

## MONITORAMENTO MENSAL DE RESERVATÓRIOS HÍDRICOS SUPERFICIAIS DO ESTADO DO PIAUÍ (BRASIL) UTILIZANDO IMAGENS DE SATÉLITE E COMPUTAÇÃO EM NUVEM (2015 – 2021)

Reurysson Chagas de Sousa Morais

Instituto Federal do Piauí – IFPI

Programa de Pós-Graduação em Análise e Planejamento Espacial

Programa de Pós-Graduação em Geoprocessamento: fundamentos e aplicações, Teresina, PI, Brasil

[reurysson@ifpi.edu.br](mailto:reurysson@ifpi.edu.br)

### RESUMO

O objetivo deste trabalho foi monitorar a variação da extensão superficial da água de oito reservatórios do estado do Piauí, Brasil, e avaliar a influência da precipitação sobre elas. O monitoramento mensal foi executado no período de 2015 e 2021 com base no *Modified Normalized Difference Water Index* (MNDWI), gerado com imagens do satélite Sentinel-2, sensor *MultiSpectral Instrument* (MSI), utilizando o *Google Earth Engine*. A associação entre a extensão superficial da água e precipitação foi avaliada com base na matriz de correlação. Os resultados indicam que a Lagoa do Portinho e barragem de Bocaina vêm em processo de recuperação do volume armazenado refletindo no aumento da extensão da superfície da água, oposto do observado na Lagoa de Parnaíba. Considerando todos os reservatórios, observou-se fraca correlação negativa entre os parâmetros analisados. Contudo, dados da Lagoa do Portinho e barragens Mesas de Pedra, Jenipapo e Algodões II demonstraram correlação positiva moderada entre a extensão superficial da água e as precipitações registradas nos meses anteriores. Os dados sugerem que outros fatores possam estar interferindo dos estoques hídricos, como as modificações na cobertura e uso da terra, derivações clandestinas, bem como as contribuições de águas subterrâneas.

**Palavras-chave:** Google Earth Engine. Índice de água. Recurso Hídricos. Sentinel-2.

### MONTHLY MONITORING OF SURFACE WATER RESERVOIRS IN THE STATE OF PIAUÍ (BRAZIL) USING SATELLITE IMAGES AND CLOUD COMPUTING (2015 – 2021)

### ABSTRACT

The objective of this work was to monitor the variation of the surface water extension of eight reservoirs in the state of Piauí, Brazil, and to evaluate the influence of precipitation on them. Monthly monitoring was carried out between 2015 and 2021 based on the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI), generated with images from the Sentinel-2 satellite, MultiSpectral Instrument (MSI) sensor, using Google Earth Engine. The association between surface water extension and precipitation was evaluated based on the correlation matrix. The results indicate that Lagoa do Portinho and the dam of Bocaina are in the process of recovering the stored volume, reflecting an increase in the extension of the water surface, opposite to what was observed in Lagoa de Parnaíba. Considering all reservoirs, a weak negative correlation was observed between the analyzed parameters. However, data from Lagoa do Portinho and Mesas de Pedra, Jenipapo and Algodões II dams showed a moderate positive correlation between surface water extension and rainfall recorded in previous months. The data suggest that other factors may be interfering with water stocks, such as changes in land cover and use, clandestine derivations, as well as groundwater contributions.

**Keywords:** Google Earth Engine. Water index. Water Resource. Sentinel-2.

### INTRODUÇÃO

O Brasil possui grande disponibilidade hídrica, tanto superficial quanto subterrânea, que o coloca em situação privilegiada frente aos demais países do mundo. No entanto, a distribuição dos estoques hídricos é bastante desigual em relação à densidade populacional (ANA, 2021), reflexo da variabilidade de condicionante geoambientais.

A região Nordeste do Brasil se apresenta como a mais crítica em termos de disponibilidade hídrica. As secas são recorrentes nessa região e suas causas já foram bastante discutidas e envolvem fenômenos climáticos de escala global, regional e local (MAGALHÃES, 2016).

Uma solução governamental que vem sendo adotado para enfrentamento da crise hídrica no Nordeste é a implantação de açudes, barragens e perfuração de poços, uma estratégia reativa na visão de

Magalhães (2016), mas que contribuiu para a formação de uma infraestrutura hídrica básica na região (BURITI; BARBOSA, 2018), embora subutilizada, a exemplo do que ocorre no estado do Piauí onde a ausência de adutoras limita o acesso aos estoques hídricos.

Por estar em contato direto com a atmosfera, o armazenamento superficial pode ser bastante variável em função da atuação das condições climáticas. Marengo *et al.* (2018) analisaram as características climáticas da seca recente ocorrida no Nordeste (2010 a 2016) e concluíram que ela pode ter afetado os níveis dos reservatórios da região resultando numa crise real de abastecimento. Isso reforça a necessidade de monitoramento constantes da quantidade e qualidade da água armazenada nesses reservatórios.

A dinâmica dos reservatórios superficiais, sejam eles naturais ou artificiais, não respondem exclusivamente às variações de dados meteorológicos, visto que ela também reflete fatores locais como o tipo de uso e ocupação das terras, o próprio uso da água e condições geológicas. Assim sendo, programas de monitoramento dos estoques hídricos comumente são apoiados por dados climáticos, bem como por dados hidrológicos de cota, volume e vazão de reservatórios e, mais recentemente, por dados derivados de sensoriamento remoto. Hou *et al.* (2022) integraram todos esses dados de campo e imagens de satélite para criação de modelo que permitiu reconstruir o armazenamento mensal de água para 6.695 reservatórios em todo o mundo para o período de 1984 a 2015 e avaliar as alterações nos estoques hídricos.

Em escala local, Ghansah *et al.* (2022) utilizaram imagens Sentinel-2 para o monitoramento de pequenos reservatórios da Região do Alto Leste em Gana durante cinco estações secas observadas entre os anos de 2015 e 2020. Além de indicar a capacidade dos reservatórios de manutenção de águas até o final da estação seca, também demonstraram a capacidade do sensoriamento remoto como ferramenta de monitoramento hídrico.

Diante disso, observa-se que os avanços recentes na área de sensoriamento remoto permitem o desenvolvimento de técnicas de monitoramento dos estoques dos reservatórios superficiais. Gao *et al.* (2016) apresentam algumas dessas técnicas de quantificação do volume de água armazenadas em lagos e reservatórios a partir de dados de área superficial e elevação detectados remotamente, partindo do pressuposto de que a forma da bacia do corpo d'água é conhecida. No entanto, as limitações apresentadas pelos satélites, como a baixa resolução espacial e temporal, limita a aplicação dessas técnicas em corpos d'água de pequenas dimensões, uma realidade comum no estado do Piauí.

Alternativamente o monitoramento dos estoques hídricos pode ser feito acompanhando as variações da extensão superficial da água dos reservatórios utilizando imagens de satélites. Gao *et al.* (2016) destacam que as estimativas de área de corpos d'água a partir de imagens de satélite podem ser realizadas a partir de três abordagens: definição de limites para bandas isoladas ou índices espectrais de água, classificação de imagens e abordagens híbridas que envolvem várias etapas de classificação.

Devido à simplicidade de formulação, os índices espectrais de água têm sido largamente utilizados para delimitar corpos d'água. Usando os mesmos princípios adotados para o cálculo do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI), McFeeters (1996) propôs o Índice de Água por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Water Index* - NDWI) para delinear automaticamente os corpos d'água a partir da relação obtidas entre as bandas do verde (green) e infravermelho (NIR) ( $NDWI = (green - NIR) / (green + NIR)$ ).

Xu (2006) observou que o NDWI não consegue remover completamente a influência da vegetação, do solo e de áreas construídas, e tende a superestimar a área de água. Diante disso, propôs a substituição da banda do infravermelho próximo para o infravermelho médio, criando o Índice da Diferença de Água Normalizada Modificado (*Modified Normalized Difference Water Index* - MNDWI).

Tanto o NDWI quanto o MNDWI têm sido largamente utilizados no monitoramento de corpos hídricos, nas mais diferentes regiões do mundo utilizando dados de diferentes sistemas sensores (KEYS e SCOTT, 2018; ASHTEKAR; MOHAMMED-ASLAM; MOOSVI, 2019; HUSSAIN e BANO, 2019; LI *et al.*, 2019). Um importante estudo comparativo da precisão dos índices de água pode ser consultado nos trabalhos de Gil, Padovani e Coelho (2019).

Apesar do esforço governamental e da disponibilidade de dados disponível, há uma quantidade enorme de reservatórios sem qualquer programa de monitoramento. No estado do Piauí, apenas 25 dos 39 mais importantes reservatórios estão cadastradas no Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR) da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Soma-se aos 14 reservatórios não

monitorados, dezenas de outros de pequeno porte que atendem a população em suas necessidades básicas e produtivas.

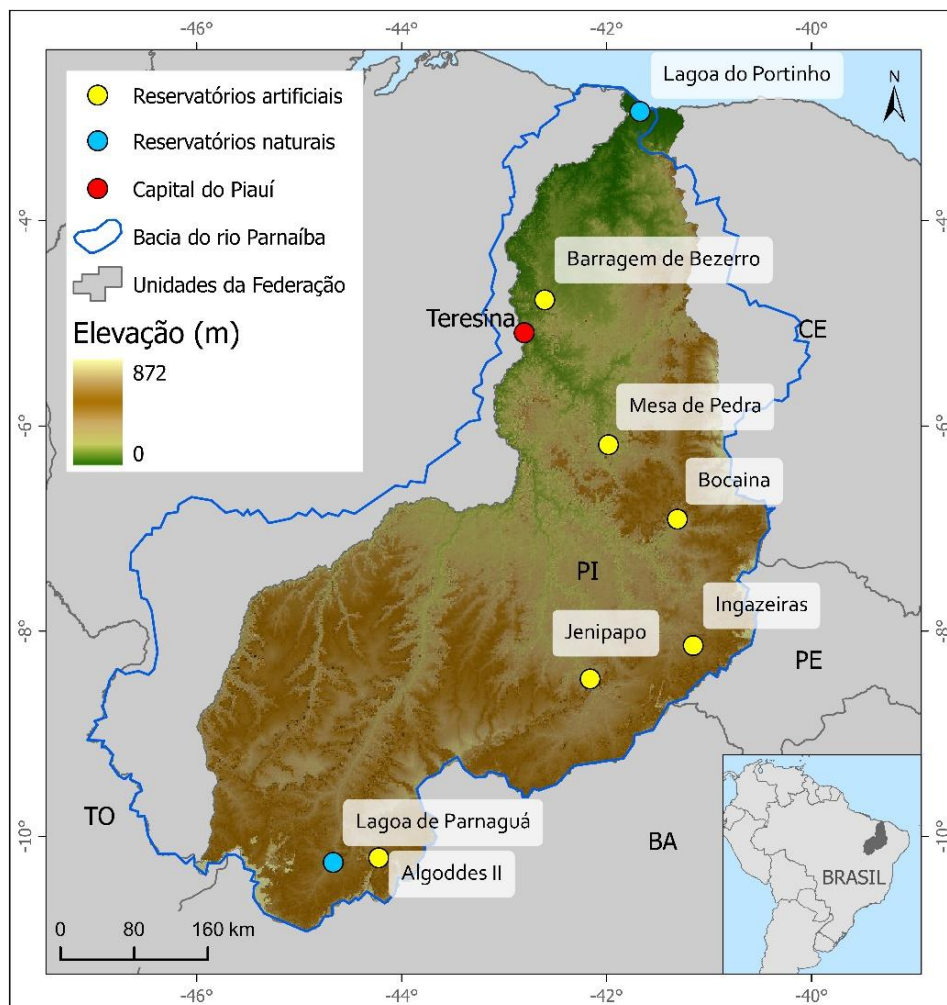
Diante disso, este trabalho objetivou monitorar as variações mensais de área da superfície de oito reservatórios hídricos do estado do Piauí, entre os anos de 2015 e 2021, utilizando índices de água calculados a partir do processamento em nuvem de imagens do satélite de resolução espacial moderadamente alta e avaliar a influência da variação da precipitação sobre esses estoques hídricos. Entende-se, portanto, que esse monitoramento pode contribuir para gestão dos recursos hídricos ao indicar tendências de redução/aumento do volume estocado e, conseqüentemente, risco de escassez hídrica.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Localização e caracterização da área de estudo

Para o monitoramento mensal dos reservatórios superficiais de água (naturais e artificiais) no estado do Piauí, foram selecionados oito reservatórios (Quadro 1) com histórico recente de problemas relacionados à seca noticiados pela mídia local (SANTIAGO, 2015; OLIVEIRA JÚNIOR, 2016; PEREIRA, 2016; SENA, 2017), exceto a barragem Mesa de Pedra, que não tem apresentado problema de escassez hídrica, mas que é estratégica para abastecimento das cidades de seu entorno (Figura 1). O monitoramento foi realizado para o período de novembro de 2015 a dezembro de 2021, definido em função da disponibilidade das imagens de satélites utilizadas – Satélites Sentinel 2A e 2B.

Figura 1 - Estado do Piauí: localização dos reservatórios superficiais monitorados e altimetria, 2022.



Fontes - ANA, 2017; IBGE, 2021; JAXA, 2021. Elaboração: autor, 2022.

O estado do Piauí está quase que integralmente inserido na bacia hidrográfica do rio Parnaíba (BHRP). Apresenta relevo predominantemente plano a suave ondulado, com ocorrência planaltos e chapadas delimitadas por escarpas dissecadas. Na região centro-norte ocorrem extensas superfícies aplainadas, já a faixa correspondente à Depressão Sertaneja se estende desde o extremo sul até região sudeste do estado (FERREIRA; DANTAS, 2010). Com exceção dos reservatórios Lagoa do Portinho e barragem do Bezerro e Mesa de Pedra, todos os demais estão localizados em áreas acima dos 230m de altitude e próximos às cabeceiras de drenagem dos principais rios do estado.

O Piauí encontra-se na região de transição entre o clima semiárido e sub-úmido úmido, segundo a classificação de Thornthwaite e Mather de 1955 (ANDRADE JÚNIOR *et al.*, 2005). Dos oito reservatórios monitorados, três (Bocaina, Ingazeiras e Jenipapo) ocorrem na região semiárida com precipitação na faixa dos 500 a 700 mm.ano<sup>-1</sup>. Apenas a barragem do Bezerro encontra-se na região de clima sub-úmido úmido com precipitação de 1500 a 1700 mm.ano<sup>-1</sup>, enquanto os demais se localizam na faixa de clima sub-úmido seco (precipitação entre 900 a 1100 mm.ano<sup>-1</sup>) (MORAIS e ABREU, 2021).

Os rios que alimentam os reservatórios são, em sua maioria, perenes, exceto aqueles localizado no semiárido e assentados sobre rochas cristalinas. Dos oito reservatórios, apenas quatro (Jenipapo, Ingazeiras, Algodões II e Bocaina) tem seu volume monitorado pelo Sistema de Acompanhamento de Reservatórios da Agência Nacional de Águas (ANA). A capacidade máxima de cada reservatório, bem com as demais características é apresentada no Quadro 1.

Quadro 1 - Características dos reservatórios superficiais monitorados no estado do Piauí.

Nome	Curso d'água	Município	Arcabouço geológico	Clima	Capacidade máxima (hm <sup>3</sup> )
Lagoa do Portinho	Rio Portinho	Parnaíba/Luís Correia	Sedimentar	Sub-úmido seco	20,00
Bezerro	desconhecido	Jose de Freitas	Sedimentar	Sub-úmido	10,00
Bocaina	Rio Guaribas	Bocaina	Sedimentar	Semiárido	106,00
Mesa de Pedra	Rio Sambito/Riacho cajueiro	Valença/Aroazes	Sedimentar	Sub-úmido seco	65,00
Ingazeiras	Riacho Canindé	Paulistana	Cristalino	Semiárido	25,72
Jenipapo	Rio Piauí	São João	Cristalino	Semiárido	248,00
Algodões II	Riacho Curimatá	Curimatá	Cristalino	Sub-úmido seco	247,00
Lagoa de Parnaguá	Rio Paraim	Parnaguá	Sedimentar	Sub-úmido seco	77,00

Fonte - ANA, 2022; ANDRADE JÚNIOR *et al.*, 2005; CEPRO, 2019; LIMA (2017).

### Base de dados e procedimentos de análise

No monitoramento dos corpos d'água foram utilizadas imagens do satélite Sentinel-2, sensor *MultiSpectral Instrument* (MSI), com nível de processamento 1C, que já se apresentam ortoretificadas e com valores de reflectância corrigidas para o Topo da Atmosfera (*Top Of Atmosphere* - TOA). A opção por essas imagens deu-se em função da maior disponibilidade de cenas para a área de estudo, quando comparada às imagens corrigidas para os efeitos da atmosfera (*Bottom Of Atmosphere* - BOA) (ESA, 2019).

Para a delimitação dos corpos d'água foi aplicado o MNDWI proposto por Xu (2006), com as adaptações para uso com imagens Sentinel-2 apresentadas por Yang *et al.* (2017). Estudos têm demonstrado a eficiência deste método para delimitação de grandes (N H, 2022) e pequenos corpos d'água (ÖZELKAN, 2020; ZHANG e LIU, 2022). Logo, a banda SWIR, original de 20 m de resolução espacial, foi reamostrada para 10 m. A equação utilizada é apresentada abaixo:

$$MNDWI_{10m} = \frac{\rho_3 - \rho_{11}^{10m}}{\rho_3 + \rho_{11}^{10m}} \quad (1)$$

onde  $\rho_3$  é a banda verde e  $\rho_{11}^{10m}$  é a banda do infravermelho médio reamostrada para 10m.

Antes da aplicação da equação do MNDWI, imagens TOA da coleção Sentinel-2 passaram pelas seguintes etapas:

- Aplicação de filtro de borda (tendo como referência um polígono envolvente dos reservatórios) para seleção apenas das imagens com recobrimento a área de estudo;
- Aplicação de filtro temporal para seleção apenas das imagens correspondentes ao período de análise: 11/2015 a 12/2021;
- Correção dos efeitos atmosféricos, com base no método SIAC desenvolvido por Yin *et al.* (2019);
- Recorte das imagens filtradas para os limites das áreas de interesses;
- Aplicação do filtro de nuvens adotando o limiar de 3% de cobertura de nuvens dentro da área de interesse.
- Criação de nova coleção de imagens mensais com base na mediana das imagens obtidas em cada mês.

A disponibilidade total de imagens para cada região de localização dos reservatórios é apresentada no Tabela 1. Observa-se, ainda, que após aplicação dos filtros, houve uma redução considerável das imagens com dados úteis para o cálculo do MNDWI. As demais, que não atendiam aos critérios, foram descartadas.

Tabela 1 - Quantitativo de imagens de satélite Sentinel-2 disponíveis no período de 11/2015 a 12/2021 para área dos reservatórios monitorados no estado do Piauí.

Reservatórios	Total de imagens	Imagens mensais		
		Total	Utilizadas	Descartadas
Lagoa do Portinho	155		42 (57%)	32 (43%)
Bezerro	111		37 (20%)	37 (50%)
Bocaina	247		43 (58%)	31 (42%)
Mesa de Pedra	118	74 (100%)	39 (53%)	35 (47%)
Ingazeiras	466		61 (82%)	13 (18%)
Jenipapo	279		52 (70%)	22 (30%)
Algodões II	169		54 (73%)	20 (27%)
Lagoa de Parnaquá	171		54 (73%)	20 (27%)

Elaboração - autor, 2022.

Após as etapas descritas, calculou-se o MNDWI mensal para cada reservatório. Para o cálculo de área dos reservatórios procedeu-se à delimitação dos corpos d'água onde foi adotado o limiar de 0,2 dos valores dos pixels das imagens MNDWI. Valores abaixo desse limite correspondem a solo, vegetação, nuvens e sombras. Adotou-se esse valor após sucessivos testes envolvendo os limiares 0, 0,1, 0,15, 0,2 e 0,25 aplicados em distintas áreas. Os valores mensais de área, obtidos por meio da função `ee.Image.pixelArea` do GEE, foram exportados em formato .csv e posteriormente analisados utilizando Jamovi, programa estatístico gratuito e de código aberto (THE JAMOVİ PROJECT, 2021).

De posse da coleção de imagens MNDWI obteve-se as áreas mínima, máxima e mediana ocupadas por cada reservatório, considerando todo o período de análise. Nesta fase, com o intuito de minimizar os efeitos da presença de nuvens no cálculo do índice, foram considerados os valores de percentis 0,05 e 0,95 como correspondentes das áreas mínima e máxima, respectivamente.

Para representação cartográfica das variações de área dos reservatórios, os dados *raster* foram exportados do GEE e manipulados no *software* ArcGIS Pro, versão 3.0 (ESRI - ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH, 2022), *software* devidamente licenciado pelo Campus Teresina Central do Instituto Federal do Piauí.

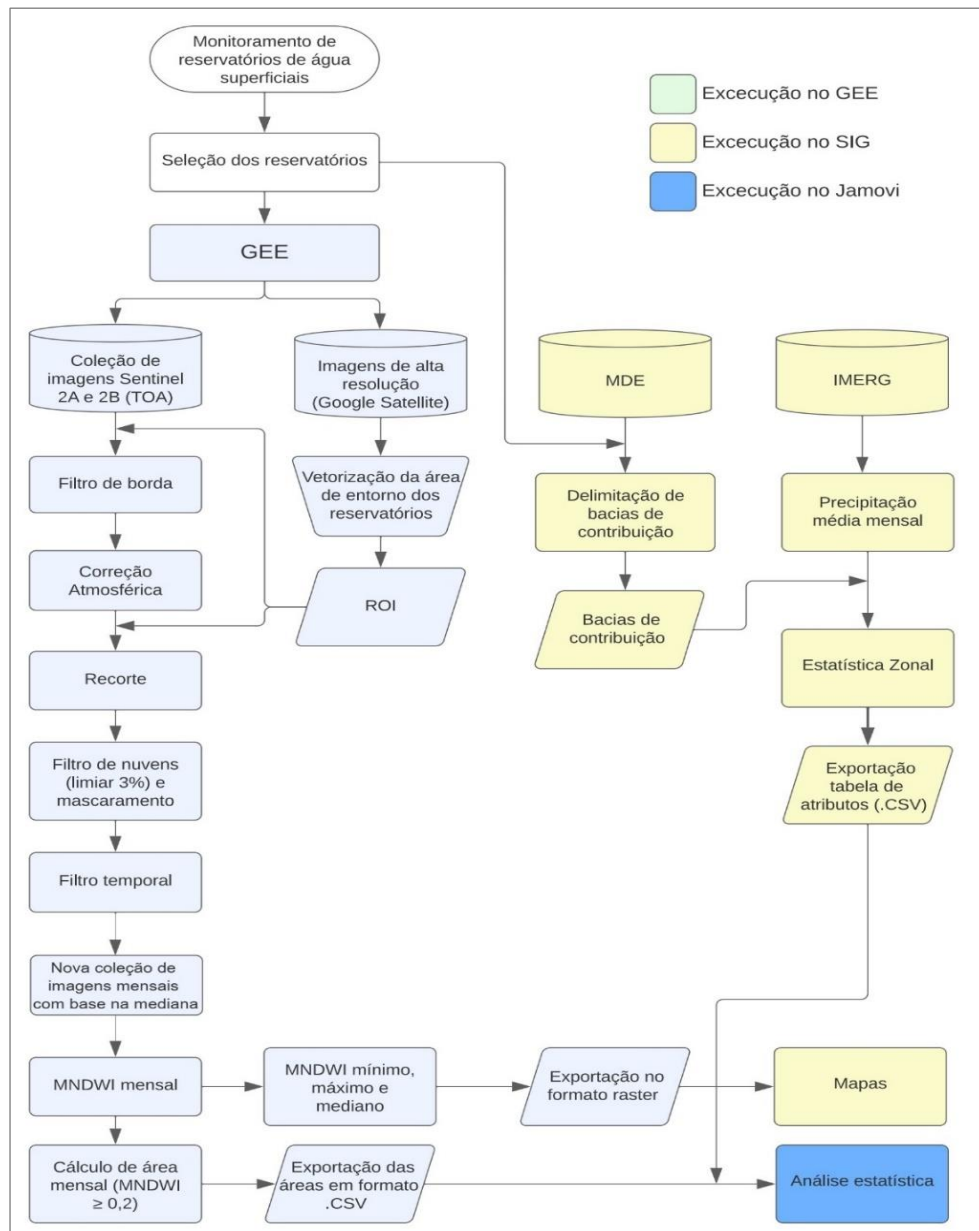
No ArcGIS Pro foi criado um modelo de processo para conversão das imagens MNDWI máxima, mínima e mediana em polígonos. Esse processo envolveu a delimitação dos reservatórios adotando-se o mesmo limiar de 0,2, seguido da aplicação de um filtro majoritário, conversão para polígono e reprojeção para o sistema de referência SIRGAS 2000.

De posse dos valores de áreas mensais dos reservatórios, foi calculada uma análise correlação de Spearman entre os valores de áreas e a precipitação média das bacias de contribuição dos reservatórios. Nesta etapa, foram utilizados dados de precipitação estimada por satélite derivado do algoritmo *The Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERGE)* disponibilizado pela plataforma Giovanni (HUFFMAN *et al.*, 2019), haja vista a inexistências de estações meteorológicas nas áreas das bacias.

Para a construção da matriz de correlação foram utilizados: (i) os valores médios mensais de precipitação; (ii) os valores médios mensais de precipitação com atraso (AT) de um a quatro meses (AT\_01 a AT\_04) na série histórica de precipitação em relação a data dos dados área; e (iii) as precipitações acumuladas (AC) e precipitação média mensais (M) considerando os dois, três e quatro meses anteriores (M\_02 a M\_04) a data dos dados de área.

A delimitação das bacias de contribuição de cada reservatório foi realizada com uso de Modelo Digital de Elevação *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*, processado em ambiente SIG, com uso da ferramenta gratuita TauDEM, versão 5.3.7 (TARBOTON, 1997). O fluxograma apresentado na Figura 2, sintetiza dos procedimentos metodológicos aplicados.

Figura 2 - Fluxograma metodológico adotado no monitoramento dos reservatórios do Piauí.



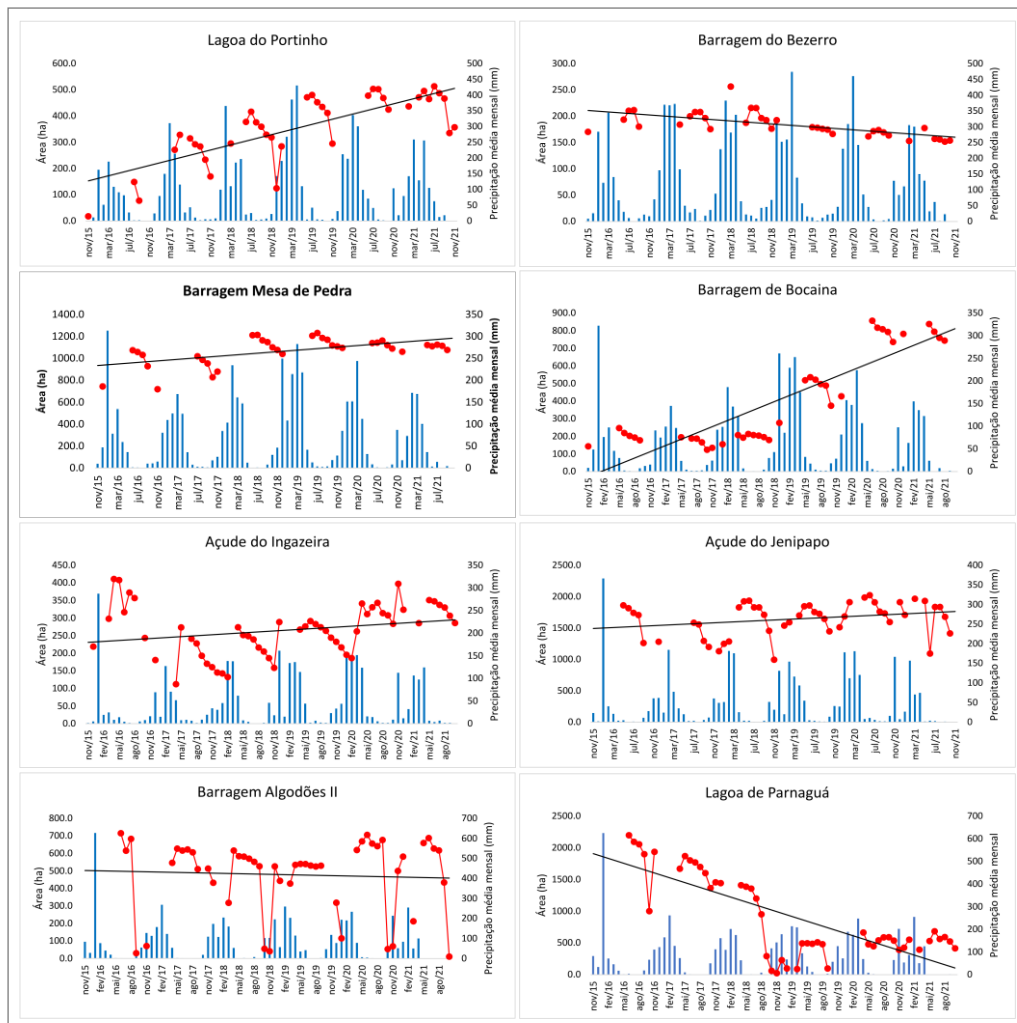
Elaboração - autor, 2022.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir das variações temporais da extensão superficial da água dos oito reservatórios (Figura 3), observa-se, de início, a ausência de dados em vários meses ao longo dos anos monitorados, sobretudo durante os períodos chuvosos, quando a cobertura de nuvens impede a obtenção de informação da superfície terrestre. Mesmo nos meses em que foi possível estimar as áreas há que se considerar uma variação de área de até 3% para mais ou para menos, visto ter sido essa a porcentagem de máxima cobertura de nuvens admitida durante a filtragem de imagens da coleção Sentinel-2.

Com base nas linhas de tendência (Figura 3) é possível observar que os reservatórios Lagoa do Portinho e Barragem de Bocaina vêm, desde 2015, quando apresentaram escassez hídrica severa, em franco processo de recuperação do volume armazenado. O oposto é observado na Lagoa de Parnaíba, que após as secas vivenciadas em 2018 e 2019 não tem conseguido recompor seu volume. Os demais reservatórios não apresentaram variações significativas nas áreas superficiais. Contudo, é possível perceber em todos os reservatórios a influência do período de estiagem sobre os estoques hídricos, marcado por um decréscimo da extensão da superfície hídrica sempre no segundo semestre. Destaca-se, contudo, a variabilidade observada na Barragem Algodões II, com vários meses com registro de área superficial próxima de zero hectare. Isso se deve a influência da presença de nuvem sobre o reservatório, que possui formato bastante estreito e alongado, e não representa a condição real.

Figura 3 - Estado do Piauí: Variação temporal da extensão superficial da água (ha) e tendência (linha preta) dos oito reservatórios superficiais monitorados no período de novembro de 2015 a dezembro de 2021.



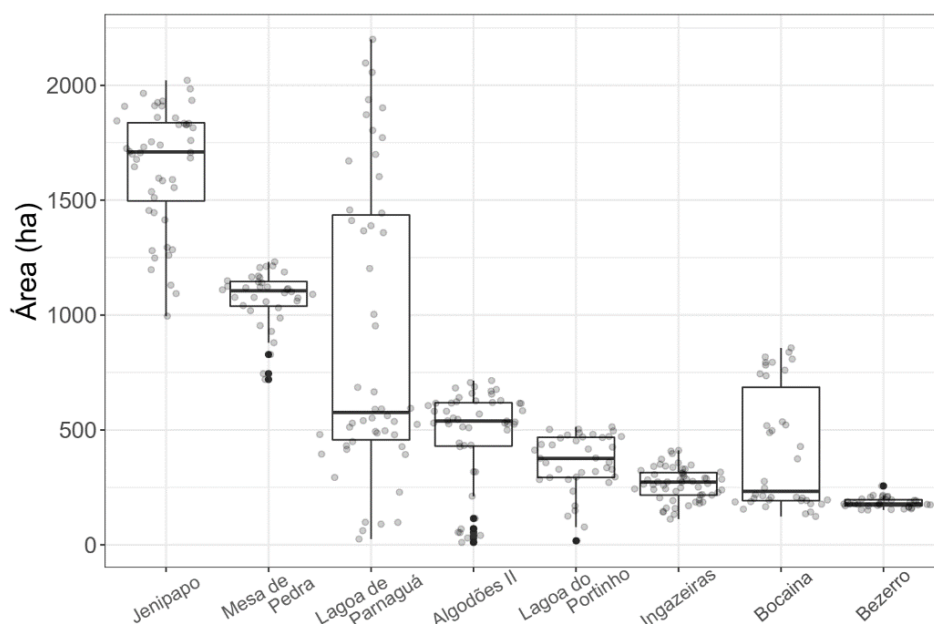
Elaboração - autor, 2022.

Observa-se, por meio de um gráfico box plots (Figura 4), que a Lagoa de Parnaíba foi a que apresentou a maior variabilidade de área superficial. Já tendo ocupado 2.200 ha, a Lagoa secou quase que

completamente nos anos 2018 e 2019. Isso mostra a importância de conservação desta que é a maior lagoa natural do estado do Piauí. As causas das variações da extensão superficial da lagoa de Parnaguá ainda não estão completamente elucidadas, contudo, Nascimento et al. (2018) apontam a conversão de vegetação nativa em pastagens e áreas agrícolas com a principal causa de degradação da bacia hidrográfica na qual lagoa está inserida.

Dentre os demais reservatórios, as barragens do Bezerro, Ingazeira e Mesa de Pedra apresentaram menores variações de área ao longo do período monitorado. Em destaque a Barragem do Jenipapo que, embora tenha apresentado variações expressivas sua área mínima, se manteve superior aos demais reservatórios. O sumário estatístico das áreas dos reservatórios monitorados é apresentado na Tabela 02.

Figura 4 - Box plots da área (ha) dos reservatórios superficiais monitorados no estado do Piauí no período de novembro de 2015 a dezembro de 2021.



Elaboração: autor, 2022.

Tabela 2 - Sumário estatístico dos valores de área dos reservatórios do estado do Piauí monitorados no período de novembro de 2015 a dezembro de 2021.

Reservatório	n	m	Em hectare (ha)							
			mín	P0.05	md.	P0.95	máx	IQR	méd.	SD
Barragem Algodões II	51	23	10.6	35.5	539	685	715	188	468	219
Barragem do Bezerro	35	39	125	154	178	216	256	26.6	184	22,6
Lagoa do Portinho	39	35	17.7	120	376	503	513	174	358	126
Barragem de Bocaina	38	35	124	142	233	821	857	493	403	264
Barragem Mesa de Pedra	36	38	720	807	1106	1212	1232	107	1072	123
Lagoa de Parnaguá	50	24	25.3	93.5	576	2003	2200	979	899	642
Barragem Jenipapo	48	26	996	1154	1709	1954	2022	340	1647	264
Barragem Ingazeiras	57	17	112	145	274	378	411	97.3	265	71,2

n: número de meses com dados; m: número de meses sem dados; mín e máx: área mínima e máxima, respectivamente; md: mediana; P0.05 e P0.95: percentis 0,5 e 0,95, nessa ordem; IQR: intervalo interquartil; méd.: média; SD: desvio padrão.

Elaboração: autor, 2022.

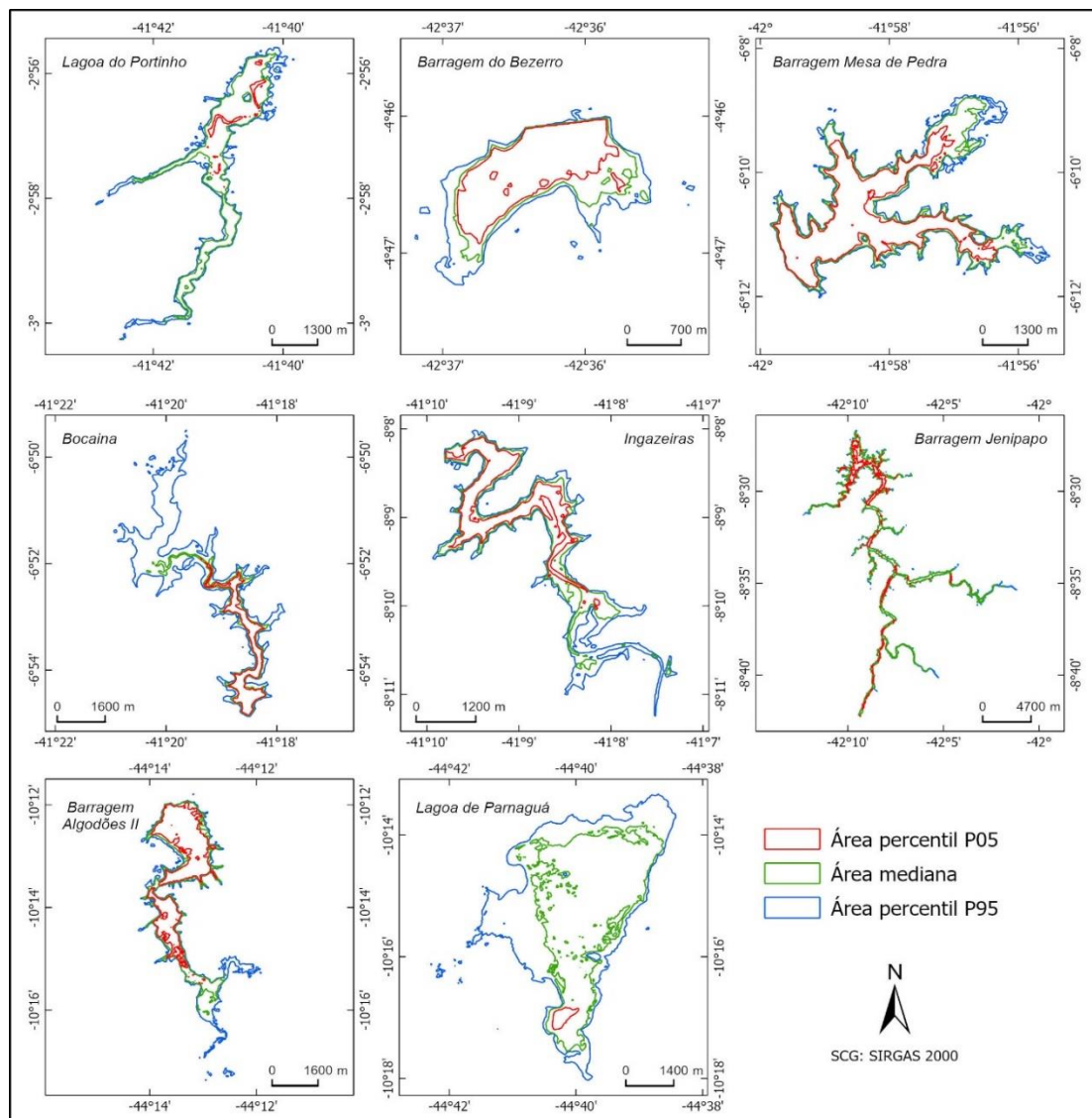


Os mapas apresentados na Figura 5 mostram a extensão superficial da água dos reservatórios monitorado definidos com base nos valores dos percentis P0,05, P0,50 e P0,95, como forma de atenuar a influência persistente da presença de nuvens no cálculo do MNDWI, mesmo após a aplicação do filtro de nuvens e redutor à mediana sobre a coleção de imagens Sentinel-2. Observa-se que a Lagoa de Parnaguá e Lagoa do Portinho tiveram a maior redução de extensão superficial da água dentre os reservatórios monitorados.

Diversos fatores podem explicar essa variação na área dos reservatórios. Segundo Santos-Filho, Mesquita e Lima (2018), a redução dos estoques hídricos da Lagoa do Portinho em 2015 decorre tanto de fatores naturais, tais como a redução da precipitação na bacia, evaporação e migração das dunas, quanto de fatores antrópicos como a construção de barramentos clandestinos para irrigação e piscicultura ao longo do rio homônimo à montante da lagoa.

Nascimento *et al.* (2018) apontaram as mudanças na cobertura e uso da terra e redução da precipitação da bacia do rio Paraim como principal fator de influência sobre estoques hídricos da Lagoa de Parnaguá. Em ambos os casos, a redução da precipitação é elencada como uma das causas da redução dos estoques hídricos. Assim sendo, este estudo restringiu-se à avaliação da correlação entre os dados mensais da extensão superficial da água e precipitação registradas nas bacias de contribuição de cada reservatório.

Figura 5 - Extensão espacial das áreas correspondentes os percentis P05, P95 e mediana dos corpos d'água dos reservatórios monitorados no estado do Piauí no período de novembro de 2015 a dezembro de 2021.



Elaboração: autor, 2022.

Dada a distribuição assimétrica dos dados de área dos reservatórios optou-se por calcular a matriz de correlação de Spearman ( $\rho$ ) entre área mensal dos reservatórios e a precipitação média mensal das bacias de contribuição. Considerando a área total de todos os reservatórios e a precipitação média mensal de suas respectivas bacias de contribuição, os resultados indicaram a existência de baixa correlação negativa significativa ( $\rho = -0,24$ ,  $p < 0,05$ ). Uma análise individual de cada reservatório também indicou a existência de correlação negativa significativa para as barragens Mesa de Pedra, Ingazeiras e Algodões II (Tabela 3).

Tabela 3 - Matriz de correlação de Spearman entre extensão superficial da água dos reservatórios e os valores médios mensais de precipitação (PREC\_BH), valores médios mensais de precipitação com atraso de um a quatro meses (AT\_01 a AT\_04) e as precipitações acumuladas (AC) e precipitação média mensais (M) de dois a quatro meses anteriores. Período dos dados: 11/2015 a 12/2021.

Área	Precipitação										
	PREC_BH	AT_01	AT_02	AT_03	AT_04	AC_02	AC_03	AC_04	M_02	M_03	M_04
Lagoa do Portinho	0.19	0.31	<b>0.48</b>	<b>0.60</b>	<b>0.48</b>	0.30	0.37	<b>0.49</b>	0.30	0.37	<b>0.49</b>
Bezerro	0.03	0.12	0.15	0.22	0.22	0.07	0.14	0.20	0.07	0.14	0.20
Mesa de Pedra	<b>-0.33</b>	-0.01	0.28	<b>0.53</b>	<b>0.62</b>	-0.20	0.03	0.26	-0.20	0.03	0.26
Bocaina	-0.19	0.13	0.28	0.24	0.39	0.05	0.15	0.28	0.05	0.15	0.28
Ingazeiras	<b>-0.30</b>	-0.04	0.18	0.35	0.34	-0.16	-0.02	0.15	-0.16	-0.02	0.15
Jenipapo	-0.27	0.25	0.34	<b>0.53</b>	<b>0.59</b>	0.01	0.14	0.32	0.01	0.15	0.32
Algodões II	<b>-0.59</b>	-0.23	0.18	<b>0.41</b>	<b>0.51</b>	<b>-0.50</b>	-0.31	-0.11	<b>-0.50</b>	-0.31	-0.11
Parnaguá	-0.30	-0.29	-0.07	-0.03	0.10	-0.34	-0.28	-0.25	-0.34	-0.28	-0.25
Total	<b>-0.24</b>	<b>-0.13</b>	-0.04	-0.03	0.06	<b>-0.20</b>	<b>-0.15</b>	-0.09	<b>-0.20</b>	<b>-0.15</b>	-0.09

**negrito:** correlação significativa ( $p < 0,05$ )

Elaboração: autor, 2022.

Observa-se, Tabela 3, que as correlações mais altas, e significativas ( $p < 0,05$ ), foram observadas para a Lagoa do Portinho quando considerado o atraso nos dados de precipitação de dois a quatro meses, assim como as chuvas acumuladas (AC\_04) e chuvas médias (M\_04) dos quatro últimos meses. Isto indica que somente após dois meses de precipitação é que a área superficial dos reservatórios passa a refletir, em partes, a influência das precipitações recebidas em sua bacia de contribuição.

Resultados semelhantes foram observados para as barragens Mesa de Pedra, Jenipapo e Algodões II que mostram certo nível de respostas às precipitações transcorridos três a quatro meses do início das chuvas, o que deixa margem para outras variáveis explicativas a serem consideradas em trabalhos futuros, a exemplo das modificações na cobertura e uso das terras e a influência exercida pelas condições geológicas e pedológicas.

A precipitação mensal média das bacias parece não ter influência direta sobre a extensão superficial da água dos reservatórios (Figura 6). Contudo, não se pode afirmar o mesmo sobre a influência da precipitação no volume estocado. Resultados semelhantes foram obtidos por Ferreira e Kemeses (2019) ao avaliarem a influência dos eventos climáticos extremos sobre os reservatórios do Nordeste. Segundo os autores, as variações de volume dos reservatórios do Piauí não apresentaram correlação com os parâmetros Evaporação e Precipitação Total, conforme verificado nos demais estados.

A relação entre área e volume é difícil de ser estabelecida utilizando imagens de satélite devido a variação fisiográfica dos reservatórios (GAO *et al.*, 2016). No entanto, novas abordagens têm surgido buscando superar essas limitações. Bhagwat *et al.* (2019) propuseram uma metodologia para estimativa volumétrica de reservatórios na Califórnia, integrando dados de área superficial da água com dados de elevação mediana de superfície de água geradas a partir de três diferentes modelos digitais de elevação. Segundo os autores a abordagem tem potencial para ser aplicadas mundialmente,

sobretudo em áreas sensíveis à seca, que demanda maior esforço de gerenciamento dos recursos hídricos.

Outra abordagem passível de ser explorada em pesquisas futuras é a correlação entre área e volume dos reservatórios. No entanto, apenas quatro dos oito reservatórios estudados apresentam dados históricos de volume no banco de dados da ANA, ainda assim com dados faltosos, o que reforça a importância do uso de dados de sensoriamento remoto no monitoramento dos estoques hídricos.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os reservatórios monitorados apresentaram pequenas variações na extensão superficial de suas águas, exceto a Lagoa de Parnaíba, o maior reservatório natural do Piauí, que após a seca observada em 2018 e 2019 não conseguiu recuperar seu volume habitual. Diferentemente de Lagoa do Portinho e Barragem de Bocaina que vêm numa tendência crescente de recuperação de seus volumes, inferido por meio de suas áreas superficiais.

De modo geral, a variabilidade mensal da área dos reservatórios não possui correlação com a precipitação mensal média das bacias de contribuição dos reservatórios, mesmo quando são consideradas com defasagem temporal ou os valores médios mensais acumulados ao longo dos meses anteriores. No entanto, avaliações localizadas sugerem as áreas da Lagoa do Portinho e barragens Mesas de Pedra, Jenipapo e Algodões II começam a apresentar associação após dois a três meses do retorno das precipitações. Logo, outros fatores, como as modificações na cobertura e uso da terra, derivações clandestinas, bem como as contribuições subterrâneas e a influência da evapotranspiração, devem ser exploradas em trabalhos futuros.

O monitoramento mensal das áreas dos reservatórios utilizando sensores ópticos, embora seja bastante eficiente e de fácil aplicação, representa um desafio em virtude da cobertura de nuvens. No entanto, esse problema pode ser superado com a integração de múltiplos sensores ópticos, bem como o uso de sensores ativos que são pouco sensíveis à presença de nuvens.

A metodologia permite ampliar sobremaneira a cobertura espacial e temporal da análise deste estudo com a inserção de dados oriundo de outros sistemas sensores, pode ser adaptado para qualquer outra região do mundo.

## AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao Instituto Federal do Piauí pelo repasse dos recursos financeiros necessários a execução desta pesquisa, via Programa de Apoio à Pesquisa, Estruturação e Reestruturação Laboratorial (Pro-Agrupar INFRA)

## REFERÊNCIAS

- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas 2017**. Brasília: ANA, 2017. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/0c698205-6b59-48dc-8b5e-a58a5dfcc989>. Acesso em: 10 jun. 2022.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Sistema de Acompanhamento de Reservatórios**. Brasília: ANA, 2022. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/sar/>. Acesso em: 15 jun. 2022.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2021**. Brasília: ANA, 2021. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos>. Acesso em: 22 jan. 2023.
- ANDRADE JÚNIOR, A. S. de *et al.* Classificação climática e regionalização do semi-árido do Estado do Piauí sob cenários pluviométricos distintos. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, CE, v. 36, n. 2, p. 143–151, 2005.
- ASHTEKAR, A. S.; MOHAMMED-ASLAM, M. A.; MOOSVI, A. R. Utility of Normalized Difference Water Index and GIS for Mapping Surface Water Dynamics in Sub-Upper Krishna Basin. **Journal of**

**the Indian Society of Remote Sensing**, [s. l.], v. 47, n. 8, p. 1431–1442, 2019.  
<https://doi.org/10.1007/s12524-019-01013-6>

BHAGWAT, T. *et al.* Volumetric Analysis of Reservoirs in Drought-Prone Areas Using Remote Sensing Products. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 11, n. 17, p. 1974, 2019.  
<https://doi.org/10.3390/rs11171974>

BURITI, C. de O.; BARBOSA, H. A. As secas na história do semiárido brasileiro: caminhos de uma pesquisa nos cariris paraibanos. In: BURITI, C. de O.; BARBOSA, H. A. (org.). **Um século de secas: por que as políticas hídricas não transformaram o semiárido brasileiro?** São Paulo: CHIADO BOOKS, 2018. p. 95–166.

CEPRO - Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais. **Piauí em números**. 11. ed. Teresina: SEPLAN/CEPRO, 2019.

EUROPEAN SPACE AGENCY. **User Guide: Sentinel-2 MSI Introduction**. [s. l.], 2019. Disponível em: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi>. Acesso em: 26 out. 2019.

ESRI - Environmental Systems Research. **ArcGIS Pro: release 3.0**. Versão 3.0.1. Redlands, CA: ESRI, 2022.

FERREIRA, R. V.; DANTAS, M. E. Relevância. In: PFALTZGRAFF, P. A. dos S.; TORRES, F. de M. T.; BRANDÃO, R. de L. (org.). **Geodiversidade do estado do Piauí**. Recife: CPRM, 2010. p. 45–64. *E-book*. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/16772?show=full>. Acesso em: 8 jun. 2021.

FERREIRA, L. G. C.; KEMENES, A. Influência histórica (1998-2016) dos parâmetros globais e regionais sobre os reservatórios do interior do Nordeste. **Revista Brasileira de Climatologia**, [s. l.], v. 25, p. 1982–203, 2019. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v25i0.60538>

GAO, H. *et al.* Satellite remote sensing of lakes and wetlands. *Em*: HONG, Y.; ZHANG, Y.; KHAN, S. I. (org.). **Hydrologic Remote Sensing: capacity building for sustainability and resilience**. New York: CRC Press, 2016. p. 57–73. <https://doi.org/10.1201/9781315370392-5>

GHANSAH, B. *et al.* Monitoring spatial-temporal variations of surface areas of small reservoirs in Ghana's Upper East Region using Sentinel-2 satellite imagery and machine learning. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, [s. l.], v. 125, p. 103082, 2022.  
<https://doi.org/10.1016/j.pce.2021.103082>

GIL, A. P.; PADOVANI, C. R.; COELHO, A. L. N. Comparação entre NDWI e MNDWI para o mapeamento de áreas inundadas no Pantanal do Taquari. In: **Anais...**, 2019, Santos, SP. **XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Santos, SP, 2019. Disponível em: <https://proceedings.science/sbsr-2019/papers/comparacao-entre-ndwi-e-mndwi-para-o-mapeamento-de-areas-inundadas-no-pantanal-do-taquari>. Acesso em: 13 set. 2022.

HOU, J. *et al.* Remotely sensed reservoir water storage dynamics (1984–2015) and the influence of climate variability and management at a global scale. **Hydrology and Earth System Sciences**, [s. l.], v. 26, n. 14, p. 3785–3803, 2022. <https://doi.org/10.5194/hess-26-3785-2022>

HUFFMAN, G. J. *et al.* **GPM IMERG Final Precipitation L3 1 month 0.1 degree x 0.1 degree V06**. [S. l.], 2019. Disponível em: [https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GPM\\_3IMERGM\\_06/summary](https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GPM_3IMERGM_06/summary). Acesso em: 13 set. 2022.

HUSSAIN, A.; BANO, D. Temporal monitoring of Ghamu bar glacial lakes using remote sensing and GIS. **International Journal of Advanced Geosciences**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 18, 2019.  
<http://dx.doi.org/10.14419/ijag.v7i1.20308>

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Malha Municipal 2021**. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html?=&t=sobre>. Acesso em: 10 jun. 2022.

JAXA, J. A. E. A. **ALOS Global Digital Surface Model “ALOS World 3D - 30m” (AW3D30)**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/data/index.htm>. Acesso em: 10 jun. 2022.

KEYS, T. A.; SCOTT, D. T. Monitoring volumetric fluctuations in tropical lakes and reservoirs using satellite remote sensing. **Lake and Reservoir Management**, [s. l.], v. 34, n. 2, p. 154–166, 2018. <https://doi.org/10.1080/10402381.2017.1402226>

LI, H. *et al.* Monitoring 40-Year Lake Area Changes of the Qaidam Basin, Tibetan Plateau, Using Landsat Time Series. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 343, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11030343>

LIMA, I. M. de M. Hidrografia do estado do Piauí, disponibilidade e usos da água. *In*: AQUINO, C. M. S. A.; SANTOS, F. A. **Recursos hídricos do estado do Piauí: fundamentos de gestão e estudos de casos em bacias hidrográficas do centro-norte piauiense**. Teresina: EDUFPI, 2017. p. 43–68.

NASCIMENTO, O. D. S. *et al.* **Análise espaço-temporal do uso e ocupação da terra da bacia hidrográfica do alto Paraím – Piauí**. **Geoambiente On-line**, [s. l.], v. 32, n. 32, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5216/revgeoamb.v0i32.49955>. Acesso em: 12 set. 2022. <https://doi.org/10.5216/revgeoamb.v0i32.49955>

MAGALHÃES, A. R. Vida e seca no Brasil. *In*: NYS, E. de; ANGLE, N. L.; MAGALHÃES, A. R. (org.). **Secas no Brasil: política e gestão proativas**. Brasília, DF: GGEE/Banco Mundial, 2016. p. 292.

MARENGO, J. A. *et al.* Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, [s. l.], v. 90, n. 2 suppl 1, p. 1973–1985, 2018. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170206>

MCFEETERS, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, [s. l.], v. 17, n. 7, p. 1425–1432, 1996. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>

MORAIS, R. C. de S.; ABREU, L. P. de. Análise espacial da variabilidade de precipitação na bacia hidrográfica do rio Parnaíba, nordeste de Brasil. **Revista da Academia de Ciências do Piauí**, Teresina, v. 2, n. 2, p. 3–18, 2021. <https://doi.org/10.29327/261865.2.2-1>

N H, R. K. Study of fluctuations in surface area of lake Haramaya using NDWI and MNDWI methods. **JGISE: Journal of Geospatial Information Science and Engineering**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 36, 2022. <https://doi.org/10.22146/jgise.68630>

NASCIMENTO, O. D. S. *et al.* Análise espaço-temporal do uso e ocupação da terra da bacia hidrográfica do alto Paraím – Piauí. **Geoambiente On-line**, [s. l.], v. 32, n. 32, 2018. <https://doi.org/10.5216/revgeoamb.v0i32.49955>

OLIVEIRA JÚNIOR, O. **Barragem de Bocaina atinge o menor volume em 32 anos**. Teresina, 2016. Disponível em: <https://www.cidadesemfoco.com/barragem-de-bocaina-atinge-o-menor-volume-em-32-anos/>. Acesso em: 25 out. 2019.

ÖZELKAN, E. Water Body Detection Analysis Using NDWI Indices Derived from Landsat-8 OLI. **Polish Journal of Environmental Studies**, [s. l.], v. 29, n. 2, p. 1759–1769, 2020. <https://doi.org/10.15244/pjoes/110447>

PEREIRA, R. **Lagoa do Portinho continua seca e vira área de pasto para animais**. Teresina, 2016. Disponível em: <https://cidadeverde.com/parnaiba/80948/lagoa-do-portinho-continua-seca-e-vira-area-de-pasto-para-animais>. Acesso em: 25 out. 2019.

SANTIAGO, P. **Barragens do Piauí estão com apenas 32% de sua capacidade total**. Teresina, 2015. Disponível em: <http://g1.globo.com/pi/piaui/noticia/2015/02/barragens-do-piaui-estao-com-apenas-32-de-sua-capacidade-total.html>. Acesso em: 25 out. 2019.

SENA, Y. **Barragem seca e cidade fica 100% sem água potável no interior do Estado**. Teresina, 2017. Disponível em: <https://cidadeverde.com/noticias/255595/barragem-seca-e-cidade-fica-100-sem-agua-potavel-no-interior-do-estado>. Acesso em: 25 out. 2019.

TARBOTON, D. G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. **Water Resources Research**, [s. l.], v. 33, n. 2, p. 309–319, 1997. <https://doi.org/10.1029/96WR03137>

THE JAMOVI PROJECT. **Jamovi (Versão 2.3.13)**. Versão 2.3.13, 2021. Disponível em: <https://www.jamovi.org>. Acesso em: 12 set. 2022.

TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. **Recursos hídricos no século XXI**. São Paulo32: Oficina de Texto, 2011.

XU, H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. **International Journal of Remote Sensing**, [s. l.], v. 27, n. 14, p. 3025–3033, 2006. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>

YANG, X. *et al.* Mapping of urban surface water bodies from Sentinel-2 MSI imagery at 10 m resolution via NDWI-Based Image Sharpening. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 9, n. 6, p. 596, 2017. <https://doi.org/10.3390/rs9060596>

YIN, F. *et al.* A sensor invariante atmospheric correction: Sentinel-2/MSI and Landsat 8/OLI. **Earth ArXiv**, 2019. Preprint. <https://doi.org/10.31223/osf.io/ps957>

ZHANG, X.; LIU, X. Comparative study on extraction of banded water and surface water in urban area based on MNDWI. *In: Proceedings.....*, 2022. 3rd International Conference on Geology, Mapping and Remote Sensing (ICGMRS). Zhoushan: IEEE, 2022. p. 33–40. <https://doi.org/10.1109/ICGMRS55602.2022.9849259>

---

Recebido em: 15/09/2022

Aceito para publicação em: 08/02/2023