

Mapping of water variability using MODIS and Landsat time series, in the Brígida River Basin, in Pernambuco

Haylla Rebeka de Albuquerque Lins Leonardo*, Francisco Marcelo de Alencar Maia**, Leidjane Maria Maciel de Oliveira***, Anderson Luiz Ribeiro de Paiva****, Sylvana Melo dos Santos*****

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

** Doutorando do PPGEC/UFPE, Recife, Pernambuco, Brasil, francisco.maia@ufpe.br;

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

**** 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.

Received 19 December ; accepted 29 December

Abstract

This research was developed with the objective of evaluating the hydrological development, from a temporal perspective, of the Brígida River Basin, located in the hinterland of Pernambuco, Brazil, using the MODIS sensor (Moderate Resolution Spectroradiometer) and Landsat, to calculate the values of EVI, albedo, NDWI and SAVI. The region's precipitation series between 1993 and 2022 was analyzed, highlighting the years 1993 and 2016 as years of severe drought, and the year 2022, with high rainfall, was chosen as a comparison. The EVI for the years 1993 and 2016, in August, the driest month, were both 0.16, and for 2022, the value was 0.22. SAVI ranged from 0.02 to 0.21 in 1993, from 0.21 to 0.40 in 2016, and 0.40 to 0.59 in 2022. The maximum albedo value was 0.427 in 1993, 0.746 in 2016 and 0.675 in 2022. The maximum NDWI value was 0.493 in 1993, 0.788 in 2016 and 0.881 in 2022. These values point to a complex relationship between heat distribution, water availability and the presence of local vegetation. The vegetation, predominant in the Caatinga biome, has a strong adaptive capacity to periods of lower water availability and a high capacity for climate regulation, which makes it extremely important to monitor its management to guarantee local climate resilience mechanisms.

Keywords: EVI, Albedo, NDWI, SAVI, Climate Change.

Mapeamento da variabilidade hídrica por meio de séries temporais MODIS e Landsat, na Bacia Hidrográfica do Rio Brígida, em Pernambuco

Resumo

Essa pesquisa foi desenvolvida com o objetivo de avaliar o desenvolvimento hidrológico, sob o enfoque temporal, da Bacia Hidrográfica do Rio Brígida, localizada no Sertão de Pernambuco, Brasil, utilizando o sensor MODIS (Moderate Resolution Spectroradiometer) e o Landsat, para cálculo dos valores de EVI, albedo, NDWI e SAVI. Foi analisada a série de precipitação da região entre os anos de 1993 e 2022, destacando os anos de 1993 e 2016 como anos de secas severas, e o ano de 2022, com elevada pluviosidade, foi escolhido como comparativo. O EVI para os anos de 1993 e 2016, em agosto, mês mais seco, foram ambos de 0,16, e para 2022, o valor foi de 0,22. O SAVI variou de 0,02 a 0,21 em 1993, de 0,21 a 0,40 em 2016 e 0,40 a 0,59 em 2022. O valor do albedo máximo foi de 0,427 em 1993, 0,746 em 2016 e 0,675 em 2022. O valor de NDWI máximo foi de 0,493 em 1993, 0,788 em 2016 e 0,881 em 2022. Esses valores apontam para uma relação complexa entre a distribuição de calor, a disponibilidade hídrica e a presença da vegetação local. A vegetação, predominante do bioma Caatinga, possui uma forte capacidade adaptativa aos períodos de menor disponibilidade hídrica e elevada capacidade de regulação climática, o que torna de extrema importância monitorar o seu manejo para garantir os mecanismos locais de resiliência ao clima.

Palavras-chave: EVI, Albedo, NDWI, SAVI, Mudanças Climáticas.

1. Introdução

Na última década, a importância dos estudos hidrológicos aumentou significativamente frente às novas perspectivas para o clima global, e diante dos cenários, cada vez mais, presentes das mudanças

climáticas. Os relatórios do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) das Nações Unidas, publicados desde 1988 até os dias atuais, apontam para a mudança do regime hidrológico com o agravamento de secas mais prolongadas em regiões que já sofrem com baixa pluviosidade (Birkmann et al., 2022). É

preciso monitorar o clima e gerenciar o uso e a ocupação do solo para preservar os recursos naturais das regiões mais secas garantindo a sobrevivência dos habitantes mais vulneráveis. A dificuldade em monitorar de perto essas regiões pela enorme extensão territorial e pela falta de recursos torna a utilização de técnicas de longo alcance como o Sensoriamento Remoto (SR) é uma opção de grande relevância (Jabal et al., 2022).

O Sensoriamento Remoto é a técnica que consiste na utilização de radiação eletromagnética emitida, refletida e recebida por sensores instalados em satélites, aviões ou drones, com a finalidade de produzir imagens e analisar a cobertura da superfície terrestre (Zhou et al., 2019). De forma geral, o SR é muito importante para mapear e gerenciar o uso e a ocupação do solo, bem como o monitoramento dos níveis dos reservatórios de água, naturais ou construídos.

O MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*) é um sensor instalado nos satélites Terra e Aqua, lançados em dezembro de 1999 e em maio de 2002, respectivamente, pelo projeto EOS (*Earth Observing System*) da NASA. O MODIS possui ampla cobertura espacial e espectral e sua capacidade de monitoramento contínuo de regiões espectrais mais finas, tais como temperatura da superfície do mar, gelo e vegetação, sendo desenvolvido para o monitoramento da terra, atmosfera e oceanos com cobertura quase diariamente (1 a 2 dias). A partir do MODIS é possível extrair o Índice de Vegetação Melhorado (*Enhanced Vegetation Index* - EVI), que é utilizado para monitorar a densidade de vegetação natural e agricultura (Zhumanova et al., 2018; Cui e Shi, 2021).

O Landsat (*Land Remote Sensing Satellite*) é uma série de satélites lançados no espaço pela NASA através do programa espacial ERTS (*Earth Resources Technology Satellite*) desde 1972, atualmente na versão Landsat 8, lançado em fevereiro de 2013, possui sensores OLI (*Operational Land Imager*) para bandas do espectro visível e TIRS (*Thermal Infrared Sensor*) para bandas do espectro infravermelho. A série histórica do Landsat pode ser utilizada para analisar o albedo, o Índice de Água por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Water Index* - NDWI) e o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (*Soil-adjusted Vegetation Index* - SAVI) para a série histórica de uma determinada região (Souza et al., 2020).

O objetivo deste trabalho é utilizar os dados dos sensores MODIS e Landsat no cálculo dos índices EVI, albedo, NDWI e SAVI, e, consequentemente, na avaliação da variabilidade hídrica ao longo do tempo na bacia hidrográfica do Rio Brígida no Sertão do Estado de Pernambuco, Brasil.

2. Material e métodos

Área de estudo

A área de estudo (Figura 1) está localizada no extremo oeste do Sertão Pernambucano, a bacia hidrográfica do Rio Brígida situa-se entre as coordenadas 07°19'02'' e 8°36'32'' de latitude sul, 39°17'33'' e 40°43'06'' de longitude oeste, e abrange uma área de 13.496 Km², correspondendo a 13,73% da superfície total do Estado.

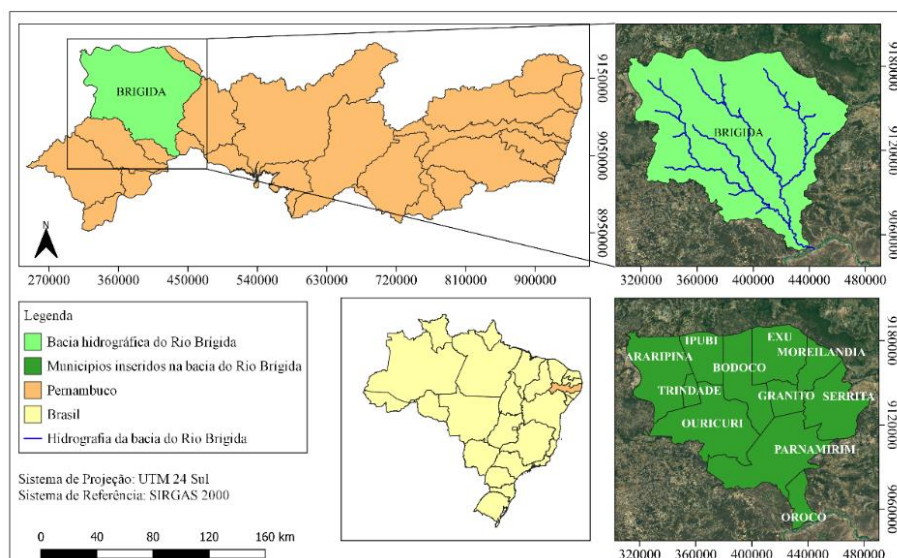


Figura 1 - Localização da área de estudo, bacia hidrográfica do Rio Brígida, em Pernambuco.

A bacia hidrográfica do Rio Brígida compõe a Unidade de Planejamento Hídrico UP11, limita-se ao norte com os Estados do Ceará e Piauí e com o grupo de bacias de pequenos rios interiores 9 - GI9 (UP28), ao sul com a bacia do riacho das Garças (UP12) e com o grupo de bacias de pequenos rios interiores 6 - GI6 (UP25), a leste com a bacia do rio Terra Nova (UP10) e o grupo de bacias de pequenos rios interiores 5 - GI5 (UP24), e a oeste com o Estado do Piauí (APAC, 2023a).

Conforme os dados da APAC (2023a), a bacia abrange áreas de 15 municípios, sendo que os que estão totalmente inseridos na bacia são: Bodocó, Granito, Ipubi e Trindade; os com sede na bacia são Exu, Moreilândia, Araripina, Ouricuri e Parnamirim; e os municípios parcialmente inseridos na bacia são Cabrobó, Orocó, Santa Cruz, Santa Maria da Boa Vista, Santa Filomena e Serrita.

Índices pluviométricos

Para a caracterização pluviométrica da área de estudo extraiu-se a série histórica de pluviometria mensal do banco de dados da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC, 2023b) referente aos postos 5 e 373, situados no município de Ouricuri – PE. Foram estudados os dados pluviométricos acumulados anuais e mensais dos anos de 1993 a 2022. O posto 5 (Ouricuri) foi utilizado para obtenção dos dados de 1993 a 2003, período em que se encerrou a disponibilidade de dados desse posto, sendo, então, utilizado o posto 373 (Ouricuri-PCD) para os dados referentes aos anos de 2004 a 2022.

Processamento do EVI

A série temporal do EVI foi extraída a partir do produto do satélite MODIS, o *Aqua Vegetation Indices 16-Day Global (MYD13A1)* com resolução de 500 m. Utilizou-se a ferramenta de geoprocessamento do Google, o editor de código do *Google Earth Engine* (2023), a plataforma funciona a partir de linguagem de programação em *Javascript*. Os valores do índice foram obtidos para os anos de 2003 a 2022, datas referentes à disponibilidade de dados do satélite.

Pré-processamento

A aquisição e processamento dos dados foram conduzidos por meio da interface de programação do *Google Earth Engine* (2023), uma plataforma de processamento em nuvem, a linguagem de programação utilizada foi o *JavaScript*. Para a seleção das imagens a serem processadas, avaliou-se as que apresentavam a menor proporção de cobertura de nuvens dentro da região delimitada para a área de estudo. Selecionou-se as imagens referentes ao dia 11 de agosto de 1993, do satélite *Land Remote Sensing Satellite* (Landsat 5), sensor *Thematic Mapper* (TM), órbita 217, pontos 65 e 66, e aos dias 10 agosto de 2016 e 11 de agosto de 2022, do satélite *Land Remote Sensing Satellite* (Landsat 8), sensor *Operational Lander Imager* compostas por bandas espectrais, Tabela 1.

Tabela 1 - Data da imagem, hora, ângulo de elevação do Sol e ponto do satélite.

Data	Hora (UTM)	Ângulo de elevação do Sol	Órbita	Ponto
11/08/1993	12:10:00.09	45.63	217	65
11/08/1993	12:10:24.18	44.69	217	66
10/08/2016	12:47:38.46	53.27	217	65
10/08/2016	12:48:02.39	52.21	217	66
11/08/2022	12:48:06.99	53.43	217	65
11/08/2022	12:48:30.92	52.37	217	66

Fonte: *Google Earth Engine* (2023).

As imagens orbitais e os arquivos vetoriais foram re-projetados para o Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas), UTM fuso 24 Sul, por ser adequado para a região em consideração. Após a aquisição das imagens, procedeu-se ao processamento dos parâmetros biofísicos, SAVI, NDWI e albedo. A criação dos mapas foi realizada a partir da ferramenta de composição de impressão do software QGIS versão 3.16.16.

Processamento dos parâmetros biofísicos

O processamento dos parâmetros biofísicos foi realizado aplicando o editor de códigos do *Google Earth Engine* (2023). As reflectâncias planetárias corrigidas de cada banda foram obtidas pelos satélites *Landsat 5 Collection 2 Tier 1 calibrated top-of-atmosphere (TOA) reflectance* e *Landsat 8 Collection 2 Tier 1 calibrated top-of-atmosphere (TOA) reflectance*. O cálculo do albedo planetário (α_{toa}) para cada banda, isto é, o albedo não ajustado à transmissividade atmosférica (τ_{sw}), é obtido através

de combinação linear entre as reflectâncias monocromáticas, pela Equação 1 para as imagens do satélite TM Landsat 5, definido por Allen et al. (2002), e pela Equação 2 para as imagens do satélite OLI Landsat 8, definido em Silva et al. (2016).

$$\alpha_{toa} = 0,293 \cdot \rho_1 + 0,274 \cdot \rho_2 + 0,233 \cdot \rho_3 + 0,155 \cdot \rho_4 + 0,032 \cdot \rho_5 + 0,012 \cdot \rho_7 \quad (1)$$

$$\alpha_{toa} = 0,300 \cdot \rho_2 + 0,276 \cdot \rho_3 + 0,233 \cdot \rho_4 + 0,143 \cdot \rho_5 + 0,035 \cdot \rho_6 + 0,012 \cdot \rho_7 \quad (2)$$

Em que: $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4, \rho_5, \rho_7$ são as reflectâncias das bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7.

A transmissividade atmosférica é definida por Allen et al. (2002) e considerada em dias de céu claro, conforme Equação 3.

$$\tau_{sw} = 0,75 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot Z \quad (3)$$

Em que: Z corresponde à altitude de cada pixel representado no Modelo Digital de elevação do Terreno (MDT).

Para o albedo da superfície ou albedo corrigido os efeitos atmosféricos (α) podem ser calculados com emprego da Equação 4.

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_p}{\tau_{sw}^2} \quad (4)$$

Em que: α_{toa} é o albedo planetário; α_p é a porção da radiação solar refletida pela atmosfera, considerado 0,03, conforme Bastiaanssen (2000), e τ_{sw} é a transmissividade atmosférica para os dias de céu claro.

O NDWI, proposto por McFeeters (1996), tem como finalidade detectar águas superficiais em ambientes de zonas úmidas e permitir a medição da extensão da água superficial, calculado conforme a Equação 5. Para o cálculo do NDWI utilizou-se as reflectâncias das bandas do verde (ρ_{Verde}) e infravermelho próximo (ρ_{IVp}).

$$NDWI = \frac{(\rho_{Verde} - \rho_{IVp})}{(\rho_{Verde} + \rho_{IVp})} \quad (5)$$

O cálculo do SAVI se deu em conformidade com Huete (1988), Equação 6, sendo que o índice leva em consideração os efeitos do solo exposto.

$$SAVI = \frac{(1 + L) \cdot (\rho_{IVp} - \rho_V)}{L + \rho_{IVp} + \rho_V} \quad (6)$$

Em que: ρ_{IVp} refere-se à banda do infravermelho próximo e ρ_V à banda do vermelho, L é uma constante, para o índice, apresentada frequentemente na literatura com um valor de 0,5.

3. Resultados e discussão

Na Figura 2 tem-se a série histórica de precipitação anual ocorrida no município de Ouricuri entre os anos de 1993 a 2022. Os períodos de seca corresponderam aos anos de 1993, 1998, 2003, 2012 e 2016, sendo que os menores valores de precipitação pluviométrica anual foram registrados nos anos de 1993 (210,90 mm), 2012 (185,90 mm) e 2016 (189,00 mm).

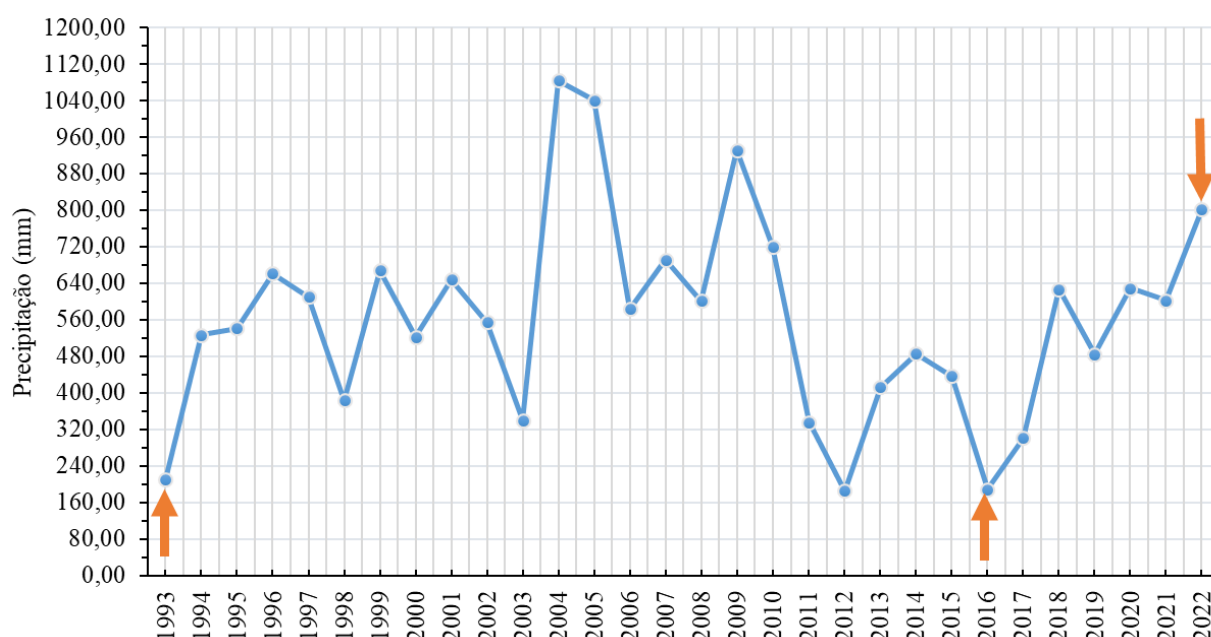


Figura 2 - Série histórica de precipitação pluviométrica na bacia do Rio Brígida, no período de 1993 a 2022.

A pluviometria da bacia do Rio Brígida foi analisada por Lima e Magalhães (2018). Os autores identificaram 6 eventos de seca no período analisado, destacando como os principais eventos, os ocorridos nos anos de 1992-1993, 1997-1999, 2001-2002, 2005, 2007-2008, 2010-2017, corroborando com o resultado destacado.

A análise da precipitação pluviométrica é de fundamental importância para compreensão do aporte hídrico da bacia, no período de baixo índice pluviométrico há uma redução na quantidade de água presente na vegetação e nos corpos hídricos. Em contrapartida, nos períodos em que há um aumento no volume precipitado, pode-se observar melhora na saúde vegetativa e aumento no suprimento de água da região.

Os maiores valores de precipitação pluviométrica anual foram registrados nos anos de

2004, 2009 e 2022, com totais anuais de 1084,40 mm, 931,80 mm, e 802,00 mm, respectivamente.

Com base nos resultados da série histórica, escolheu-se os anos de 1993, 2016 e 2022 para análise, sendo que os anos de 1993 e 2016 anos de seca e o ano de 2022 corresponderam ao período mais chuvoso. A pluviometria mensal de cada ano é apresentada na Figura 3. Por se tratar de uma região situada no Sertão Pernambucano, tem um regime de chuvas caracterizado por períodos secos nos meses de maio a outubro, e períodos chuvosos nos meses de novembro a abril. As imagens selecionadas para análise referem-se ao mês de agosto, caracterizado por menores valores de precipitação mensal. Observou-se que para o mês de estudo, no ano de 1993, não ocorreu precipitação pluviométrica, para o ano de 2016, a precipitação mensal de agosto foi de 0,50 mm e para o ano de 2022, foi de 15,40 mm.

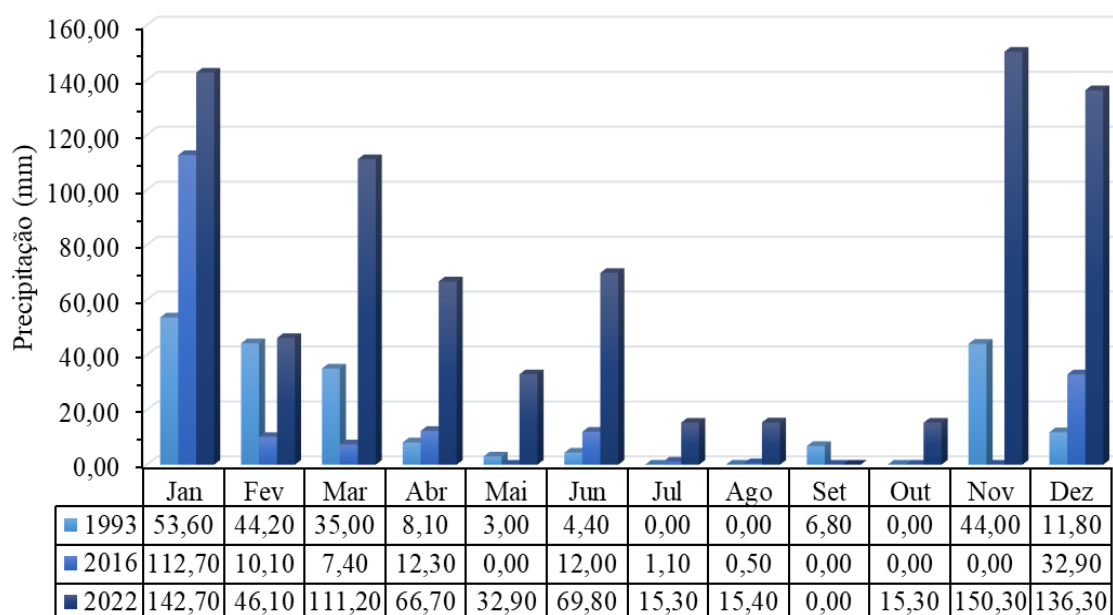


Figura 3 - Precipitação pluviométrica mensal na bacia do Rio Brígida nos anos de 1993, 2016 e 2022.

A vegetação da bacia hidrográfica do Rio Brígida é do tipo Caatinga, conforme Galvêncio et al. (2007), e esse tipo de cobertura vegetal apresenta resposta rápida a eventos de precipitação. A cobertura vegetal da região foi analisada a partir da aplicação de índices de vegetação, EVI e SAVI. O EVI é semelhante ao Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), podendo ser usado para quantificar o verde da vegetação. No entanto, o EVI corrige algumas condições atmosféricas e o ruído de fundo do dossel, e é mais sensível em áreas com vegetação densa (USGS, 2023). A partir dos dados do satélite MODIS, gerou-se a série histórica do EVI para a área de estudo referente ao período de 2003 a 2022, período de disponibilidade do satélite, Figura 4.

Os valores de EVI apresentam variação temporal, nos meses em que há ocorrência de chuvas (novembro a abril) são evidenciados valores mais altos de EVI, entre 0,30 a 0,50. De maio a outubro, são observados os menores valores do índice, entre 0,25 a 0,15. Em agosto de 2016, o valor do EVI foi de 0,17. O menor valor do índice, nesse ano, foi observado de setembro a novembro, com valor de 0,16, meses em que não houve precipitação no ano de 2016. Para o ano de 2022, o valor do EVI de agosto foi de 0,22, superior ao valor observado no ano de 2016, corroborando com o aumento da precipitação mensal evidenciada. Esses valores apontam para a alta capacidade adaptativa da vegetação da Caatinga, que se mantém em estado de latência no período seco e floresce no período chuvoso, como aponta Cunha et al. (2020).

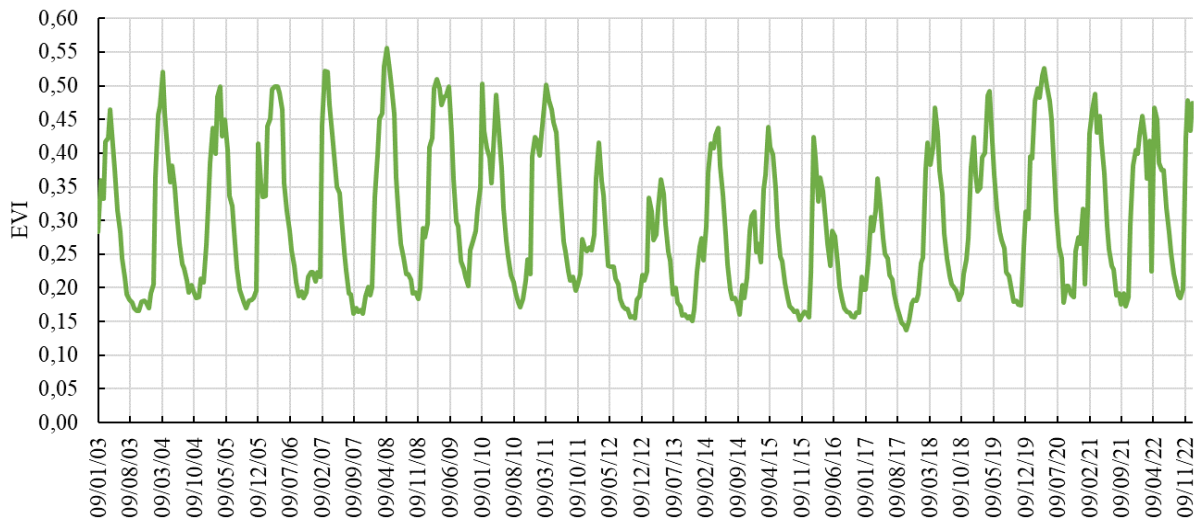


Figura 4 - Série temporal do EVI na bacia do Rio Brígida entre os anos de 1993 a 2022.

Para análise da distribuição espacial da cobertura vegetal nos anos de estudo, processou-se o SAVI (Figura 5). Conforme Boratto e Gomide (2013), valores mais baixos de SAVI são indicativos de áreas com vegetação mais rala ou solo exposto, enquanto os maiores valores do SAVI indicam áreas com vegetação mais densa. O ano de 1993 é caracterizado

por um período de seca, o SAVI apresentou valores mais baixos neste ano (0,02 a 0,21), indicando escassez hídrica da vegetação. Na região nordeste, na área de estudo, são evidenciados valores mais elevados do índice, entre 0,21 a 0,40, indicando áreas mais irrigadas, destinadas à agricultura e pastagem.

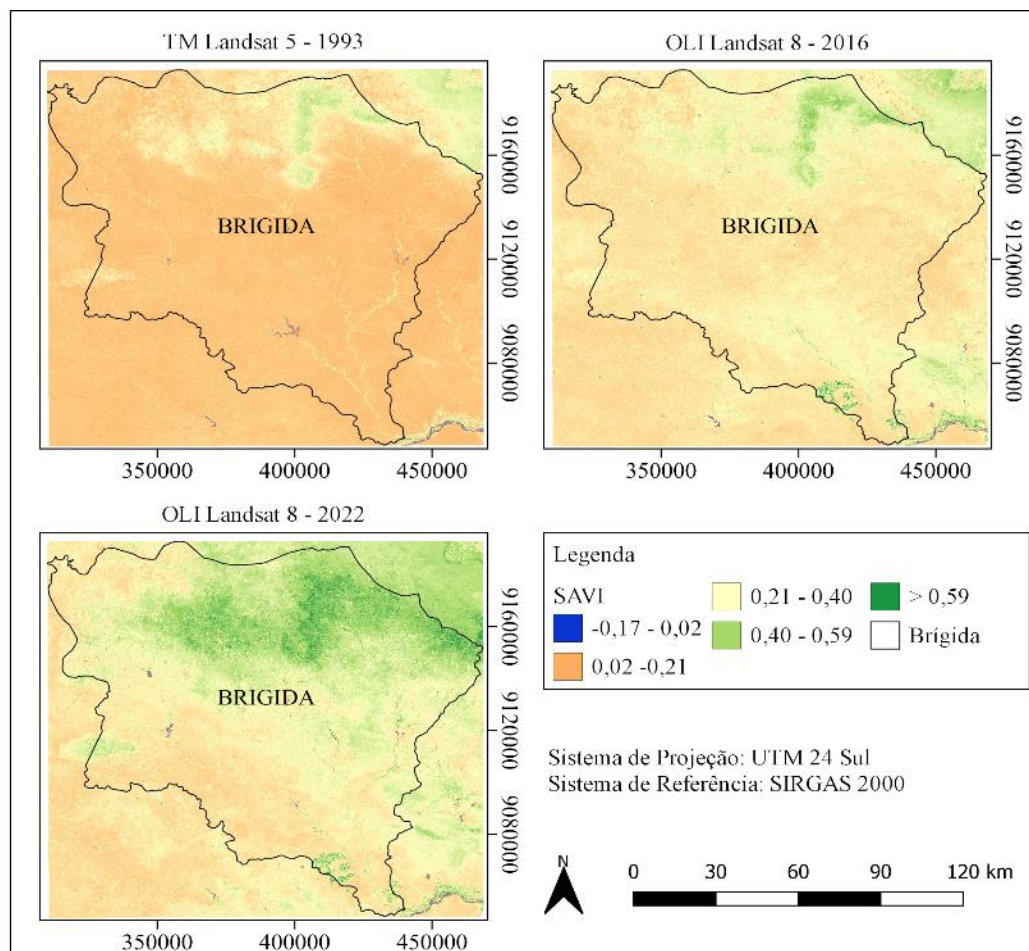


Figura 5 - SAVI para bacia do Rio Brígida nos anos de 1993, 2016 e 2022.

Os resultados apontaram para uma melhora na saúde vegetativa da área para o ano de 2016, identificada pelo aumento do valor do SAVI, apresentando valores predominantemente entre 0,21 a 0,40. Nesse ano, é possível a observação de áreas com vegetação mais densa, na porção nordeste e sudeste da bacia, caracterizadas por valores do índice entre 0,40 a 0,59, identificadas pela coloração verde. A melhora na saúde vegetativa da região, para esse ano de análise, é justificada pelo aumento da precipitação pluviométrica no período de estudo, para o ano de 1993, nos meses anteriores a análise, foi registrado uma precipitação total de 148,30 mm, precedida por períodos de seca extrema. Com relação ao ano de 2016, o valor total precipitado nos meses anteriores,

janeiro a julho de 2016, foi de 155,60 mm, precedido por anos com maior índice pluviométrico. A análise do SAVI para o ano de 2022, apresentou uma melhora significativa na saúde vegetativa da região, com valores do índice entre 0,40 a 0,59, e aumento de áreas demarcadas pela presença de vegetação mais densa, caracterizadas por SAVI superior a 0,59, na porção nordeste da bacia. A análise dos dados estatísticos do índice consta na Tabela 2, e é possível observar que ocorreu aumento do valor máximo e médio do índice ao longo dos anos estudados, corroborando com os resultados obtidos na análise da carta georreferenciada.

Tabela 2 - Dados estatísticos do SAVI da superfície para bacia do Rio Brígida nos anos de 1993, 2016 e 2022.

Imagem	Máximo	Médio	Mínimo	Desvio padrão
11/08/1993	0,593	0,112	-0,129	0,061
10/08/2016	0,694	0,189	-0,232	0,065
11/08/2022	0,696	0,241	-0,320	0,109

Áreas com vegetação e áreas com corpos hídricos refletem a radiação solar incidente de forma diversificada, a aplicação do albedo permite denotar a variabilidade que feições naturais que apresentam com relação à quantidade de energia refletida. A variação espacial e temporal do albedo para os anos de análise é observada na Figura 6. Conforme Angelini et al. (2015), são detectados maiores valores de albedo em áreas construídas ou de solo exposto, pois áreas com vegetação e corpos hídricos apresentam menores valores de albedo. Nos anos de 1993 e 2016, são identificadas áreas com maior percentual refletivo, indicadas por valores de albedo entre 25% e 29%, identificada pela coloração laranja, e entre 16% e 20%, denotada pela coloração amarela, respectivamente, caracterizando áreas de solo exposto. Para o ano de 2022, é possível evidenciar a redução no valor do albedo para a região, entre 7% e 16%, demarcada pela coloração azul claro, indicando maior percentual

vegetativo nesse período, corroborando com o resultado evidenciado pela análise do EVI e do SAVI. A água tem maior capacidade de absorção da energia incidente, dessa forma, nas porções em que há a presença de corpos hídricos são observados valores de albedo mais baixo, para o ano de 2022, entre 3% e 7%, e para os anos de 1993 e 2016, entre 3% e 11%.

Evidenciou-se que houve redução do valor mínimo de albedo entre os anos, conforme Tabela 3. Para o ano de 1993, o valor mínimo registrado foi de 2,6%, para o ano de 2016, foi de 2,1%, e para o ano de 2022, foi de 1,9%. A redução no valor do albedo ocorreu devido a um aumento no suprimento hídrico da região, gerando um maior aporte hídrico nos corpos d'água inseridos na bacia hidrográfica do Rio Brígida. Essa redução do albedo também é observada no valor médio. Para o ano de 1993, o valor médio calculado foi de 13,2%, e para 2022, foi de 10,9%.

Tabela 3 - Dados estatísticos do albedo da superfície para bacia do Rio Brígida nos anos 1993,2016 e 2022.

Imagem	Máximo	Médio	Mínimo	Desvio padrão
11/08/1993	0,427	0,132	0,026	0,044
10/08/2016	0,746	0,142	0,021	0,048
11/08/2022	0,675	0,109	0,019	0,026

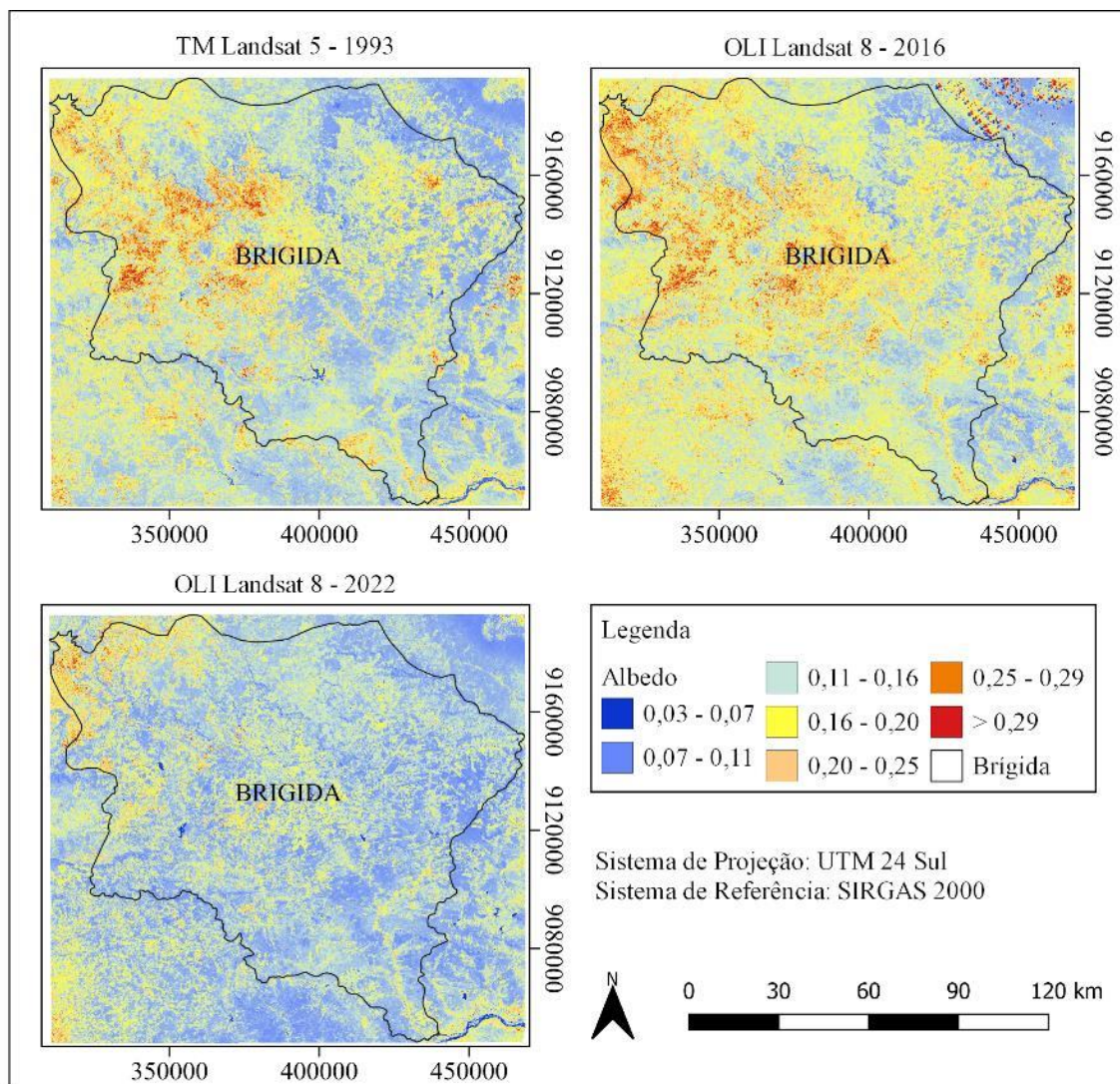


Figura 6 - Albedo para bacia do Rio Brígida nos anos de 1993, 2016 e 2022.

Para a análise detalhada do suprimento hídrico da área de estudo, aplicou-se o NDWI, esse índice permite ressaltar feições de água e minimizar o restante dos alvos (Figura 7). O NDWI apresenta valores entre -1,0 a 1,0, conforme Brenner e Guasselli (2015), os valores positivos de NDWI ($>0,0$) correspondem aos corpos hídricos, ressaltando a presença de fluxo e massa d'água, e os valores negativos referem-se às demais áreas vegetativas.

No ano de 1993 são observados valores de NDWI entre -0,32 e -0,16, identificados pela coloração avermelhada. A porção nordeste demarcada por valores mais elevados de SAVI, indicativos de maior densidade vegetativa, apresenta os menores valores de NDWI, entre -0,55 a -0,32, corroborando com o resultado previamente obtido nas cartas georreferenciadas. Para o ano de 2016, os valores do índice estão entre -0,55 e -0,08, indicando maior teor vegetativo no período. O ano de 2022 apresentou os menores valores de NDWI nas áreas com vegetação, com predominância de áreas com coloração vermelha, classificados pela classe de -0,55 a -0,32, confirmando

o resultado de aumento das áreas com vegetação obtido pelo estudo da carta georreferenciada do SAVI.

Considerando que os corpos hídricos da região são identificados por áreas com maiores valores de NDWI, é possível denotar que existem cinco principais corpos hídricos na bacia estudada, o reservatório de Algodões, em Ouricuri, o reservatório de Lagoa do Barro, em Araripina, e três corpos hídricos localizados em afluentes do Rio Brígida, conforme dados obtidos na APAC (2023), Figura 8. O NDWI identifica as áreas com corpos d'água, pela presença de valores mais elevados do índice, caracterizados pela coloração azul. Para o ano de 1993, é possível a visualização de apenas três corpos hídricos, sendo dois afluentes do Rio Brígida e o reservatório de Algodões, identificados por valores de NDWI superiores a 0,39. No ano de 2016 l visualiza-se apenas um corpo hídrico, localizado em um afluente do Rio São Francisco, a redução na quantidade de corpos hídricos observada, ocorre devido ao aporte hídrico nos corpos d'água para a data de análise.

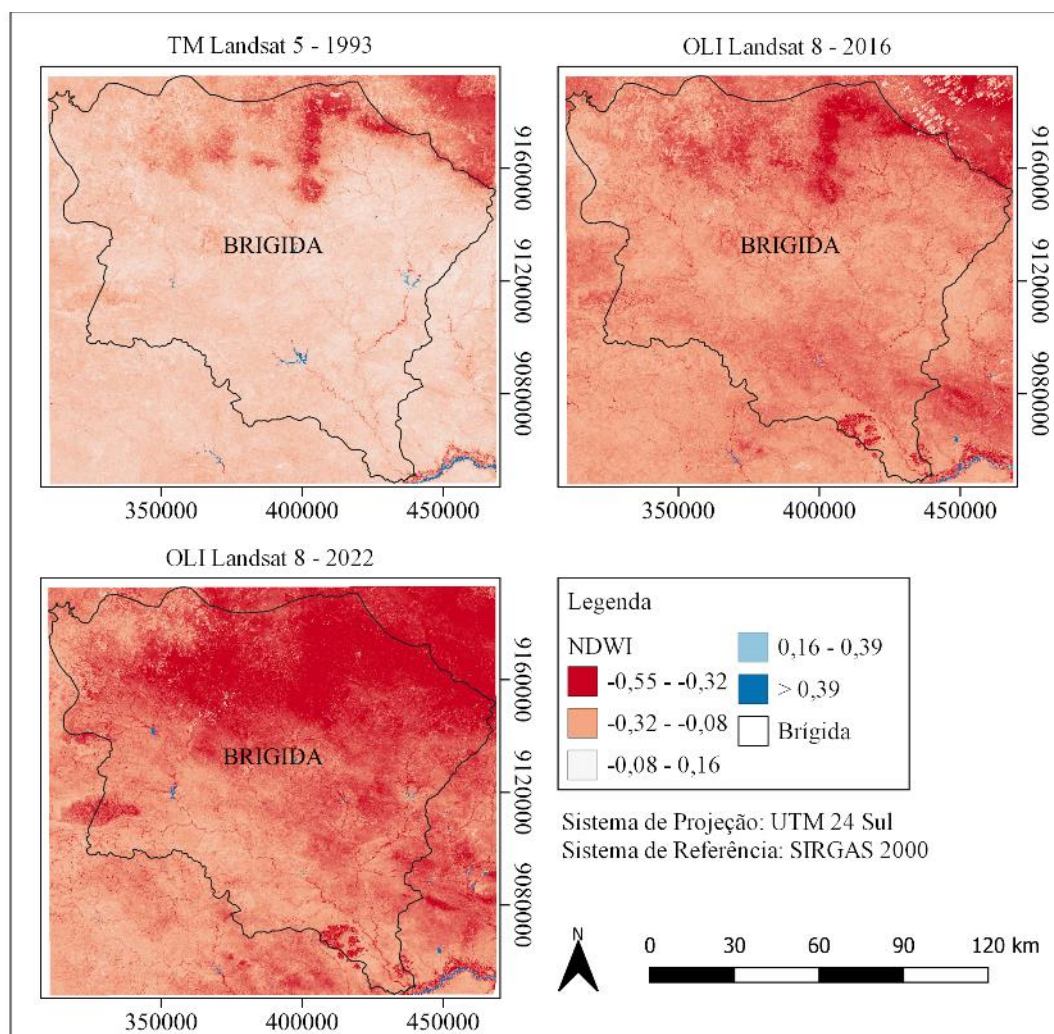


Figura 7 - NDWI para bacia do Rio Brígida nos anos de 1993, 2016 e 2022.

Considerando que no ano de 2022 houve maior índice pluviométrico, tanto para a data de análise quanto para os anos imediatamente anteriores, nesse período visualiza-se todos os corpos hídricos da área de estudo. O aumento no valor do NDWI nos anos de estudo também é denotado na análise dos valores

estatísticos do índice (Tabela 4), evidenciou-se que houve aumento nos valores máximos e mínimos dos índices para os anos de 2016 e 2022 em comparação com o ano de 1993.

Tabela 4 - Dados estatísticos do NDWI da superfície para bacia do Rio Brígida nos anos 1993, 2016 e 2022.

Imagem	Máximo	Médio	Mínimo	Desvio padrão
11/08/1993	0,493	-0,244	-0,686	0,085
10/08/2016	0,788	-0,361	-0,726	0,077
11/08/2022	0,881	-0,413	-0,784	0,115

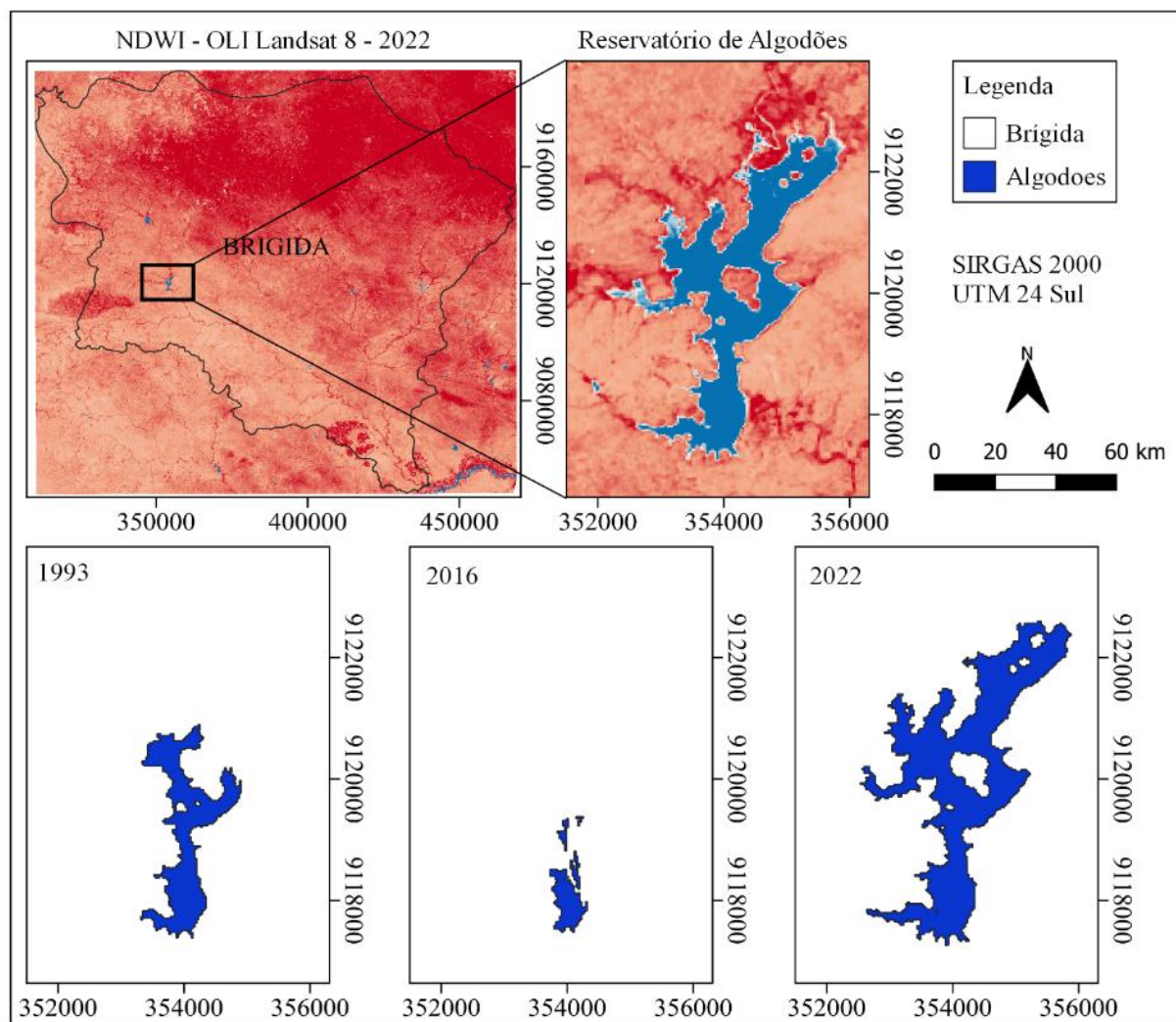


Figura 9 - Área superficial do Reservatório de Algodões nos anos de 1993, 2016 e 2022.

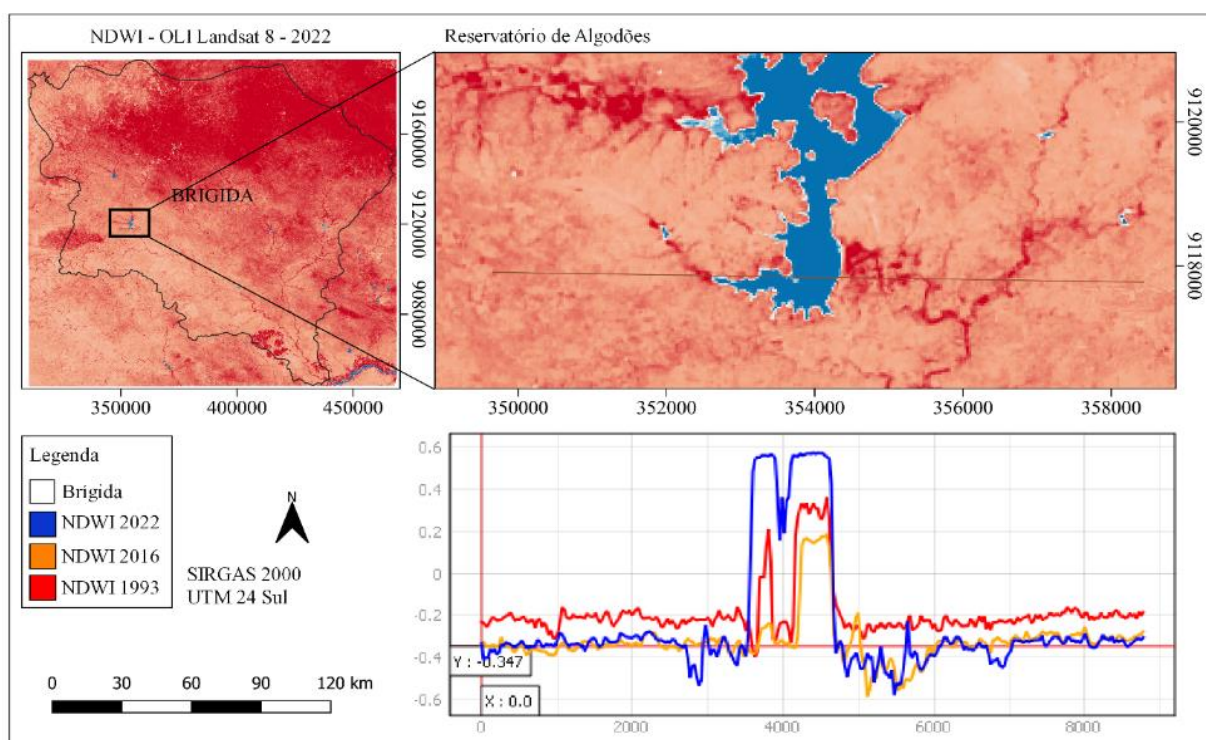


Figura 10 - Perfil do NDWI no Reservatório de Algodões nos anos de 1993, 2016 e 2022.

Comparativamente, traçou-se o perfil do SAVI para a área do reservatório com a finalidade de avaliar a variação do valor do índice entre as áreas com cobertura vegetal e a região do corpo hídrico, Figura 11. Corroborando com os resultados denotados no perfil do NDWI, são evidenciados valores elevados de SAVI nas áreas com cobertura vegetal. Conforme Bacalhau et al. (2017), a área do entorno do Reservatório de Algodões é coberta majoritariamente por vegetação esparsa.

No ano de 1993 são denotados os menores valores de SAVI, nos anos de 2016 e 2022 evidenciou-se um aumento no valor do índice, nesses anos é possível visualizar a presença de áreas com vegetação mais densa, caracterizadas valores de SAVI mais elevados, entre 0,2 a 0,4. Na região do corpo hídrico são observados valores de SAVI negativos em todos os anos. Ao analisar o albedo na região do Reservatório de Algodões, é possível visualizar a variabilidade da vegetação no seu entorno (Figura 12).

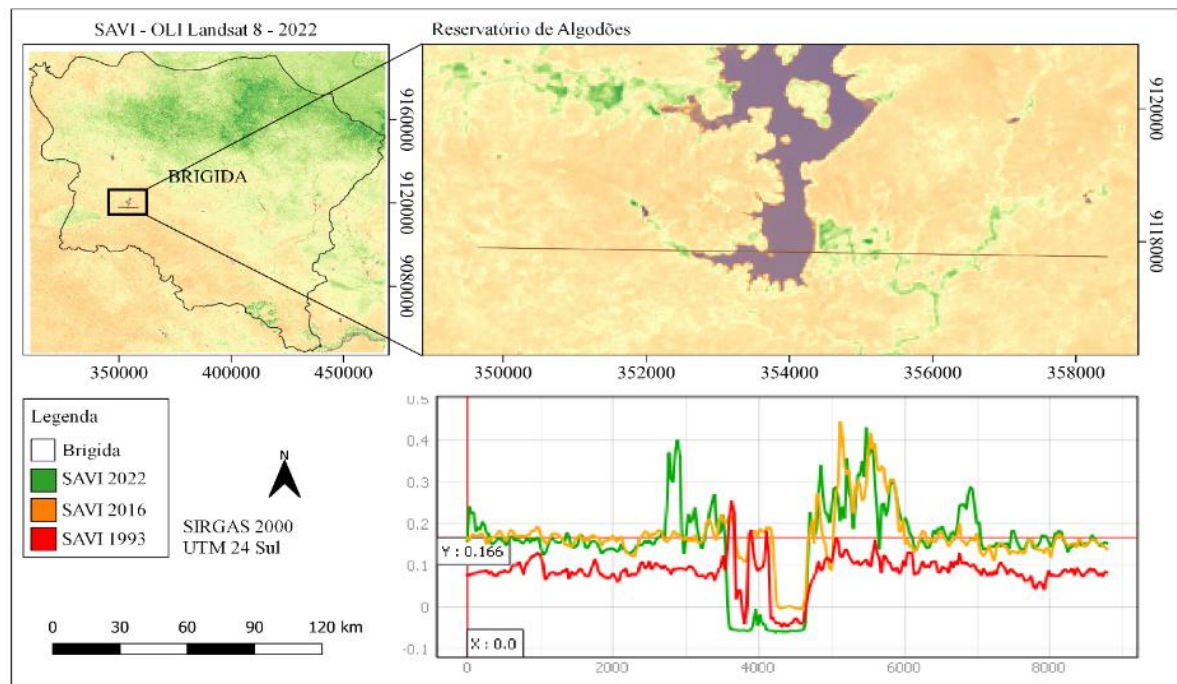


Figura 11 - Perfil do SAVI no Reservatório de Algodões nos anos de 1993, 2016 e 2022

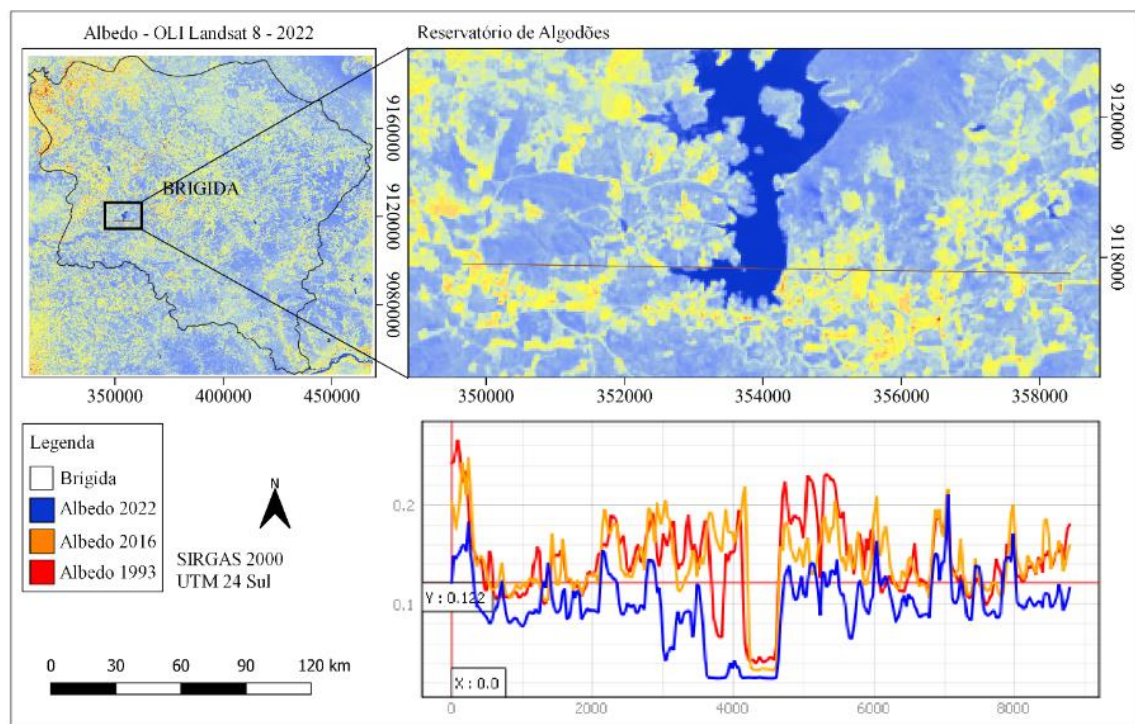


Figura 12 - Perfil do albedo no Reservatório de Algodões nos anos de 1993, 2016 e 2022.

Nos perfis do NDWI e SAVI observou-se uma constância no valor dos índices na região, com variação apenas para áreas com presença de água, porém com relação ao albedo evidenciou-se que não há constância no valor observado nas áreas com cobertura vegetal, devido à variação da densidade da vegetação. Na região do corpo hídrico são denotados valores baixos de albedo, na área com presença de água o albedo apresenta maior constância dos valores, devido à baixa refletividade de energia pela água. Entretanto, evidenciou-se o aumento do albedo no reservatório nos anos de 1993 e 2016, em comparação com o ano de 2022, devido ao menor aporte hídrico do corpo d'água nos anos caracterizados pela seca.

Ficou evidente que a precipitação tem influência direta nos níveis dos reservatórios da região, mas pôde-se observar também que a variação da disponibilidade hídrica afeta, a longo prazo, a distribuição da vegetação, o que consequentemente faz com que a refletância de energia aumente. Além disso, a vegetação da Caatinga, adaptada ao clima seco, funciona como um dissipador de energia, amenizando os efeitos do calor mesmo após a redução da pluviosidade, nos anos de seca intensa.

A variabilidade da precipitação pluviométrica nos anos de estudo ocasionou variação na cobertura vegetal da região e no aporte hídrico dos reservatórios localizados na bacia hidrográfica do Rio Brígida, afetando, assim, a quantidade de energia refletida por essa área. É evidente que as secas geram enormes impactos econômicos, sociais e ambientais para a população residente nos municípios da região e que a vulnerabilidade dessa população depende da resiliência adaptativa da vegetação da Caatinga.

4. Conclusão

O presente estudo aponta para a necessidade da preservação e manejo adequado da vegetação da Caatinga na Região do Sertão Pernambucano, associando a disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica do Rio Brígida, como medida preventiva frente aos impactos que serão gerados pelas mudanças climáticas. A vegetação da Caatinga tem um grande potencial de regulação da temperatura ambiente e elevada capacidade adaptativa aos períodos secos. Os índices EVI e SAVI são importantes para monitorar a extensão dessa vegetação nas áreas de sertão, auxiliando o processo de monitoramento e preservação desse bioma, associado ao processo de governança local, esses índices podem fornecer excelentes indicadores da vulnerabilidade climática regional. Já o NDWI, como indicador de disponibilidade hídrica, foi importante para monitorar os níveis dos reservatórios locais, sendo que, associado ao albedo, possibilitou o entendimento mais abrangente do balanço energético local, melhorando o

entendimento de como a baixa pluviosidade afeta a interface solo-vegetação-atmosfera. Mais estudos devem ser considerados para avaliar a transferência de calor e água na atmosfera da região, estudando principalmente as dinâmicas de evapotranspiração no regime hidrológico da bacia hidrográfica do Rio Brígida.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FACEPE pela bolsa de Doutorado (IBPG-1657-3.01/21) e ao CNPq pela bolsa de Doutorado (140017/2020-8). Agradecem também à Universidade Federal de Pernambuco - UFPE e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC – UFPE.

Referências

- Allen, R. G., Trezza, R., Tasumi, M., 2002. Surface energy balance algorithms for land. Advance training and user's manual, version 1.0, 98p.
- Angelini, L. P., Fausto, M. A., Mützenber, D. M. S., Danielle Christine Stenner Nassarden, D. C. S., Danelichen, V. H. M., Marques, H. O., Machado, N. G., Nogueira, J. S., Biudes, M. S., 2015. Relação entre albedo e temperatura da superfície estimados por sensoriamento remoto na área urbana de Cuiabá, Mato Grosso. In Anais... XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR/INPE, João Pessoa-PB, Brasil.
- APAC - Agência Pernambucana de Águas e Climas. Bacia do Rio Brígida, 2023a. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/bacias-hidrograficas-rio-brigida/161-bacias-hidrograficas-rio-brigida/25-bacia-do-rio-brigida>. Acesso em: 18/08/2023.
- APAC - Agência Pernambucana de Águas e Climas. Monitoramento pluviométrico, 2023b. Disponível em: <http://old.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php>. Acesso em: 16/08/2023.
- Bacalhau, J. R., Ribeiro Neto, A., 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.
- Bastiaanssen, W. G. S., 2000. Based sensible and latent heat fluxes in irrigated Gedi Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, v. 229, p. 87100.
- Birkmann, J., Jamshed, A., Mcmillan, J. M., Feldmeyer, D., Totin, E., Solecki, W., Ibrahim, Z. Z., Roberts, D., Kerr, R. B., Poertner, H. O., Pelling, M., Djalante, R., Garschagen, M., Leal Filho, W., Guha-Sapir, D., Alegría, A., 2022. Understanding human vulnerability to climate change: a global perspective on index validation

- for adaptation planning. *Science of the Total Environment*, v. 803, p.150065.
- Boratto, I. M., Gomide, R. L., 2013. Aplicação dos índices de vegetação NDVI, SAVI e IAF na caracterização da cobertura vegetativa da região Norte de Minas Gerais. In *Anais... Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 16, Foz do Iguaçu. São José dos Campos: INPE, p. 7345-7352.
- Brenner, V. C., Guasselli, L. A., 2015. Índice de diferença normalizada da água (NDWI) para identificação de meandros ativos no leito do canal do rio Gravataí/RS – Brasil. In *Anais... XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, João Pessoa-PB, Brasil, p. 3693-3699.
- Cui, L., Shi, J., 2021. Evaluation and comparison of growing season metrics in arid and semiarid areas of northern China under climate change. *Ecological Indicators*, v. 121, p. 107055.
- Cunha, J., Nóbrega, R. L. B., Rufino, I., Erasmi, S., Galvão, C., Valente, F., 2020. Surface albedo as a proxy for land-cover clearing in seasonally dry forests: evidence from the Brazilian Caatinga. *Remote Sensing Environment*, v. 238, 111250.
- Galvêncio, J. D., Sá, I. I. S., Moura, M. S. B., Ribeiro, J. G., 2007. Determinação das características físicas, climáticas e da paisagem da Bacia Hidrográfica do Rio Brígida com o auxílio de técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto. *Revista de Geografia*, v. 24, 293-306.
- Google Earth Engine. Editor de códigos, 2023. Disponível em: <https://code.earthengine.google.com/>. Acesso em: 18/08/2023.
- Huete, A. R., 1988. A Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25, 295-309. [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- Jabal, Z. K., Khayyun, T. S., Alwan, I. A., 2022. Impact of climate change on crops productivity using MODIS-NDVI time series. *Civil Engineering Journal*, 8, 1136-1156.
- Lima, J. R., Magalhães, A. R., 2018. Secas no Nordeste: registros históricos das catástrofes econômicas e humanas do século 16 ao século 21. *Parcerias Estratégicas*, 3, 191-212.
- Mcfeeters, S. K., 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, v. 17, 1425 - 1432.
- Silva, B. B., Braga, A. C., Braga, C. C., Oliveira, L. M. M., Montenegro, S. M. G. L., Barbosa Júnior, 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.
- Souza, C. M., Shimbo, Z., Rosa, J., Parente, M. R., Alencar, A., Rudorff, B. F. T., Hasenack, H., Matsumoto, M. G., Ferreira, L., Souza-Filho, P. W. M., Oliveira, S. W., Rocha, W. F., Fonseca, A. V., Marques, C. B., Diniz, C. G., Costa, D., Monteiro, D., Rosa, E. R., Vélez-Martin, E., Azevedo, T., 2020. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with Landsat archive and earth engine. *Remote Sensing*, v. 12, 2735.
- USGS - United States Geological Survey. Landsat Enhanced Vegetation Index. 2023. Disponível em: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-enhanced-vegetation-index#:~:text=Landsat%20Enhanced%20Vegetation%20Index%20>. Acesso em: 22/08/2023.
- Zhou, D., Xiao, J., Bonafoni, S., Berger, C., Deilami, K., Zhou, Y., Frolking, S., Yao, R., Qiao, Z., Sobrino, J. A., 2019. Satellite remote sensing of surface urban heat islands: progress, challenges, and perspectives. *Remote Sensing*, 11, 48.
- Zhumanova, M., Mönnig, C., Hergarten, C., Darr, D., Wrage-Mönnig, N., 2018. Assessment of vegetation degradation in mountainous pastures of the Western Tien-Shan, Kyrgyzstan, using e MODIS NDVI. *Ecological indicators*, 95, 527-543.