UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA E DE AGRIMENSURA

ENRIQUE MATHEUS ARAUJO MACHADO

ANÁLISE DA DINÂMICA HÍDRICA DO RESERVATÓRIO ENGENHEIRO FRANCISCO SABOYA, IBIMIRIM – PE POR MEIO DE SENSORIAMENTO REMOTO

Rio Largo, AL
2025

ENRIQUE MATHEUS ARAUJO MACHADO

ANÁLISE DA DINÂMICA DO RESERVATÓRIO ENGENHEIRO FRANCISCO SABOYA, IBIMIRIM – PE POR MEIO DE SENSORIAMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura da Universidade Federal de Alagoas, como requisito à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura.

Orientador: Prof. Dr. Jhonathan Gomes dos Santos

Rio Largo, AL

2025

Catalogação na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
Bibliotecário Responsável: Erisson Rodrigues de Santana - CRB4 - 1512

M149a Machado, Enrique Matheus Araújo.

Análise da dinâmica hídrica do reservatório engenheiro Francisco Saboya, Ibimirim – PE por meio de sensoriamento remoto. / Enrique Matheus Araújo Machado. – 2025.

57 f.: il.

Orientador(a): Jhonathan Gomes dos Santos.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura) – Graduação em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas. Rio Largo, 2024.

Inclui bibliografia

1. Curva cota–área–volume. 2. Mapbiomas. 3. Recurso hídrico. 4. Semiárido. I. Título.

CDU: 528.7

Folha de Aprovação

ENRIQUE MATHEUS ARAUJO MACHADO

Análise da Dinâmica do Reservatório Engenheiro Francisco Saboya, Ibimirim – PE por meio de Sensoriamento Remoto

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura.

Aprovado em: 11 / 11 / 2025

Banca examinadora:

gov.br Documento assinado digitalmente
JHONATHAN GOMES DOS SANTOS
Data: 24/11/2025 12:11:51-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____
Orientador – Prof. Dr. Jhonathan Gomes dos Santos
Campus de Engenharia e Ciências Agrárias
Universidade Federal de Alagoas

gov.br Documento assinado digitalmente
AYRTON MARTIM OLIVEIRA DIAS MELO
Data: 24/11/2025 13:44:32-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____
Prof. MSc. Ayrton Martim Oliveira Dias Melo
Campus de Engenharia e Ciências Agrárias
Universidade Federal de Alagoas

gov.br Documento assinado digitalmente
MICHELLE ADELINO CERQUEIRA
Data: 24/11/2025 13:41:13-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____
Profª. Dra. Michelle Adelino Cerqueira
Campus de Engenharia e Ciências Agrárias
Universidade Federal de Alagoas

Dedico esse trabalho a Deus autor e consumador e minha vida, a minha família que sempre esteve ao meu lado e meus avós (*in memoriam*) que seus conselhos me incentivaram a continuar.

AGRADECIMENTOS

Fim! Mais uma etapa concluída.

Foram anos de convivência, choros, raivas, alegrias e troca de conhecimento. Lembro-me do momento que iniciei, lá em junho do ano de 2018, com enfrentamento de greves, pandemia..., mas cheguei até aqui e posso dizer: vivi a universidade e consegui chegar ao final, agora é alçar sonhos maiores.

Agradeço a Deus, pois sem a ajuda dEle não teria chegado até aqui. Como sempre digo a mim mesmo: “Nunca me deixes esquecer que tudo que tenho, tudo o que sou e o que vier a ser, vem de Ti, Senhor.”

Aos meus pais, Erasto e Elian que são minha base, agradeço por me ajudarem desde o início com os conselhos e financeiramente, por acreditarem nas minhas escolhas e me incentivarem a alcançar esta formação. Amo vocês!

Ao meu irmão Erick, minha cunhada Mikaelle e familiares e principalmente minha prima Jessilany que sempre estiveram me incentivando a continuar e construir um grande futuro, minha gratidão.

Aos meus amigos de ensino médio: Amanda, Aline, Erica, Rayssa. Aos meus amigos *“Bests*” principalmente ao meu amigo irmão Gabriel, obrigado.

Agradeço a cada professor com quem tive aula, especialmente àqueles que mais me acolheram: Profª. Dra. Rafaela Faciola, com suas aulas aprendi muito — além do conteúdo, aprendi sobre o caráter de ser um bom profissional. Levarei todos esses conhecimentos e experiencia para a vida toda.

Ao meu orientador Prof. Dr. Jhonathan Gomes, que me incentivou a encarar esse trabalho que esteve presente, me dando norte para finalizá-lo. Desde a linha de pesquisa do CELMM, me fez enxergar o universo da agrimensura e da cartografia. Sua contribuição e orientação foram essenciais para que eu pudesse crescer como estudante e como pessoa.

Para finalizar, agradeço a todos que diretamente ou indiretamente contribuíram para o meu crescimento.

E, principalmente aos meus queridos e amados amigos: Wellington Jr., Pamela Regina; às minhas amigas de sala, com quem convivemos por sete anos, amando, brigando, mas, conseguimos! Berlange Lins, Sara Muller e você, Viviele Barbosa, que esteve comigo em todas as loucuras de mudança de PPC, disciplinas é cada história.

Muito obrigado a todos!

RESUMO

A água é um recurso vital para a vida, atendendo a múltiplas demandas sociais, econômicas e ambientais. Contudo, o meio ambiente vem passando por transformações significativas que afetam diretamente os recursos hídricos, influenciada por fatores como ações antrópicas, variações climáticas, características geográficas e expansão urbana. Reservatórios destinados ao abastecimento, à irrigação, à dessedentação animal e outras finalidades enfrentam alterações em sua dinâmica e períodos de escassez hídrica, especialmente em regiões do semiárido brasileiro, marcadas pelas estiagens recorrentes. Nesse contexto, Sensoriamento Remoto se mostra uma ferramenta eficaz para o monitoramento de reservatórios, permitindo a análise de séries históricas de imagens de satélite, fornecendo dados que modelem a superfície e a identificação de períodos críticos de seca, contribuindo para a compreensão da dinâmica do reservatório ao longo do tempo. Este estudo teve como objetivo aplicar técnicas de Sensoriamento Remoto e de Geoprocessamento em imagens de satélites disponibilizadas pela coleção 7 do MapBiomas, bem como o Modelo Digital do Terreno fornecido pelo projeto Pernambuco Tridimensional no Reservatório Engenheiro Francisco Saboya. A parti dos dados de cota, área e volume foi gerada a curva Cota–Área–Volume (CAV), permitindo identificar a modelagem da superfície do reservatório e a compreensão do armazenamento do corpo d'água. Além disso, foi realizado o estudo uso e ocupação do solo em alguns ciclos distintos do reservatório, identificando padrões recorrentes. O estudo realizado por meio de processamentos de dados no QGIS da série histórica de 1985 a 2021, provieram no desenvolvimento de mapas temáticos da dinâmica hídrica e do entorno do reservatório com objetivo de compreender cobertura espacial e apoiar análises ambientais. Os resultados evidenciaram a variação entre os dados por imagem e os dados reais, permitindo a identificação do modelo matemático da superfície e possibilitando uma compreensão mais detalhada do comportamento do reservatório em diferentes níveis de cota. Por exemplo, na cota 424 m, o reservatório apresentou área de 3.285,32 ha e volume de 85,91 hm³. Na análise ambiental, observou-se a ausência de demarcação dos limites do entorno como Área de Preservação Permanente (APP), favorecendo várias ações antrópicas ao redor do reservatório. Em 2017, o entorno era composto majoritariamente por formação savânica (1.708,73 ha) e pastagem (4.788,52 ha), totalizando mais de 66% da área. Em síntese, a eficácia no monitoramento por meio técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento permitiu estimar a dinâmica do espelho d'água e interpretar mapas relacionados ao entorno do reservatório. Assim esse estudo contribuiu, pois foi realizado para subsidiar políticas públicas voltadas à gestão eficiente dos recursos hídricos e a preencher lacunas de dados no reservatório Engenheiro Francisco Saboya.

Palavra-chave: curva cota–área–volume; mapbiomas; recurso hídrico; semiárido.

ABSTRACT

Water is a vital resource for life, meeting multiple social, economic, and environmental demands. However, the environment has been undergoing significant transformations that directly affect water resources, influenced by factors such as human actions, climate variations, geographical characteristics, and urban expansion. Reservoirs intended for supply, irrigation, animal watering, and other purposes face changes in their dynamics and periods of water scarcity, especially in regions of the Brazilian semi-arid region, marked by recurring droughts. In this context, Remote Sensing proves to be an effective tool for monitoring reservoirs, allowing the analysis of historical series of satellite images, providing data that model the surface and identify critical periods of drought, contributing to the understanding of the reservoir's dynamics over time. This study aimed to apply Remote Sensing and Geoprocessing techniques to satellite images provided by the MapBiomas Collection 7, as well as the Digital Terrain Model provided by the Pernambuco Tridimensional project, in the Engenheiro Francisco Saboya Reservoir. Based on elevation, area, and volume data, the Elevation-Area-Volume (CAV) curve was generated, allowing for the identification of the reservoir's surface modeling and an understanding of the water body's storage. Furthermore, a land use and occupation study was conducted across several distinct reservoir cycles, identifying recurring patterns. The study, carried out through data processing in QGIS of the historical series from 1985 to 2021, resulted in the development of thematic maps of the reservoir's water dynamics and surroundings, aiming to understand spatial coverage and support environmental analyses. The results highlighted the variation between image data and real-world data, allowing for the identification of the mathematical model of the surface and enabling a more detailed understanding of the reservoir's behavior at different elevation levels. For example, at an elevation of 424 m, the reservoir presented an area of 3,285.32 ha and a volume of 85.91 hm^3. In the environmental analysis, the absence of demarcation of the surrounding area's boundaries as a Permanent Preservation Area (APP) was observed, favoring various anthropogenic actions around the reservoir. In 2017, the surrounding area was composed mainly of savannah formation (1,708.73 ha) and pasture (4,788.52 ha), totaling more than 66% of the area. In summary, the effectiveness of monitoring through remote sensing and geoprocessing techniques allowed for the estimation of the water surface dynamics and the interpretation of maps related to the reservoir's surroundings. Thus, this study contributed to supporting public policies aimed at the efficient management of water resources and filling data gaps in the Engenheiro Francisco Saboya reservoir.

Keywords: elevation-area-volume curve; mapbiomas; water resource; semi-arid region.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Abrangência do semiárido. 16
Figura 2 - Divisão metodológica para processamento do programa Pernambuco Tridimensional. 19
Figura 3 - Diferença das máscaras hídricas do Reservatório Engenheiro Francisco Saboya.Fonte**:** De Oliveira Farias et al., (2024). 23
Figura 4 - Tabela estatísticas dos NDWI gerados no reservatório nos anos 2017 e 2019. Fonte: Farias et al., (2024). 23
Figura 5 - Tabela com as variações dos métodos aplicados no Reservatório Engenheiro Francisco Saboya nos anos de 2018, 2019 e 2020. 24
Figura 6 - Índices físicos de vegetação aplicados no período de três anos. 25
Figura 7 - Mapa de evapotranspiração do Reservatório Engenheiro Francisco Saboya. 25
Figura 8 - Mapa de localização do Reservatório Engenheiro Francisco Saboya. 27
Figura 9 - Fluxograma da etapa metodológica. 29
Figura 10 - Distribuição temporal de desastres associados ao clima no Nordeste do Brasil. 41
Figura 11 - Dinâmica do espelho d'água dos dois ciclos identificados no reservatório. 41
Figura 12 - Mapa comparativo do uso e ocupação do ano de 1985 e 2021 42
Figura 13 - Mapa de uso e ocupação do ano de 1986. 44
Figura 14 - Mapa de uso e ocupação do ano de 2001. 45
Figura 15 - Mapa de uso e ocupação do ano de 2004. 47
Figura 16 - Mapa de uso e ocupação do ano de 2017. 48

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Cota x Área. 34
Gráfico 2 - Boxplot do volume real e do volume da imagem. 35
Gráfico 3 - Cota x Volume. 36
Gráfico 4 - Boxplot do volume real e do volume da imagem. 37
Gráfico 5 - Curva Cota–Área–Volume. 37
Gráfico 6 - Comportamento hidrológico do reservatório. 39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Planilha-síntese com os dados obtidos por sensoriamento remoto. 32
Tabela 2 - Diferenças percentuais entre a área real e a área da imagem. 35
Tabela 3 - Diferenças percentuais entre o volume real e o volume da imagem. 36
Tabela 4 - Área e volume modelado da superfície do Reservatório Engenheiro Francisco Saboya. 38
Tabela 5 - Área do reservatório identificada na Coleção 7 do MapBiomas. 39
Tabela 6 - Quantificação das classes do uso e ocupação do solo do ano de 1985 e 2021 no Reservatório Engenheiro Francisco Saboya. 43
Tabela 7 - Quantificação das classes do uso e ocupação do solo do ano de 1986 no Reservatório Engenheiro Francisco Saboya. 44
Tabela 8 - Quantificação das classes do uso e ocupação do solo do ano de 2001 no Reservatório Engenheiro Francisco Saboya. 46
Tabela 9 - Quantificação das classes do uso e ocupação do solo do ano de 2004 no Reservatório Engenheiro Francisco Saboya. 47
Tabela 10 - Quantificação das classes do uso e ocupação do solo do ano de 2017 no Reservatório Engenheiro Francisco Saboya. 49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRAGE	Associação Brasileira das Empresas Geradoras de Energia Elétrica
ANA	Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
APP	Área de Preservação Permanente
CAV	Cota—Área—Volume
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
EH	Estado Hidrológico
GPS	Global Positioning System
IAF	Índice Global de Área Foliar
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais
MDT	Modelo Digital do Terreno
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NDWI	Normalized Difference Water Index
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis
OMJ	Oscilação Madden Julian
ONGs	Organizações Não Governamentais
PE3D	Pernambuco Tridimensional
PIMox	Perímetro Irrigado do Moxotó
SRHE	Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index
SUDENE	Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 12
2. OBJETIVOS 14
2.1. Objetivo Geral 14
2.2. Objetivos Específicos 14
3. REFERENCIAL TEÓRICO 15
3.1. Gestão dos Recursos Hídricos 15
3.2. Dinâmica Hídrica no Contexto do Semiárido Brasileiro 15
3.3. Sensoriamento Remoto Aplicado à Recursos Hídricos 17
3.4. Bancos de Dados para Processamento Digital de Imagem 17
3.4.1. MapBiomas 18
3.4.2. Pernambuco Tridimensional 18
3.5. Curva Cota–Área–Volume (CAV) 19
3.6. Geoprocessamento no Monitoramento Hídrico 20
3.7. Reservatório Engenheiro Francisco Saboya 21
4. MATERIAIS E MÉTODOS 27
4.1. Área de Estudo 27
4.2. Procedimento Metodológicos 28
4.2.1. Pré-processamento 30
4.2.2. Levantamento dos Dados da Curva CAV 30
4.2.3. Organização e Tratamento dos Dados da Curva CAV 31
4.2.4. Análise de Padrões da Série Histórica 32
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES 34
5.1. Curva Cota-Área-Volume (CAV) 34
5.1.1. Relação Cota x Área 34
5.1.2. Relação Cota x Volume 35
5.1.3. Relação Curva Cota–Área–Volume (CAV) 37
5.2. Modelagem Matemática da Relação Cota-Área-Volume 38
5.3. Análise da Dinâmica Hídrica ao Longo da Série Histórica 38
6. CONCLUSÃO 50
7. REFERÊNCIAS 52

1. INTRODUÇÃO

A água é essencial para atender diversas demandas sociais, econômicas e ambientais no mundo. Entretanto, uma problemática recorrente no Brasil é a escassez hídrica. Pois, com o crescimento demográfico aumenta a probabilidade de intensificação desse fenômeno. Desta forma, a região nordeste do Brasil é afetada por fatores climáticos e geográficos. A realização de análises consistentes dos dados volumétricos de reservatórios de médio e grande porte é fundamental, sobretudo nas regiões brasileiras com escassez hídrica, como as zonas semiáridas do Nordeste. Nesse contexto, as informações volumétricas permitem uma gestão proativa e eficiente dos recursos hídricos (Costa, 2019).

A escassez de estudos e práticas de gestão ambiental nas áreas dos corpos hídricos, favorece o uso irregular e a ocupação inadequada em suas margens. Essa situação revela diversas problemáticas, como desmatamento, assoreamento do reservatório, resíduos químicos provenientes da irrigação, entre outros. Isso afeta principalmente a qualidade e disponibilidade dos recursos hídricos, promovendo alterações no meio ambiente (Lira *et al*., 2015).

No ano de 1890, no município de Cedro-CE, iniciou-se a implantação de reservatórios e açudes, com o objetivo de acumular águas superficiais utilizadas para abastecimento populacional e na dessedentação animal. Contudo, a ausência de políticas adequadas gerou conflitos reais sobre a segurança hídrica nas regiões semiáridas. O Reservatório Engenheiro Francisco Saboya foi concebido com a finalidade de armazenar água para fins de irrigação. Uma vez que está localizado na bacia Moxotó, a jusante do perímetro irrigado de Moxotó. Inaugurado em 1959, é gerido desde sua implantação até os dias atuais pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) (Lira, 2015). O conselho atuante do Reservatório Engenheiro Francisco Saboya desempenha um papel ativo em discussões relevantes de gestão de recursos, demandas, condições climáticas e regionais. Em disposição ao projeto de integração do rio São Francisco, com vista à contribuição para o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis (ODS) (Ferreira; Costa; Carvalho, 2023).

Os reservatórios existentes no semiárido de Pernambuco têm múltiplas utilidades. Principalmente o Reservatório Engenheiro Francisco Saboya, conhecido popularmente açude Poço da Cruz. Onde tem se desempenhado, as atividades associadas à agropecuária, abastecimento, irrigação; usos múltiplos que influenciam a dinâmica hídrica (Dos Santos, 2021). Segundo Vasconcelos et al. (2020), a região do sertão pernambucano onde o reservatório está situado é frequentemente impactada pela seca e pelos baixos índices de precipitação. Diante desses contextos torna-se fundamental estabelecer uma periocidade no seu monitoramento.

As geotecnologias possuem grande relevância em monitoramento hídrico. Entre elas, os dados obtidos por sensores orbitais, além dos Modelos Digitais de Elevação e Terreno. Ferramentas que geram dados e análises que podem ser utilizadas em pesquisas científicas e na formulação de políticas públicas direcionadas ao manejo hídrico (Costa, 2019).

Com as dinâmicas hídricas, muitas das vezes causadas pela crescente escassez hídrica em regiões semiáridas, se faz necessária a utilização de ferramentas aprimoradas para monitoramento. Nesse contexto, o presente trabalho tem como eixo análises da dinâmica hídrica no Reservatório Engenheiro Francisco Saboya.

Para isso, técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento serão aplicadas com o objetivo de gerar a curva Cota–Área–Volume (CAV), por meio de imagens de satélite disponibilizadas pelo MapBiomas e dados do Modelo Digital do Terreno (MDT), disponível no Pernambuco Tridimensional (PE3D). A curva CAV permitirá identificar o modelo matemático que representa o reservatório, possibilitando a compreensão do armazenamento do corpo d’água. Além disso, a série histórica geoprocessada correlacionada com o uso e ocupação do solo do estudo do Mapbiomas, poderá identificar e padrões recorrentes, oferecendo subsídios técnicos de monitoramento.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Monitorar a dinâmica hídrica do Reservatório Engenheiro Francisco Saboya utilizando técnicas de sensoriamento remoto e análises de séries temporais, com proposito de identificar padrões espaciais e temporais.

2.2. Objetivos Específicos

1. Construir a curva Cota–Área–Volume (CAV) do Reservatório Engenheiro Francisco Saboya a partir da classificação realizada pelo MapBiomas com base em imagens Landsat, combinada com dados do Modelo Digital de Terreno (MDT).
2. Desenvolver modelos matemáticos que representem a relação entre cota, área e volume, com base nos dados obtidos.
3. Analisar padrões na dinâmica hídrica do reservatório ao longo da série histórica, correlacionando esses padrões com o uso e ocupação do solo no entorno com base nos dados da Coleção 7 do MapBiomas.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Gestão dos Recursos Hídricos

A água, desde tempos antigos desempenhou um papel central no desenvolvimento urbano, principalmente no abastecimento superficial, suprido pela água da chuva, rios e ribeiros. Com a escassez, passou-se à busca por águas subterrâneas. Desde os primórdios até os dias atuais, a água é um elemento fundamental na estruturação da sociedade (Ribeiro, 2023).

Além de sua relevância histórica, a água é um recurso natural essencial à vida, sendo imprescindível em várias demandas dos seres humanos. Além disso, o dimensionamento da água é importante para o desenvolvimento econômico e social. Contudo, a degradação contínua do meio ambiente vem prejudicando grandemente este recurso vital. (Wolker; Pimmel, 2013). A compreensão do uso da água é fundamental, uma vez que esse recurso está relacionado à segurança alimentar, à saúde pública e ao equilíbrio ecológico. No entanto, com as mudanças atmosféricas e o aumento populacional, desenvolve-se uma pressão sobre os recursos hídricos. A má administração desse recurso acarreta escassez, degradação ambiental e conflitos socioeconômicos (Hafemann, 2023).

O acesso à água é um direito universal, independentemente do usufruto. É direito de todos, sejam aqueles que pagam pelo serviço de abastecimento ou aos que não o fazem. Entretanto, para a melhor distribuição da água, é essencial uma gestão eficiente dos recursos hídricos. Embora grande parte da água encontrada no planeta esteja distribuída de forma heterogênea, é importante um planejamento político justo e eficaz para garantir a segurança do uso sustentável (Almeida *et al.*, 2009).

3.2. Dinâmica Hídrica no Contexto do Semiárido Brasileiro

O nordeste brasileiro tem um registro histórico marcado pela seca e pela escassez de água em grande parte da região nordestina. Os impactos da seca e da escassez hídrica se manifestam na perda de safras agrícolas, no desemprego nas zonas rurais e na migração da população para os centros urbanos. Diversos fatores contribuem para esse cenário, sendo o clima um dos principais fatores que influenciam a paisagem e o regime hídrico. Os longos períodos de estiagem, somados a razões geológicas e geomorfológicas da região, afetam a disponibilidade de água superficial e subterrânea, comprometendo a qualidade e o seu uso adequado (Zanella, 2014).

> O Semiárido brasileiro é composto por 1 262 municípios, dos Estados do Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e Minas Gerais. Os critérios para delimitação do Semiárido foram a precipitação pluviométrica média anual igual ou inferior a

> 800 mm; o Índice de Aridez de *Thornthwaite* igual ou inferior a 0,50; e o percentual diário de déficit hídrico igual ou superior a 60%, considerando todos os dias do ano. A competência para fixar critérios técnicos e científicos para a delimitação do Semiárido foi dada ao Conselho Deliberativo da Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste - SUDENE pela Lei Complementar n. 125, de 03.01.2007. O Semiárido, cabe destacar, não é a área de atuação da SUDENE, que é mais abrangente territorialmente (IBGE, 2021, p. 58).

Ainda em concordância com o IBGE (2021), grande parte dos recursos hídricos não se mantém durante os longos períodos de seca, incluindo os rios perenes. A principal exceção é o Rio São Francisco, que tem vazão constante de 246,94 L/s ao longo do ano. Essas características hidrográficas são predominantes nesta região semiárida (Figura 1).

Figura 1 - Abrangência do semiárido.



Fonte: IBGE (2021).

Além da hidrografia, o semiárido apresenta complexidade na estruturação natural de suas paisagens. O estudo climático nessa região é influenciado por sistemas atmosféricos tropicais e extratropicais, resultando em grande variabilidade pluviométrica. Dentro desse domínio, algumas paisagens foram identificadas, cada uma com caracterização específica. Geomorfologicamente, o semiárido tem uma interação compartimental entre processos tectônicos, erosivos e litológicos (Jatobá, 2019).

Diante das recorrentes secas ocasionadas pela irregularidade pluviométrica, surgiram questionamentos sobre como solucionar a subsistência no semiárido brasileiro. O

primeiro Plano Diretor do Nordeste evidenciou a gestão dos recursos hídricos como prioridade para o desenvolvimento regional. Nesse contexto, manifestou-se uma estratégia política na construção de reservatórios para atender à população em suas necessidades básicas, atenuando os efeitos causados pelas secas (Neto, 2020).

No entanto, apesar da possibilidade de construção de novos reservatórios no semiárido, essa medida impossibilita a preservação da qualidade e da quantidade do recurso hídrico já acumulado. Nos reservatórios existentes, diversas ações antrópicas e processos naturais contribuem para o assoreamento, que reduz a capacidade de armazenamento e, consequentemente, eleva os índices de evaporação (De Araújo, 2003).

3.3. Sensoriamento Remoto Aplicado à Recursos Hídricos

O sensoriamento remoto é uma ciência marcada por importantes avanços em suas aplicações de monitoramento. Essas inovações ampliam a frequência de revisita e proporcionam resoluções espectrais, espaciais e radiométricas mais elevadas. No monitoramento de recursos hídricos, esses avanços tecnológicos no sensoriamento remoto contribuem para maior eficiência e precisão de dados (Crioni, 2024).

Uma das principais limitações na gestão dos recursos hídricos é a lacuna de dados qualitativos e quantitativos. Diante dessa problemática, o uso do sensoriamento remoto surge como uma ferramenta eficaz para análises, permitindo correlacionar os dados espaciais com informações obtidas *in loco*. Com validação adequada, essa abordagem contribui para o preenchimento das lacunas existentes nos dados de estudos sobre recursos hídricos (Oliveira, 2025).

Uma utilização do recurso hídrico é a irrigação. Segundo Magnoni e Manzioni (2021), a aplicação do sensoriamento remoto para o manejo de irrigação é de grande relevância para cálculo de balanço hídrico do solo por meio da utilização de imagens multiespectrais. Essa abordagem contribui na realização de irrigação líquida, já que as limitações são feitas por estimativas pontuais.

Nas análises das precipitações de reservatórios, o estudo espaço-temporal por meio de técnicas de sensoriamento remoto, indica os impactos sobre os recursos hídricos, revelando alterações nas águas superficiais. Essas técnicas são fundamentais para a compreensão da dinâmica dos reservatórios, e seus resultados auxiliam diversas decisões políticas e de gestão ambiental (Barbosa *et al*., 2022).

O sensoriamento remoto possui grande relevância para fins de monitoramento ambiental, oferecendo resultados precisos e mapeamentos eficazes que favorecem análises detalhadas e comparações visuais consistentes (Carvalho *et al*., 2021).

3.4. Bancos de Dados para Processamento Digital de Imagem

3.4.1. MapBiomas

O banco de dados MapBiomas, parte do Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil, é uma iniciativa que emprega tecnologias avançadas como, o *Google Earth Engine*, imagens temporais do *Landsat*, com coleções que iniciam no ano de 1985 até os dias atuais, para monitorar as transformações do território nacional. Seu objetivo é gerar tratamento e análises precisas do uso e ocupação do solo, resultando em mapas detalhados e identificando tendências. O Mapbiomas é uma colaboração entre universidades, Organizações Não Governamentais (ONGs) e empresas de tecnologia, que integram ferramentas como o QGIS e plataformas digitais para o processamento de dados. Seus resultados são disponibilizados de forma gratuita, promovendo o acesso aberto à informação (Silva *et al.*, 2022).

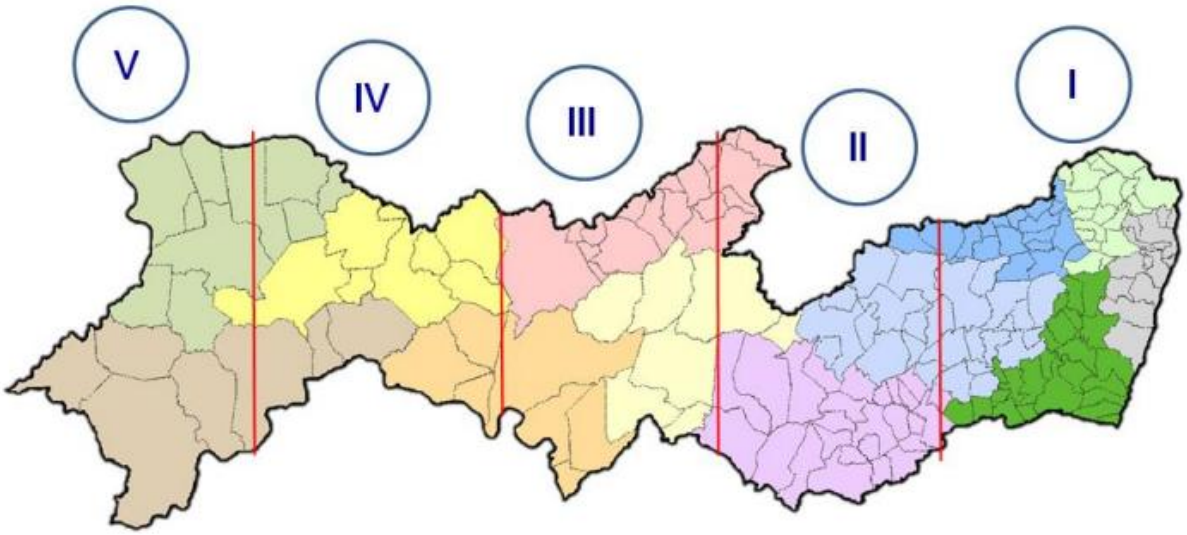
O MapBiomas gera dados ágeis, precisos e de alta qualidade, destacando-se em relação a outras metodologias aplicadas na análise do uso e ocupação do solo. Além disso, as imagens disponibilizadas pelo MapBiomas mostraram elevada acurácia em suas análises, demonstrando resultados que corroboram a fidelidade do tratamento (Francisco *et al*., 2023).

Internacionalmente, são poucos os produtos que têm a capacidade de monitorar e mapear grandes áreas com alta resolução temporal, sendo o MapBiomas um dos projetos que oferecem esse tipo de serviço. O MapBiomas, com apoio do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), agrega dados e tratamentos de referência (MapBiomas, 2023).

3.4.2. Pernambuco Tridimensional

Em 2014, teve início o programa Pernambuco Tridimensional (PE3D), que mapeia todo o território do estado de Pernambuco. Foram realizados o perfilamento a laser e todo o recobrimento aerofotogramétrico dos 98.149 km² do estado, utilizando uma metodologia estruturada em cinco blocos (Figura 2). A produção de imagens aéreas e de varredura utilizando a tecnologia *Light Detection and Ranging* (LiDAR) resultou em dados em alta representação espacial e precisão, organizados em conjuntos de dados em escala 1:5.000 (Cirilo *et al*., 2015).

Figura 2- Divisão metodológica para processamento do programa Pernambuco Tridimensional.



Fonte: Cirilo *et al*., (2015).

Surgiu a partir de um trabalho de extensão realizado pela Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos (SRHE). Sua idealização ocorreu em decorrência das catástrofes de inundação que atingiram diversas regiões dos estados de Pernambuco e Alagoas. O levantamento concentrou-se nos rios Una, Mundaú e Sirinhaém, com foco na análise dos estirões fluviais e das áreas alagadas das respectivas bacias hidrográficas. O recobrimento neste estudo totalizou aproximadamente 1.100 km², utilizando escalas de 1:5.000 e 1:2000 (Cirilo *et al*., 2014).

O PE3D contribui diretamente para os estudos de gestão territorial do estado de Pernambuco, subsidiando fontes de dados espaciais de referência que são fundamentais para o ordenamento territorial e para o uso e ocupação do solo (Pontes *et al*., 2019).

3.5. Curva Cota–Área–Volume (CAV)

Curva Cota–Área–Volume são modelos matemáticos que relacionam parâmetros dos reservatórios, como a capacidade de armazenamento e a área do espelho d'água (Kuhnen, 2020). Elas são utilizadas como ferramenta para controles de cheias no abastecimento de água. Conforme descrito, a curva CAV gera um modelo da superfície do reservatório com regras operacionais voltadas para análises e demandas hídricas (Mattos, 2012).

Os resultados estimados da curva cota–área–volume são fundamentais para compreender a dinâmica dos reservatórios. No entanto, sua elaboração exige atividades de coleta de dados realizados *in loco*, por meio de técnicas de batimetria e topografia, que empregam equipamentos como ecobatímetro e *Global Positioning System* (GPS) geodésico. Esse processo envolve custos elevados, o que dificulta a realização de atualizações periódicas da curva (Costa, 2019).

Ainda de acordo com Costa (2019), a precisão e confiabilidade dos dados da curva CAV são fundamentais para a estimativa do volume. A ausência de dados viáveis compromete a gestão eficiente do reservatório, dificultando tomadas de decisões eficazes.

O Brasil teve avanços significativas no enfrentamento de impactos do assoreamento na gestão de reservatório, a Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (ANA) em conjunto com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) elaborou a resolução conjunta N° 003 - ANEEL - ANA. Essa norma exige o monitoramento dos reservatórios utilizando a curva CAV, com atualização a cada 10 anos, conforme as normas cartográficas vigentes (Estigon; Matos; Mauad, 2012).

> A ABRAGE com base em dois trabalhos de consultoria contratados, uma na área de Cartografia e Geodésia e outra na área de Sedimentos, elaborou proposta metodológica sugerindo novas orientações para atualização das curvas Cota X Área X Volume - CAV [...]. Conforme descrito nos itens: 3.7.1.; 3.7.2.; 3.7.3; 3.7.4. e 3.7.5 das Orientações para Atualização das Curvas Cota X Área X Volume - CAV versão de Dez-2013 publicada pela ANA com cooperação da Associação Brasileira de Empresas Geradoras de Energia Elétrica - ABRAGE e a supervisão da ANA, o Plano de Monitoramento de Sedimento do Reservatório é citado, porém o documento não cita nenhum detalhamento do que seria este Plano, somente cita que, após a primeira batimetria completa dos reservatórios (a cada 10 anos), o empreendedor deverá fazer o Plano de Monitoramento de Sedimento do Reservatório, dentre os itens que deverá compor este Plano está o levantamento batimétrico das seções de controle (item 3.2 das Orientações) com as seguintes frequências: anual, a cada 2 ou 3 anos, conforme a classificação do Nível de Criticidade do Reservatório (item 3.1.5 das orientações) (CUNHA; ROIG, 2018, p. 05).

Devido ao elevado custo para a geração da curva CAV, que pode variar entre R$ 1.200 e R$ 4.400 por hectômetro cúbico, muitos fatores influenciam esse valor, como a localização do reservatório, a mobilização das equipes e a área de abrangência do corpo hídrico. Muitos gestores de reservatórios situados na região semiárida brasileira, por não disporem de monitoramento contínuo, ainda utilizam curvas antigas, elaboradas entre as décadas 1950 a 1970, o que compromete a confiabilidade dos dados. Com isso, é provável que haja assoreamento nos reservatórios, que compromete tanto a qualidade da água - muitas das vezes devido ao uso irregular das áreas de entorno - quanto a capacidade de armazenamento d'água. Atualmente, os avanços tecnológicos, como os sistemas de posicionamento global e os equipamentos de aerofotogrametria e batimetria, permitem o aprimoramento e a precisão e atualização dos dados, superando as limitações das metodologias utilizadas em projetos antigos (Collischonn; Clarke, 2016).

3.6. Geoprocessamento no Monitoramento Hídrico

Os meios físico, biológico e atmosférico do ambiente sofrem transformações constantes devido às ações antrópicas. Por isso, estudos voltados ao monitoramento e à

análise dos impactos ambientais estão sendo continuamente realizados. Nesse contexto, o campo das geotecnologias tem evoluído junto aos avanços tecnológicos, permitindo que o geoprocessamento seja utilizado para levantar e analisar dados espaciais com precisão, contribuindo para o planejamento ambiental. Em especial, estudos que envolvem bacias hidrográficas fazem uso de técnicas de sensoriamento remoto e de geoprocessamento para compreender a distribuição e as características ambientais da superfície (Souza, 2017).

As Ferramentas de Geoprocessamentos são essenciais para a gestão hídrica e para a sustentabilidade da água nas gerações futuras. Elas alimentam os bancos de dados capazes de acompanhar as variações de vazão e os impactos das atividades humanas, como a irrigação agrícola e a expansão urbana. Esses recursos são fundamentais para o monitoramento ambiental, pois comprovam resultados e orientam decisões estratégicas voltadas à preservação ambiental e à gestão dos recursos hídricos (Alves; Campos; Xavier, 2013).

A aplicação de técnicas de geoprocessamento tornou-se indispensável para a análise do uso da terra, apresentam processos de desmatamento e contribuindo para o monitoramento agrícola. Métodos derivados do sensoriamento remoto têm permitido identificar a dinâmica territorial com maior precisão. As análises multitemporais revelam características das áreas estudadas, destacando a importância do monitoramento contínuo para a promoção da sustentabilidade. As técnicas aplicadas no campo da geotecnologia demonstram avanços significativos e geram previsões detalhadas que orientam e promovem o equilíbrio entre a preservação dos recursos naturais e a produção (Lima, 2025).

O Brasil, por ser um território de grande extensão geográfica, possui diversas áreas de difícil acesso. Nesse contexto, os métodos aplicados no geoprocessamento tornam-se fundamentais para avaliar e monitorar essas áreas. Por meio de séries históricas de imagens, é possível identificar áreas de preservação e de degradação ambiental. No entanto, apesar dos avanços nas pesquisas, o acesso às geotecnologias enfrenta obstáculos, principalmente ao custo elevado dos softwares de processamento e aquisição de dados (Mentz, 2021).

Ainda segundo Mentz (2021), as ferramentas de geoprocessamento são especialmente relevantes na análise de áreas úmidas e da dinâmica hidrológica. Tornar essas geotecnologias mais acessíveis é essencial para garantir informações precisas e de qualidade, contribuindo para avanços nos estudos ambientais e na gestão eficiente dos recursos naturais.

3.7. Reservatório Engenheiro Francisco Saboya

No entorno do Reservatório Engenheiro Francisco Saboya, foram analisados os impactos ambientais decorrentes do uso para irrigação agrícola e da ocupação irregular do solo. Essas práticas intensificaram as alterações nas estruturas paisagísticas, resultando na

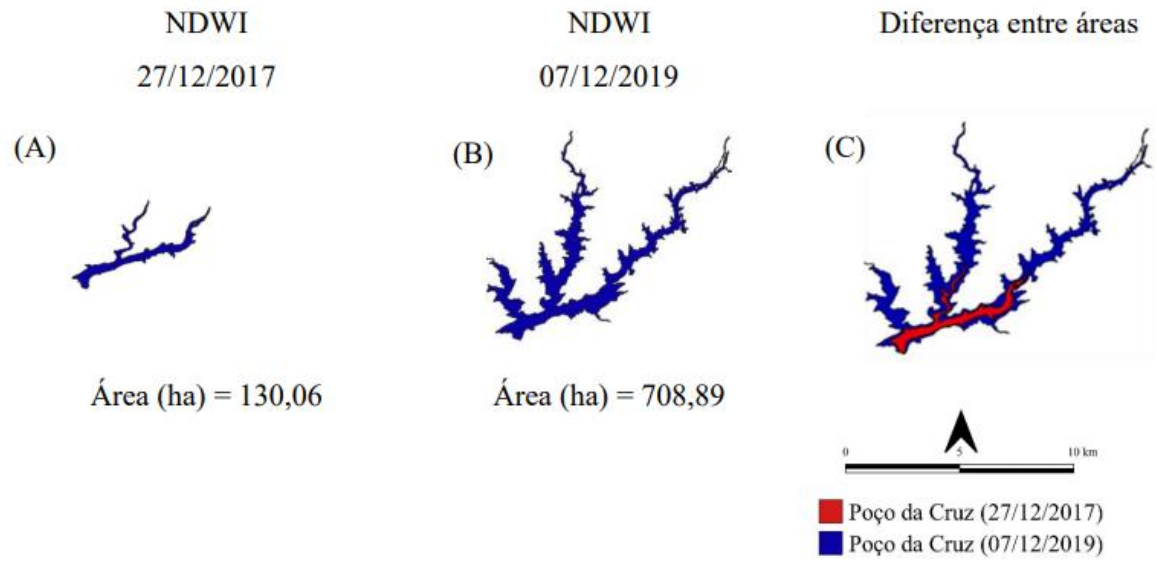
degradação das matas ciliares e das Áreas de Preservação Permanente (APPs). A avaliação foi realizada por meio de técnicas de geoprocessamento, que monitoram e identificam transformações com precisão (Silva; Duarte; Vasconcelos, 2024).

O reservatório possui grande importância para a comunidade de Poço da Cruz e para o Perímetro Irrigado do Moxotó (PIMox), contribuindo diretamente para a agricultura local e o bem-estar da população. No entanto, a ausência de manejo conservacionista e de políticas educacionais voltadas à preservação ambiental compromete o uso sustentável da água, principalmente durante os períodos de seca, que são períodos recorrentes no semiárido pernambucano (Dos Santos, 2021).

Complementando sua análise, o uso de geotecnologias tem proporcionado estratégias eficazes de gestão, auxiliando os proprietários e gestores do reservatório na tomada de decisões. Por meio de mapas temáticos, índices de vegetação e de corpo hídrico (NDVI e NDWI), além da análise do uso e ocupação do solo, é possível classificar áreas úmidas e de cobertura vegetal, promovendo decisões estratégicas e sustentáveis para o manejo dos recursos hídricos.

O reservatório apresenta uma dinâmica hídrica variável, apontada pela aplicação do Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI), que permitiu a extração de máscaras do corpo hídrico e a identificação das diferenças espaciais entre as áreas nos anos de 2017 e 2019 (Figura 3) (De Oliveira Farias et al., 2024).

Figura 3 - Diferença das máscaras hídricas do Reservatório Engenheiro Francisco Saboya.



Fonte: De Oliveira Farias et al., (2024).

O autor também destaca a relevância das ferramentas geotecnológicas utilizadas, que foram fundamentais para a obtenção precisa dos dados. Essa abordagem permitiu revelar os valores estatísticos do NDWI correspondentes a cada índice analisado (Figura 4).

Figura 4 - Tabela estatísticas dos NDWI gerados no reservatório nos anos 2017 e 2019.

Imagem	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão
27/12/2017	-0,478	0,155	0,364	0,182
07/12/2019	0,255	0,408	0,483	0,027

Fonte: Farias *et al.,* (2024).

Por meio da aplicação de métodos de processamento digital de imagem, como o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) e o Índice de Área Foliar (IAF), foram identificadas variações nos índices de vegetação, temperatura, radiação e evapotranspiração ao longo dos três anos avaliados (Figura 5) (Barbosa; Lopes, 2022).

Figura 5 - Tabela com as variações dos métodos aplicados no Reservatório Engenheiro Francisco Saboya nos anos de 2018, 2019 e 2020.

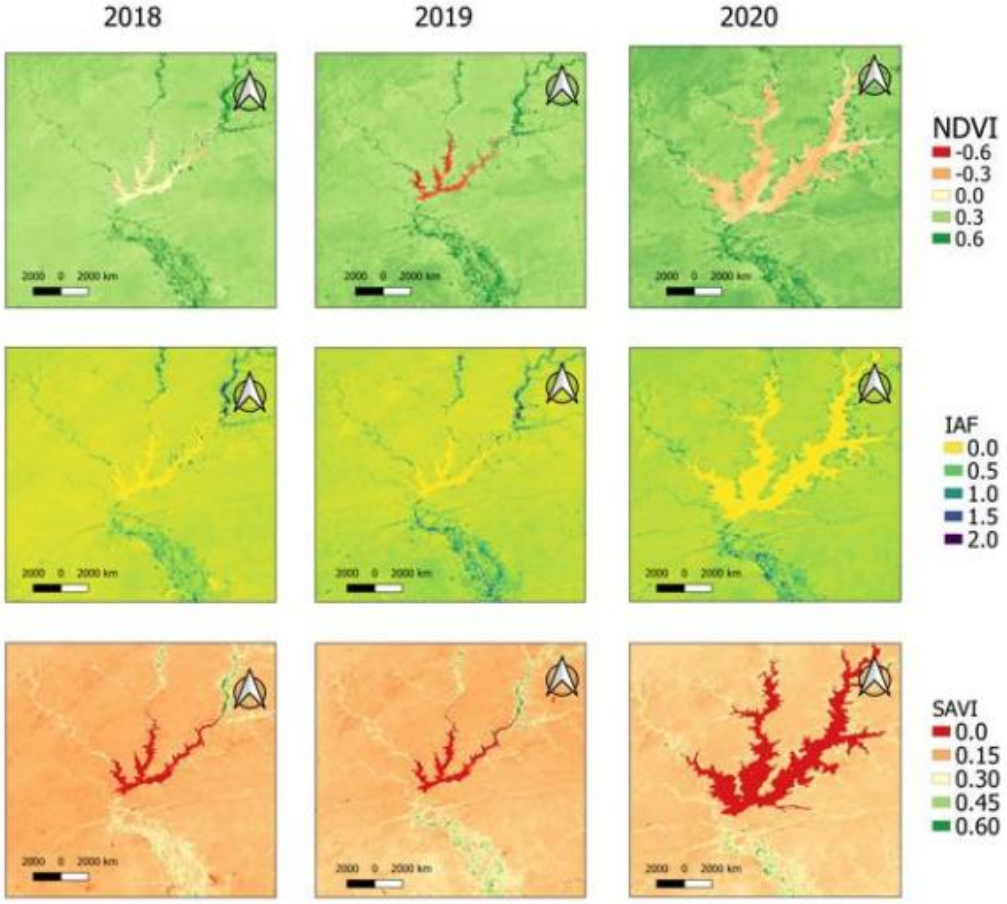
Parâmetro	Ano	Mínimo	Média	Máximo
NDVI	2018	-0,87	0,28	0,87
	2019	-0,83	0,31	0,85
	2020	-1,00	0,35	0,91
IAF	2018	0,00	0,16	7,01
	2019	0,00	0,21	5,32
	2020	0,00	0,25	2,82
SAVI	2018	-0,08	0,18	0,69
	2019	-0,15	0,20	0,68
	2020	-0,07	0,21	0,64
Temperatura da superfície (°C)	2018	20,72	30,76	44,06
	2019	23,47	42,08	48,08
	2020	25,56	41,18	46,34
Saldo de Radiação (Wm^{-2})	2018	270,74	596,97	810,02
	2019	275,12	543,13	811,85
	2020	306,75	541,62	786,54
ETr (mm/dia)	2018	-3,19	2,93	6,32
	2019	-2,44	1,96	7,48
	2020	-2,24	2,07	7,59

Fonte: Barbosa e Lopes, (2022).

> De acordo com os dados, o ano de 2020 apresentou os maiores valores de NDVI (0,35), IAF (0,25) e SAVI (0,21), seguido pelo ano de 2019 e 2018. Já em relação a estimativa da evapotranspiração real diária, 2018 foi o ano que apresentou maior valor (6,32 mm/dia) e os anos de 2019 e 2020 apresentaram valores semelhantes (Barbosa e Lopes, 2022, p. 33).

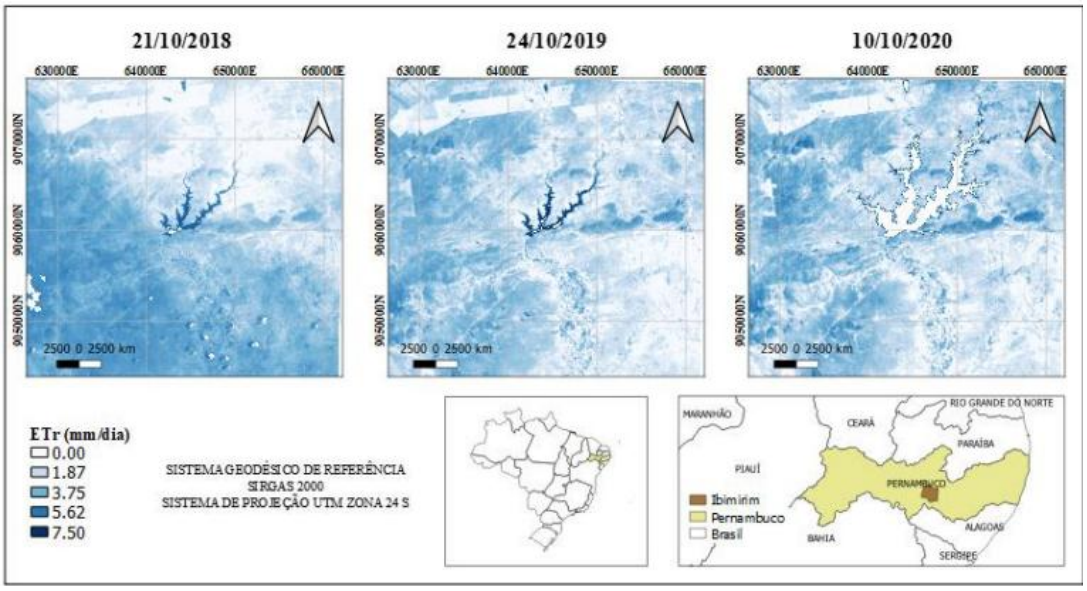
Ainda segundo o autor, os índices de vegetação aplicados ao reservatório apresentaram variações entre os anos, sendo que os maiores valores de cada índice indicam a presença de vegetação densa (Figura 6), com destaque para o ano de 2020. Na análise espacial da evapotranspiração, observou-se uma variação diária entre -3,19 e 7,59 mm/dia, com o ano de 2018 registrando o maior valor médio e 2019 com menor (Figura 7).

Figura 6 - Índices físicos de vegetação aplicados no período de três anos.



Fonte**:** Barbosa; Lopes, (2022).

Figura 7 - Mapa de evapotranspiração do Reservatório Engenheiro Francisco Saboya.



Fonte**:** Barbosa e Lopes, 2022.

Os estudos voltados para o reservatório são fundamentais para avaliar sua situação e realizar análises espaço-temporal. Segundo Medeiros (2018), os resultados obtidos por

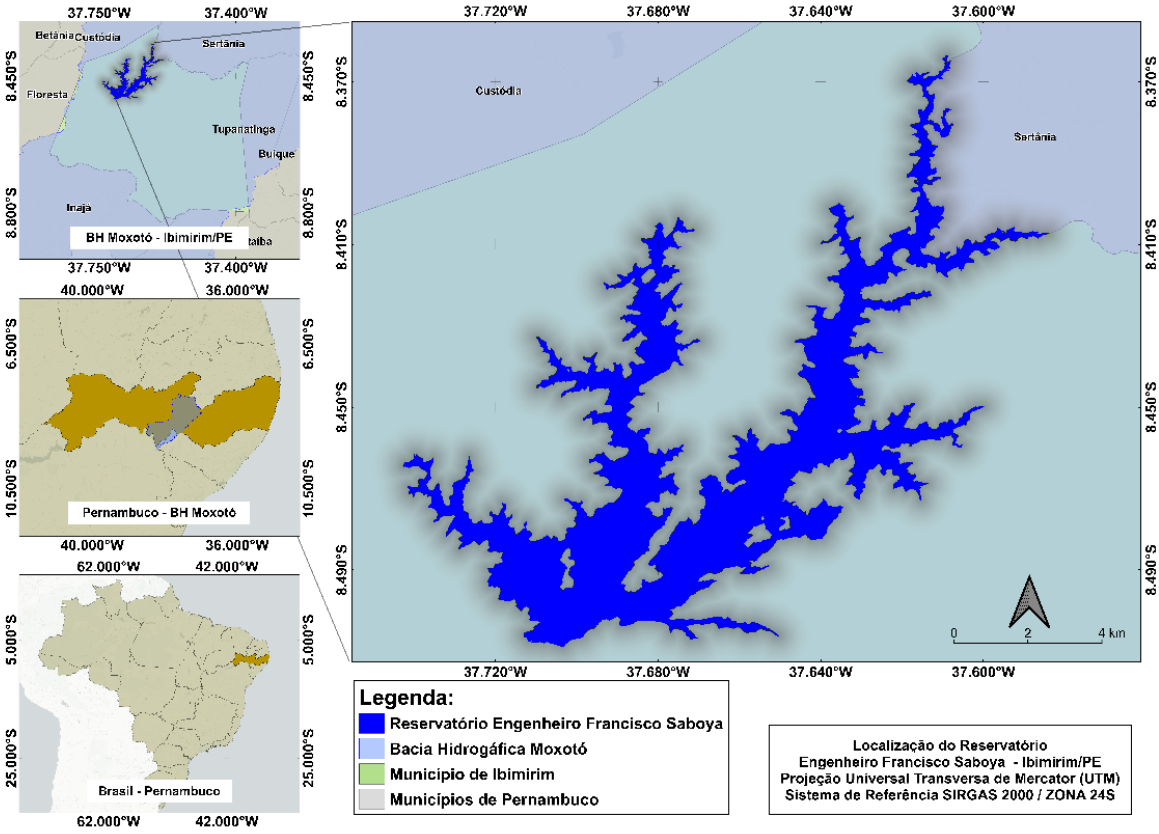
meio de técnicas de processamento aplicadas aos recursos hídricos, contribuem para um planejamento eficiente, subsidiando tomadas de decisões com base nos dados gerados.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Área de Estudo

O Reservatório Engenheiro Francisco Saboya, conhecido popularmente como Poço da Cruz, situa-se no município de Ibimirim, no estado de Pernambuco. Suas coordenadas geográficas são: 08° 29' 52,10" S, 37° 43' 2,57" W (Figura 8). De acordo com ANA (2017), os dados operacionais indicam que o reservatório possui uma área de drenagem total de 4.680,10 km², com a capacidade máxima do volume hídrico de 504,00 hm³ e mínima de 75,60 hm³. A construção de Poço da Cruz foi finalizada no ano de 1957, e, posteriormente, em 2014, houve a recuperação dos açudes. Atualmente, sua estrutura é de enrocamento, com extensão de 420,00 m e altura de 43 m na barragem principal. O proprietário e operador é o Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS). O reservatório atende quatro tipos de demanda: cerca de 2% no abastecimento humano urbano fornecido para as sedes municipais de Itaíba/PE e Tupanatinga/PE; cerca de 3% destinado ao abastecimento humano rural; cerca de 3% na dessedentação animal e 92% do volume armazenado é destinado à irrigação (ANA, 2017).

Figura 8 - Mapa de localização do Reservatório Engenheiro Francisco Saboya.



Fonte: Autor (2025).

O reservatório está localizado na Bacia Hidrográfica do Rio Moxotó com área total de 9.744,01 km², sub-bacia do submédio São Francisco. A maior parte da área da bacia está localizada no estado de Pernambuco, enquanto uma porção menor se estende até o estado de Alagoas, chegando ao rio São Francisco. A bacia hidrográfica recebe o nome de rio Moxotó, cuja nascente localiza-se no município de Sertânia, o rio percorre ≅ 220 km até a foz, no rio São Francisco; um dos afluentes é o rio Piutã, que deságua no reservatório Eng. Francisco Saboya.

A Bacia Hidrográfica Moxotó ocupa duas províncias geológicas: cristalina e sedimentar. No município que está localizado o reservatório, predominam o Complexo Gnáissico-Migmatítico e a unidade litoestratigráfica do Pré-Cambriano Superior, correlacionada ao Grupo Salgueiro. Os solos predominantes da bacia pertencem às classes BRUNO NÃO CÁLCICO e REGOSOL (Pernambuco, 1998).

Dessa forma, a Agência Nacional da Água e Saneamento Básico (ANA) estabeleceu os Estados Hidrológicos (EH) do reservatório por meio da resolução n° 50, de 06 de agosto de 2018.

- **EH Vermelho**: Volume ≦ 98,50 hm³, cota ≦ 423,79 m;
- **EH Amarelo**: Volume entre 98,50 e 185,80 hm³, cota entre 423,79 e 427,67 m;
- **EH Verde**: Volume entre 185,80 e 279 hm³, cota entre 427,67 e 430,55 m;
- **EH Azul**: Volume ≧ 279 hm³, cota ≧ 430,55 m.

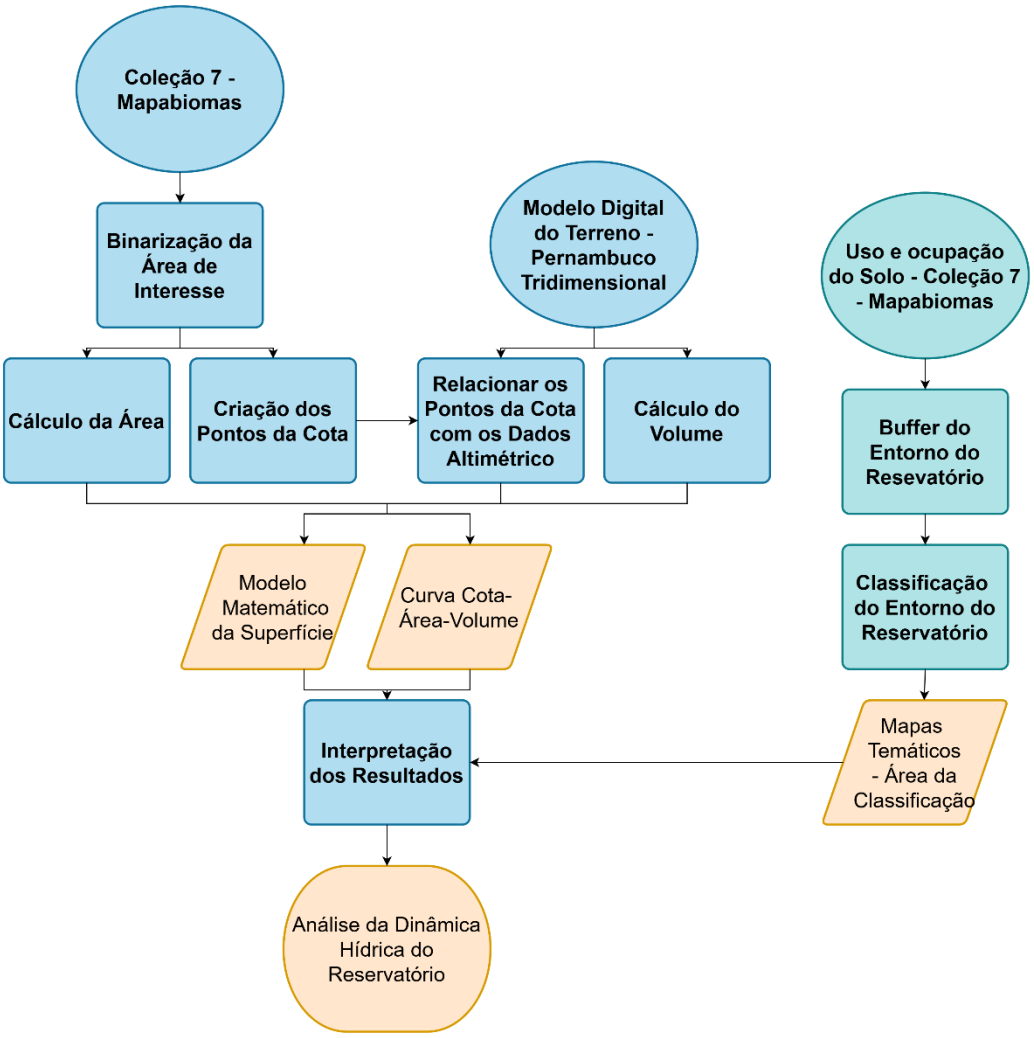
De acordo com a ANA (2025), Poço da Cruz encontra-se em EH Verde com cota de 429,03 m e volume de 226,39 hm³.

O reservatório está situado no sertão nordestino, em uma região predominante de Caatinga densa, caracterizada por vegetação rasteira, seca e marginal. Segundo a Agência Pernambucana de águas e clima (APAC) (2023), a temperatura média do ar no município de Ibimirim é de 25,6 °C. A taxa de evapotranspiração anual é de 1526,1 mm, e a precipitação acumulada anual é de 510,2 mm. Conforme a classificação climática de Köppen, a região é caracterizada pelo clima semiárido quente, definido como de baixas latitudes e altitudes.

4.2. Procedimento Metodológicos

Para alcançar os objetivos propostos, foram criadas etapas metodológicas que descrevam e relacionam parâmetros técnicos detalhados do Reservatório Engenheiro Francisco Saboya (Figura 9).

Figura 9 - Fluxograma da etapa metodológica.



Fonte: Autor (2025).

Inicialmente, realizou-se o levantamento dos dados-base para execução do trabalho acadêmico, por meio da obtenção da série histórica temporal na plataforma do MapBiomas – Coleção 7.0, que disponibiliza gratuitamente um conjunto de imagens multitemporais anualmente de uso e cobertura do solo, geradas pelos sensores do satélite *Landsat* e abrangendo o período de 37 anos (1985-2021). Em paralelo, foi realizada a aquisição do Modelo Digital do Terreno (MDT) no banco de dados Pernambuco Tridimensional que executou a campanha de coletas de dados entre os anos de 2014 e 2015, na qual a média do volume do reservatório era de 27,69 hm³. E aquisição da ficha técnica viabilizado pela ANA, com os dados reais para validação.

4.2.1. Pré-processamento

Previamente ao processamento, os dados brutos passaram por um ajuste inicial no *software* QGIS versão 3.40.11. No MDT, foi realizado o mosaico das imagens, uma vez que o banco de dados abrange uma área inferior à do reservatório. Em seguida, foi realizada a binarização (valores 0 e 1) de cada imagem da série histórica, com a finalidade de isolar os pixels correspondentes aos corpos d'água. Após essa etapa, os pixels da lâmina d'água são convertidos do formato raster para vetor. Para melhor visualização, foi aplicado uma suavização na camada vetorial. Esse procedimento foi repetido de maneira padronizada para todos os anos da série histórica, utilizando os mesmos parâmetros de binarização, recorte e suavização. Com o polígono do reservatório foi realizado o recorte do reservatório no MDT.

4.2.2. Levantamento dos Dados da Curva CAV

Finalizado o pré-processamento, foram aplicadas técnicas operacionais que forneceram os dados de volume, cota e área, base para a construção do CAV. Para o cálculo do volume do reservatório, foi desenvolvido uma rotina no *Python* que utiliza como parâmetros principais: o Modelo Digital do Terreno do reservatório e a cota desejada para análise.

O processamento identificou as camadas de entrada onde foi aplicada a expressão lógica (Equação 1):

$$Volume = (cota - MDT) * if(MDT < cota) \quad (1)$$

Essa fórmula calcula a profundidade útil apenas nos pontos onde o MDT está abaixo da cota especificada. Após a resolução da expressão foi somado o volume encontrado com o volume real da menor cota 418 com 30,3 hm³ de acordo com a ficha técnica do reservatório. A rotina apresenta o volume em metros cúbicos (m³) e em hectômetros cúbicos (hm³) facilitando a interpretação dos dados.

Para a geração da altitude, esta é obtida por meio da integração entre o MDT e a representação vetorial do reservatório. A camada vetorial do reservatório é utilizada como base para a criação de 1000 pontos aleatórios na borda, quantidades de pontos escolhidos para maior detalhamento da cota. O procedimento foi realizado pela ferramenta do QGIS "Pontos aleatórios na borda da camada". Posteriormente, foi efetuada a integração dos pontos de amostragem com o MDT, utilizando o *plugin* "*Point Sampling Tool*". A execução segue os seguintes critérios:

- Camadas contendo pontos de amostragem = 1000 pontos;
- Camada com campo/bandas para obter valores = MDT;
- Campo identificador "Id".

Durante o processamento, o *plugin* cruza as informações gerando duas colunas: uma com Id dos pontos e outra com a altimetria. Essa nova camada representa os pontos

amostrados já integrados à altimetria. O procedimento seguiu exatamente as mesmas ferramentas e parâmetros para todos os anos da série histórica.

O procedimento de identificação da área do corpo d'água do reservatório é realizado de forma simplificada, utilizando a respectiva camada vetorial para cada ano da série temporal. A área da superfície do corpo hídrico foi determinada em hectares a partir da geometria da camada vetorial, utilizando a calculadora de campo do QGIS versão 3.40.11.

4.2.3. Organização e Tratamento dos Dados da Curva CAV

A partir dos dados de cota, área e volume gerados no QGIS, foi realizada a organização e o tratamento das informações no Excel versão 2210. As informações foram tabuladas da seguinte forma: a área foi agrupada por ano; o volume, de acordo com a cota extraída do MDT; e a cota, também associada ao respectivo ano.

Em relação a cota em cada ano, há uma amostragem de mil valores de altitude, o que gera discrepâncias significativas. Para a minimização dessas variações, foi aplicado um método estatístico dos interquartil (IQR) que permite identificar e excluir *outliers*. O IQR é eficaz para filtrar valores atípicos, mantendo apenas os dados que se encontram dentro do intervalo interquartil. Esse método IQR foi aplicado para cada ano da série histórica. Como consequência, houve variação na quantidade de dados entre os anos. Para padronização, adotou-se o número de registros do ano com menor quantidade de dados (889 linhas).

Em seguida, foram aplicadas medidas estatísticas – média, moda e mediana – para cada ano. Observou-se que a média e a mediana apresentaram comportamentos semelhantes. No entanto, optou-se pela mediana como medida representativa da altitude anual, por sua maior certeza frente a variações pontuais e por ser menos sensível a flutuação residual.

Para construção do modelo matemático da superfície, foi elaborado uma planilha-síntese (Tabela 1).

Tabela 1 - Planilha-síntese com os dados obtidos por sensoriamento remoto.

Cota (m)	Área (ha)	Volume (hm³)
418	600,1	30,4
419	1196,5	34,1
420	1854,0	41,5
421	2028,4	50,6
422	2114,7	61,2
423	2909,6	73,6
424	3058,8	88,0
425	3753,8	104,6
426	4286,0	123,6
427	4667,4	145,2
428	4938,1	169,4

Fonte: Autor (2025).

Logo após a construção da planilha-síntese, foram gerados os gráficos correspondentes às relações entre cota e área, cota e volume, e cota–área–volume. A partir dos gráficos de cota × área e cota × volume, foi possível identificar linhas de tendência lineares, demonstrando as funções matemáticas que regem essas relações. Com base nessas funções, foi elaborado uma tabela com os valores de área e volume modelados, obtidos pela substituição da variável “x” pelos diferentes níveis de cotas (418-428).

4.2.4. Análise de Padrões da Série Histórica

Para a análise do reservatório, foram aplicados procedimentos para a identificação de padrões. O estudo observou o comportamento dos dados obtidos a partir do cálculo da área, bem como a elaboração de mapas temáticos que representem padrões recorrentes. Esses mapas serão gerados por meio da união das áreas vetoriais classificadas, permitindo uma compreensão mais clara da dinâmica espacial e do comportamento do reservatório ao longo do tempo.

Para garantir a eficácia na observação, foi realizada uma análise dos dados de uso e ocupação do solo disponibilizados pela plataforma MapBiomas, referente à Coleção 7. A partir da obtenção dos dados dos anos com maiores e menores áreas de inundação do Reservatório Engenheiro Francisco Saboya, realiza-se o recorte da área de interesse dos anos de 1985 início da série histórica e 2021 último registro da coleção 7 e os anos de 1986, 2001, 2004 e 2017 que demonstram os picos de maior e menor espelho d’água. Antes disso, é gerado um buffer de 120 metros para melhor cobertura espacial, essa delimitação segue a

Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 302 de 20 de março de 2002, Art. 3º, inciso I, que define como Área de Preservação Permanente (APP) 100 m da faixa no entorno de reservatórios artificiais localizados em zona rural. O *buffer* foi feito a partir da área de coroamento do reservatório que tem por cota 437 m.

Com o resultado do buffer, é realizado o recorte do reservatório nos dados de uso e ocupação do solo. Em seguida, procede-se à classificação das classes temáticas, utilizando o estilo de cores disponibilizado pelo próprio MapBiomas. Posteriormente, é analisada a porcentagem de área classificada por meio do plugin *"r.report"* do GRASS, integrado ao QGIS, o que permite a construção da tabela quantitativa de uso e ocupação do solo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os principais resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia descrita anteriormente. A análise busca também discutir com referências teóricas que fundamentam o estudo.

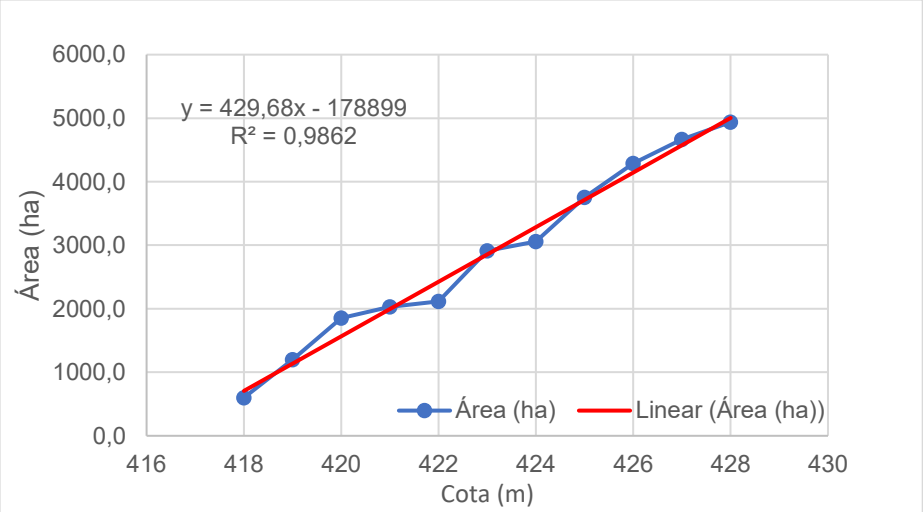
5.1. Curva Cota-Área-Volume (CAV)

Nas subseções a seguir, procura-se compreender as relações entre os dados obtidos da curva Cota–Área–Volume para o reservatório.

5.1.1. Relação Cota x Área

O Gráfico 1 apresenta a relação entre cota e área, evidenciando uma tendência linear. O modelo matemático ajustado descreve com alta precisão a correlação entre essas variáveis, com coeficiente de determinação R^2 = 0,9862, indicando que 98,62% da variabilidade dos dados é explicada pelo modelo. O que caracteriza um ajuste de alta qualidade dos dados observados (Quinino; Reis; Bessegato, 2011).

Gráfico 1 - Cota x Área.



Fonte: Autor (2025).

A Tabela 2 apresenta os valores obtidos a partir do processamento dos dados e da ficha técnica de monitoramento disponibilizados pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). A correlação entre esses valores indica uma diferença percentual entre a área e a cota, indicando discrepância entre os dados reais e os estimados por meio de técnicas de sensoriamento remoto. O Gráfico 2 demonstra que a área gerada por imagem apresenta maior dispersão e mediana superior à área real. De acordo com Bacalhau (2022),

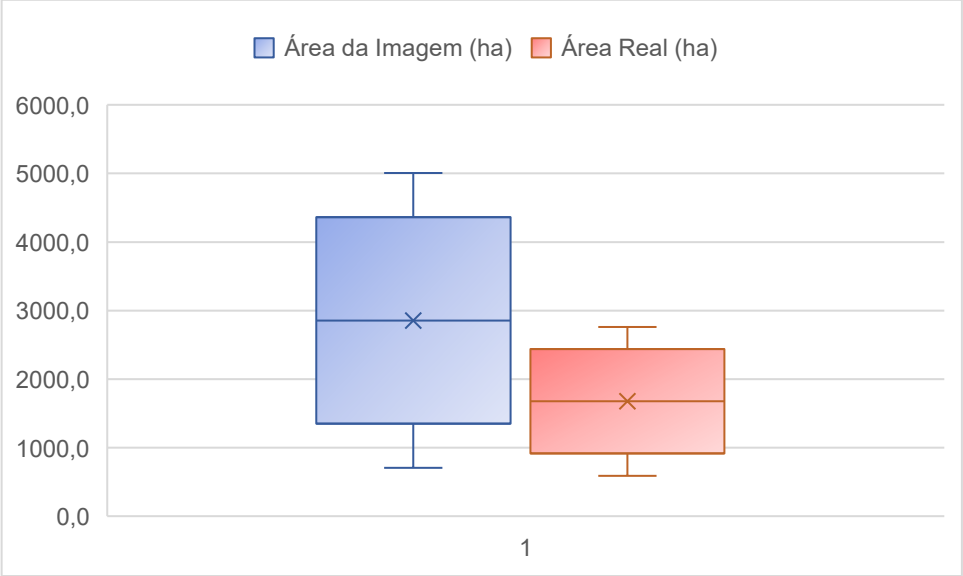
qualidade e a resolução espacial das imagens interferem diretamente na precisão dos dados estimados, podendo gerar divergências em relação aos dados obtidos por métodos convencionais. Influências como reflectância, variações naturais, movimentação do corpo hídrico pode interferir nos dados causando possíveis erros.

Tabela 2 - Diferenças percentuais entre a área real e a área da imagem.

Cota (m)	Área Real (ha)	Área da Imagem (ha)	Diferença (%)
418	592,2	707,2	19,4
420	1.026,2	1.567,0	52,7
422	1.460,1	2.426,0	66,1
424	1.894,0	3.285,3	73,5
426	2.328,0	4.145,0	78,0
427	2.762,0	5.004,0	81,2

Fonte: Autor (2025).

Gráfico 2 - Boxplot da área real e da área da imagem.



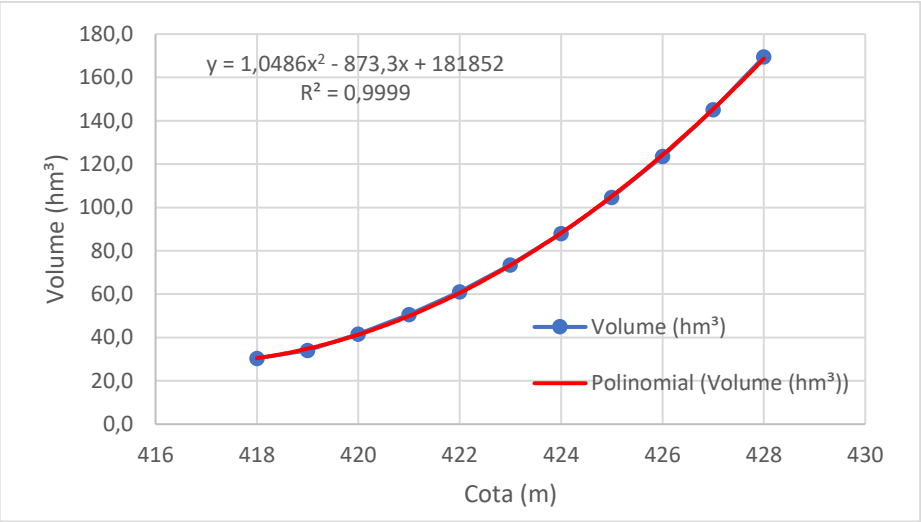
Fonte: Autor (2025).

5.1.2. Relação Cota x Volume

A partir da metodologia aplicada para a estimativa do volume do reservatório com base nos dados processados, foi gerado o Gráfico 3. Esse gráfico revela uma tendência polinomial grau 2 do volume em relação à cota. Conforme Ratkowsky (1993), modelos matemáticos com poucos parâmetros tendem ser mais próximos da linearidade, sendo assim mais aplicação e interpretação. Pois, modelos simples explicam bem o fenômeno estudado.

Com a aplicação da linha de tendência, foi possível identificar a função que modela o comportamento da superfície inundada, apresentando um coeficiente de determinação R^2 = 0,99, o que indica 99% de aderência entre os dados. Quanto mais próximo de 1 for o valor de R^2, representa um ajuste de alta qualidade (Quinino; Reis; Bessegato, 2011).

Gráfico 3 - Cota x Volume.



Fonte: Autor (2025).

Ao analisar a Tabela 3 apresenta a diferença entre o volume estimado por imagem de satélite e o volume real, revela uma variação percentual de 15% a 26%. Sendo que a primeira cota 418 m têm diferença de 55,4%, isso pode ter acontecido por alguma interferência na imagem ou no cálculo do volume. Observa-se no Gráfico 4 que os dados tem coerência, tendo suas medianas próximas.

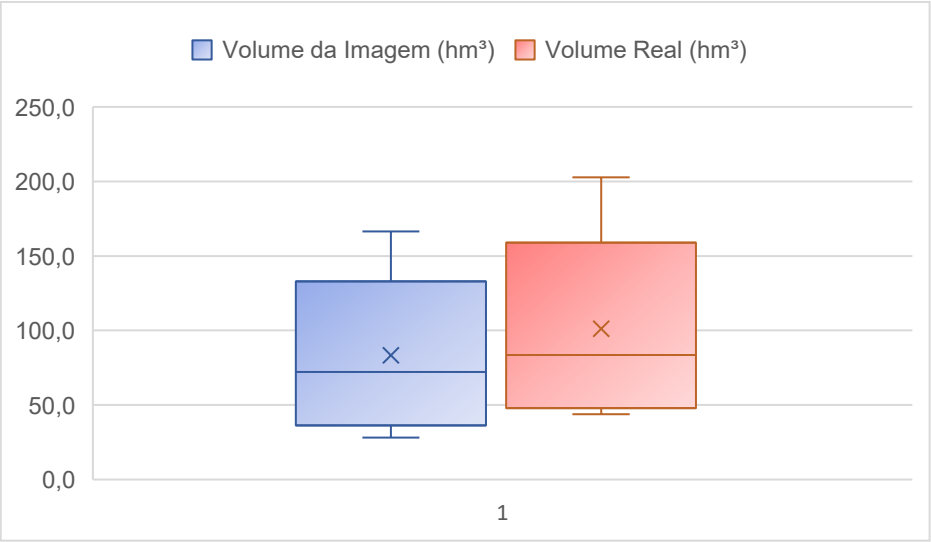
No estudo de Collischonn e Clarke (2016), a diferença percentual reportaram entre 6% e 8% como aceitáveis para aplicações em gestão hídrica. Embora as variações do volume da imagem do reservatório Eng. Francisco Saboya sejam superiores, importante ressaltar que vários fatores como resolução espacial, método de construção do MDT, influenciam nos resultados. No entanto, os valores obtidos ainda oferecem subsídios relevantes para análise volumétrica.

Tabela 3 - Diferenças percentuais entre o volume real e o volume da imagem.

Cota (m)	Volume Real (hm³)	Volume da Imagem (hm³)	Diferença (%)
418	43,8	28,2	55,4
420	49,1	39,0	25,8
422	67,7	58,3	16,1
424	99,5	85,9	15,8
426	144,5	121,9	18,5
427	202,7	166,3	21,9

Fonte: Autor (2025).

Gráfico 4 - Boxplot do volume real e do volume da imagem.

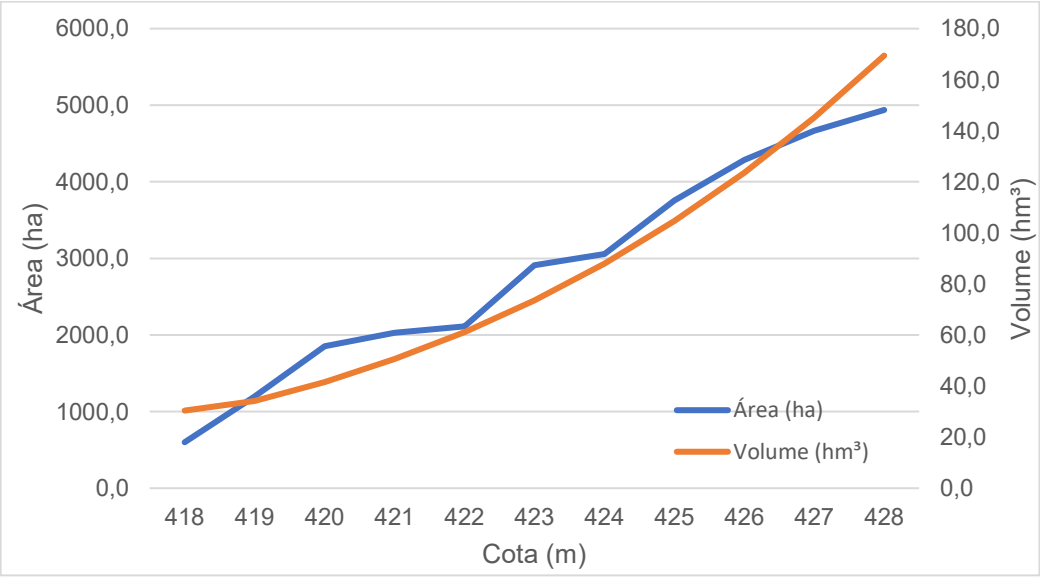


Fonte: Autor (2025).

5.1.3. Relação Curva Cota–Área–Volume (CAV)

A partir da extração dos dados de cota, área e volume, foi gerado a curva CAV do reservatório, permitindo uma compreensão mais precisa do comportamento das variáveis envolvidas. No gráfico 5 observa-se que, à medida que a cota aumenta, há um crescimento progressivo tanto da área inundada quanto do volume armazenado, indicando a relação direta entre a elevação e a capacidade de armazenamento do reservatório. A curva Cota–Área–Volume é importante para representar a dinâmica hídrica de reservatório e estimar a capacidade de armazenamento. Para obtenção da disponibilidade hídrica, é importante ter as informações que constrói a curva CAV (Collischonn; Clarke, 2016).

Gráfico 5 - Curva Cota–Área–Volume.



Fonte: Autor (2025).

5.2. Modelagem Matemática da Relação Cota-Área-Volume

A partir das relações entre cota e área, e entre cota e volume, foi possível gerar equações matemáticas que modelam a superfície do reservatório (Equação 2 e 3).

$$y = 216{,}96x - 90097 \quad (2)$$

.

$$y = 1{,}0486x^2 - 873{,}3x + 181822 \quad (3)$$

Ao encontrar os valores de “y” nas equações, foi possível gerar a Tabela 4, contendo a identificação das áreas e volumes modelados. Esses dados permitem uma compreensão mais detalhada do comportamento do reservatório em diferentes níveis de cota, permitindo análises precisa sobre sua dinâmica ao longo do tempo.

Os dados sugerem que o terreno ao redor do reservatório tem uma inclinação relativamente uniforme, sem grandes variações; a profundidade aumenta rapidamente em cotas superiores indicando maior capacidade de armazenamento. Reforçando a ideia de que o reservatório tem mais eficiência em armazenar água em cotas mais elevadas.

Tabela 4 - Área e volume modelado da superfície do Reservatório Engenheiro Francisco Saboya.

Cota (m)	Área Modelada (ha)	Volume Modelado (hm³)
418	707,24	28,19
419	1.136,92	32,56
420	1.566,60	39,04
421	1.996,28	47,61
422	2.425,96	58,28
423	2.855,64	71,05
424	3.285,32	85,91
425	3.715,00	102,88
426	4.144,68	121,93
427	4.574,36	143,09
428	5.004,04	166,34

Fonte: Autor (2025).

5.3. Análise da Dinâmica Hídrica ao Longo da Série Histórica

A análise temporal da Coleção 7 do MapBiomas permitiu compreender a evolução da dinâmica hidrológica do Reservatório Engenheiro Francisco Saboya ao longo de um intervalo de 37 anos (1985-2021). Por meio da interpretação das imagens de satélite, foi possível identificar a variação da área do reservatório. A Tabela 5 apresenta os valores anuais das áreas inundadas do reservatório registrados durante o período coberto pela Coleção 7.

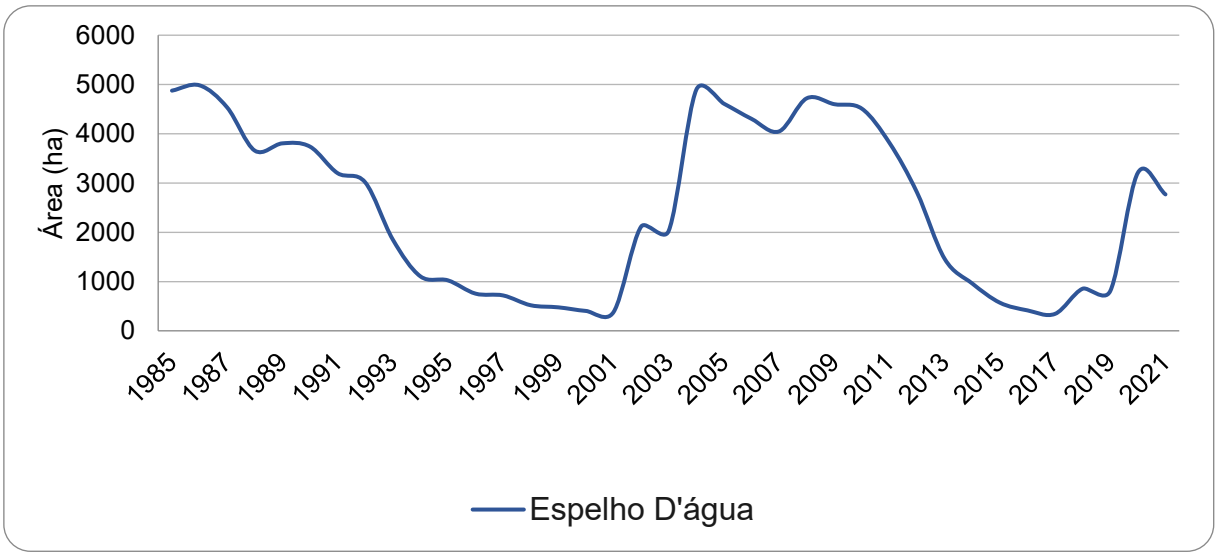
Tabela 5 - Área do reservatório identificada na Coleção 7 do MapBiomas.

Ano	Área (ha)	Ano	Área (ha)	Ano	Área (ha)
1985	4.874,76	1998	518,58	2011	3.814,20
1986	4.982,85	1999	476,37	2012	2.804,04
1987	4.533,48	2000	403,29	2013	1.459,44
1988	3.657,15	2001	379,08	2014	959,31
1989	3.804,93	2002	2.114,73	2015	570,42
1990	3.739,05	2003	2.028,42	2016	414,72
1991	3.200,40	2004	4.893,30	2017	344,34
1992	3.015,09	2005	4.609,98	2018	854,64
1993	1.854,00	2006	4.302,45	2019	808,02
1994	1.106,10	2007	4.047,48	2020	3.207,51
1995	1.023,84	2008	4.718,88	2021	2.768,40
1996	754,38	2009	4.599,81		
1997	717,84	2010	4.508,19		

Fonte: Autor (2025).

É visível a variação da dinâmica hídrica do reservatório entre seus níveis máximos e mínimos ao longo dos 37 anos analisados. O Gráfico 6, ilustra de forma clara o comportamento hidrológico do reservatório, percebe-se que as áreas máximas são próximas a área de coroamento do reservatório que tem o total de 4.929,00 hectares.

Gráfico 6 - Comportamento hidrológico do reservatório.



Fonte: Autor (2025).

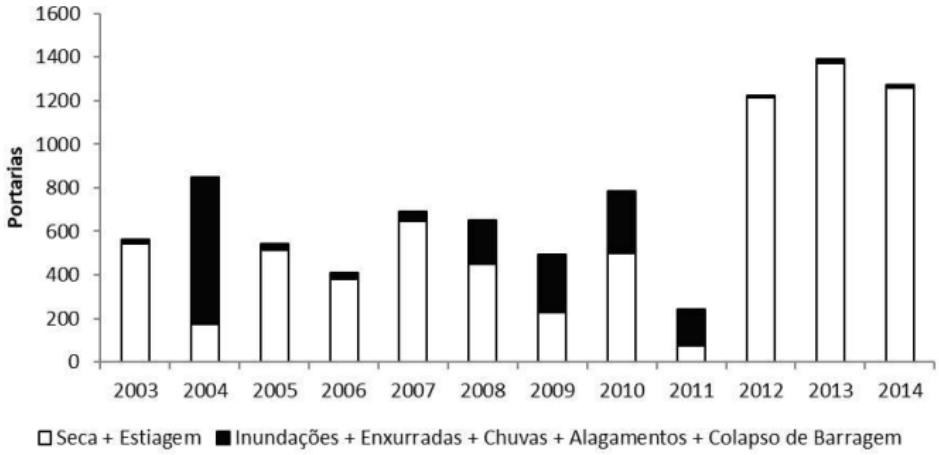
Observa-se que, ao longo do período analisado, o Reservatório Engenheiro Francisco Saboya apresenta dois ciclos distintos de cheia e redução da área (1986 – 2001 e 2004 - 2017). No primeiro ciclo, a área máxima foi registrada em 1986, com um espelho d'água de 4.982,85 hectares, enquanto a área mínima ocorreu em 2001, com apenas 379,08 hectares. No segundo ciclo, a área máxima foi observada em 2004, atingindo 4.893,30 hectares, e a mínima em 2017, com 344,34 hectares.

A análise desses dois ciclos revela um padrão recorrente na duração entre o enchimento e o esvaziamento do reservatório, estimado entre 14 e 16 anos. O gráfico 6 distingue um crescimento exponencial da área inundada em um intervalo relativamente curto, indicando uma rápida recuperação hídrica do reservatório.

Os períodos de redução da área do reservatório podem estar associados a diversos fatores, como o uso irregular da água para irrigação e a variabilidade climática intrasazonal. Segundo Nobre e Melo (2001), entre os anos de 1998 e 2000, observou-se uma elevada variabilidade na distribuição das chuvas, com ocorrência de anomalias positivas e negativas de precipitação em ciclos de 30 a 45 dias, principalmente no ano de 2000. Esse fenômeno climático é conhecido como *Oscilação Madden-Julian* (OMJ), caracterizado pela alternância entre períodos secos e chuvosos, mesmo dentro da estação chuvosa. Tais oscilações podem ter influenciado diretamente a dinâmica hídrica do reservatório, resultando na menor área inundada registrada em 2001.

No segundo ciclo, o comportamento do reservatório segue um padrão compatível com a tendência de distribuição temporal de desastres climáticos no Nordeste. De acordo com Olímpio (2020), há registros de períodos prolongados de seca e estiagem com duração média de dez anos, os quais estão associados à escassez ou ao excesso hídrico. A Figura 10, desenvolvida por Olímpio, pode ser relacionada à dinâmica hídrica observada nesse segundo ciclo, indicando que, nos anos de 2004, 2008, 2009, 2010 e 2011, houve maior taxa de inundação e redução de seca e estiagem. Nos demais anos, predominou a ocorrência de seca e estiagem em níveis mais elevados. De acordo com o ANA (2017), o estado hidrológico do reservatório foi classificado como EH Vermelho, com volume observado de 7,66 hm^3.

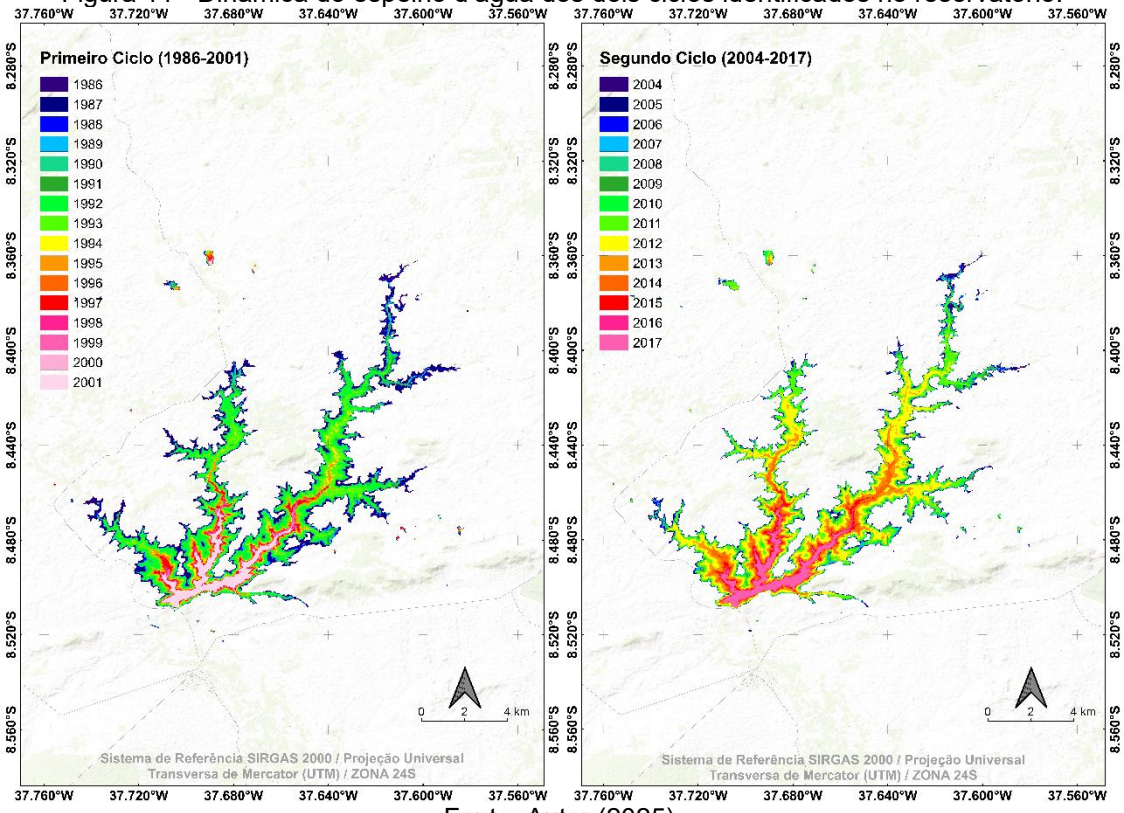
Figura 10 - Distribuição temporal de desastres associados ao clima no Nordeste do Brasil.



Fonte: Olímpio (2020).

O Reservatório Engenheiro Francisco Saboya possui uma capacidade hídrica de 504 hm³ e apresenta uma dinâmica hidrológica variável ao longo do tempo (Figura 11). Essa variabilidade revela padrões recorrentes ao longo da série histórica analisada, permitindo a identificação de dois ciclos distintos de enchimento e redução da área inundada.

Figura 11 - Dinâmica do espelho d'água dos dois ciclos identificados no reservatório.



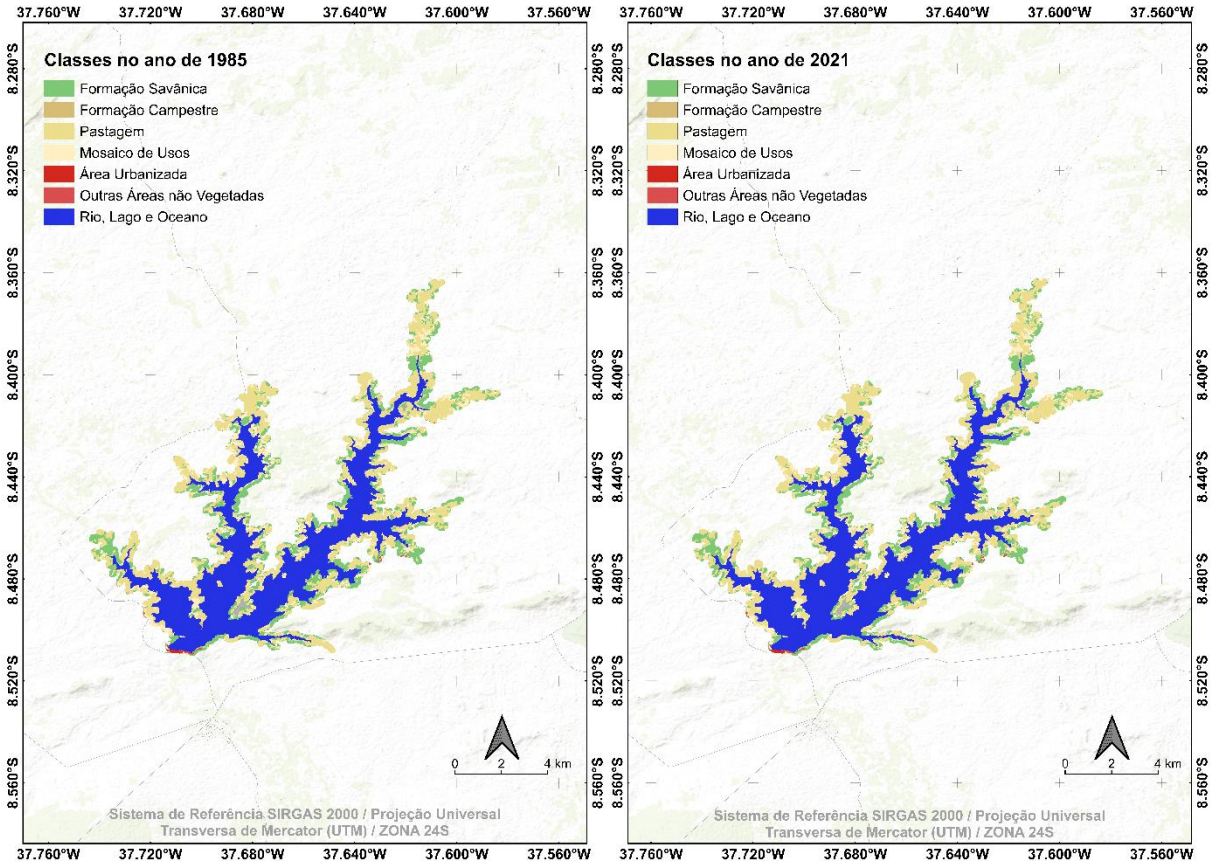
Fonte: Autor (2025).

O estudo conduzido pelo MapBiomas, com base na Coleção 7 de dados sobre o uso e ocupação do solo, apresenta resultados ambientais relevantes que ajudam a compreender as dinâmicas no entorno do Reservatório Engenheiro Francisco Saboya. Já foram identificados dois ciclos de enchimento e redução do reservatório na série histórica, o que permitiu a análise dos pontos correspondentes às áreas de máxima e mínima inundação.

Segundo a Resolução do CONAMA n° 302 de 20 de março de 2002, Art. 3°, inciso I, estabelece-se que uma faixa de 100 metros no entorno de reservatórios artificiais localizados em zona rural constitui Área de Preservação Permanente (APP). Essa faixa poderá ser ampliada conforme o licenciamento ambiental e o plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica onde o reservatório está inserido.

A série histórica do reservatório tem início em 1985, com dados gerados até 2021 por meio da Coleção 7 do MapBiomas. O estudo sobre o uso e a ocupação do solo abrange todos os anos desse período, permitindo uma análise comparativa entre os diferentes momentos da série. Observa-se que os dados referentes a 1985 apresentam diferenças significativas em relação aos de 2021 (Figura 12).

Figura 12 - Mapa comparativo do uso e ocupação do ano de 1985 e 2021.



Fonte: MapBiomas; Elaboração: Autor (2025).

Ao longo desses 37 anos, ocorreram dois ciclos e dentro das classes definidas, destaca-se a identificação da formação campestre, além do notável crescimento da área urbanizada, mostrando transformações no entorno do reservatório.

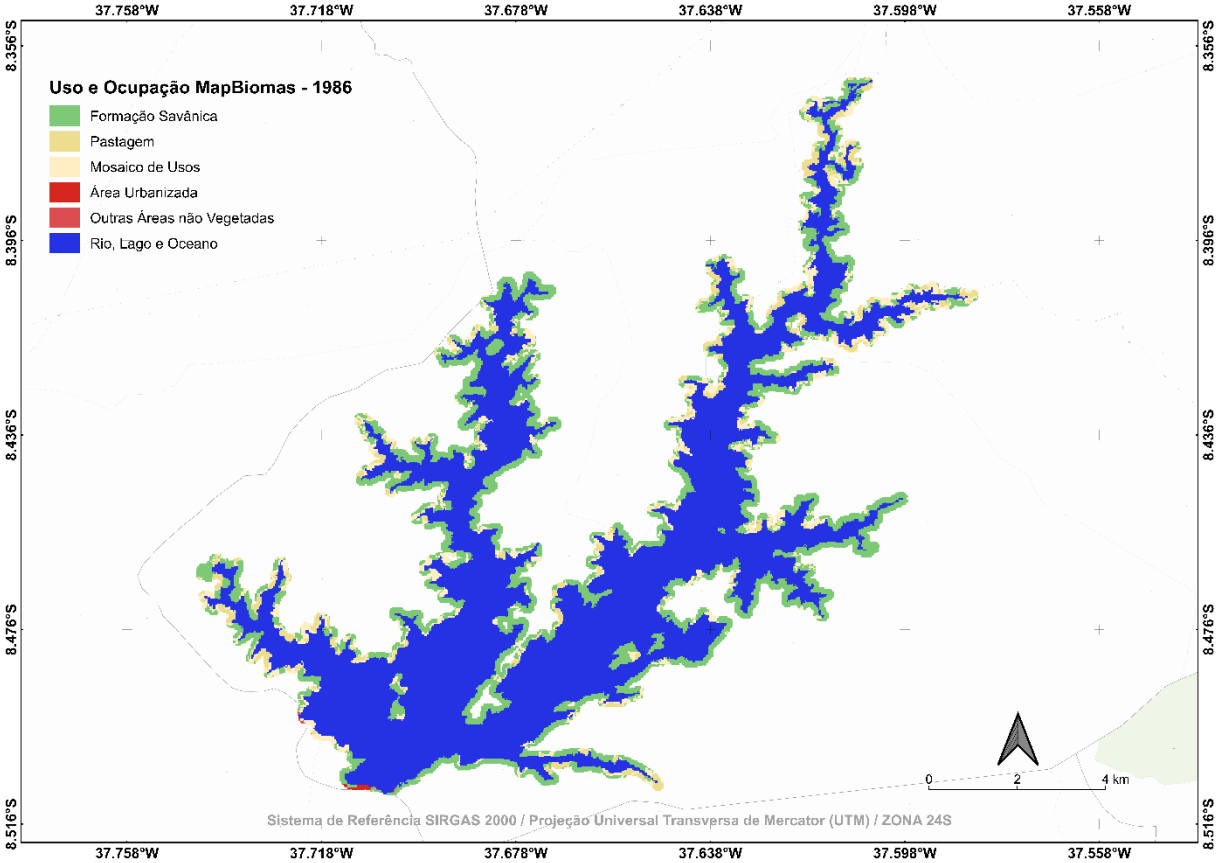
Tabela 6 - Quantificação das classes do uso e ocupação do solo do ano de 1985 e 2021 no Reservatório Engenheiro Francisco Saboya.

Uso do solo	1985		2021	
	Área (ha)	(%)	Área (ha)	(%)
Formação Savânica	1.809,50	24,03	1.271,56	16,89
Formação Campestre	0	0	11,31	0,15
Pastagem	146,87	1,95	2.365,32	31,41
Mosaico de Usos	732,94	9,73	726,32	9,65
Área Urbanizada	5,30	0,07	8,13	0,11
Área não Vegetada	2,65	0,04	14,85	0,20
Rio, Lago e Oceano	4.832,30	64,18	3.132,02	41,60
Área Total	**7.529,50**	**100**	**7.529,50**	**100**

Fonte: Autor (2025).

Com base nos dados apresentados na Tabela 6, observa-se um crescimento da área de pastagem, que passou de 146,87 hectares para 2.365,32 hectares em 2021, abrangendo o reservatório e seu entorno. A área urbanizada também apresentou um aumento expressivo, com quase o dobro da extensão registrada em 1985. O uso do território para atividades agrícolas é notório, uma vez que a maioria das classes identificadas no estudo de uso e ocupação do solo está relacionada a esse tipo de prática.

Figura 13 - Mapa de uso e ocupação do ano de 1986.



Fonte: MapBiomas; Elaboração: Autor (2025).

A Figura 13 apresenta as classes de uso e cobertura do solo identificadas na faixa de 120 metros no entorno do reservatório, no ano de 1986 — período em que a área de inundação se aproximava da capacidade máxima. Além da ocupação pelo espelho d'água, destacam-se cinco classes mapeadas pelo MapBiomas: Formação Savânica: caracteriza-se por vegetação arbustiva e árvores esparsas área com vegetação típica do bioma cerrado; Pastagem: são áreas destinada a criação de gado que caracteriza o solo com cobertura gramíneas; Mosaico de Usos: classificado como Agricultura, porém sem definição precisa da atividade; Área Urbanizada: refere-se a presença de núcleos urbanos; Áreas Não Vegetadas: são solos exposto causado por processo de degradação.

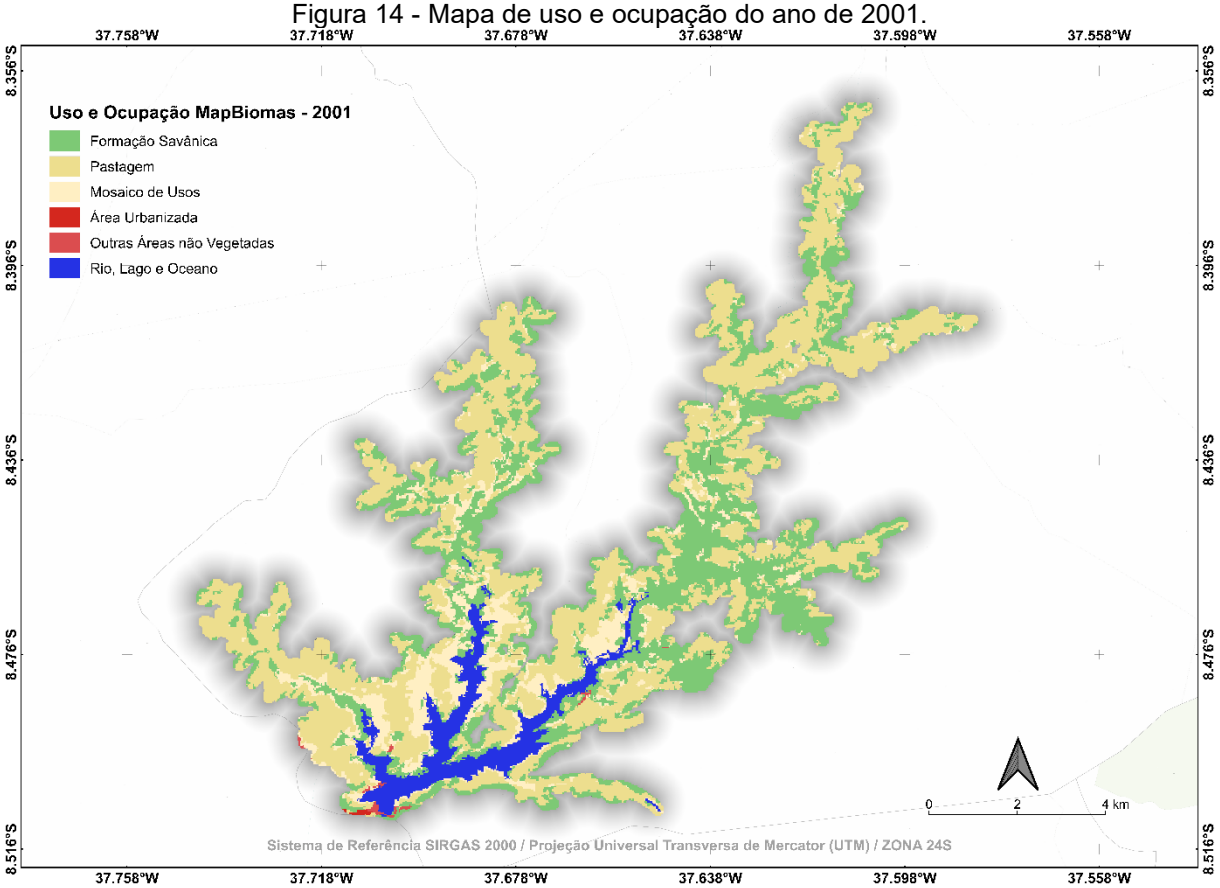
Tabela 7 - Quantificação das classes do uso e ocupação do solo do ano de 1986 no Reservatório Engenheiro Francisco Saboya.

Uso do solo	Área (ha)	(%)
Formação Savânica	1.805,05	23,97
Pastagem	287,73	3,82
Mosaico de Usos	595,53	7,91
Área Urbanizada	5,30	0,07
Área não Vegetada	2,21	0,03
Rio, Lago e Oceano	4.833,68	64,20
Área Total	**7.529,50**	**100**

Fonte: Autor (2025).

Em 1986 (Tabela 7), observa-se a expressiva extensão da área inundada, bem como a presença marcante da formação savânica, considerada uma característica natural da Caatinga, mas sem muita presença de vegetação arbórea. No entanto, verifica-se que aproximadamente 11,73% já se encontra ocupada, com uso voltado à agricultura e à expansão urbana — totalizando cerca de 883,26 hectares.

Figura 14 - Mapa de uso e ocupação do ano de 2001.



Fonte: MapBiomas; Elaboração: Autor (2025).

Durante o primeiro ciclo de redução da área inundada, registrado no ano de 2001 (Figura 14), observa-se a permanência das seis classes de uso e cobertura do solo já identificadas no mapa de 1986. No entanto, a análise espacial revela um aumento na área de pastagem, e uma significativa diminuição do recurso hídrico em comparação ao cenário de 1986 que segundo Nobre e Melo (2001), nos anos anteriores (1988 a 2000), ocorreu um fenômeno climático conhecido como *Oscilação Madden-Julian* (OMJ), que foi a ocorrência de ciclos de 30 a 45 dias de precipitações positivas e negativas, com intensificação dos ciclos no ano 2000 que influenciou a diminuição do volume do reservatório.

Tabela 8 - Quantificação das classes do uso e ocupação do solo do ano de 2001 no Reservatório Engenheiro Francisco Saboya.

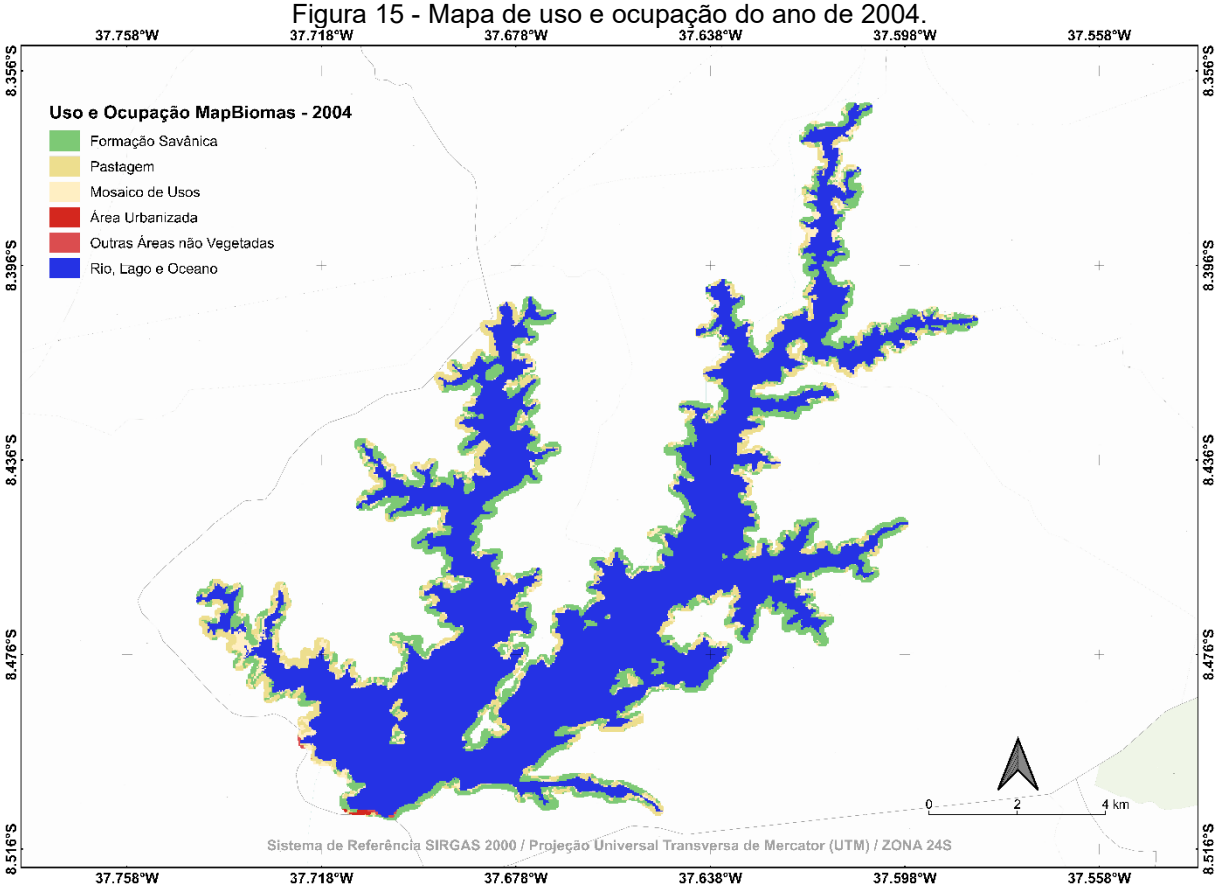
Uso do solo	Área (ha)	(%)
Formação Savânica	2.473,13	32,85
Pastagem	3.675,23	48,81
Mosaico de Usos	852,86	11,33
Área Urbanizada	4,949	0,07
Área não Vegetada	18,38	0,24
Rio, Lago e Oceano	504,95	6,71
Área Total	**7.529,50**	**100**

Fonte: Autor (2025).

Na tabela 8, os dados descrevem um aumento expressivo da pastagem, que passou a ocupar aproximadamente 48,81% da área do reservatório, incluindo a faixa de 120 metros ao seu redor. A classe de área urbanizada não apresentou variação significativa. Já a área inundada, que em 1986 abrangia 64,20% do reservatório, foi reduzida para apenas 6,71% em 2021 — uma diferença de 57,49%, equivalente a cerca de 4.328,73 hectares.

O segundo ciclo de enchimento e redução do espelho d'água registrado no ano de 2004, já se enquadra nas diretrizes da Resolução do CONAMA nº 302, que estabelece os 100 metros do entorno de reservatório como APP. A Figura 15 representa a fase de cheia do reservatório, demonstrada no mapa pela predominância da área inundada em relação às demais classes de uso e cobertura do solo.

Figura 15 - Mapa de uso e ocupação do ano de 2004.



Fonte: MapBiomas; Elaboração: Autor (2025).

A área destinada à atividade agrícola cobre aproximadamente 14,78% da região analisada, o que corresponde a cerca de 1.113,12 hectares (Tabela 9). A taxa de ocupação urbana permanece equivalente à observada em 2001. Ambas as formas de uso acabam por ocupar irregularmente as Áreas de Preservação Permanente, contrariando as diretrizes legais.

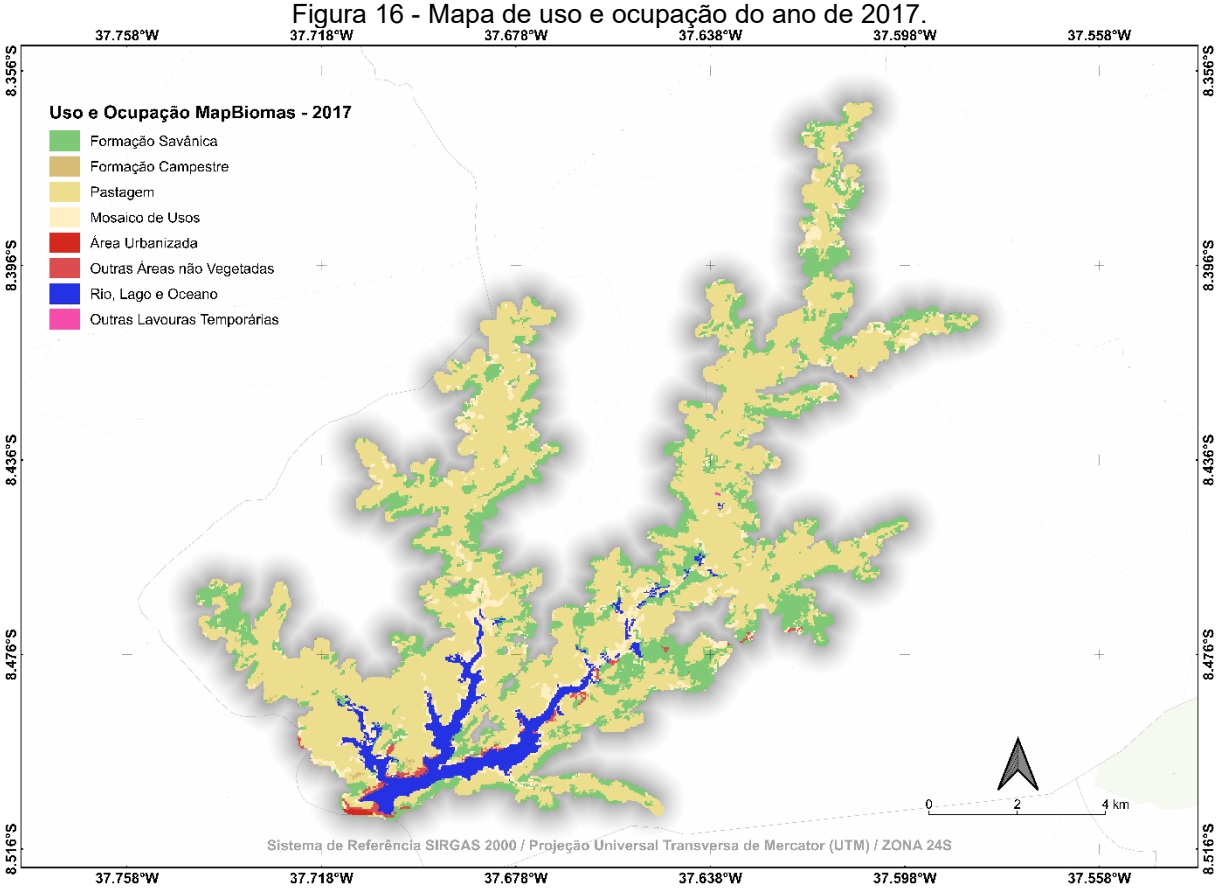
Tabela 9 - Quantificação das classes do uso e ocupação do solo do ano de 2004 no Reservatório Engenheiro Francisco Saboya.

Uso do solo	Área (ha)	(%)
Formação Savânica	1.484,71	19,72
Pastagem	740,37	9,83
Mosaico de Usos	372,75	4,95
Área Urbanizada	5,04	0,07
Área não Vegetada	4,24	0,06
Rio, Lago e Oceano	4.922,40	65,37
Área Total	**7.529,50**	**100**

Fonte: Autor (2025).

No ano em que ocorreu a redução do segundo ciclo, grande parte da área teve o uso na pastagem, já que a vegetação encontrada é gramínea. (Figura 16).

Figura 16 - Mapa de uso e ocupação do ano de 2017.



Fonte: MapBiomas; Elaboração: Autor (2025).

A análise espacial relata a descaracterização do ambiente natural da Caatinga, com a abertura de uma expressiva área destinada ao uso agrícola. Nesse contexto, surgem duas novas classes identificadas como Lavouras Temporárias e Formação Campestre, além de um aumento na área urbana.

Essa dinâmica pode ser observada na Tabela 10, referente ao uso e ocupação do solo no ano de 2017. Toda a área que deveria ser destinada à preservação permanente apresenta cobertura voltada para atividades agrícolas, totalizando 5.334,84 hectares — o equivalente a aproximadamente 70,86% da região sem caracterização do bioma da Caatinga. Observa-se também um crescimento na ocupação urbana, que passou de 5,04 hectares para 7,60 hectares, localizado ao sul do reservatório, em seu entorno.

Tabela 10 - Quantificação das classes do uso e ocupação do solo do ano de 2017 no Reservatório Engenheiro Francisco Saboya.

Uso do solo	Área (ha)	(%)
Formação Savânica	1.708,73	22,69
Formação Campestre	8,66	0,12
Pastagem	4.788,52	63,60
Mosaico de Usos	545,69	7,25
Área Urbanizada	7,60	0,10
Área não Vegetada	56,12	0,75
Rio, Lago e Oceano	413,57	5,49
Lavouras Temporárias	0,62	0,01
Área Total	**7.529,50**	**100**

Fonte: Autor (2025).

É perceptível que, ao longo dos 37 anos da série histórica, houve um crescimento significativo da atividade agrícola de forma irregular no reservatório e em seu entorno, chegando inclusive a ocupar áreas normalmente inundadas durante os períodos de redução do espelho d'água.

Segundo Silva, Duarte e Vasconcelos (2024), a ocupação ilegal da APP é justificada pela ausência de demarcação da área protegida, o que tem permitido a ocupação de zonas de drenagem expostas durante a vazante do reservatório.

Atualmente, a inexistência de licenciamento ambiental para o Reservatório Engenheiro Francisco Saboya, compromete a implementação de um plano ambiental de conservação da APP. Como consequência, observa-se a prática de atividades agrícolas com o uso de irrigação em áreas frágeis. "Às áreas frágeis e sensíveis, no caso a APP, foi bem significativa, acarretando uma interferência prejudicial no ecossistema, em especial a atividade de agricultura que contribuiu para alterações estruturais na paisagem." (Silva, Duarte, e Vasconcelos, 2024, p.24).

6. CONCLUSÃO

Um dos principais objetivos deste trabalho foi gerar a curva Cota-Área-Volume por meio do processamento de dados de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento, como alternativa às técnicas convencionais de batimetria e topografia, que geralmente envolvem custos elevados. O processo metodológico aplicado neste trabalho pode ser replicado em outros reservatórios, permitindo análises da dinâmica hídrica de forma eficiente e economicamente viável.

Em síntese, o monitoramento de reservatórios na região semiárida representa um desafio significativo, devido à influência de múltiplas variáveis sobre a dinâmica hídrica. A análise do comportamento da superfície permite realizar estimativas sobre essa dinâmica. Além da identificação de alterações ambientais que impactam negativamente os recursos hídricos. No caso do Reservatório Engenheiro Francisco Saboya, a ausência de licenciamento ambiental compromete diretamente a disponibilidade e o uso sustentável da água. Diante disso, é fundamental que a expansão urbana e o desenvolvimento econômico estejam intrinsicamente alinhados ao manejo sustentável e à adoção de soluções inovadoras, garantindo a conservação e a preservação dos recursos hídricos.

Os projetos MapBiomas e o Pernambuco Tridimensional (PE3D) foram fundamentais para o desenvolvimento deste estudo, ao fornecerem dados ambientais confiáveis e de ampla cobertura espacial. O MapBiomas, com sua escala nacional, disponibilizou a série temporal de imagens de satélite essencial para extração dos dados que permitiram a construção da curva CAV. O PE3D, por sua vez, aplicou geotecnologias avançadas para gerar diversos resultados geoespaciais em todo o território pernambucano, entre eles o Modelo Digital do Terreno, revelando informações altimétricas cruciais para o cálculo da curva. A integração desses projetos demonstra o potencial do sensoriamento remoto e do geoprocessamento como ferramentas eficazes para o monitoramento ambiental reforçando a importância de soluções tecnológicas na gestão hídrica.

Apesar das limitações observadas na validação dos dados, com discrepância entre os valores estimados com os reais, o uso do sensoriamento remoto é fundamental para suprir lacunas de informação relacionadas ao reservatório. Para garantir maior confiabilidade nos resultados futuros, recomenda-se a adoção de métodos complementares de validação, como aplicação da topografia e batimetria in loco para obter dados atuais e precisos.

Embora os processos de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento sejam eficazes, é fundamental destacar que sua aplicação depende de validações adequadas, as quais muitas vezes enfrentam limitações devido à escassez ou à indisponibilidade de dados. Ainda assim, a continuidade deste trabalho é de grande relevância, pois, com o modelo matemático da superfície, é possível estimar projeções futuras para o reservatório. Com o

apoio da série histórica, torna-se viável analisar e prever padrões recorrentes para horizontes de 10 a 20 anos, conforme o avanço de pesquisas futuras.

Assim, este trabalho alcançou os objetivos propostos ao aplicar uma metodologia eficaz para o monitoramento do Reservatório Engenheiro Francisco Saboya, com potencial de replicação em outros recursos hídricos. Reforça-se, portanto, o papel estratégico das geotecnologias na gestão hídrica, promovendo eficiência, sustentabilidade e planejamento voltado para as gerações futuras.

7. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Flávio Gomes de et al. **Importância estratégica da água para o terceiro milênio.** GEOgraphia, v. 4, n. 8, p. 45-56, 2009. DOI: 10.22409/GEOgraphia2002.v4i8.a13432. Disponível em: https://periodicos.uff.br/geographia/article/view/13432. Acesso em: 20 ago. 2025.

ALVES, Welber F.; CAMPOS, A. C.; XAVIER, Fabiana F. **Monitoramento quantitativo como instrumento de gestão dos recursos hídricos superficiais no distrito federal, tendo o geoprocessamento como ferramenta de suporte**. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, v. 20, 2013. Disponível em: https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=1718. Acesso em: 05 de out. de 2025.

BACALHAU, José Ráurium. **Caracterização volumétrica de reservatórios por meio de sensoriamento remoto.** 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022. Disponível em: https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/47255. Acesso em: 15 nov. 2025.

BARBOSA, Antônio Helton da Silva; CUELLAR, Miguel Dragomir Zanic; MOREIRA, Melquisedec Medeiros; ARRAES, Kátia Alves; SILVA, Camila Saiury Pereira. **Dinâmica dos espelhos d'água dos reservatórios da Bahia:** uma aplicação a partir do sensoriamento remoto. Caderno de Geografia, Belo Horizonte, v. 32, n. 70, p. 1000, 2022. DOI: 10.5752/P.2318-2962.2022v32n70p1000. Disponível em: https://periodicos.pucminas.br/geografia/article/view/27664. Acesso em: 1 out. 2025.

BARBOSA, Laízy de S. Azevedo; LOPES, Pabrício Marcos Oliveira. **Spatio-temporal variation of evapotranspiration around the Engenheiro Francisco Saboia Reservoir, Ibimirim-PE**. Journal of Hyperspectral Remote Sensing v, v. 12, n. 2, p. 28-35, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.29150/2237-2202.2022.252721. Acesso em: 07 de out. de 2025.

BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). **Boletim de acompanhamento de alocação de água.** Brasília, DF: ANA, 2017. Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/todos-os-documentos-do-portal/documentos-sre/alocacao-de-agua/boletim-acompanhamento-alocacao-2017-2018-reservatorio-poco-da-cruz-novembro2017.pdf. Acesso em: 14 de out. de 2025.

BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). **Boletim de acompanhamento de alocação de água**. Brasília, DF: ANA, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/regulacao-e-fiscalizacao/alocacao-de-agua-e-marcos-regulatorios/alocacao-de-agua/poco-da-cruz_05-2025.pdf. Acesso em: 14 de jul. de 2025.

BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). **Reservatórios do semiárido brasileiro: hidrologia, balanço hídrico e operação**. 2017. Disponível em: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/ccc25b76-f711-41ea-a79e-c8d30c287e53/attachments/Reservatrios_do_semiarido_brasileiro_hidrologia,_balano_hdrico_e_operao.pdf. Acesso em: 14 de jun. de 2025.

BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).. **Resolução nº 54, de 6 de agosto de 2018. Dispõe sobre condições de uso dos recursos hídricos no sistema hídrico Poço da Cruz e rio Moxotó, localizados no Estado de Pernambuco.** Brasília, DF: ANA, 2018. Documento nº 00000.048370/2018-65. Disponível

em: https://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2018/Outorgas/0054-2018_Outorga_de_Direito_de_Uso.pdf?124415. Acesso em: 14 de jun. de 2025.

BRASIL. IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Semiárido. In: IBGE. **Quadro geográfico de referência para produção, análise e disseminação de estatísticas**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/apps/quadrogeografico/pdf/21_Semiarido.pdf. Acesso em: 27 ago. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA Nº 302, de 20 de março de 2002**. Dispõe sobre os parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente de reservatórios artificiais e o regime de uso do entorno. Disponível em: https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=98315. Acesso em: 12 de out. de 2025.

CARVALHO, José Valderisso Alfredo De et al.. **Uso do sensoriamento remoto como ferramenta de verificação de recursos hídricos em períodos chuvosos e de estiagem no município de Patos-PB**. Anais do VI CONAPESC... Campina Grande: Realize Editora, 2021. Disponível em: <https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/76972>. Acesso em: 01 de out. de 2025.

CIRILO, José Almir et al. **Pernambuco Tridimensional**: Base de dados espaciais para planejamento urbano e gestão territorial. 12th Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Expressão Portuguesa, 2015. Disponível em: https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=12751. Acesso em: 02 de out. de 2025.

CIRILO, José Almir et al. **Suporte de informações georreferenciadas de alta resolução para implantação de infraestrutura e planejamento territorial**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 7, n. 4, p. 755-763, 2014. Disponível em: https://www.academia.edu/download/87408148/31956.pdf. Acesso em: 02 de out. de 2025.

COLLISCHONN, Bruno; CLARKE, Robin Thomas. **Estimativa e incerteza de curvas cota-volume por meio de sensoriamento remoto.** RBRH, v. 21, p. 719-727, 2016. Disponivel em: https://doi.org/10.1590/2318-0331.011616022. Acesso em: 03 de out. de 2025.

CONSIDERAÇÕES SOBRE O CLIMA E OS RECURSOS HÍDRICOS DO SEMIÁRIDO NORDESTINO. **Caderno Prudentino de Geografia**, [S. l.], v. 1, n. 36, p. 126–142, 2014. Disponível em: https://revista.fct.unesp.br/index.php/cpg/article/view/3176. Acesso em: 27 ago. 2025.

COSTA, Fábio Araújo da. **Sensoriamento remoto aplicado ao monitoramento de reservatório no semiárido do Nordeste: Poço da Cruz, Pernambuco. 2019**. Dissertação (Mestrado em Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019. Disponível em: https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/36143. Acesso em: 14 de jun. de 2025.

CRIONI, Pedro Luiz Becaro. **Aplicação do sensoriamento remoto com imagens do satélite Sentinel-2 no estudo e validação de recursos hídricos no Brasil.** 2024. Disponível em: https://hdl.handle.net/11449/256147. Acesso em: 01 de out. de 2025.

CUNHA, P.; ROIG, H. **Monitoramento da sedimentação de reservatórios hidroeletricos (programas e normas)**. Vitória-ES, 2018. Disponível em: https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/65/PAP102.pdf. Acesso em: 03 de out. de 2025.

DE ARAÚJO, José Carlos. **Assoreamento em reservatórios do semi-árido: modelagem e validação. Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 2, p. 39-56, 2003. Disponível em: http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v8n2.p39-56. Acesso: 30 de set. de 2025.

DE OLIVEIRA FARIAS, Mirelly et al. XVII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. **Detecção e extração de área superficial de reservatório a partir de índice NDWI no sertão pernambucano**. Disponível em: https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=16916. Acesso em: 07 de out. de 2025.

DOS SANTOS, Patrício Rinaldo et al. **Gestão de água na irrigação e modificações na cobertura do solo em reservatório artificial no semiárido brasileiro.** Guaju: Revista Brasileira de Desenvolvimento Territorial Sustentável , [S. l.], v. 7, n. 1, p. 180–212, 2021. DOI: 10.5380/guaju.v7i1.75795. Disponível em: https://revistas.ufpr.br/guaju/article/view/75795. Acesso em: 5 out. 2025.

DOS SANTOS, Patrício Rinaldo et al. **Gestão de água na irrigação e modificações na cobertura do solo em reservatório artificial no semiárido brasileiro**. [*s. l.*], 2021. Disponível em: http://dx.doi.org/10.5380/guaju.v7i1.75795. Acesso em: 12 de ago. 2025.

ESTIGONI, Marcus Vinícius; MATOS, Artur José Soares; MAUAD, Frederico Fábio. **Análise da orientação da ANA para a atualização das curvas cota-área-volume de reservatórios**. X Encontro Nacional de Engenharia Sanitária, Foz do Iguaçu, PR, Brasil. Anais. Foz do Iguaçu, PR, Brasil, p. 3, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Marcus-Estigoni/publication/274062862_Artigo_completo/links/5512f49f0cf2eda0df2d470d/Artigo-completo.pdf. Acesso em; 03 de out. de 2025.

FERREIRA, PHR; COSTA, A. B.; Carvalho, RMCMO. **Gestão de recursos hídricos no semiárido pernambucano: o caso do conselho de usuários do açude poço da cruz, Ibimirim**. [*s. l.*], 2023. Disponível em: https://anais.abrhidro.org.br/jobs.php?Event=191. Acesso em 12 de ago. 2025.

FRANCISCO, Paulo Roberto Megna; SANTOS, Djail; RIBEIRO, George do Nascimento; SILVA, Viviane Farias; AYRES, Gypson Dutra Junqueira; RODRIGUES, Raimundo Calixto Martins. **Dinâmica temporal da cobertura e uso das terras do Estado da Paraíba utilizando Mapbiomas©.** Revista Geama, [S. l.], v. 9, n. 3, p. 57–66, 2023. Disponível em: https://www.journals.ufrpe.br/index.php/geama/article/view/5442. Acesso em: 3 out. 2025.

HAFEMANN, A. C. **Década internacional da água 2018-2028**: caminhos para o desenvolvimento. Sociedade em Debate, [S. l.], v. 29, n. 3, p. 25-35, 2023. DOI: 10.47208/sd.v29i3.3401. Disponível em: https://rsd.ucpel.edu.br/rsd/article/view/3401. Acesso em: 25 ago. 2025.

JANDREICE MAGNONI, Pedro Henrique; DE OLIVEIRA FERREIRA SILVA, Cesar; LILLA MANZIONE, Rodrigo. **Sensoriamento remoto aplicado ao manejo da irrigação em áreas com escassez de dados: estudo de caso em pivô central em Itatinga-SP.** IRRIGA, [S. l.], v. 1, n. 3, p. 585–598, 2021. DOI: 10.15809/irriga.2021v1n3p585-598. Disponível em: https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/4380. Acesso em: 1 out. 2025.

JATOBÁ, Lucivânio. **Elementos de climatologia e geomorfologia do Trópico Semiárido Brasileiro. Recife-PE**, julho, p. p48, 2019. Disponível em: https://periodicos.ufmg.br/index.php/geografias/article/view/50814. Acesso em: 27 ago. 2025.

KUHNEN, Beatriz da Silva et al. **Método e técnica para obtenção da curva cota x área x volume (CAV).** 2020. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/226744. Acesso em: 03 de out. de 2025.

LIMA, Asheley Aicha da Silva. **Utilização de imagens LANDSAT 7 e 8 e SENTINEL-2 para monitoramento agrícola, análise de desmatamento e uso da terra:** um estudo de caso no médio Parnaíba Piauiense. 2025. 50 f. Monografia (Graduação em Ciências Ambientais) - Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2025. Disponível em: http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/81850. Acesso em: 05 de out. de 2025.

LIRA, Marianny Monteiro P. de *et al*. **Uso e ocupação do solo no entorno do açude Poço da Cruz – PE, Brasil.** Segurança Hídrica e Desenvolvimento Sustentável, Desafios do Conhecimento e da Gestão, [*s. l.*], 2015. Disponível em: https://anais.abrhidro.org.br/jobs.php?Event=4. Acesso em: 14 jul. 2025.

LIRA, Marianny Monteiro Pereira de. **Análise do uso e ocupação do solo no entorno do reservatório Poço da Cruz, Pernambuco – Brasil**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, [*S. l.*], 2015. Disponível em: https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/16725. Acesso em: 19 jun. 2025.

MAPBIOMAS. ATBD_R. **Algorithm Theoretical Basis Document & Results: MapBiomas Fire, 2023.** Disponível em: https://brasil.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/4/2023/08/ATBD_-_MapBiomas_Fogo_-_Colecao_2.pdf. Acesso em: 02 de out. de 2025.

MATOS, Artur José Soares. **Melhorias qualitativas na modelagem de levantamentos batimétricos em reservatórios por meio da ferramenta computacional "CAV-NH". 2012**. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2012. https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-25102012-104425/pt-br.php. Acesso em: 03 de out. de 2025.

MEDEIROS, Felipe Jeferson de; LIMA, Kellen Carla; CAETANO, Darllin de Araújo; SILVA, Francisco Jânio de Oliveira. **Impacto da Variabilidade Interanual da Precipitação nos Reservatórios do Semiárido do Nordeste do Brasil**. Anuário do Instituto de Geociências , Rio de Janeiro, BR., v. 3, pág. 731–741, 2019. DOI: 10.11137/2018_3_731_741. Disponível em: https://revistas.ufrj.br/index.php/aigeo/article/view/29766. Acesso em: 7 out. 2025.

MENTZ, Bianca. **Identificação das áreas de úmidas no município de Portão (Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos) através da utilização de técnicas de geoprocessamento**. 2021. Disponível em: http://www.repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/12675. Acesso em: 05 de out. de 2025.

NETO, Pereira; CIRÍCIO, Manoel. **Perspectivas da açudagem no semiárido brasileiro e suas implicações na região do Seridó potiguar**. Sociedade & Natureza, v. 29, p. 285-294, 2022. Disponível em: https://www.scielo.br/j/sn/a/Yfr38bRyrzz3jwsfH6t5W5P/?format=html&lang=pt. Acesso em: 27 ago. 2025.

NOBRE P. e MELO ABC, "**Variabilidade Climática intrasazonal sobre o Nordeste do Brasil em 1998-2000"**, Revista Climanálise, CPTEC/INPE, 2001. Disponível em: http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/revista/ano2.shtml. Acesso em: 12 de out. de 2025.

OLÍMPIO, João Luís Sampaio. **Desastre naturais no Nordeste do Brasil:** um enfoque sobre as secas e estiagens. Climatologia geográfica: do local ao regional e dimensões socioambientais, v. 1, p. 255-274., 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/379986098_DESASTRES_NATURAIS_NO_NORDESTE_DO_BRASIL_ENFOQUE_DAS_SECAS_E_ESTIAGENS. Acesso em: 12 de out. de 2025.

OLIVEIRA, Edimara Torres. **Sensoriamento remoto aplicado à avaliação da qualidade da água do reservatório Edson Queiroz, Ceará. 2025**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária) - Campus de Crateús, Universidade Federal do Ceará, Crateús, 2025. Disponível em: http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/80068. Acesso em: 01 de out. de 2025.

PERNAMBUCO. APAC. Agência Pernambucana de Águas e Clima. **Atlas climatológico do Estado de Pernambuco: normais climatológicas 1991-2020.** Agência Pernambucana de Águas e Clima. Gerência de Meteorologia e Mudanças Climáticas. Recife: APAC, GMMC, 2023. Disponível em: https://www.apac.pe.gov.br/images/webAtlas-Climatologico-do-Estado-de-Pernambuco-APAC.pdf. Acesso em: 14 jun. 2025.

PERNAMBUCO. **Pernambuco Tridimensional (PE3D)**. Disponível em: http://www.pe3d.pe.gov.br/. Acesso em: 16 de jun. de 2025.

PERNAMBUCO. **Plano de recursos hídricos do estado de Pernambuco.** Recife: Governo do Estado, 1998. Disponível em: http://www.apac.pe.gov.br/down/PERHPE_volume8.pdf. Acesso em: 14 de jun. de 2025.

PONTES, Júlia Isabel et al. **Pernambuco tridimensional:** potencialidade de geração de produtos cartográficos de apoio a gestão de bacias hidrográficas. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, v. 19, p. 2019, 2019. Disponível em: http://marte2.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/marte2/2019/09.16.15.28/doc/97532.pdf. Acesso em: 02 de out. de 2025.

PROJETO MAPBIOMAS – **Coleção 07 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasi**l. Disponível em: https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/. Acesso em: 16 de jun. de 2025.

QUININO, Roberto C.; REIS, Edna A.; BESSEGATO, Lupércio F. **O coeficiente de determinação R² como instrumento didático para avaliar a utilidade de um modelo de regressão linear múltipla.** Revista de Teoria e Prática da Educação Estatística, Belo Horizonte, v. 1, n. 1, p. 1–14, 2011. Disponível em: https://www.est.ufmg.br/portal/wp-content/uploads/2023/01/RTP_01_2011.pdf. Acesso em: 15 nov. 2025.

RATKOWSKY, D. A. **Principles of nonlinear regression modeling**. Journal of Industrial Microbiology, Springer, v. 12, n. 3-5, p. 195–199, 1993. Disponível em: https://academic.oup.com/jimb/article/12/3-5/195/5987873. Acesso: 15 de nov. de 2025.

RIBEIRO, Maria do Carmo Franco. **Desafios construtivos em torno do abastecimento de água às cidades, desde a época romana até à Idade Moderna**. 2023. Disponível em: https://hdl.handle.net/1822/87119. Acesso em: 25 de ago. de 2025.

SILVA, B.S. et al. **Mapeando três décadas de transformações no território norte mineiro usando geoprocessamento**. X Seminário de Iniciação Científica do IFNMG e II Seminário da Pós-Graduação do IFNMG, [s. l.], 2022. Disponível em: https://share.google/LqUuuwzHHYavs9DbB. Acesso em: 2 out. 2025.

SILVA, Jaimeson Jardel França; DUARTE, Simone Mirtes de Araújo; VASCONCELOS, Géssica dos Santos. **Diagnóstico da mata ciliar do reservatório Engenheiro Francisco Sabóia, Ibimirim-PE**. Revista Semiárido De Visu, [S. l.], v. 12, n. 1, p. 17–26, 2024. DOI: 10.31416/rsdv.v12i1.563. Disponível em: https://semiaridodevisu.ifsertaope.edu.br/index.php/rsdv/article/view/563. Acesso em: 5 out. 2025.

SOUZA, José Carlos de. **Metodologia para avaliação ambiental em bacias hidrográficas, utilizando técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto**. 2017. Disponível em: http://hdl.handle.net/11449/151549. Acesso em: 05 de out. de 2025.
VASCONCELOS, Rochele Sheila *et al*. **Escassez hídrica e disponibilidade de aluviões para a construção de barragens subterrâneas em Pernambuco. Recursos hídricos do Nordeste**. [*s. l.*], 2020. Disponível em: https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=6971. Acesso em: 15 ago. 2025.

VASCONCELOS, Rochele Sheila et al. **Escassez hídrica e disponibilidade de aluviões para a construção de barragens subterrâneas em Pernambuco. Recursos hídricos do Nordeste.** [s. l.], 2020. Disponível em: https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=6971. Acesso em: 15 ago. 2025.

WOLKMER, Maria de Fátima S.; PIMMEL, Nicole Freiberger. **Política Nacional de Recursos Hídricos:** governança da água e cidadania ambiental. Sequência (Florianópolis), p. 165-198, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.5007/2177-7055.2013v34n67p165. Acesso em: 20 de ago. de 2025.