. http://dx.doi.org/10.5016/geociencias.v39i2.14394.

ELVIDGE, C. D.; LYON, R. J. P. Influence of rock-soil spectral variation on the assessment of green biomass. **Remote Sensing of Environment**, n.17, p.265-279, 1985.

FARIAS, M.O., et al. Variabilidade espaço-temporal da cobertura do solo por índices de vegetação e água no Agreste Pernambucano. **Revista Agrotecnologia.** v. 7, p. 91-99. 2017.

FELIPPE, M.F.; GOMES, C.S; JÚNIOR, A.P.M. Nascentes e Áreas Úmidas. **Recursos hídricos: as águas na interface sociedade-natureza**, 2023.

FERNANDES, M.F.; QUEIROZ, L.P de. Vegetação e flora da Caatinga. **Ciência e cultura**, v. 70, n. 4, p. 51-56, 2018.

FERREIRA, É.A et al. **Aplicação de conceitos da teoria de jogos para análise de conflitos em recursos hídricos no Eixo Leste do Projeto de Integração do Rio São Francisco**. Trabalho de Conclusão de Curso para Engenharia Civil. Universidade Federal de Campina Grande Centro
de Tecnologia e recursos naturais. Campina Grande/PB. 2018.

FIGUEIREDO, A.T.T de et al. **Segurança alimentar e nutricional e a convivência com o semiárido na percepção de moradores do Sertão de Pernambuco**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. 2020.

FIGUEIREDO, L.M.M. **O papel do Plano Nacional de Segurança Hídrica: a universalização do acesso a água no país, principalmente no Nordeste e Ceará**. São Paulo, 2020.

FOURY, A. P. **As matas do nordeste brasileiro e sua importância econômica. Boletim de Geografia.** 31:14-131. 1972.

FRANCISCO, P. R. M. **Classificação e mapeamento das terras para mecanização do Estado da Paraíba utilizando sistemas de informações geográficas.** Dissertação (Mestrado em Manejo de Solo e Água). Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal da Paraíba, Areia. 122f. 2010.

GAO, BO-CAI. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote sensing of environment**, v. 58, n. 3, p. 257-266, 1996.

GAMEIRO, S.; TEIXEIRA, C. P. B; NETO, T. A. S.; LOPES, M. F. L.; DUARTE, C. R.; SOUTO, M. V. S; ZIMBACK, C. R. L. Avaliação da cobertura vegetal por meio

de índices de vegetação (IVDN, SAVI e IAF) na sub-bacia hidrográfica do Baixo Jaguaribe, CE. **Revista Terrae**, v.13, n.13, p.15-22, 2016.

GANDHI, G. Meera; PARTHIBAN, S.; THUMMALU, Nagaraj; CHRISTY, A.. Ndvi: vegetation change detection using remote sensing and gis ⁚ a case study of vellore district. **Procedia Computer Science**, [S.L.], v. 57, p. 1199-1210, 2015. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.415.

GOMES, Fábio Vitorino. **Análise da Correlação do Índice de Vegetação (NDVI) e precipitação do alto curso do Rio Paraíba**. 2019. https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/23760. João Pessoa - PB, 2019.

HE, Yanhu; GONG, Zhenjie; ZHENG, Yanhui; ZHANG, Yuanbo. **Inland Reservoir Water Quality Inversion and Eutrophication Evaluation Using BP Neural Network and Remote Sensing Imagery: a case study of dashahe reservoir**. Water, [S.L.], v. 13, n. 20, p. 2844, 12 out. 2021. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/w13202844.

HENDERSON-SELLERS, A.; MCGUFFIE, K.; PITMAN, A. J. The project for intercomparison of land-surface parametrization schemes (PILPS): 1992 to 1995. **Climate Dynamics**, v. 12, p. 849-859, 1996.

JIANG, W., NI, Y., PANG, Z., HE, G., FU, J., LU, J., YANG, K., LONG, T., AND LEI, T.: **A NEW INDEX FOR IDENTIFYING WATER BODY FROM SENTINEL-2 SATELLITE REMOTE SENSING IMAGERY**, ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., V-3-2020, 33–38, https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-3-2020-33-2020, 2020.

KHALID, Hafiza Wajiha; KHALIL, Rao M. Zahid; QURESHI, Muhammad Ateeq. **Evaluating spectral indices for water bodies extraction in western Tibetan Plateau**. The Egyptian Journal Of Remote Sensing And Space Science, [S.L.], v. 24, n. 3, p. 619-634, dez. 2021. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.09.003.

LEONARDO, Haylla Rebeka de Albuquerque Lins; SALGUEIRO, Camila Oliveira de Britto; ALMEIDA, Débora Natália Oliveira de; SANTOS, Sylvana Melo dos; OLIVEIRA, Leidjane Maria Maciel de. **Sensoriamento Remoto Aplicado na Geoespacialização do Reservatório Poço da Cruz - PE e seu Entorno**. Revista Brasileira de Geografia Física, [S.L.], v. 14, n. 6, p. 3592-3607, 31 dez. 2021. Revista Brasileira de Geografia Fisica. http://dx.doi.org/10.26848/rbgf.v14.6.p3614-3629.

LIMA, M. M. P. **Uso de imagens Sentinel para estimativa do estoque de carbono e biomassa acima do solo no bioma Caatinga**. 107f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2021.

LIMA, Jéssica Fernanda de. **Índices espectrais, temperatura e o albedo de superfície no bioma da caatinga utilizando imagens orbitais**. 2020.

Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

LIU, Zhixin; XU, Jiayi; LIU, Mingzhe; YIN, Zhengtong; LIU, Xuan; YIN, Lirong; ZHENG, Wenfeng. Remote sensing and geostatistics in urban water-resource monitoring: a review. **Marine And Freshwater Research**, [S.L.], v. 74, n. 10, p. 747-765, 14 mar. 2023. CSIRO Publishing. http://dx.doi.org/10.1071/mf22167.

MACEDO, C. E. S. **Estimativa dos Índices de Vegetação NDVI e SAVI na Unidade de Conservação do Parque Estadual das Carnaúbas – CE com utilização de técnicas do sensoriamento remoto**. 84f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental). Centro de Tecnologia. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2019.

MARQUES, Antonia Mirelle Lopes. **Composição florística e fatores associados ao solo que determinam traços funcionais da vegetação lenhosa em duas fitofisionomias da caatinga: carrasco versus mata seca**. 2024. 60 f. Dissertação (Mestrado em Sistemática, Uso e Conservação da Biodiversidade) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.

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.

MARKHAM, B.; STOREY, J.; MORFITT, R. Landsat-8 sensor characterization and calibration. **Remote Sensing**, v. 7, n. 3, p. 2279-2282, 2015.

MASSAD, F. **Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia.** 2 ed. Oficina de Textos, São Paulo, 2010.

MCFEETERS, S.K. The use of the Normalized Diference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, 17: 1425-1432. 1996.

MORAIS, F. M. A. V. M de. **Formatação de ficha de inspeção visual de barragens de terra.** Monografia (Especialização) - Curso de Especialização em Segurança de Barragens: Aspectos Técnicos e Legais, Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 63f. 2019.

MORLIN, V.T.; EUZÉBIO, S.R.M. Direito à água: um direito humano de três dimensões. **Revista do CNMP**, n. 7, p. 59-81, 2018.

ONU. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. 2015. Disponível em: http://www.br.undp.org/content/dam/brazil/docs/agenda2030/undp-br-Agenda2030- completo-pt-br-2016.pdf. Acesso em: 20 dez. 2023.

PATIL, Pritam P.; JAGTAP, Megha P.; KHATRI, Narendra; MADAN, Hakka; VADDURI, Aditya Abhiram; PATODIA, Tarun. Exploration and advancement of NDDI leveraging NDVI and NDWI in Indian semi-arid regions: a remote sensing-

based study. **Case Studies In Chemical And Environmental Engineering**, [S.L.], v. 9, p. 100573, jun. 2024. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100573.

PINTO, T.C.A. **Variabilidade espaço-temporal do reservatório Jucazinho - PE e seu entorno utilizando dados orbitais.** TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. 2020.

QGIS Development Team. **QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project.** Disponível em http://www.qgis.org/. 2014. Acesso em: 20 de dezembro 2023.

RIVA, G.R.S. **Água, um direito humano**. Paulinas – São Paulo : Paulinas, (Coleção cidadania) 2016.

RABELO, Samuel Trajano. **Flora e estrutura fitossociológica de fitofisionomias costeiras da APA do Rio Pacoti, Ceará**: relações 127 f. Dissertação(Mestrado em Ciências Marinhas Tropicais) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais, Instituto de Ciências do Mar - LABOMAR, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

RAMOS, Gabriela Gomes; ALVES, João Batista; ARAðJO, Maria de Fátima de; FERREIRA, Vinícius Staynne Gomes; PINTO, Marília Gabriela Caldas; LEITE, Maria José de Holanda; VASCONCELOS, Alexandro Dias Martins; RIBEIRO, Isabella Rocha. **Levantamento Dos Impactos Ambientais De Um Trecho De Mata Ciliar Em Região De Caatinga No Sertão Paraíbano**. Brazilian Journal Of Development, [S.L.], v. 6, n. 7, p. 52848-52859, 2020. Brazilian Journal of Development. http://dx.doi.org/10.34117/bjdv6n7-798.

RODRIGUES M. T et al. DETECÇÃO DE VEGETAÇÃO EM ÁREA DE MINERAÇÃO POR MEIO DE ÍNDICES ESPECTRAIS. **In: Anais Do XX Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto**, 2023, Florianópolis. Anais eletrônicos... São José dos Campos, INPE, 2023. Disponível em: <https://proceedings.science/sbsr-2023/trabalhos/deteccao-de-vegetacao-em-area-de-mineracao-por-meio-de-indices-espectrais?lang=pt-br>

SANTOS. S, R.; DO AMARAL FIGUEIREDO, M.; DE ALVARENGA MARTINS, J. V. VARIAÇÕES TEMPORAIS NA VEGETAÇÃO BASEADO NA CORRELAÇÃO DE NDVI E DE PLUVIOMETRIA EM UMA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA TROPICAL EM MINAS GERAIS. **Revista Territorium Terram**, [S. l.], v. 6, n. 8, 2023. Disponível em: http://periodicos.ufsj.edu.br/territorium_terram/article/view/5252.

SILVA, D. R. R da. **A inspetoria de obras contra as secas: uma instituição como produtora do espaço?** Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 139f. 2018.

SILVA, Djane Fonseca da; LIMA, Maria José da Silva; SOUZA NETO, Pedro Fernandes de; GOMES, Heliofábio Barros; SILVA, Fabrício Daniel dos Santos; ALMEIDA, Henrique Ravi Rocha de Carvalho; COSTA, Rafaela Lisboa;

PEREIRA, Marcos Paulo Santos. **Caracterização de eventos extremos e de suas causas climáticas com base no Índice Padronizado de Precipitação Para o Leste do Nordeste**. Revista Brasileira de Geografia Física, [S.L.], v. 13, n. 2, p. 449-464, 7 abr. 2020. Revista Brasileira de Geografia Fisica. http://dx.doi.org/10.26848/rbgf.v13.2.p449-464.

SILVA, Jhon Lennon Bezerra da; MOURA, Geber Barbosa de Albuquerque; SILVA, Marcos Vinícios da; GUEDES, Roni Valter de Souza; LOPES, Pabrício Marcos Oliveira; SILVA, Ênio Farias de França e; VASCONCELOS, Rochele Sheila; FRANCILINO, Anna Hozana. **Inferência Exploratória de Dados Espaço-Temporal da Precipitação Pluviométrica no Nordeste Brasileiro**. Revista Brasileira de Geografia Física, [S.L.], v. 13, n. 5, p. 2019-2036, 29 jul. 2020. Revista Brasileira de Geografia Fisica. http://dx.doi.org/10.26848/rbgf.v13.5.p2019-2036.

SILVA, J.G., OLIVEIRA, L.M.M., NASCIMENTO, E.F. **Análise temporal da cobertura do solo por índices de vegetação no município de Belo Jardim – PE. Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Natal, RN, 2164 – 2167. 2019.

SOARES, Débora Rodrigues. **Dinâmica espaço-temporal de coberturas hídrica e vegetal por sensoriamento remoto na bacia do rio Brígida**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.

SOUSA, Ademar Almeida de; LIRA, Marcos Antônio Tavares; OLIVEIRA, Ulisses Costa de; MENDES JÚNIOR, Carlos Alberto. **Análise Multitemporal do Espelho d'água do Açude Jaburu I por Meio de Ferramentas de Sensoriamento Remoto nos Anos de 2013 a 2020**. Revista Brasileira de Meteorologia, [S.L.], v. 37, n. 2, p. 233-241, jun. 2022. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863720026.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. **Limnologia**. São Paulo: Oficina de Textos. 631 p. Soils and Sediments, v. 2, n. 4, p. 216-222, 2008.

VASCONCELOS, D.P; et al. **Governançada água no brasil: uma contribuição bibliométrica**. HOLOS, v. 8, p. 147-155, 2016. DOI: 10.15628/holos.2016.4814. Disponível em:
<https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/4814/pdf>.
Acesso em: 26 de setembro de 2023.

XUE, J., SU, B. Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. **Journal of Sensors [online]**. 2017. Disponível: https://doi.org/10.1155/2017/1353691. Acesso: 19 de julho de 2023.

ZHAO, XUAN; LIU, JIANJUN; BU, YUANKUN. Quantitative analysis of spatial heterogeneity and driving forces of the thermal environment in urban built-up areas: A case study in Xi'an, China. **Sustainability**, v. 13, n. 4, p. 1870, 2021.