

Spectral indices of vegetation and water in the spatio-temporal characterization of the Brígida river basin - Sertão Pernambucano

Frederico Antonio Peregrino Wanderley da Costa Neto*, Débora Natália Oliveira de Almeida**, Anderson Luiz Ribeiro de Paiva***, Sylvana Melo dos Santos****, Leidjane Maria Maciel de Oliveira*****

* Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, Pernambuco, Brasil, frederico.neto@ufpe.br;

** Doutoranda do PPGEC/UFPE, Recife-PE, Brasil, debora.noalmeida@ufpe.br;

*** Departamento de Engenharia Civil e Ambiental (DECIV), Docente permanente do PPGEC, UFPE, Recife, Pernambuco, Brasil, anderson.paiva@ufpe.br;

**** DECIV, Docente permanente do PPGEC, UFPE, Recife, Pernambuco, Brasil, sylvana.santos@ufpe.br;

***** DECIV, Docente permanente do PPGEC, UFPE, Recife, Pernambuco, Brasil, leidjane.oliveira@ufpe.br.

Received 04 December; accepted 05 December

Abstract

Drought is one of the main challenges faced in the northeastern semi-arid region. As security measures against these natural phenomena, several surface water reservoirs, also known as weirs, were implemented. As a way of evaluating the effectiveness of these structures and the consequences of droughts, remote sensing is used as a tool, which allows the evaluation of space-time changes in vegetation cover and water surfaces. The present article used this tool with the aid of the QGIS software, with the objective of evaluating the variations of the Vegetation Index by Normalized Difference (NDVI) and of the Humidity Index by Normalized Difference (NDWI) for Planning Unit 13, corresponding to the Hydrographic Basin of the Brígida River. For this, images from the Landsat 8 satellite were obtained for September 22, 2014 and September 20, 2022, corresponding to the month with the lowest precipitation rates in the region. From the results found, it was identified that 4 of the 5 main evaluated weirs showed an expansion of their reservoir in the year 2022. Regarding vegetation cover, results were obtained with variations of 0.159 and -0.336 for 2014 and 0.188 and -0.334 for 2022, with a greater vegetative expansion in the north of the basin, close to Chapada do Araripe. With this, it was possible to conclude that remote sensing techniques are an effective tool for analyzing the management of water resources in a basin.

Keywords: Rainfall analysis, Orbital images, Spectral characteristics.

Índices espectrais de vegetação e água na caracterização espaço-temporal da bacia hidrográfica do rio Brígida - Sertão Pernambucano

Resumo

A seca é um dos principais desafios enfrentados no Semiárido nordestino e como medidas de segurança frente a estes fenômenos naturais foi realizada a implantação de diversos reservatórios de águas superficiais, também conhecidos como açudes. Como forma de avaliar a efetividade destas estruturas e as consequências das secas, utiliza-se como ferramenta o sensoriamento remoto, o qual permite avaliar as alterações espaço-temporais da cobertura vegetal e corpos hídricos. O presente artigo utilizou técnicas de Sensoriamento Remoto com auxílio do software QGIS de livre acesso, com o objetivo de avaliar as variações do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e do Índice de Umidade por Diferença Normalizada (NDWI) para a Unidade de Planejamento 13, correspondente a Bacia Hidrográfica do Rio Brígida. Para isso, foram obtidas imagens provenientes do satélite Landsat 8 para os dias 22 de setembro de 2014 e 20 de setembro de 2022, correspondente ao mês com menor incidência de nuvens na região. A partir dos resultados encontrados, ficou evidenciado que quatro dos cinco principais açudes geoespacializados apresentaram uma expansão de seu reservatório no ano de 2022. Em relação a cobertura vegetal, foram obtidos resultados com variações de 0,159 e -0,336 para 2014 e 0,188 e -0,334 para 2022, com um aumento de área vegetativa no norte da bacia, próximo à Chapada do Araripe. Com isso, salienta-se que a geotecnologia em Sensoriamento Remoto é uma ferramenta efetiva para tomada de decisão na gestão dos recursos hídricos em unidades de planejamento.

Palavras-chave: Análise pluviométrica, Imagens orbitais, Características espectrais.

1. Introdução

O Nordeste brasileiro vem sendo o foco de diversos estudos relacionados aos impactos causados pelas mudanças climáticas. Essa preocupação

constante com as condições atuais desta região se dá pelo fato de que a agricultura possui papel fundamental em sua economia, se destacando por ser o maior produtor nacional de banana (34,0% da produção nacional) e mandioca (34,7% da produção

nacional), além de ser a segunda região com maiores taxas de produção de arroz e frutícola (Castro, 2012).

Conforme apresentado por Medeiros et al. (2012), cerca de 57% do Nordeste está inserido no Semiárido brasileiro, se caracterizando por sua irregularidade de chuvas, com longos períodos de seca, temperaturas elevadas, alta evapotranspiração e baixa capacidade para acumulação de águas subterrâneas. Conforme estudos realizados por Castro (2012), um dos principais desafios enfrentados pelos moradores da região são as estiagens prolongadas, as quais ocasionam as grandes secas, sendo a mais recente a seca de 2001, na qual o Rio São Francisco sofreu uma diminuição significativa de seu volume, contribuindo para uma crise energética em todo o Brasil.

Como forma de minimizar os efeitos causados pela seca, foram implantadas medidas de emergência através da construção de reservatórios de águas superficiais, comumente denominados por açudes, aliado aos Conselhos Gestores de Açudes (CONSUs). De acordo com o Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco – PERH-PE (Pernambuco, 2022) existem atualmente 19 CONSUs, atuando em 23 açudes inseridos no Estado de Pernambuco. A Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), destaca que dos açudes supracitados, 10 estão presentes na UP13 Rio Brígida, são eles: Chapéu, Entremontes, Engenheiro Camacho, Lagoa do Barro, Lopes II, Camará, Cachimbo, Caiçara, Parnamirim e Algodões.

De modo a avaliar as consequências das secas e mudanças vegetativas em uma região de interesse, pesquisas desenvolvidas por Chaves (2019) evidenciaram que a aplicação de técnicas de Sensoriamento Remoto é ferramenta vantajosa, devido a sua facilidade para obtenção de imagens para estudo de índices de vegetação e análise de corpos d'água, diminuindo os custos envolvidos, aumentando a rapidez e constância da obtenção dos dados.

As técnicas de Sensoriamento Remoto, em especial os índices, desempenham um papel fundamental na extração de informações sobre a vegetação e têm contribuído amplamente à ecologia, à agricultura e à silvicultura, ao monitoramento urbano e outras comunidades (Gu et al., 2021; Leonardo et al., 2021).

A utilização de técnicas de Sensoriamento Remoto aplicadas por Alves et al. (2021) permitiram a análise do estresse hídrico da cobertura vegetal em áreas cultiváveis no Estado do Paraná. Os pesquisadores destacaram que as técnicas de SR constituem ferramentas eficientes na análise do déficit hídrico da região, concluindo que a resposta espectral se correlaciona com a produtividade e possibilita identificar a situação hídrica da cobertura analisada. Ainda, Souza (2022) destaca que através de sensores

orbitais é possível cobrir grandes extensões de áreas superficiais, com escalas temporais satisfatórias para as análises, permitindo obter resultados que antes só seriam possíveis com estudos ambientais em campo.

Conforme citado por Peruzzo et al. (2019), a utilização dos Índices de Vegetação (IVs) possibilita o monitoramento e a mensura do comportamento espacial da superfície vegetal de uma região e, conseqüentemente, as formas de uso do solo, sendo um aspecto importante para o monitoramento da vegetação a partir de técnicas de Sensoriamento Remoto.

Uma das análises possíveis desta ferramenta é a obtenção de índices espectrais, os quais, conforme Bacalhau et al. (2017), permite a detecção de alterações nos usos e cobertura do solo, taxa de vegetação e presença de corpos hídricos. É importante ressaltar ainda que o monitoramento constante das alterações destes parâmetros auxilia no desenvolvimento de diagnósticos precisos e atualizados, colaborando para o planejamento socioambiental das regiões analisadas.

Os Índices de Vegetação têm um papel significativo na detecção e rastreamento de mudanças na vegetação, seja em termos de quantidade ou qualidade (Vela et al., 2020; Leonardo et al., 2021). Um dos métodos eficientes de monitoramento das secas é a utilização do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), obtido através das bandas do infravermelho próximo e do vermelho, com variações entre -1 a 1. Valores mais próximos a 1 indicam condições vegetativas mais favoráveis e saudáveis.

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), proposto por Rouse et al. (1973), é considerado um dos principais indicadores para a análise da cobertura vegetal. Utiliza as faixas visível e infravermelha próxima do espectro eletromagnético para quantificar a densidade da vegetação em uma determinada área (Galvínio, 2019). Conforme os valores de NDVI se aproximam de 0, entende-se uma vegetação mais esparsa e menos saudável. A obtenção de valores negativos, por sua vez, indica a presença de corpos hídricos.

Além do NDVI, o monitoramento da escassez hídrica também pode ser realizado a partir da obtenção do Índice de Água por Diferença Normalizada – NDWI, proposto por McFeeters (1996) e amplamente utilizado para avaliação espaço-temporal de corpos hídricos. Sousa et al. (2022) evidenciaram que a metodologia de aplicação deste índice permite ressaltar feições de água e minimizar a visualização dos demais usos e cobertura do solo, seguindo o mesmo princípio aplicado ao NDVI, com variações entre -1 a 1. Neste caso, valores próximos a 1 indicam a existência de uma superfície de água, valores entre 0 e 0,2, representa superfícies inundadas

e/ou húmidas. Para os valores abaixo de 0 indica a ocorrência de uma superfície seca.

De acordo com o Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco (Pernambuco, 2022), desenvolvido no ano de 2022, a Bacia Hidrográfica do Rio Brígida, classificada como Unidade de Planejamento UP 13 apresentou uma das taxas de crescimento populacional mais altas de Pernambuco entre os anos de 2010 e 2019, na qual estima-se uma taxa de crescimento populacional urbano de 2% ao ano, enquanto a população rural diminuiu em cerca de 0,5% ano.

Entretanto, o PERH (Pernambuco, 2022) vincula este crescimento populacional à operação dos perímetros irrigados, os quais auxiliam na geração de emprego e renda, atraindo trabalhadores e fixando a população. Em relação aos aspectos qualitativos e quantitativos das águas, a UP 13 se caracteriza como uma das únicas do Estado de Pernambuco que apresenta registro de toxicidade, possuindo também

vários pontos com riscos de eutrofização e salinização, de modo que apenas as áreas próximas ao rio São Francisco e entorno dos reservatórios possuem segurança hídrica.

Deste modo, no sentido de contribuir para a análise temporal e espacial dos aspectos de segurança hídrica da UP 13, o presente estudo tem como objetivo modelar índices espectrais de vegetação e água para caracterização espaço-temporal da bacia hidrográfica do rio Brígida - Sertão Pernambucano nos anos 2014 e 2022 detalhando o mosaico terrestre.

2. Material e métodos

A área de estudo engloba a Unidade de Planejamento UP 13, correspondente à Bacia Hidrográfica do Rio Brígida, localizada no alto Sertão do estado de Pernambuco. A Figura 1 dispõe do mapa de localização da região de estudo.

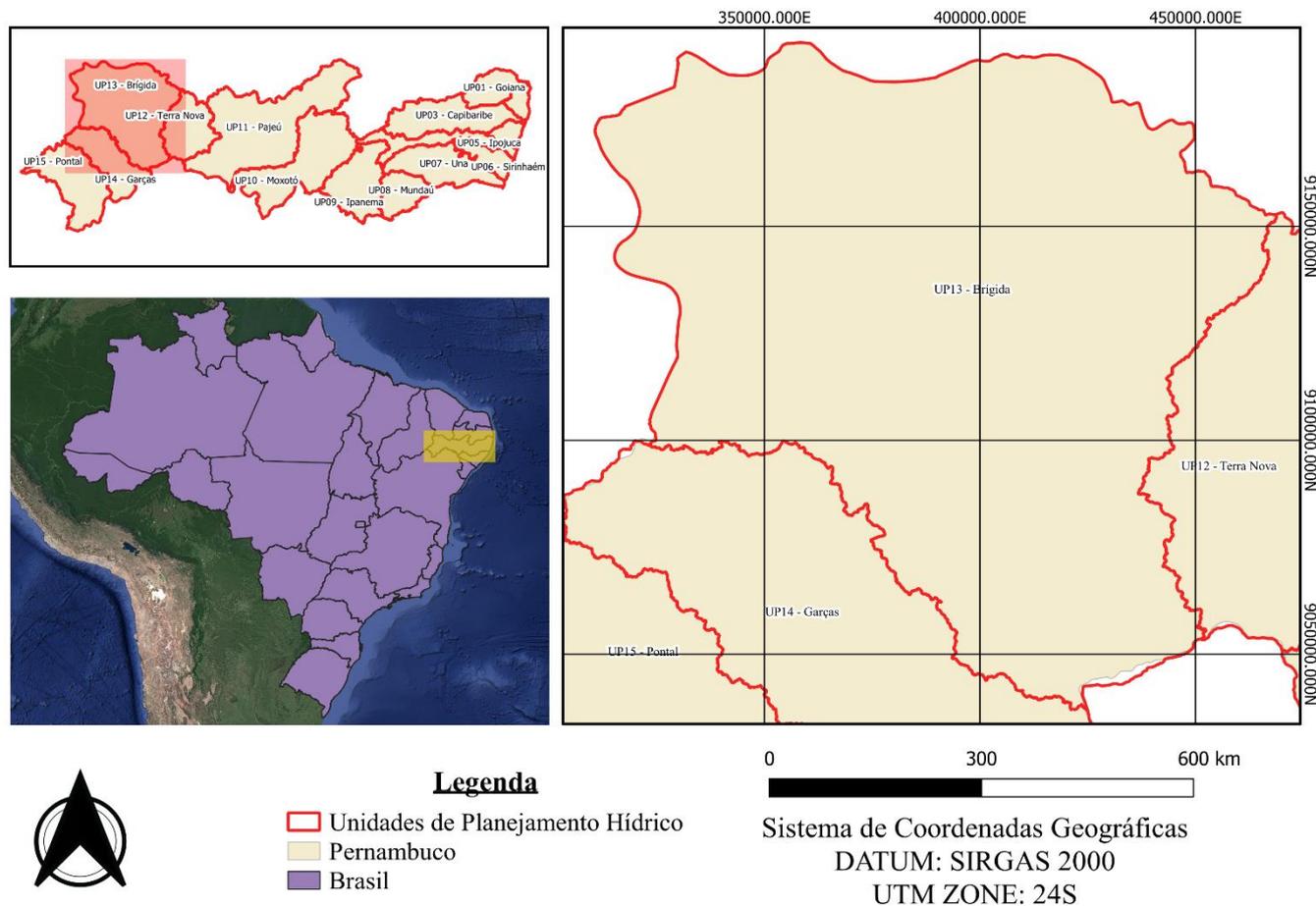


Figura 1 - Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio Brígida.

De acordo com informações disponibilizadas pela Agência Pernambucana de Águas e Clima – APAC, a bacia do Rio Brígida possui uma extensão de 13.495,73 km², correspondente a 13,73% do Estado de Pernambuco, abrangendo 15

municípios, sendo eles: Bodocó, Granito, Ipubi, Trindade, Exu, Moreilândia Araripina, Ouricuri, Parnamirim, Cabrobó, Orocó, Santa Cruz, Santa Maria da Boa Vista, Santa Filomena e Serrita (APAC, 2023).

O levantamento dos dados acerca da climatologia da região estudada se deu através das normais climatológicas do Brasil, disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2023), referente ao período entre 1991 e 2020. Conforme Santos et al. (2019), o conhecimento da variabilidade espaço-temporal da precipitação é pertinente no contexto da gestão em regiões semiáridas, seja para subsidiar a tomada de decisões em relação às tendências climáticas, como para o monitoramento de eventos extremos de precipitação em curto e médio prazo.

Estudos realizados por Pereira et al. (2020) constataram que a vegetação da Caatinga é bastante sensível às variações de precipitação, com maior parte das espécies perdendo todas as suas folhas na estação seca e recuperando-as rapidamente quando começa o período chuvoso, por isso a precipitação é um fator importante para análise do comportamento dos índices espectrais.

As Figura 2 e Figura 3 evidenciaram as normais climatológicas entre 1991 e 2020 (INMET, 2023) referente a precipitação e evapotranspiração potencial, obtidas a partir da estação climatológica de Ouricuri. As informações pluviométricas são muito importantes para análise e compreensão da distribuição espacial da cobertura vegetal com o uso

do NDVI, devido a sua relação com o vigor vegetativo da Caatinga bem como da superfície do espelho d'água de reservatórios utilizando-se do NDWI.

A partir da Figura 2, as menores taxas de precipitação foram verificadas durante o mês de setembro, na qual foi identificada uma precipitação média mensal de apenas 2,6 mm. Além disso, observou-se que o período chuvoso para a região de Ouricuri corresponde aos meses entre dezembro e abril, dos quais o mês de março se destaca por apresentar a maior taxa de precipitação média, no valor de 135,6 mm. Já entre os meses de maio a novembro, correspondente ao período seco da região, a média de precipitação mensal é inferior a 50 mm.

Os valores correspondentes a evapotranspiração potencial, conforme a Figura 3, evidenciaram uma estabilidade durante a maior parte do ano, no qual destacaram os meses de outubro a dezembro. Com isso, a maior taxa foi identificada para o mês de dezembro, com valor de 235,2 mm, enquanto a menor taxa corresponde ao mês de julho, com valor de 123,8 mm. Ressalta-se que os dados de evapotranspiração potencial do mês de janeiro não foram incluídos para os resultados da Estação Ouricuri devido a grande quantidade de falhas identificadas.

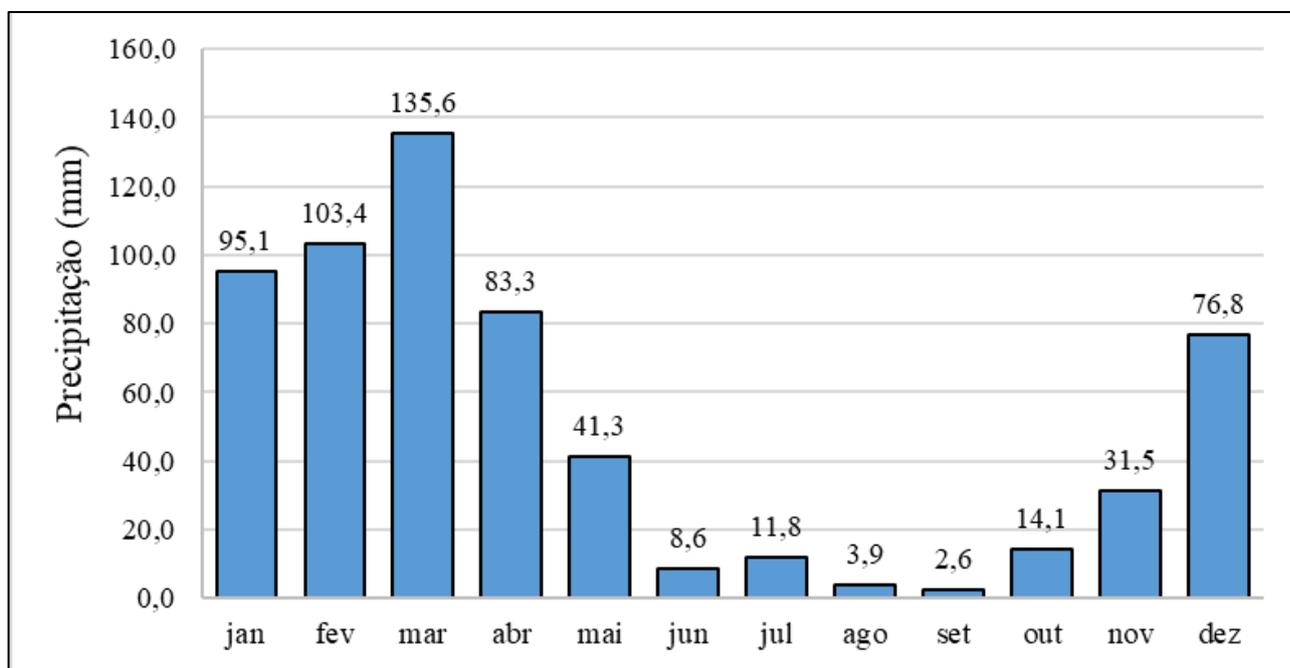


Figura 2 - Normais climatológicas entre 1991 e 2020 da precipitação mensal (mm) - Estação climatológica Ouricuri. Fonte: INMET (2023).

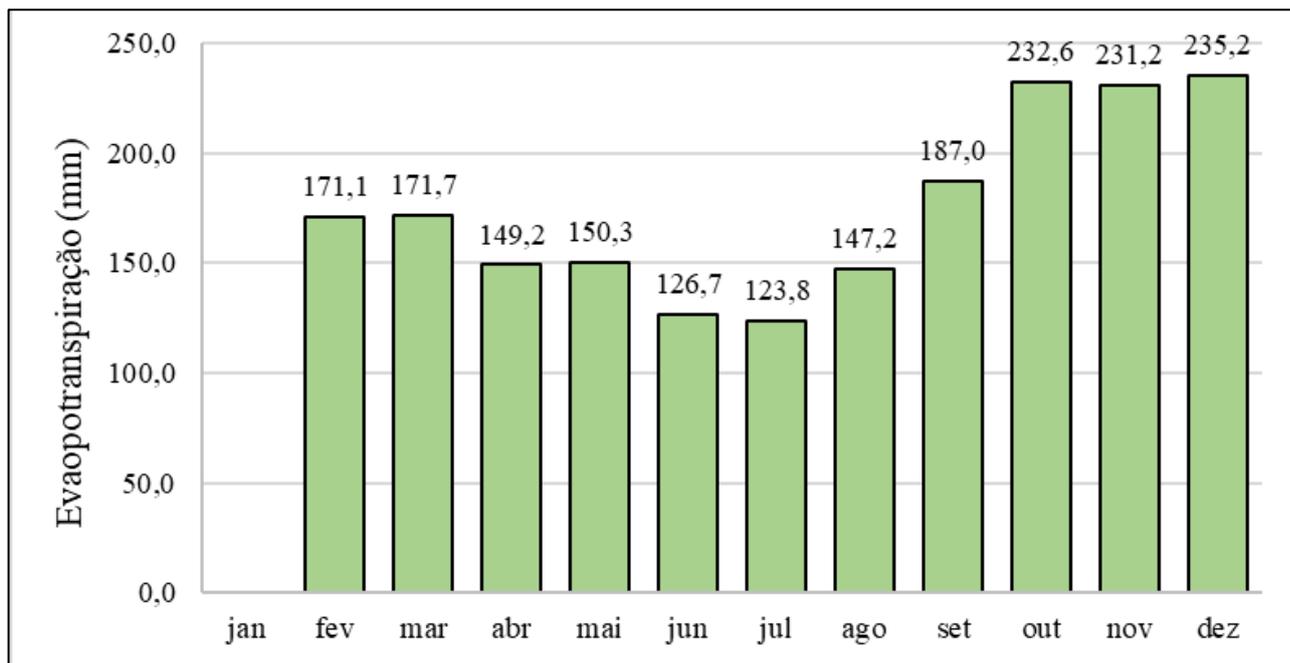


Figura 3 - Normais climatológicas entre 1991 e 2020 da evapotranspiração potencial mensal (mm) - Estação climatológica Ouricuri. Fonte: INMET (2023).

É válido destacar que para o presente trabalho, foram avaliados os resultados referentes à Bacia Hidrográfica do Rio Brígida, acrescido a uma análise detalhada dos Açudes da Lagoa do Barro, Algodões, Lopes II, Chapéu e Entremontes, uma vez que de acordo com o PERH (Pernambuco, 2022), as regiões próximas a estes açudes se destacaram por não apresentar déficit de atendimento hídrico.

Para processamento das cartas georreferenciadas de índices vegetativos NDVI, foi utilizado o software de livre acesso QGIS versão 3.16.7. As imagens utilizadas no presente estudo foram obtidas a partir do catálogo de imagens disponibilizadas de maneira gratuita pela plataforma *EarthExplorer* (EE), desenvolvida pelo *United States Geological Survey* (USGS, 2023a). Foram consideradas imagens provenientes do sistema satélite OLI/Landsat 8.

Conforme Figura 2, o mês de setembro se configura pelas menores taxas de precipitação da região, com média mensal de 2,6 mm, e, por este motivo, foi escolhido para o desenvolvimento das análises contidas no presente estudo. Dessa forma, as imagens provenientes do satélite OLI/Landsat 8, utilizadas para análise do NDVI e NDWI da UP 13, são referentes às datas de 22/09/2014 e 20/09/2022.

A partir das bandas do sensor OLI, modelou-se a reflectância monocromática pela conversão dos números digitais de cada pixel e banda para reflectância planetária através de fatores aditivos e multiplicativos, reportados no arquivo de metadados da imagem (MTL). Para isso, realizou-se a correção da reflectância pelo ângulo zenital solar (Z) e o quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol e a distância

Terra-Sol na data da obtenção da imagem (dr), conforme metodologia proposta por Silva et al. (2016), Bezerra et al. (2017) e Leonardo et al. (2019). Utilizou-se a Equação 1 para obtenção dos valores de reflectância da área de estudo.

$$\rho_{\lambda i} = \frac{A_{pi} + M_{pi} * ND_i}{\cos Z \cdot dr} \quad (1)$$

onde: $\rho_{\lambda i}$ é a reflectância planetária no topo da atmosfera de cada banda i, adimensional; A_{pi} é o fator aditivo de redimensionamento de cada banda, disponível no arquivo metadados da imagem; M_{pi} é o fator multiplicativo de redimensionamento de cada banda, disponível no arquivo metadados da imagem; ND_i é o número digital correspondente a intensidade do pixel de cada banda; Z é o ângulo zenital solar obtido com base no ângulo de elevação do Sol (E), disponível no arquivo metadados da imagem ($Z = 90 - E$).

Para obtenção dos valores referentes ao índice NDVI, calculou-se a razão entre a diferença das reflectâncias das bandas 4 e 5, correspondentes, respectivamente, às faixas do vermelho (ρ_V) e infravermelho próximo (ρ_{IVp}), conforme demonstrado através da Equação 2.

$$NDVI = \frac{\rho_{IVp} - \rho_V}{\rho_{IVp} + \rho_V} \quad (2)$$

Já para o cálculo do índice NDWI, foi calculada a razão entre a diferença das reflectâncias das bandas 3 e 5, correspondentes, respectivamente, às faixas do verde (ρ_{verde}) e infravermelho próximo (ρ_{IVp}), conforme demonstrado através da Equação 3 (McFeeters, 1996).

$$NDWI = \frac{\rho_{verde} - \rho_{IVp}}{\rho_{verde} + \rho_{IVp}} \quad (3)$$

É importante destacar que os resultados obtidos a partir do cálculo da reflectância e dos índices NDVI e NDWI, executados com auxílio do software QGIS, foram verificados e confirmados com auxílio do programa Excel, utilizando valores de pixels da imagem estudada.

Por fim, tendo em vista a correlação direta entre a área e volume dos açudes da região e visando validar os resultados encontrados através da presente metodologia, realizou-se uma comparação dos resultados encontrados com os dados baixados através do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios – SAR, disponibilizado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA (2023a).

3. Resultados e discussão

A partir das cartas georreferenciadas dos índices NDVI e NDWI, avaliou-se a dinâmica espaço-temporal da Bacia Hidrográfica do Rio Brígida, referente aos anos de 2014 e 2022. Em relação a faixa de cores apresentada, observou-se que as cores em tons de azul representaram os corpos hídricos e enquanto tons de verde escuro, por indicarem valores de NDVI mais próximos a 1, representaram a superfície com maiores taxas de cobertura vegetal. Conforme a Figura 4, observou-se a distribuição espacial das feições presentes na bacia em questão detectadas do comportamento espectral do NDVI.

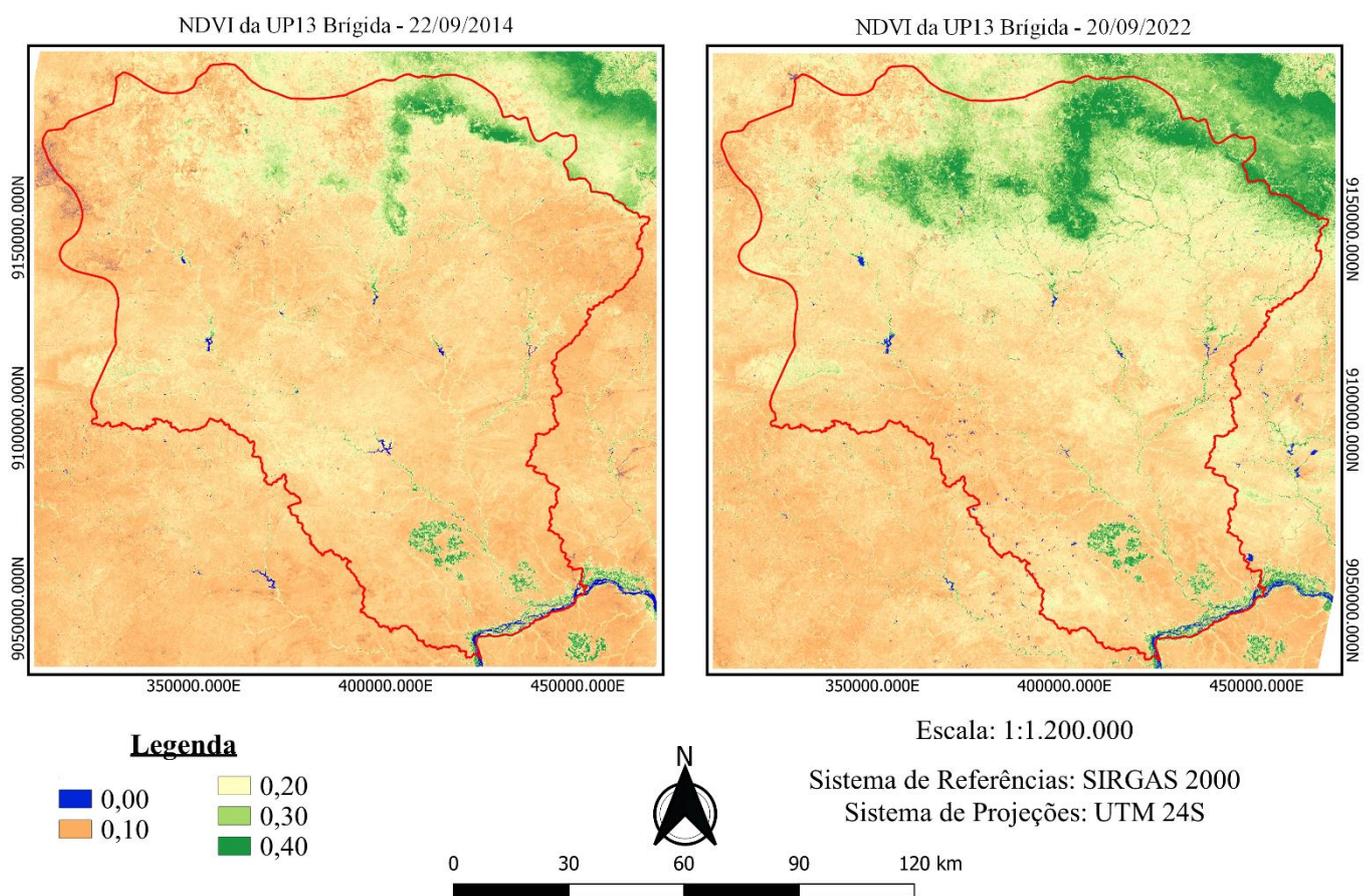


Figura 4 - Cartas georreferenciadas de NDVI da Unidade de Planejamento (UP 13) do Rio Brígida correspondente aos anos de 2014 e 2022.

Conforme os resultados apresentados, identificou-se um acréscimo nos valores de NDVI em relação aos anos estudados. As cartas georreferenciadas na Figura 4 demonstraram também uma expansão substancial na superfície vegetal na região norte da Bacia do Rio Brígida, onde foram identificados valores de NDVI que variaram de 0,30 e 0,40. Essa expansão dos valores de NDVI identificada na região norte da bacia está vinculada ao crescimento

vegetativo que compreende a área do Complexo do Araripe, abrangendo os municípios de Exú, Moreilândia, Serrita e Bodocó explicitando a revitalização da mata da Chapada do Araripe.

Corroborando com os resultados encontrados por Almeida et al. (2017), no qual já havia sido detectada esta revitalização ao analisar os anos de 2008 e 2011. Comportamento semelhante foi evidenciada na pesquisa de Damasceno et al. (2020),

quando investigaram o comportamento do NDVI no município de Arcoverde-PE, e foram obtidos valores de NDVI entre 0,40 e 0,80, demonstrando um aumento do porte da vegetação arbórea-arbustiva na região do estudo.

Salientou-se que as regiões onde foram possíveis identificar faixas de NDVI superiores a 0,30 se concentraram nas proximidades dos açudes e corpos hídricos, locais onde é possível o desenvolvimento da prática de agricultura irrigada, auxiliando na manutenção da cobertura vegetal.

Na Tabela 1 tem-se os valores estatísticos de NDVI máximo e mínimo, média e desvio padrões referente ao período estudado. Com menor valor médio (0,159) para o ano 2014 e o maior valor médio

(0,188), observou-se que houve crescimento na média do NDVI.

Tabela 1 - Dados estatísticos do índice NDVI para a bacia Brígida nos anos de 2014 e 2022.

Ano	Média	Máximo	Mínimo	Desvio padrão
2014	0,159	0,625	-0,336	0,053
2022	0,188	0,643	-0,334	0,074

Os valores negativos de NDVI ($< 0,0$) que compõe a geolocalização dos principais açudes da pertencentes a bacia hidrográfica em estudo, coincide com os maiores valores de NDWI, que a partir do intervalo de classe corresponde valores de NDWI igual ou maior que 0,20, como pode ser observado na Figura 5.

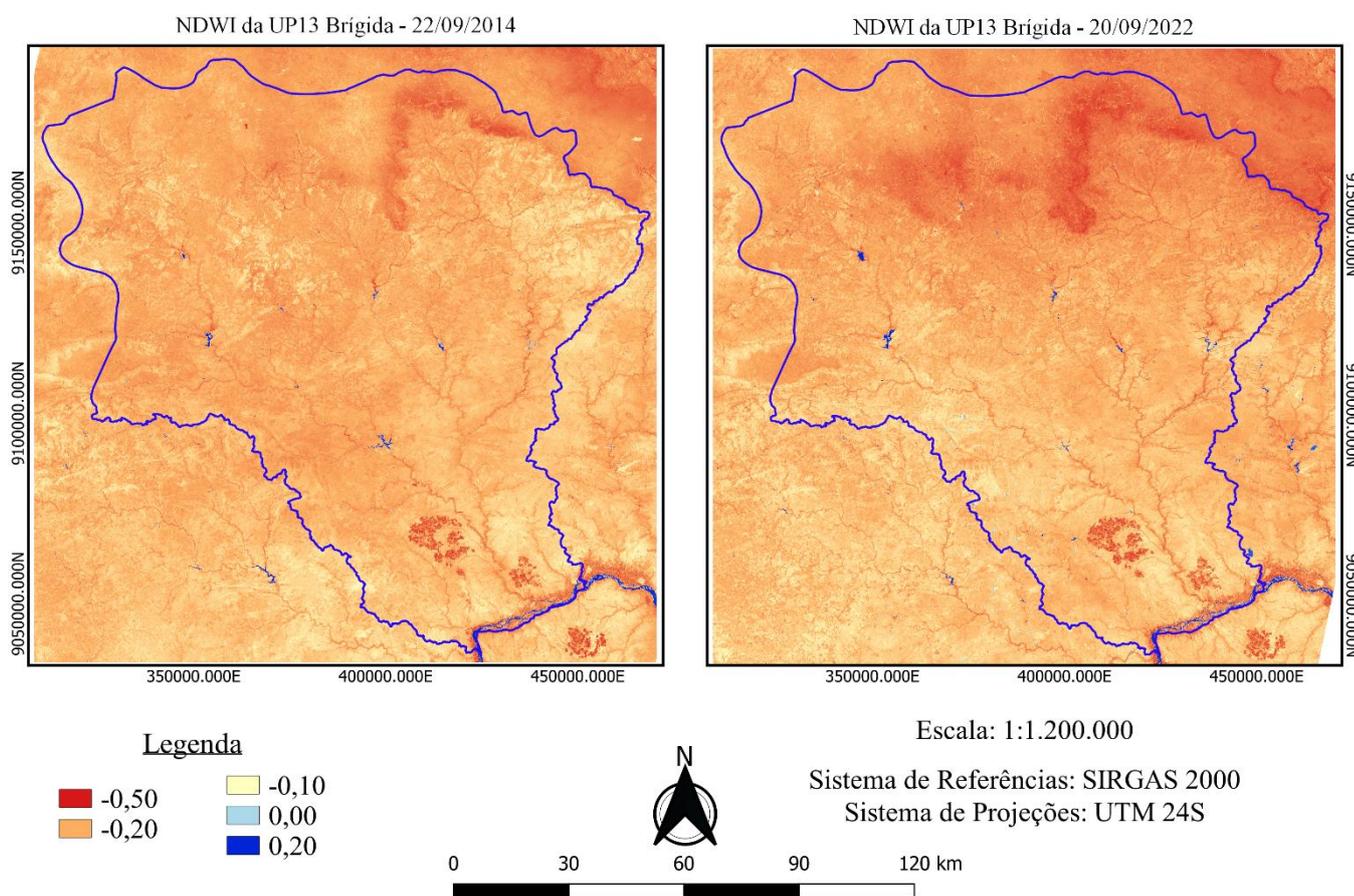


Figura 5 - Cartas georreferenciadas de NDWI da UP 13 Brígida correspondente aos anos de 2014 e 2022.

Como destaque de escala pixel a pixel, observou-se que os índices NDVI e NDWI são inversamente proporcionais, evidenciando que estes resultados condizem com a eficiência dos índices, pois foram destacados os reservatórios Chapéu, Algodões, Lagoa do Barro, Lopes II e Entremontes. A partir da análise da Figura 5, notou-se a predominância de valores negativos de NDWI, evidenciado pelas tonalidades amarelo a vermelho, demonstrando o

baixo teor de umidade da região. Vale ressaltar que esses valores denotam o resultado provenientes das imagens de satélite selecionadas para este estudo, onde foram referentes ao mês de setembro, o qual, conforme discutido e apresentado na Figura 2, corresponde ao mês mais seco da região.

Valores positivos de NDWI, correspondendo a presença de superfície com corpos hídricos, onde foram identificadas regiões de açudes e no trecho do

Rio São Francisco, ao sul da bacia. Estes resultados podem ser relacionados com a carta georreferenciada de NDVI apresentada na Figura 4 e, demonstraram que os açudes supracitados contribuíram para armazenamento, mesmo nos períodos mais secos do ano, sendo um recurso essencial e efetivo na manutenção das atividades econômicas e sociais da região.

Como forma de avaliar as mudanças temporais e espaciais referentes aos índices que detectaram cobertura vegetal e água, realizou-se o levantamento dos principais açudes presentes na região, visando avaliar o efeito temporal na área superficial de reservatórios. Com isso, tem-se da Figura 6 a Figura 10 a representação com detalhamento dos resultados da geoespacialização dos açudes do Chapéu, Algodões, Lagoa do Barro, Lopes II e Entremontes, respectivamente.

Ressaltou-se que as figuras apresentadas foram desenvolvidas em escala 1:80.000, sistema de referência geográfica SIRGAS 2000 e UTM 24S. Na Figura 6, observou-se que no Açude do Chapéu, a área

superficial de corpo hídrico e área com vegetação foi maior em 2022 que em 2014.

Tal comportamento analisado foi constatado tanto nas cartas georreferenciadas do NDVI como no NDWI. Ao se tratar de corpo hídrico, verificou-se que o NDWI permitiu melhor delimitação de bordas dos açudes da bacia hidrográfica do Rio Brígida estudados neste presente trabalho.

A partir da análise dos resultados encontrados identificou-se que os açudes do Chapéu, Lagoa do Barro, Algodões e Lopes II apresentaram uma extensão na área de seu reservatório. Pode-se observar também que a maior disponibilidade hídrica decorrente deste fenômeno refletiu em uma maior intensidade e extensão da tonalidade verde nos mapas temáticos de NDVI, ou seja, favoreceu o crescimento vegetativo das regiões periféricas ao açude. Por outro lado, o açude Entremontes apresentou um comportamento contrário, de modo que a extensão de seu reservatório apresentou uma redução quando comparado o ano de 2022 e 2014.

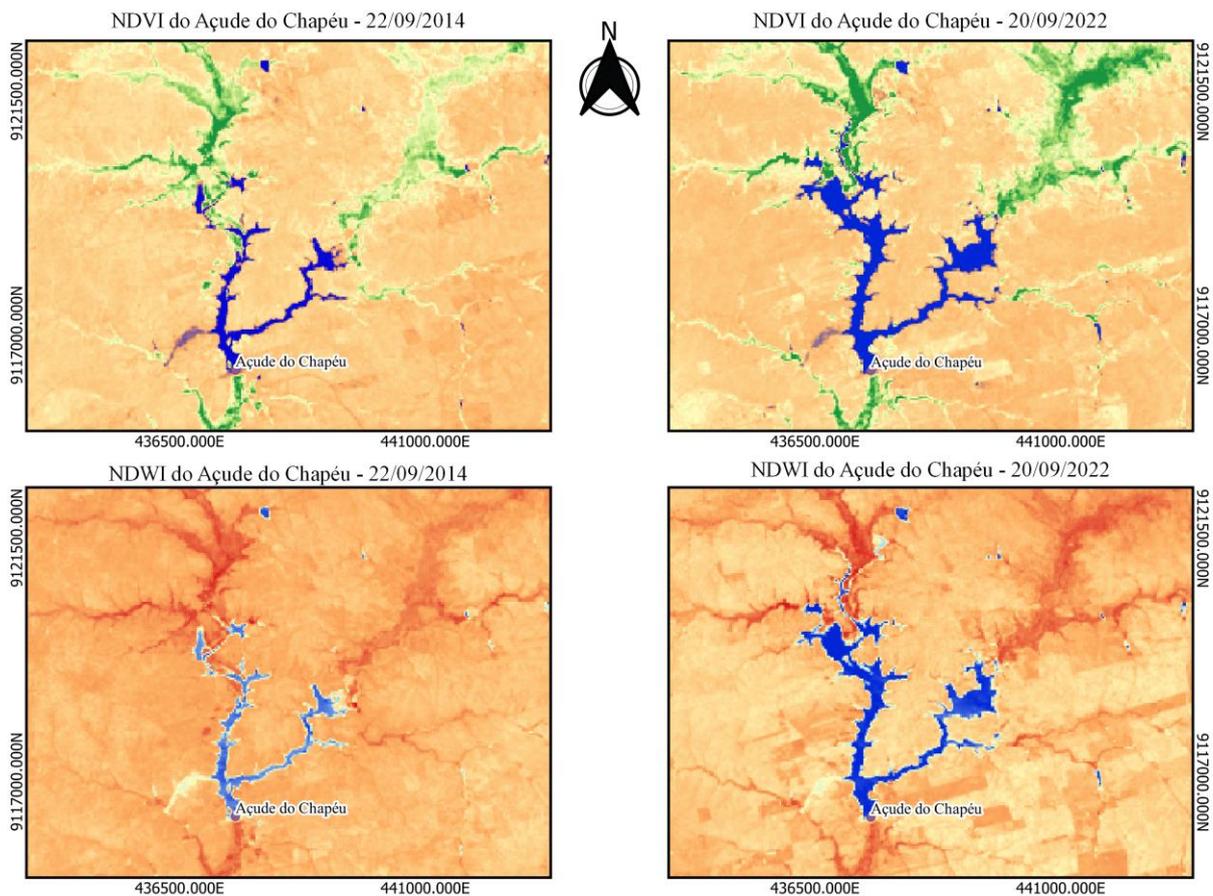


Figura 6 - Comparação dos parâmetros NDVI e NDWI para o Açude do Chapéu, nos anos de 2014 e 2022.

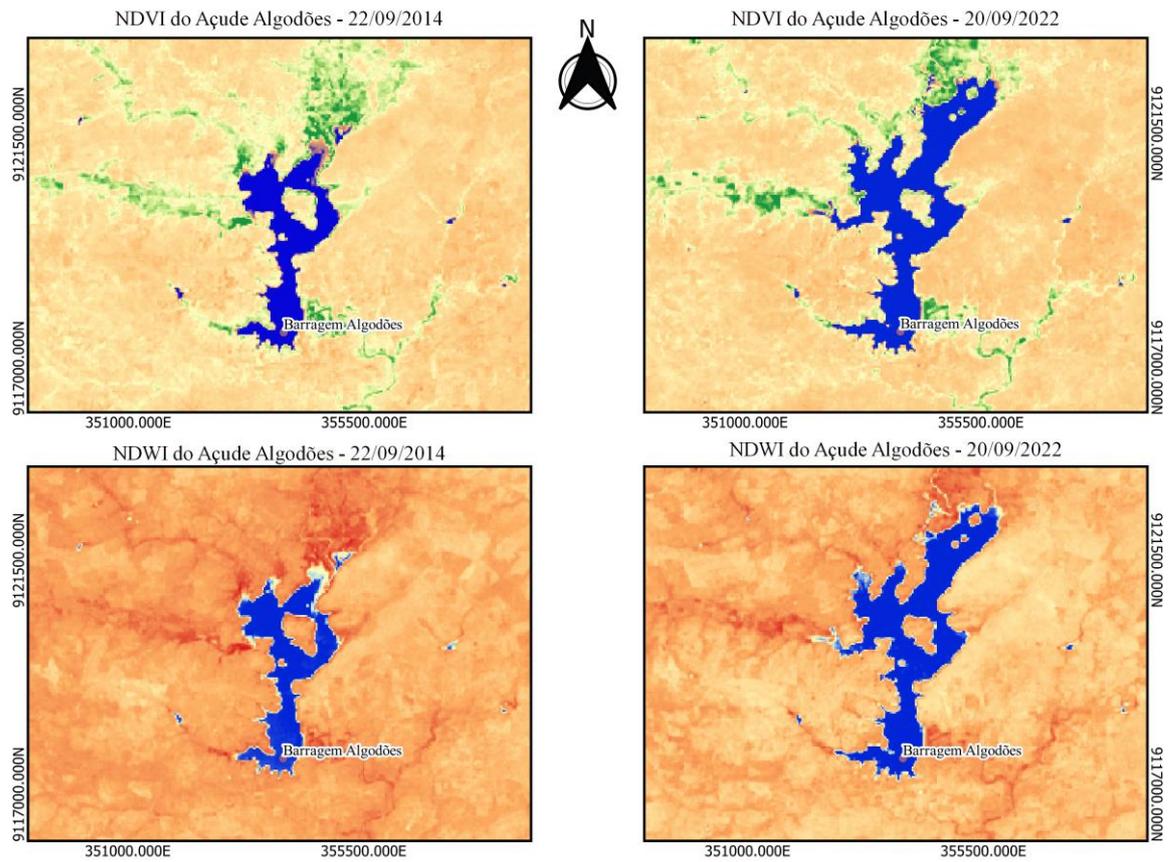


Figura 7 - Comparação dos parâmetros NDVI e NDWI para o Açude Algodões, correspondente aos anos de 2014 e 2022.

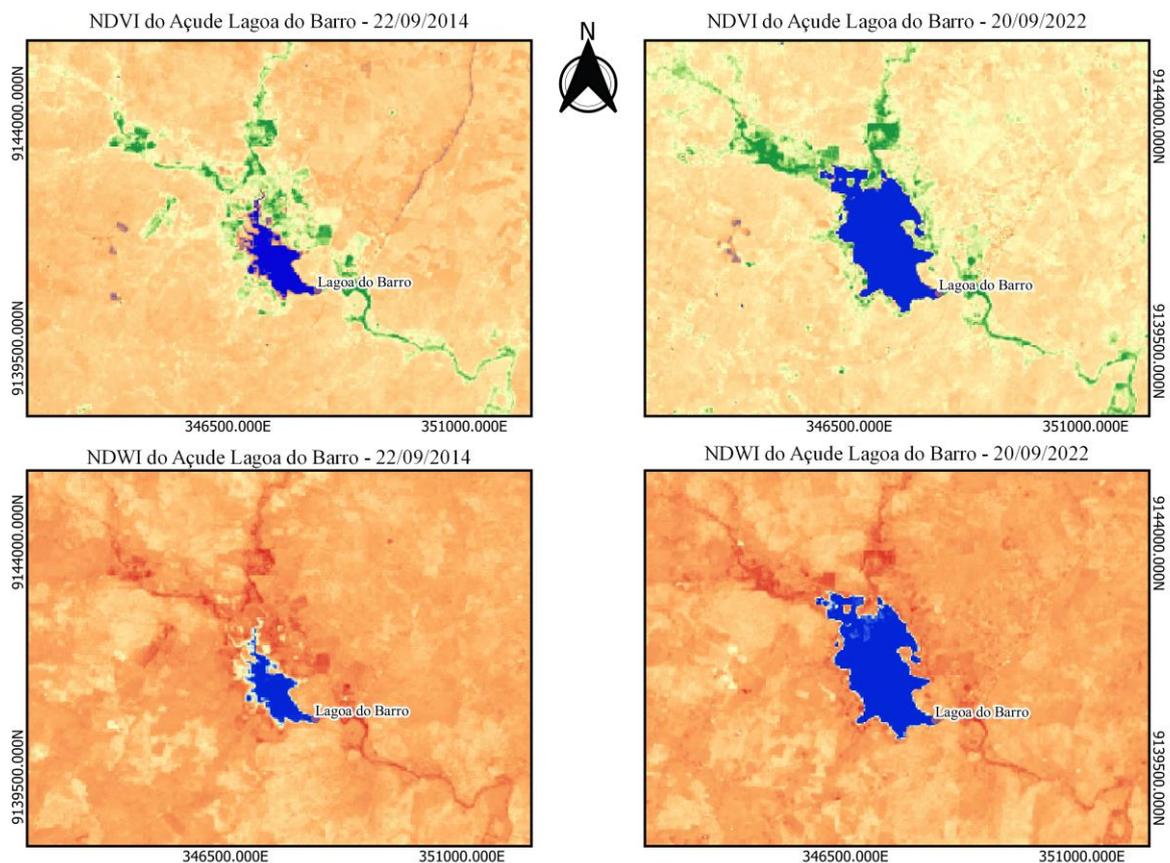


Figura 8 - Comparação dos parâmetros NDVI e NDWI para o Açude Lagoa do Barro, correspondente aos anos de 2014 e 2022.

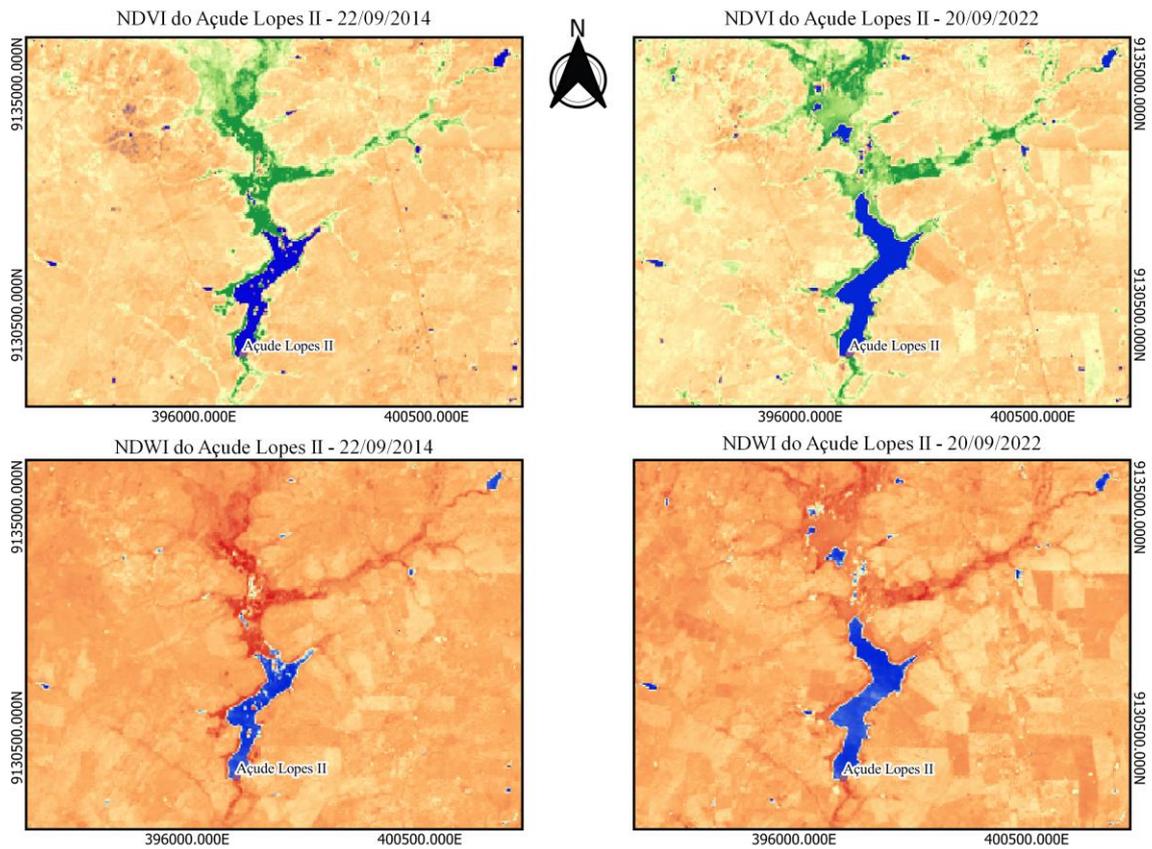


Figura 9 - Comparação dos parâmetros NDVI e NDWI para o Açude Lopes II, correspondente aos anos de 2014 e 2022.

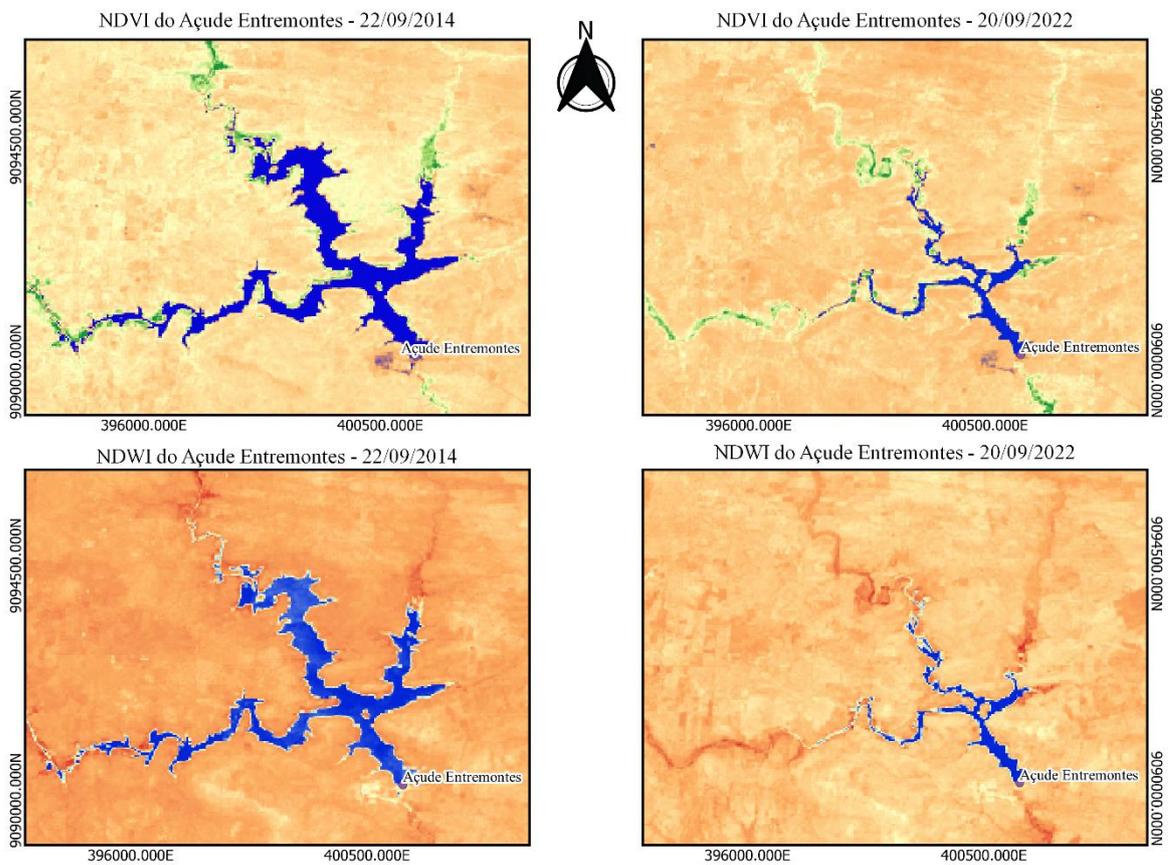


Figura 10 - Comparação dos parâmetros NDVI e NDWI para o Açude Entremontes, correspondente aos anos de 2014 e 2022.

Os resultados desta pesquisa condizem com pesquisas realizadas com outros sistemas sensores, a exemplo do Sentinel 2, com Almeida et al. (2021) quando analisaram a distribuição espacial do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI) utilizando dados do sensor MSI - Sentinel 2, na região semiárida que compreende parte do território da bacia hidrográfica do rio Moxotó em Pernambuco. Ao se analisar as datas das imagens que abrangeram períodos considerados chuvoso e seco em 2019, ficou evidenciado a dinâmica do comportamento espacial da área de estudo. O NDVI apresentou valores médios iguais a 0,404; 0,343; 0,179; 0,162; 0,158 e 0,273, referentes a junho, julho, setembro, outubro, novembro e dezembro de 2019, respectivamente. Na visualização do NDVI pelas cartas georreferenciadas, ficou evidenciado a diminuição ao longo dos meses e o aumento no último mês estudado na bacia hidrográfica.

Levando em conta que o aumento da extensão da área dos açudes também reflete de forma direta no aumento de seu volume acumulado, foi realizada uma comparação dos resultados encontrados com as informações disponíveis no Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR), ferramenta disponibilizada pela ANA (2023a), a qual armazena os dados históricos de variação dos volumes de diversos reservatórios do Brasil. Desse modo, na Figura 11, evidenciou-se os volumes acumulados em cada açude avaliado, podendo relacionar com a variabilidade espacial dos reservatórios.

Destacou-se que os valores de volume apresentados foram referentes ao mês de setembro, de modo a se adequar com os demais dados apresentados pelo presente estudo. Entretanto, determinados açudes não dispõem de medições no mês de setembro. Por este motivo, considerou-se dados provenientes dos meses de agosto ou outubro, os quais foram considerados representativos.

Os casos em que não foram identificadas medições nos meses subsequentes, optou-se por desconsiderar na apresentação das tabelas, visto que a medição do volume dos açudes em meses chuvosos não seria representativa para o objetivo deste trabalho. Por este motivo, foram removidas as medições do Açude Lopes II, referente ao ano de 2017 e as medições do Açude Algodões dos anos de 2017 a 2022, considerando os dados reais da plataforma SAR.

Os dados disponibilizados pela ANA (2023a) confirmam os resultados encontrados através das cartas georreferenciadas de NDVI e NDWI, de modo que os Açudes do Chapéu, Lagoa do Barro e Lopes II, apresentaram em 2014 um volume de água correspondente a, respectivamente, 9,74, 13,86 e 24,60% de sua capacidade total, sendo observado um

acréscimo do volume de água armazenado no ano de 2022, no qual estes mesmos reservatórios apresentaram volumes acumulados correspondentes a 10,07, 42,61 e 54,34%, evidenciando a eficiência da utilização de índices espectrais.

É válido destacar que devido as falhas de medições identificadas para o Açude Algodões, não foi possível realizar sua comparação anual. Entretanto, no ano de 2014 seu reservatório encontrava-se em cerca de 14,41% de sua capacidade total, apresentando uma expansão no ano de 2015, alcançando a faixa de 17,60% de sua capacidade, e uma redução no ano de 2016, no qual o reservatório encontrava-se com apenas 1,36% de seu volume total preenchido. Este comportamento se assemelha aos resultados encontrados para os demais açudes, nos quais têm-se os anos de 2016 e 2017 com menores volumes acumulados, conforme evidenciado na Figura 11.

Para o Açude Entremontes, por sua vez, os dados disponibilizados pela ANA (2023a) indicaram uma redução no volume do reservatório quando comparados os anos de 2014 e 2022, no qual o reservatório apresentou, respectivamente, cerca de 8,91% e 1,86% de sua capacidade total, confirmando os resultados encontrados através da Figura 10, evidenciando assim a eficácia de técnicas de Sensoriamento Remoto com dados orbitais e modelagem de índices espectrais.

Contudo, destacou-se que a variação anual do volume do reservatório, quando comparado os anos de 2014 e 2022, não ocorreu de maneira constante. Os dados encontrados referentes aos Açudes Chapéu, Lagoa do Barro e Entremontes, permitiram concluir que houve um acréscimo de volume em seu reservatório no ano de 2020, no qual identificou-se as maiores taxas de volume acumulado para os Açudes do Chapéu e Lagoa do Barro. Entretanto, este acréscimo de volume não identificado para o Açude Lopes II, de modo que as medições realizadas neste reservatório identificaram sua seca.

Comportamento similar entre o espelho d'água modelado por índices espectrais e dados do SAR foram também constatados em outras pesquisas, a exemplo de Barros et al. (2020) que utilizando o Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI) delimitaram o espelho d'água do Reservatório Poço da Cruz, situado no município de Ibirimir - Pernambuco - Brasil. A partir de imagens do satélite OLI Landsat 8, datadas de 05/12/2017 e 15/06/2018, analisou-se o comportamento do espelho d'água em dois diferentes períodos, um seco e um chuvoso. Com base nos resultados obtidos foi possível delimitar o espelho d'água do Reservatório Poço da Cruz no ano de 2017 (1,28 km²) e de 2018 (7,70 km²), o que evidenciou um aumento de 6,42 km² da área no intervalo, evidenciando um comportamento condizente com os

dados do SAR do referido açude. Também, os autores verificaram o nítido aumento do volume útil do reservatório entre dezembro/2017 e junho/2018 pelo

SAR, decorrente da presença de eventos chuvosos nos meses iniciais de 2018, com valor máximo em março/2018.

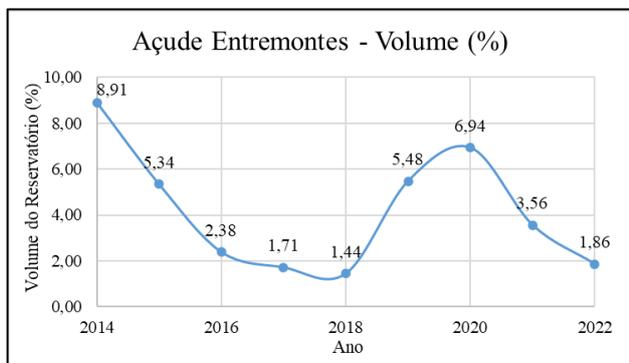
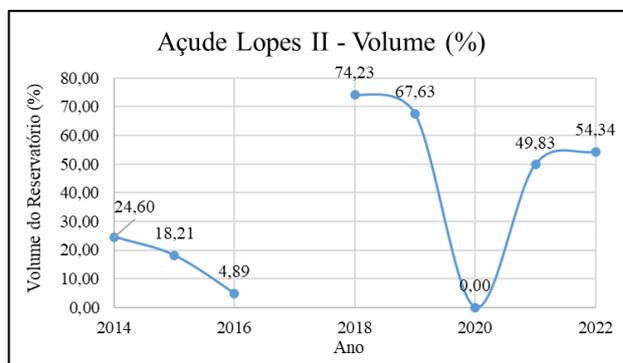
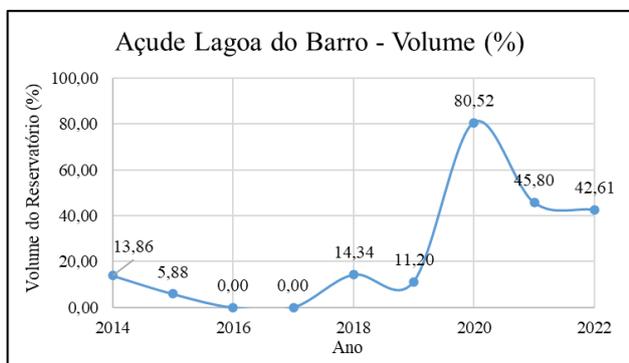
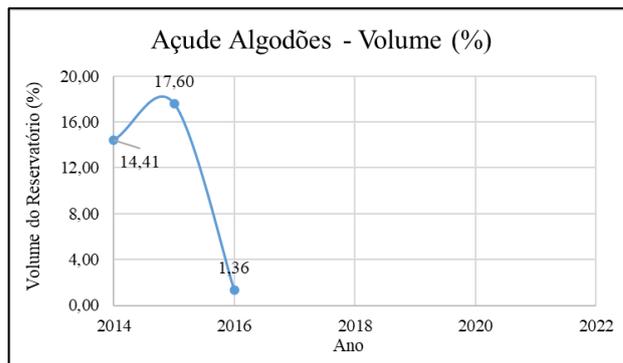
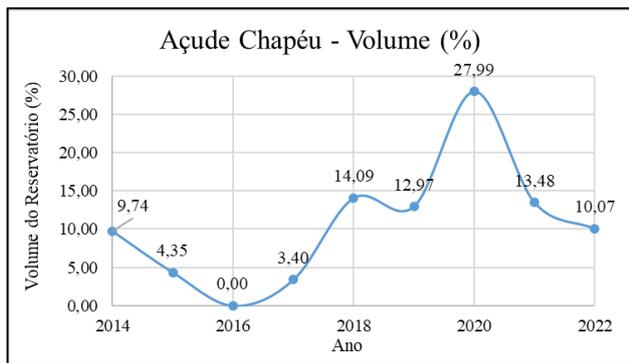


Figura 11 - Variação anual do volume nos açudes pertencentes a Bacia Hidrográfica do Brígida.

Para melhor compreensão da ocorrência das variações espaço-temporal dos aspectos hídricos e vegetativos das bacias hidrográficas do semiárido nordestino ao longo dos anos, identifica-se a necessidade de avaliar as variações climatológicas da região, com destaque para a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT).

De acordo com as informações disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2023), o ZCIT é um dos principais sistemas meteorológicos de parte das regiões no Norte e Nordeste brasileiro, responsável pela geração de eventos chuvosos. Jatobá (2019)

menciona que este sistema corresponde às áreas de baixas pressões equatoriais, nas quais convergem alísios boreais e austrais, provocando movimentos ascendentes do ar, os quais geram a condensação do vapor d'água, formação de nuvens e posterior precipitação.

Ainda de acordo com Jatobá (2019), os anos onde o ZCIT não é direcionado para regiões ao sul da Linha do Equador, haverá tendência de ocorrência de fortes secas no semiárido nordestino. Desta forma, os resultados encontrados refletem o comportamento desse sistema meteorológico e condizem com estudos desenvolvidos por Marengo *et al.* (2016) e com os

dados da plataforma “Monitor de Secas” disponibilizado de forma online pela ANA (2023b), na qual registrou-se para o mês de setembro de 2014 a ocorrência de secas extremas e excepcionais na área de influência da Bacia do Rio Brígida, enquanto para setembro de 2022 foram registradas secas classificadas como fracas.

4. Conclusão

Evidenciou-se que de a variação espaço-temporal na bacia do Rio Brígida, referente aos anos de 2014 e 2022, apresentou uma expansão dos corpos hídricos, com exceção do Açude Entremontes, e uma expansão da cobertura vegetal, principalmente ao ser observado a região norte da Bacia que compreende a biorregião do Complexo do Araripe.

Entretanto, os dados do Sistema de Monitoramento de Reservatórios da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2023a) demonstraram que esta variação não ocorreu de forma gradual, de modo que foi possível identificar variações do acúmulo de água do reservatório ao longo dos anos, o qual refletiu as variações nos ciclos hidrológicos da bacia. Deste modo, foi possível identificar os anos de 2016 e 2017 como os mais secos para a região, enquanto o ano de 2020 houve as maiores taxas de acúmulo de água nos açudes, com exceção do Açude Lopes II, o qual foi identificado como seco neste mesmo ano.

A análise da variação espaço-temporal dos aspectos hídricos de uma bacia hidrográfica deve ser feita considerando toda a série de variações anuais, uma vez que o comportamento hidrológico das bacias inseridas no seminário nordestino apresentam forte influência das variações climáticas e meteorológicas da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), a qual deve ser levada em consideração para que se possa identificar os possíveis motivos para a expansão ou redução de seus açudes, auxiliando na tomada de decisão para gestão dos recursos hídricos superficiais com uma maior eficiência de detalhamento técnico.

As técnicas de Sensoriamento Remoto mostraram uma eficiente ferramenta na análise temporal dos recursos de uma bacia hidrográfica e possibilitaram uma análise e avaliação efetivas das mudanças geradas em uma região, decorrentes da gestão de seus recursos hídricos.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo incentivo a pesquisa e concessão de bolsa de Doutorado da segunda autora, processo nº 88887.827976/2023-00; a Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) e ao Instituto Nacional de

Meteorologia (INMET) pela disponibilização dos dados meteorológicos para realização da pesquisa; ao *United States Geological Survey* (USGS, 2023b) pela aquisição da imagem de satélite, à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), pelo banco de dados de monitoramento dos reservatórios no Nordeste e semiárido; e ao e ao Projeto Sensoriamento remoto aplicado no delineamento espaço-temporal de corpos hídricos e áreas verdes no Semiárido brasileiro.

Referências

- Almeida, D.N.O., Oliveira, L.M.M., Silva, C.B., Bezerra, U.A., Farias, M.O., Candeias, A.L.B., 2017. Análise das Bacias Hidrográficas do Rio Brígida, Rio Terra Nova e Grupo de Bacias de Pequenos Rios Interiores 9 (G9) de Pernambuco usando índices de vegetação e de umidade. In: Anais do XXVII Congresso Brasileiro de Cartografia. Rio de Janeiro–RJ: INPE.
- Almeida, D.N.O., Salgueiro, C.O.B., Chaves, J.V.B., Santos, Oliveira, L.M.M., 2021. Spectral indices in the detection of water bodies using images from the MSI - Sentinel 2 sensor. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, v.11, 125-135.
- Alves, D.S., Nitsche, P.R., Cirino, V.M., Scholz, M.B.S., Santos Neto, J., Caramori, P.H., 2021. Remote sensing allows to estimate water stress and yield losses of bean cultivars. *Irriga* 26, 1, 1-12.
- ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2023a. Sistema de Acompanhamento de Reservatórios. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/sar0/Medicao>. Acesso em: 22 ago. 2023.
- ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2023b. Monitor de Secas. Disponível em: <https://monitordesecas.ana.gov.br/mapa>. Acesso em: 02 nov. 2023.
- APAC, Agência Pernambucana de Águas e Clima, 2023. Sistema de Informação Geográfica. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/>. Acesso em: 22 de agosto de 2023.
- Bacalhau, J.R., Neto, A.R., De Oliveira, L.M.M., 2017. Aplicação de índice de vegetação no monitoramento da seca: açude Algodões no sertão pernambucano. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, v. 2, 283-293.
- Barros, J.P.M., Santos, M.B., Souza, A.M.P., Almeida, D.N.O., Oliveira, L.M.M., 2020. Sensoriamento remoto na delimitação do espelho d'água do reservatório Poço da Cruz - Pernambuco – Brasil. In: Anais do XV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Caruaru, Pernambuco.
- Bezerra, U.A., Oliveira, L.M.M., Leite, A.C.S., Almeida, D.N.O., Candeias, A.L.B., Tavares Júnior, J.R., 2017. Multitemporal analysis of vegetation indices for the superior region of the

- Moxotó River hydrographic basin. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing* v.7, 272-283.
- Castro, C.N., 2012. A agricultura no Nordeste brasileiro: oportunidades e limitações ao desenvolvimento. Texto para Discussão.
- Chaves, J.V.B., 2019. Geotecnologia como ferramenta na espacialização superficial dos açudes da bacia hidrográfica do Rio Brígida. Trabalho de Conclusão de Curso.
- Damasceno, M.L., Pereira, J.A.S., Schuler, C.A.B., 2020. Análise espaço temporal da cobertura vegetal do município de Arcoverde (Pernambuco). *Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto*, v.1, 038-050.
- Galvíncio, J., 2019. Estimation of surface temperature with images obtained with drones. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 9, 397-406
- Gu, L., Shuai, Y., Shao, C., Xie, D., Zhang, Q., Li, Y., Yang, J., 2021. Angle effect on typical optical remote sensing indices in vegetation monitoring. *Remote Sensing* 13., 1699.
- INMET, Instituto Nacional de Meteorologia, 2023. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em: 01 set. 2023.
- Leonardo, H.R.A.L., Oliveira, L.M.M., Oliveira, E.F., Almeida, D.N.O., Paiva, A.L.R., 2019. Geotechnology in the analysis of behavior spectral of natural resources in the Semiarid pernambucano. *Journal of Hyperspectral* 9, 4, 191-203.
- Leonardo, H.R.A.L., Salgueiro, C.O.B., Almeida, D.N.O., Santos, S.M.; Oliveira, L.M.M., 2021. Sensoriamento remoto aplicado na geoespacialização do Reservatório Poço da Cruz - PE e seu Entorno. *Revista Brasileira de Geografia Física* v.14, , 3592-3607.
- Jatobá, L., 2019. Elementos de Climatologia e Geomorfologia do Trópico Semiárido Brasileiro. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco.
- Marengo, J.A., Cunha, A.P., Alves, L.M., 2016. A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. *Revista Climática*, 3(1), 49-54.
- Medeiros, S.S., Cavalcante, A.M.B., Marin, A.M.P., Tinôco, L.B.M., Salcedo, I.H., Pinto, T.F., 2012. Sinopse do censo demográfico para o semiárido brasileiro. Instituto Nacional do Semiárido. Campina Grande.
- McFeeters, S.K., 1996. The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17, pp. 1425-1432.
- Pereira, J.A.V., Souza, Y.G., Correia, I.M.G., Souza, B.I., 2020. Uso e cobertura do solo e comparação entre os índices de vegetação SAVI e NDWI na área de Proteção Ambiental das Onças, PB, Brasil. *Revista de Geografia*, 37, 2, 278-298.
- Pernambuco – Secretaria de Infraestrutura e Recursos Hídricos, 2022. Plano Estadual de Recursos Hídricos e Pernambuco – PERH-PE. Secretaria de Infraestrutura e Recursos Hídricos do Governo Estadual de Pernambuco, Secretaria Executiva de Recursos Hídricos. Recife: Seinfra.
- Peruzzo, J.S., Santos Pereira, M.C., Silva, L.D.R., Oliveira, B.S., Silvino, G. S., 2019. Sensoriamento remoto aplicado ao monitoramento ambiental da bacia do Alto Piranhas, Semiárido Nordestino. *Revista Brasileira de Meio Ambiente* 7 (3), 28-37.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *NASA Spec. Publ* 1, 309-317.
- Santos, S.R.Q., Cunha, A.P.M.A., Ribeiro Neto, G.G., 2019. Avaliação de dados de precipitação para o monitoramento do padrão espaço-temporal da seca no Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, 25: 80-100.
- Silva, B.B., Braga, A.C., Oliveira, L.M.M., Montenegro, S.M.G.L., Barbosa Junior, B., 2016. Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20, 3-8.
- Sousa, A.A., Oliveira, U.C., Júnior, C.A.M., 2022. 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*, 37, 233-241.
- Souza, C.R.R.S., 2022. Análise do comportamento do albedo, NDVI e temperatura de superfície utilizando dados landsat-8: um estudo de caso no entorno da barragem Barra do Juá, Pernambuco. Trabalho de Conclusão de Curso.
- USGS, United States Geological Survey, 2023a. Earth Explorer. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 22 ago. 2023.
- USGS, United States Geological Survey, 2023b. Landsat Missions. Disponível em: <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat>. Acesso em: 22 ago. 2023.
- Vela, E., Miljković, V., Babić, L., 2020. Spatiotemporal analysis of LANDSAT satellite imagery for change detection in Česma Forest Ecosystem. *Technical Gazette* 27, 5, 1648-1653.