



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MAYARA MARIA DE ARRUDA GOMES

**IDENTIFICAÇÃO AUTOMATIZADA E AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO DE LOCAIS  
PARA IMPLEMENTAÇÃO DE BARRAGENS**

Recife - PE

2025

MAYARA MARIA DE ARRUDA GOMES

**IDENTIFICAÇÃO AUTOMATIZADA E AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO DE LOCAIS  
PARA IMPLEMENTAÇÃO DE BARRAGENS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil.

**Área de concentração:** Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

**Orientador:** Prof. Dr. José Almir Cirilo

Recife - PE

2025

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Gomes, Mayara Maria de Arruda.

Identificação automatizada e avaliação multicritério de locais para implementação de barragens / Mayara Maria de Arruda Gomes. - Recife, 2025.

148f.: il.

Tese (Doutorado)- Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2025.

Orientação: José Almir Cirilo.

1. Geoprocessamento; 2. Modelos Digitais de Terreno (MDT); 3. Análise Hierárquica por Processos (AHP); 4. PE3D. I. Cirilo, José Almir. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

MAYARA MARIA DE ARRUDA GOMES

**IDENTIFICAÇÃO AUTOMATIZADA E AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO  
DE LOCAIS PARA IMPLEMENTAÇÃO DE BARRAGENS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil, área de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Aprovada em 24/10/2025

Orientador: Prof. Dr. José Almir Cirilo, UFPE

**BANCA EXAMINADORA**

participação por videoconferência

Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto (examinador interno)

Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Rochele Sheila Vasconcelos (examinadora externa)

Universidade Estadual de Santa Cruz

participação por videoconferência

Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra (examinador externo)

Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência

Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo (examinador interno)

Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Leidjane Maria Maciel de Oliveira (examinadora interna)

Universidade Federal de Pernambuco

## RESUMO

A ampliação da infraestrutura hídrica é uma medida necessária para enfrentar desafios relacionados à variabilidade climática, crescimento populacional e aumento da demanda por água, além de reduzir a vulnerabilidade a eventos extremos, especialmente períodos prolongados de seca. Diante dessa necessidade, este estudo apresenta uma metodologia automatizada para identificar locais estratégicos para construção de reservatórios, combinando ferramentas avançadas de geoprocessamento, como Modelos Digitais de Terreno (MDT) de alta resolução, e técnicas multicritério da Análise Hierárquica por Processos (AHP). A metodologia proposta é estruturada em duas etapas principais. Inicialmente, o software LOCASIN foi utilizado para identificação preliminar dos locais potenciais, aproveitando dados espaciais do projeto Pernambuco Tridimensional (PE3D). Na segunda etapa, aplicou-se a técnica AHP para validar e hierarquizar esses locais, considerando um conjunto de critérios físicos, ambientais e socioeconômicos por meio de análises espaciais integradas. Para demonstrar a aplicabilidade dessa metodologia, realizou-se um estudo de caso nas bacias hidrográficas dos rios Goiana, Sirinhaém e Mundaú, no estado de Pernambuco. Foram identificados, respectivamente, 15, 8 e 7 locais com potencial para reservatórios, destacando-se pela relação eficiente entre volume armazenado e área inundada. A validação indicou conformidade técnica e ambiental adequada, com avaliação de precisão de 52% para Goiana, 61% para Sirinhaém e 45% para Mundaú. A principal contribuição desta pesquisa é o acoplamento operacional do AHP a um modelo de localização automática de barragens, formando um fluxo SIG-LOCASIN-AHP que prioriza e valida os locais candidatos identificados automaticamente. Os resultados obtidos demonstram que esta abordagem é replicável em outras regiões, contribuindo de forma objetiva para o planejamento e gestão sustentável dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Geoprocessamento; Modelos Digitais de Terreno (MDT); Análise Hierárquica por Processos (AHP); PE3D.

## **ABSTRACT**

Expanding water infrastructure is essential to address challenges posed by climate variability, population growth, and increasing water demand, as well as to reduce vulnerability to extreme events, particularly prolonged droughts. This study presents an automated methodology to identify strategic sites for reservoir construction by combining advanced geoprocessing tools, such as high-resolution Digital Terrain Models (DTM), with the multicriteria Analytic Hierarchy Process (AHP). The workflow comprises two main stages. First, the LOCASIN software is used to perform a preliminary screening of potential locations, leveraging spatial data from the Pernambuco Tridimensional (PE3D) project. Second, AHP is applied to validate and rank these candidate sites by integrating physical, environmental, and socioeconomic criteria through spatial analyses. A case study in the Goiana, Sirinhaém, and Mundaú river basins (Pernambuco State, Brazil) identified 15, 8, and 7 potential reservoir sites, respectively, characterized by an efficient relationship between stored volume and inundated area. Validation indicated adequate technical and environmental compliance, with accuracy assessment of 52% for Goiana, 61% for Sirinhaém, and 45% for Mundaú. The main contribution is the operational coupling of AHP to an automated dam-site location model, forming a GIS–LOCASIN–AHP pipeline that prioritizes and validates automatically detected candidates. The results suggest that the approach is replicable to other regions and can support objective, sustainable water-resources planning and management.

**Keywords:** Geoprocessing; Digital Terrain Models (DTM); Analytic Hierarchy Process (AHP); PE3D.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição percentual dos usos das barragens no Brasil.....	19
Figura 2 – Mapa com a disposição das barragens existentes em Pernambuco.....	38
Figura 3 - Mapa de localização da área de estudo.....	40
Figura 4 – Mapa de localização geográfica da bacia do Rio Goiana.....	42
Figura 5 - Mapa de localização geográfica da bacia do Rio Sirinhaém.....	46
Figura 6 - Mapa de localização geográfica da bacia do Rio Mundaú.....	49
Figura 7 – Fluxograma dos dados espaciais de entrada necessários ao software. ..	55
Figura 8 – Distribuição espacial de barragens potenciais (a) e locais de bacias selecionados (b). .....	61
Figura 9 – Ficha informativa de uma bacia exemplar. <b>(a)</b> Informações sobre a bacia selecionada: (1) curvas das lâminas d'água, do volume de armazenamento e da área de inundação; (2) Seção transversal da barragem e seção longitudinal da bacia; (vista superior da bacia. <b>(b)</b> Informações sobre todas as alturas potenciais da barragem: (1) características da barragem; (2) características da bacia; (3) critérios de avaliação de barragens e bacias.....	61
Figura 10 – Fluxograma sobre a elaboração do mapa de critérios .....	64
Figura 11 – Etapas de normalização dos dados .....	70
Figura 12 - Potenciais localizações de barragens encontradas para a Bacia do Rio Goiana.....	76
Figura 13 - Curvas cota – área – volume para as barragens identificadas – Rio Goiana. ....	80
Figura 14 - Potenciais localizações de barragens identificadas para a Bacia do Rio Sirinhaém. ....	83
Figura 15 - Curvas cota – área – volume para as barragens identificadas – Rio Sirinhaém. ....	85
Figura 16 - Potenciais localizações de barragens identificadas para a Bacia do Rio Mundaú. ....	89
Figura 17 - Curvas cota – área – volume para as barragens encontradas – Rio Mundaú. ....	92
Figura 18 – Mapas classificados de critérios padronizados para seleção de locais para barragens na Bacia do Rio Goiana .....	95
Figura 19 – Mapa de adequação da bacia do Rio Goiana. ....	105

Figura 20 -Curva ROC para a adequação dos locais das barragens obtidas no mapa .....	106
Figura 21 - Validação do mapa de adequação do local da barragem usando barragens atuais conhecidas na área de estudo (os números acima das colunas mostram a quantidade atual das barragens).....	107
Figura 22 – Categorias de adequação dos locais para barragens na bacia do Rio Goiana.....	109
Figura 23 - Mapas classificados de critérios padronizados para seleção de locais para barragens na Bacia do Rio Sirinhaém.....	114
Figura 24 - Mapa de adequação da bacia do Rio Sirinhaém. ....	116
Figura 25 - Curva ROC para a adequação dos locais das barragens obtidas no mapa. ....	117
Figura 26 - Validação do mapa de adequação do local da barragem usando barragens atuais conhecidas na área de estudo (os números acima das colunas mostram a quantidade atual das barragens).....	118
Figura 27 - Categorias de adequação dos locais para barragens na bacia do Rio Sirinhaém. ....	120
Figura 28 - Mapas classificados de critérios padronizados para seleção de locais para barragens na Bacia do Rio Mundaú. ....	124
Figura 29 - Mapa de adequação da bacia do Rio Mundaú.....	126
Figura 30 - Curva ROC para a adequação dos locais das barragens obtidas no mapa. ....	127
Figura 31 - Validação do mapa de adequação do local da barragem usando barragens atuais conhecidas na área de estudo (os números acima das colunas mostram a quantidade atual das barragens).....	128
Figura 32 – Mapa de adequação com as barragens encontradas e planejadas para a bacia do Rio Mundaú. ....	130



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação das barragens por volume .....	41
Tabela 2 – Classificação utilizada pela ICOLD para barragens .....	41
Tabela 3 – Informações sobre as barragens existentes na bacia hidrográfica Goiana. .....	43
Tabela 4 - Informações sobre as barragens existentes na bacia hidrográfica Sirinhaém. ....	47
Tabela 5 – Informações sobre as barragens existentes na bacia hidrográfica Mundaú. .....	50
Tabela 6 – Principais parâmetros de entrada no modelo .....	56
Tabela 7 – Critérios utilizados para seleção dos locais pelo método AHP.....	64
Tabela 8 – Classificação de declividade do terreno proposta pela Embrapa. ....	65
Tabela 9 – Valores e definições de peso ou importância dos critérios.....	67
Tabela 10 – Valores médios de RI .....	69
Tabela 11 – Parâmetros selecionados para execução do software .....	74
Tabela 12 - Características físicas das barragens identificadas – Bacia do Rio Goiana .....	77
Tabela 13 – Características físicas das barragens identificadas – Bacia do Rio Sirinhaém .....	82
Tabela 14 - Características físicas das barragens identificadas – Bacia do Rio Mundaú .....	88
Tabela 15 – Níveis de adequação para o mapa de elevação na bacia do Rio Goiana. .....	96
Tabela 16 - Níveis de adequação para o mapa de declividade na bacia do Rio Goiana. .....	97
Tabela 17 - Níveis de adequação para o mapa de precipitação na bacia do Rio Goiana. .....	97
Tabela 18- Níveis de adequação para o mapa de densidade de drenagem na bacia do Rio Goiana. ....	98
Tabela 19- Níveis de adequação para o mapa de distância até estradas na bacia do Rio Goiana. ....	99
Tabela 20 - Níveis de adequação para o mapa de tipo de solo na bacia do Rio Goiana. .....	100

Tabela 21- Níveis de adequação para o mapa de uso do solo na bacia do Rio Goiana. .....	102
Tabela 22 – Pesos dos critérios utilizados na seleção dos locais .....	103
Tabela 23 - Níveis de adequação para o mapa na bacia do Rio Sirinhaém.....	112
Tabela 24 - Níveis de adequação para o mapa na bacia do Rio Mundaú.....	123

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP	Analytic Hierarchy Process (Análise Hierárquica por Processos)
ANA	Agência Nacional de Águas
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
AUC	Area Under the Curve (Área abaixo da curva)
BHRS	Bacia Hidrográfica do Rio Sirinhaém
CCR	Concreto Compactado a Rolo
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
DSSM	Dam Suitability Stream Model (Modelo de Adequação de Barragens)
GIS / SIG	Geographic Information System (Sistemas de Informação Geográfica)
LOCASIN:	Software de Localização Automatizada de Barragens
MDT / MDE	Modelo Digital de Terreno / Modelo Digital de Elevação
PNSH	Plano Nacional de Segurança Hídrica
ROC	Receiver Operating Characteristic
SCS-CN	Soil Conservation Service Curve Number
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SWAT	Soil and Water Assessment Tool

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	14
1.1	PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA.....	14
1.2	OBJETIVOS GERAIS.....	17
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	18
2.1	IMPORTÂNCIA DAS BARRAGENS PARA USOS MÚLTIPLOS .....	18
2.2	CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DE LOCAIS NA IMPLEMENTAÇÃO DE RESERVATÓRIOS .....	23
2.2.1	Critérios Técnicos, Físicos e Ambientais .....	23
2.2.2	Critérios Socioeconômicos, Jurídicos e de Uso do Território .....	24
2.2.3	Ferramentas de Apoio à Tomada de Decisão .....	24
2.2.4	Estudos Aplicados .....	25
2.3	USO DE TECNOLOGIAS DIGITAIS PARA LOCALIZAÇÃO AUTOMÁTICA DE RESERVATÓRIOS .....	26
2.4	ANÁLISE MULTICRITÉRIO (AHP) NO PLANEJAMENTO DE INFRAESTRUTURA HÍDRICA .....	33
3	METODOLOGIA.....	37
3.1	ABRANGÊNCIA ESPACIAL DO ESTUDO .....	37
3.1.1	Bacia do Rio Goiana.....	42
3.1.2	Bacia do Rio Sirinhaém .....	45
3.1.3	Bacia do Rio Mundaú .....	48
3.2	LOCASIN .....	53
3.2.1	Dados de entrada espaciais e processamento.....	54
3.2.2	Parâmetros para definição das características da barragem e da bacia.....	56
3.2.3	Análise do Rio.....	56
3.2.4	Análise do posicionamento da barragem.....	57

3.2.5	Análise da bacia .....	58
3.2.6	Combinação da bacia .....	60
3.2.7	Pós-processamento .....	60
3.3	APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP PARA VALIDAÇÃO DOS LOCAIS .....	63
3.3.1	Elaboração de mapas de critérios .....	63
3.3.2	Ponderação dos critérios .....	66
3.3.3	Normalização dos critérios .....	69
3.3.4	Combinação dos critérios .....	70
3.4	ANÁLISE DE PRECISÃO.....	72
3.5	ANÁLISE DAS BARRAGENS PROVENIENTES DO LOCASIN E PLANEJADAS .....	73
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	74
4.1	IDENTIFICAÇÃO DOS LOCAIS POTENCIAIS PARA BARRAMENTOS.....	74
4.1.1	GOIANA.....	75
4.1.2	SIRINHAÉM.....	82
4.1.3	MUNDAÚ .....	87
4.2	VALIDAÇÃO DOS LOCAIS DE BARRAGENS COM O MÉTODO AHP .....	94
4.2.1	BACIA DO RIO GOIANA .....	94
4.2.2	BACIA DO RIO SIRINHAÉM .....	110
4.2.3	BACIA DO RIO MUNDAÚ .....	121
5	CONCLUSÕES .....	131
6	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	133
7	REFERÊNCIAS .....	135

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA

A crescente variabilidade climática, aliada ao aumento das demandas por água em setores urbano, agrícola e industrial, tem ampliado os desafios da gestão hídrica no Brasil. Este cenário é particularmente crítico em duas realidades hidrológicas contrastantes no território nacional: de um lado, o Semiárido brasileiro, caracterizado pela escassez de recursos hídricos e pela irregularidade das precipitações; de outro, regiões com alta pluviosidade, onde o risco de inundações se agrava diante da urbanização desordenada e da insuficiência de infraestrutura para controle de cheias (ANA, 2024).

O Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) estabelece como diretriz central a garantia dos usos múltiplos da água, priorizando tanto o abastecimento humano quanto a proteção contra eventos hidrológicos extremos, como secas e inundações (BRASIL, 2022). A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) aponta que, em 2030, a demanda hídrica nacional atingirá aproximadamente 2.600 m<sup>3</sup>/s, representando um aumento de 24% em relação a 2017. O setor agrícola permanecerá como o maior demandante, com cerca de 68,4% da retirada total, seguido pelos setores urbano (17,9%) e industrial (7,5%) (ANA, 2024).

A intensificação dos eventos extremos, estiagens severas e cheias abruptas, é uma realidade amplamente documentada. Estudos recentes confirmam que, entre 2003 a 2019, cerca de 49,2% dos municípios brasileiros decretaram Situação de Emergência (SE) ou Estado de Calamidade Pública (ECP) relacionada a inundações. Quanto a seca ou estiagem, cerca de 51,1% decretaram SE ou ECP no mesmo período (ANA, 2020). A urbanização crescente agrava este quadro, sobretudo nas regiões metropolitanas do Sudeste, Sul e Nordeste, onde a impermeabilização do solo eleva os picos de escoamento superficial, aumentando a frequência e a severidade de enchentes. Estudos documentam que a expansão urbana intensa leva a altos índices de impermeabilização, resultando em escoamentos superficiais significativamente maiores e eventos de inundações mais frequentes (Parra; Teixeira, 2020).

O Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH), lançado em 2019 pelo Ministério do Desenvolvimento Regional, prevê investimentos de R\$ 108 bilhões em obras estruturantes, incluindo mais de 114 empreendimentos prioritários, entre barragens, adutoras e sistemas de esgotamento sanitário. Este plano destaca que as infraestruturas de regularização de vazões, particularmente os reservatórios, são fundamentais tanto para garantir o abastecimento em regiões com déficit hídrico, quanto para mitigar os impactos de cheias em bacias urbanizadas ou suscetíveis a inundações (BRASIL, 2019).

Além disso, o Plano Integrado de Longo Prazo de Investimentos em Infraestrutura (PILPI), componente do escopo estratégico do Plano Nacional de Infraestrutura, destaca a importância de alinhar os investimentos em infraestrutura com diretrizes de sustentabilidade, resiliência climática e desenvolvimento regional, promovendo uma gestão integrada dos recursos hídricos e das políticas públicas frente às mudanças climáticas (BRASIL, 2021). As barragens são, nesse contexto, elementos-chave não apenas para garantir a segurança hídrica, mas também para fomentar cadeias produtivas, promover o uso da irrigação de forma agrícola sustentável e assegurar a disponibilidade de água para atividades industriais e geração de energia (ANA, 2020).

Do ponto de vista técnico, o planejamento e a localização de barragens demandam uma abordagem baseada em análise multicritério, que contemplem variáveis topográficas, hidrológicas, ambientais, sociais e econômicas. A adoção de técnicas como a Análise Hierárquica por Processos (AHP), integrada a Sistemas de Informações Geográficas (SIG), tem se consolidado como uma metodologia robusta para subsidiar a escolha de locais adequados para construção de barragens (Kharazi; Khazaeli; Heshmatpour, 2021). Estudos realizados em regiões semiáridas da Índia, do Iraque e do Peru demonstram que a combinação AHP-SIG permite não apenas identificar locais com maior eficiência de armazenamento hídrico, mas também minimizar os impactos socioambientais decorrentes da implementação dessas infraestruturas (Othman et al., 2020; Al-Khuzai; Janna; Al-Ansari, 2020b).

Além do benefício evidente na gestão da escassez hídrica, os reservatórios cumprem função essencial no controle de cheias, protegendo áreas urbanas e rurais contra eventos de inundação. A construção de barragens contribui para a amortização dos picos de vazão durante eventos extremos, permitindo que os volumes de água

sejam liberados de forma controlada, reduzindo os danos materiais, sociais e ambientais (BRASIL, 2019).

No contexto das mudanças climáticas, o último relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas aponta que "a variabilidade e os extremos do ciclo da água devem aumentar mais rapidamente que as alterações médias em grande parte das regiões do mundo", incluindo o Brasil (IPCC, 2022). Esse quadro reforça a urgência da adoção de soluções baseadas em infraestrutura resiliente, com destaque para sistemas integrados de reservatórios.

Diante desse panorama, a presente pesquisa se justifica pela necessidade de desenvolver metodologias tecnológicas e replicáveis para a seleção de locais adequados à implementação de barragens no Brasil, considerando os múltiplos usos da água e os desafios impostos tanto pela escassez quanto pelo excesso hídrico. O objetivo central é fornecer ferramentas que possam subsidiar a tomada de decisão técnica e política no planejamento da expansão da infraestrutura hídrica nacional.

Este trabalho propõe e demonstra, em três bacias de Pernambuco, um acoplamento entre o AHP (em ambiente SIG) e um modelo de localização automática de barragens (LOCASIN). O AHP organiza e pondera critérios físicos, ambientais e de acesso para mapear a adequação espacial, enquanto o LOCASIN identifica locais candidatos e suas alternativas de altura/volume. O acoplamento LOCASIN-AHP permite priorizar os candidatos e validar a coerência do mapa de adequação frente a barragens existentes por meio de análise de sensibilidade, compondo uma metodologia replicável para planejamento de infraestrutura hídrica. A escolha das bacias hidrográficas analisadas neste estudo, ainda a ser apresentada no decorrer deste trabalho, fundamenta-se na representatividade hidrológica, na ocorrência simultânea de desafios relacionados à escassez hídrica e ao risco de enchentes, e na possibilidade de aplicação da metodologia proposta a outras regiões do país.



## 1.2 OBJETIVOS GERAIS

Este estudo visa desenvolver e avaliar um modelo acoplado integrando o AHP (em SIG) ao LOCASIN para seleção, priorização e validação de locais para barragens com base em dados altimétricos de alta resolução, tendo como objeto de estudo e aplicações em bacias hidrográficas do estado de Pernambuco.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Utilizar o software LOCASIN como ferramenta de alocação de barragens, considerando critérios geomorfológicos e hidrológicos.
- Elaborar mapas temáticos e de adequação locacional com base em critérios físicos, ambientais e socioeconômicos por meio de Sistemas de Informações Geográficas (SIG).
- Validar os locais selecionados utilizando a técnica de Análise Hierárquica por Processos (AHP), integrando múltiplos critérios de decisão.
- Acoplar a análise multicritério AHP ao LOCASIN para priorizar os locais candidatos identificados automaticamente.
- Validar quantitativamente o desempenho do fluxo AHP–LOCASIN por curvas ROC/AUC usando o inventário de barragens existentes.
- Comparar os resultados obtidos pela abordagem automatizada com os locais previamente identificados por métodos convencionais adotados por instituições públicas.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 IMPORTÂNCIA DAS BARRAGENS PARA USOS MÚLTIPLOS

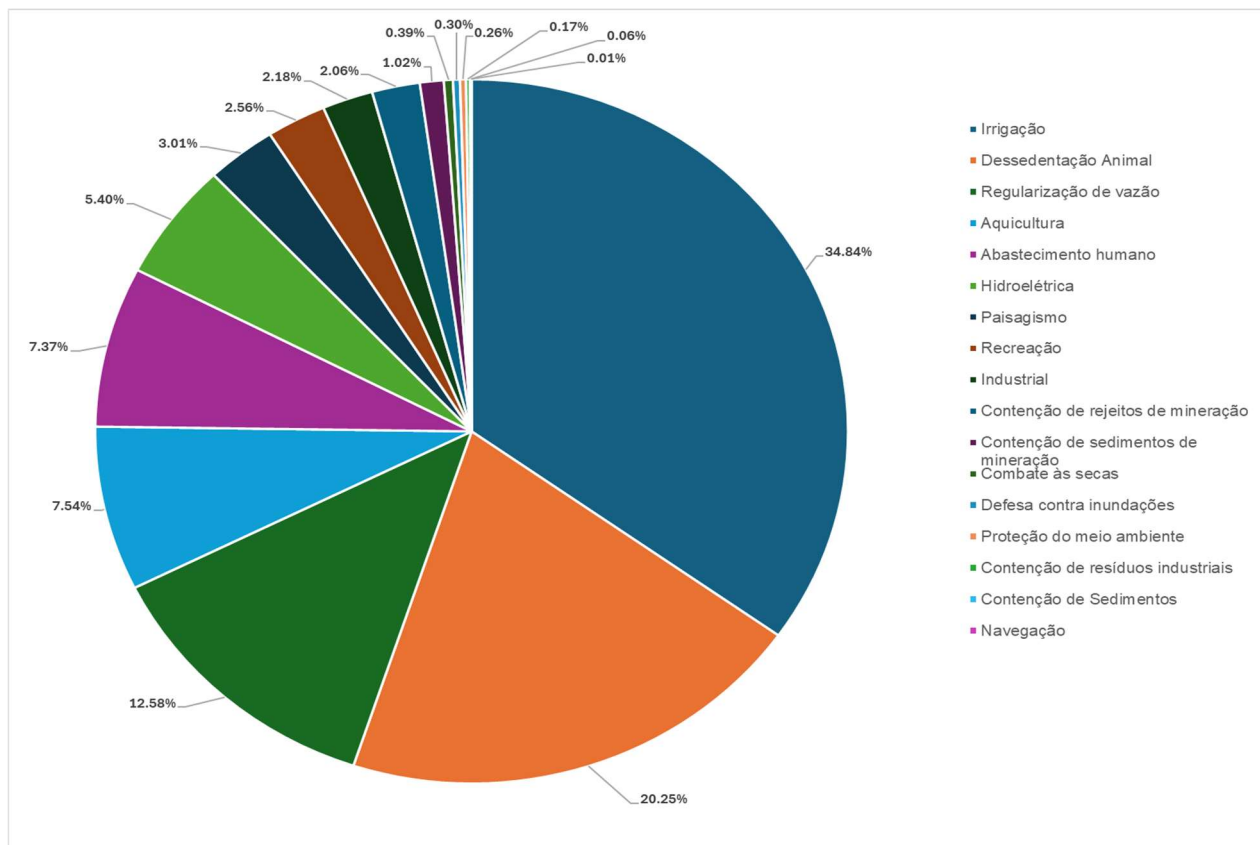
As barragens de usos múltiplos são infraestruturas fundamentais para a gestão integrada e racional dos recursos hídricos em escala regional e global. Elas constituem instrumentos versáteis e multifuncionais que contribuem de maneira decisiva para o desenvolvimento sustentável, ao atender simultaneamente a diversas necessidades humanas, econômicas e ambientais. Essas estruturas possibilitam a regulação das vazões dos cursos d'água, o abastecimento de populações, atividades produtivas, a geração de energia limpa, o controle de cheias, a recarga de aquíferos, a manutenção de ecossistemas e a criação de oportunidades econômicas por meio da pesca, turismo, lazer e navegação. Ao articularem essas diferentes funções, as barragens ampliam a resiliência dos sistemas socioambientais e proporcionam uma matriz de benefícios distribuídos ao longo do tempo e do espaço (Lee; Kang, 2020; IEA, 2015).

A caracterização dos usos das barragens no Brasil permite compreender a amplitude e a complexidade das demandas hídricas enfrentadas em diferentes regiões do país. Ao analisarmos a base de dados do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), evidencia-se a diversidade de funções atribuídas a essas infraestruturas, refletindo tanto os desafios locais de gestão dos recursos hídricos quanto as prioridades setoriais de desenvolvimento. Essa análise revela padrões que são fundamentais para orientar políticas públicas, estratégias de investimento e ações de fiscalização.

A seguir, a Figura 1 apresenta a distribuição percentual dos principais usos das barragens cadastradas, com destaque para as finalidades voltadas à produção agropecuária, energética e ao abastecimento humano. Observa-se que o uso para irrigação representa a principal finalidade, correspondendo a 34,84% do total de barragens cadastradas. Em seguida, destacam-se os usos voltados à dessedentação animal (20,25%) e à geração hidrelétrica (12,58%), refletindo a forte relação entre segurança hídrica, produção agropecuária e energética. Outras finalidades relevantes incluem a aquicultura (7,54%), o abastecimento humano (7,37%), a regularização de vazões (5,4%), além de usos múltiplos voltados ao paisagismo, recreação e controle de cheias. Usos industriais e ambientais, como contenção de rejeitos e sedimentos,

proteção ambiental e combate a secas, ainda que em menor proporção, evidenciam a multiplicidade de papéis que essas infraestruturas exercem no território nacional (Brasil, 2025).

Figura 1 - Distribuição percentual dos usos das barragens no Brasil



Fonte: SNISB, 2025

Este panorama reforça a importância das barragens como instrumentos estratégicos para o desenvolvimento sustentável e a resiliência climática no Brasil. A variedade de funções indica a necessidade de uma abordagem integrada de gestão e planejamento, considerando os diversos interesses socioeconômicos e ambientais envolvidos.

Sua importância é amplificada no contexto das mudanças climáticas, onde a variabilidade das chuvas e os eventos extremos se tornam mais frequentes. As barragens surgem, nesse sentido, como dispositivos capazes de amortecer os impactos das oscilações climáticas, ao garantir estoques de água e energia mesmo em condições adversas. Isso é especialmente relevante em regiões de clima semiárido, como o Nordeste brasileiro, onde o armazenamento artificial permite o

abastecimento regular durante longos períodos de seca (Granados et al., 2021; Santana et al., 2024).

No contexto da regulação de vazões, as barragens cumprem uma função essencial para a estabilidade hidrológica das bacias. Elas armazenam volumes significativos de água durante os períodos chuvosos e a liberam de forma controlada nos períodos de estiagem, evitando secas severas e garantindo uma oferta constante e previsível. Essa função é particularmente relevante em regiões semiáridas, onde a precipitação é altamente sazonal e a disponibilidade de água superficial sofre grandes variações. Além disso, o armazenamento estratégico contribui para a regularização dos fluxos ecológicos mínimos, necessários à manutenção de habitats aquáticos e à conservação da biodiversidade. Tais contribuições são também relevantes para a manutenção da qualidade da água, prevenindo processos de eutrofização e salinização (Toné; Lima Neto, 2020).

Do ponto de vista do controle de cheias, as barragens desempenham papel vital na proteção de áreas urbanas e agrícolas vulneráveis a inundações sazonais. Ao amortecer os picos de cheia, reduzem significativamente os danos econômicos, sociais e ambientais, além de salvar vidas humanas. Segundo estimativas da Internacional Hydropower Association, (2023), o uso de infraestruturas de água, incluindo barragens, para controle de cheias pode reduzir de 12 a 22% os danos potenciais ao PIB naqueles locais expostos a inundações representando uma economia anual significativa de US\$ 53 a 96 bilhões em escala global.

No setor energético, as barragens associadas a usinas hidrelétricas constituem fontes renováveis de energia de alta eficiência, com baixa emissão de gases de efeito estufa. Elas oferecem capacidade de geração despachável, flexível e de resposta rápida à demanda, sendo essenciais para a estabilidade de sistemas elétricos interligados. Jeuland (2020) aponta que a energia hidrelétrica permanece como a espinha dorsal da matriz energética de vários países, ao mesmo tempo em que novos arranjos, como os reservatórios de bombeamento, estão ampliando a capacidade de armazenamento e regulação da produção intermitente de fontes solar e eólica (Lemperière *et al.*, 2022). Tais avanços tecnológicos tornam as barragens ainda mais relevantes na transição para uma matriz energética limpa.

O abastecimento urbano e industrial constitui outra função estratégica dos reservatórios. Grandes cidades dependem da água armazenada para garantir a segurança hídrica de milhões de habitantes e a continuidade das atividades

industriais. Estimativas recentes sugerem que mais de 60% das metrópoles mundiais utilizam águas de reservatórios artificiais para consumo doméstico e usos diversos (Sunil; Singh; Molakala, 2024). Além disso, os reservatórios possibilitam a expansão da agricultura irrigada, especialmente em zonas áridas e semiáridas, elevando a produtividade agrícola e reduzindo a vulnerabilidade alimentar. A segurança alimentar, por sua vez, fortalece a estabilidade econômica e social das comunidades dependentes do setor agropecuário.

As barragens também impulsionam usos econômicos alternativos da água, como a aquicultura, a pesca comercial e esportiva, o turismo e o lazer. A presença de grandes espelhos d'água incentiva o surgimento de polos de desenvolvimento regional, com geração de emprego e diversificação das atividades econômicas locais. O caso da barragem de Sobradinho, no Brasil, ilustra como a multifuncionalidade pode ser articulada de forma sinérgica, promovendo benefícios ambientais e sociais significativos (Kelman *et al.*, 2022). Além disso, reservatórios bem manejados têm se tornado espaços de educação ambiental e pesquisa científica, ampliando seu valor social.

Do ponto de vista econômico, os grandes projetos de barragens têm sido associados a aumentos no PIB, incremento da arrecadação fiscal e melhorias na infraestrutura de transporte, eletrificação e saneamento. Tortajada (2015) destaca o exemplo do Butão, onde os empreendimentos hidrelétricos respondem por aproximadamente 25% do PIB e 40% das receitas públicas, sendo o principal vetor de crescimento do país. Esses dados ilustram o potencial transformador das barragens quando integradas a políticas públicas de desenvolvimento territorial. Além disso, sua construção e manutenção geram milhares de empregos diretos e indiretos.

No entanto, os impactos socioambientais associados à implementação e operação de barragens demandam atenção rigorosa. Entre os principais desafios estão a fragmentação de habitats, a interrupção da migração de espécies aquáticas, o deslocamento de comunidades ribeirinhas, o assoreamento dos reservatórios e os riscos geotécnicos (Zhang *et al.*, 2022). Estudos como o de Jeuland (2020) enfatizam a importância de uma governança participativa, com mecanismos de compensação, reassentamento digno e monitoramento ambiental contínuo. A adoção de tecnologias de mitigação, como passagens para peixes, monitoramento remoto e técnicas de dragagem, tem sido incentivada internacionalmente. Tais medidas permitem conciliar os benefícios com a conservação ambiental.

A governança institucional é determinante para o sucesso dos projetos de usos múltiplos. No Brasil, a atuação da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) têm promovido a normatização técnica e o fortalecimento da cultura de segurança de barragens. Além disso, modelos de gestão participativa como comitês de bacia e consórcios intermunicipais permitem a conciliação dos múltiplos interesses envolvidos, conforme sugerido por Lee; Kang (2020). A transparência na gestão e o acesso público às informações têm se mostrado fatores críticos para a legitimação social desses empreendimentos.

Estudos contemporâneos ampliam essa visão multifacetada. Türk; Türk (2022) analisam os riscos sísmicos em áreas com múltiplos reservatórios, destacando a necessidade de mapeamento geotécnico preciso. Nathan; Lowe (2012) evidenciam o papel das pequenas barragens agrícolas na gestão hídrica descentralizada. Mohamed (2019) apresenta os impactos positivos da Barragem de Assuã, como a expansão agrícola e o desenvolvimento do turismo. Grget; Bačić (2024) reforçam a importância do monitoramento estrutural e da instrumentação de longo prazo. Olushola; Irughe (2017) demonstram como a batimetria e a modelagem volumétrica são úteis na otimização da operação. Foudi et al. (2023) propõem o uso do conceito de Nature's Contributions to People (NCP) para integrar os valores ecológicos, sociais e culturais das barragens aos processos decisórios.

Conclui-se que as barragens de usos múltiplos, quando planejadas com critérios técnicos, ambientais e sociais rigorosos, constituem soluções estratégicas para os desafios da segurança hídrica, energética e alimentar. Sua eficácia está condicionada à governança integrada, ao engajamento dos atores locais e ao monitoramento contínuo de seus efeitos. Como infraestruturas de longa duração, as barragens demandam uma abordagem sistêmica que articule os princípios da sustentabilidade, da justiça socioambiental e da inovação tecnológica. Para tanto, é fundamental que as decisões sobre construção, operação e descomissionamento considerem tanto os benefícios econômicos quanto os custos sociais e ambientais, garantindo um balanço justo e sustentável para as presentes e futuras gerações.

## 2.2 CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DE LOCAIS NA IMPLEMENTAÇÃO DE RESERVATÓRIOS

A delimitação de áreas aptas à implementação de reservatórios configura um componente estratégico na engenharia de recursos hídricos. Este processo demanda uma abordagem integrada que contemple aspectos geomorfológicos, hidrológicos, ecológicos, geotécnicos, socioeconômicos e normativos.

Devido à multiplicidade e interdependência desses fatores, observa-se um crescente emprego de metodologias quantitativas e qualitativas robustas. Dentre as principais ferramentas destacam-se os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), a Análise Multicritério de Decisão (MCDM) e modelagens hidrológicas baseadas em séries temporais e algoritmos de otimização. A articulação dessas técnicas permite incorporar critérios diversos, ponderar seus pesos relativos e estruturar cenários prospectivos consistentes, como demonstrado nos trabalhos de Masi et al. (2024) e Castelli; Masi; Arrighi (2024).

### 2.2.1 Critérios Técnicos, Físicos e Ambientais

O delineamento técnico de um reservatório exige análise detalhada da topografia local, priorizando regiões com morfologias favoráveis à formação de volumes úteis com mínima área inundada, o que se traduz em maior eficiência hidráulica e menor custo socioambiental. Declividades elevadas, vales encaixados e cotas altimétricas apropriadas são atributos desejáveis, conforme ressaltado por Ahmad (2014) e Capilla; Carrión; Hernandez (2016).

Do ponto de vista hidrológico, é imperativo considerar o regime hidrometeorológico da bacia contribuidora, com especial atenção às vazões médias, máximas e mínimas, bem como à variabilidade interanual e sazonal. Reservatórios situados em bacias com estabilidade hidrológica tendem a apresentar maior previsibilidade de operação (Baban; Wan-Yusof, 2003; Kaldi; Bachu, 2009).

A variável ambiental, por sua vez, deve abranger a identificação de áreas legalmente protegidas, remanescentes de vegetação nativa, corredores ecológicos e habitats críticos. A análise de sensibilidade ecológica permite antecipar os impactos

sobre a biodiversidade e priorizar medidas de compensação ambiental adequadas (Roberts et al., 2003; Kennish et al., 2002)

Em termos geológicos e geotécnicos, substratos rochosos estáveis, baixa condutividade hidráulica do solo e ausência de estruturas tectônicas ativas são preferíveis, uma vez que reduzem o risco de infiltração indesejada, instabilidade de taludes e colapsos estruturais. A avaliação geotécnica detalhada, incluindo sondagens e mapeamentos estruturais, é pré-requisito técnico essencial (Tsiko; Haile, 2011).

### **2.2.2 Critérios Socioeconômicos, Jurídicos e de Uso do Território**

A variável socioeconômica incide diretamente sobre a viabilidade política e institucional dos projetos. A magnitude dos impactos sobre comunidades locais — especialmente em contextos rurais ou tradicionalmente ocupados — deve ser quantificada por meio de indicadores como densidade populacional, tipologia fundiária, índice de vulnerabilidade social e distribuição de atividades econômicas (Gökmener et al., 2023; Liu et al., 2019).

A análise do uso e cobertura do solo, baseada em sensores remotos e validação em campo, permite identificar zonas antropizadas compatíveis com o uso proposto, além de mapear áreas com restrições legais, tais como terras indígenas, áreas de proteção ambiental e zonas urbanas consolidadas, que inviabilizam a implementação de reservatórios por imperativo legal.

A infraestrutura existente no entorno, como acessos rodoviários, disponibilidade energética e proximidade de centros operacionais, exerce papel decisivo na redução dos custos logísticos relacionados à implementação, manutenção e operação do empreendimento. Além disso, uma boa acessibilidade técnica representa um fator crucial para garantir a segurança operacional, bem como para viabilizar respostas eficientes em situações de emergência e eventos extremos (Luis-Ruiz et al., 2022).

### **2.2.3 Ferramentas de Apoio à Tomada de Decisão**

O ambiente decisório em torno da alocação espacial de reservatórios exige a integração de métodos multicritério, que permitem combinar variáveis heterogêneas sob um arcabouço analítico coerente. O Processo de Hierarquia Analítica (AHP) é



amplamente utilizado para atribuir pesos aos critérios, enquanto a lógica fuzzy contribui com a incorporação de incertezas qualitativas. Os SIGs são fundamentais para representar espacialmente os critérios e gerar zonas de aptidão (Ahmad; Shahabi; Ahmad, 2015).

Modelagens híbridas, que associam SIG, AHP e técnicas participativas, foram aplicadas com sucesso em diversos contextos, conforme ilustrado por Ahmadi; Shamsai, (2009). A construção de cenários com base em restrições físicas, ambientais e sociais possibilita a priorização de alternativas com maior custo-benefício socioambiental.

A inclusão de stakeholders locais no processo deliberativo contribui não apenas para a legitimidade das decisões, mas também para a sustentabilidade social e institucional dos empreendimentos, como evidenciado nos estudos conduzidos por Masi et al. (2024).

#### 2.2.4 Estudos Aplicados

A utilização de estudos de caso é essencial para validar metodologias teóricas e evidenciar sua aplicabilidade em contextos reais. Casos empíricos demonstram a aplicabilidade das abordagens descritas:

- **Malásia:** uso combinado de SIG e AHP para definir zonas de prioridade com base em declividade, cobertura vegetal e disponibilidade hídrica (Ahmad; Shahabi; Ahmad, 2015).
- **Grécia:** aplicação de sensoriamento remoto de alta resolução em áreas montanhosas para modelagem de bacias aptas à construção de reservatórios (Kalogeropoulos *et al.*, 2023).
- **Eritreia:** emprego de lógica fuzzy e SIG para mapear zonas resilientes à seca com múltiplos usos potenciais (Tsiko; Haile, 2011).
- **Brasil:** identificação de áreas aptas à implementação de usinas hidrelétricas com base em critérios ambientais e sociais integrados (Lopes *et al.*, 2022).

## 2.3 USO DE TECNOLOGIAS DIGITAIS PARA LOCALIZAÇÃO AUTOMÁTICA DE RESERVATÓRIOS

A localização automática de reservatórios utiliza tecnologias de sensoriamento remoto e geoprocessamento para identificar e mapear potenciais estruturas de contenção globalmente. Por meio de sensoriamento remoto, imagens de satélite e dados geoespaciais, obtêm-se informações precisas sobre as coordenadas de reservatórios. Esse tipo de tecnologia é extremamente útil para diversos fins, como monitoramento de barragens existentes, identificação de novas barragens em regiões remotas e até mesmo para fins de planejamento e gestão de recursos hídricos. Além disso, a localização automática de barragens também pode ser fundamental para avaliar a segurança e a manutenção dessas estruturas.

Existem várias maneiras de realizar a localização automática de barragens, incluindo algoritmos de processamento de imagens que identificam características específicas das barragens em imagens de satélite, e sistemas de posicionamento global (GNSS) que fornecem coordenadas geográficas com alta precisão. Além disso, a incorporação de inteligência artificial (IA) e aprendizado de máquina (AM) tem incrementado a precisão e a eficiência na detecção automática de reservatórios. Com algoritmos avançados, é possível analisar grandes volumes de dados e reconhecer padrões que indicam a presença de barragens.

A localização automática de barragens desempenha um papel fundamental na gestão de recursos hídricos e na segurança da infraestrutura. Ao fornecer informações atualizadas sobre a localização das barragens, permite-se que as autoridades monitorem e tomem medidas proativas para evitar situações de risco. Isso contribui para a prevenção de desastres e a proteção das comunidades que vivem próximas a essas estruturas.

Até o presente momento de escrita desta tese há poucos softwares capazes de detectar automaticamente locais potenciais para a construção de barragens. Muitos estudos empregaram Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para localizar potenciais reservatórios sem visitas de campo como por exemplo Padmavathy et al., 1993; Al-Adamat, 2008; Ziadat et al., 2012; Kadam et al. al., 2012; Krois e Schulte, 2014; Al-Khuzai et al., 2020. Porém, a maioria não era capaz de detectar automaticamente locais a partir de uma série de parâmetros. Muitos destes estudos utilizavam os modelos digitais do terreno avaliando as curvas de níveis e o

conhecimento técnico dos especialistas para localizar barragens manualmente. Esses métodos invariavelmente reúnem diferentes conjuntos de dados, desde sensoriamento remoto e mapas digitalizados, muitas vezes combinados com modelagem hidrológica, e exploram o espaço de tomada de decisão dentro do ambiente GIS.

Padmavathi et al. (1993) utilizaram o Sistema de Informações Geográficas para identificação de locais para barragens. Usando a abordagem GIS foram selecionados sete locais no distrito de Hassan, Karnataka, Índia, cobrindo cerca de 400 km<sup>2</sup> de área. Vários mapas temáticos da área de estudo na escala 1:50.000 foram analisados e os locais adequados foram selecionados dependendo do contorno e inclinação. A provável área de propagação (WSA) e a Área Imediata a Jusante (IDA) foram desenhadas. Esses polígonos foram cruzados com diferentes mapas temáticos para descobrir a adequação. Antes da intersecção, pesos apropriados (menos adequados para mais adequados na escala de 1 a 5) foram atribuídos a diferentes classes de mapas temáticos, tendo em mente que a pior área só fica submersa no caso de WSA enquanto no caso do IDA, os pesos foram atribuídos tendo em conta a necessidade de água. O Índice Ponderado Cumulativo Normalizado (NCWI) foi desenvolvido para descobrir a adequação dos locais do ponto de vista dos recursos naturais. Todos os sete locais selecionados foram considerados bastante razoáveis com base nos valores do NCWI. As aldeias que seriam beneficiadas foram identificadas. A verificação de campo foi realizada e observou-se que os locais seriam bastante adequados.

Al-Adamat (2008) também fizeram uso de técnicas de SIG para selecionar locais ideais para lagoas de coleta de água dentro do aquífero do basalto/NE na Jordânia. Buffering, União e operações aritméticas em GIS foram todas usadas na análise dos dados com base em diferentes critérios socioeconômicos e físicos. Os resultados da análise GIS resultaram na seleção de 72 locais adequados dentro da área de estudo.

Ziadat et al. (2012) desenvolveram uma metodologia utilizando uma abordagem participativa baseada em GIS e levantamentos de campo para identificar áreas adequadas a diferentes intervenções voltadas à captação de água da chuva. Para avaliar a aptidão dessas intervenções, foram considerados os seguintes parâmetros biofísicos principais: declividade do terreno, profundidade e textura do solo e pedregosidade. Esses critérios foram integrados e aplicados na elaboração de um

mapa de adequação, utilizando técnicas de análise espacial tanto raster quanto vetorial. Posteriormente, aspectos socioeconômicos foram incorporados ao estudo por meio da sobreposição das informações relacionadas à posse da terra sobre o mapa previamente desenvolvido. As avaliações em campo demonstraram que essa abordagem contribuiu significativamente para a seleção de áreas mais apropriadas para as intervenções, identificando diversas opções viáveis com o envolvimento ativo das comunidades locais. Dessa forma, a metodologia proposta evidenciou a eficácia da abordagem GIS participativa como uma ferramenta integradora dos critérios biofísicos e socioeconômicos, promovendo o engajamento dos agricultores na adoção de estratégias de captação de água da chuva, especialmente em sistemas de pastagens em áreas secas, com vistas à mitigação da degradação dos recursos naturais.

Kadam et al. (2012) investigaram a bacia hidrográfica do Alto Karha da parte semiárida da Província Vulcânica Deccan, na Índia para identificar os locais potenciais para construir estruturas de coleta de água da chuva com a ajuda de sensoriamento remoto e sistema de informação geográfica. Procurou-se compreender o terreno basáltico no contexto espacial para descobrir as estruturas de captação de água da chuva como lagoas agrícolas, tanque de percolação, barragens de controle e bueiros decorrentes de camadas temáticas, como uso/cobertura do solo, declividade, solo, drenagem, entre outros dados. Posteriormente, essas camadas foram processadas para derivar o escoamento a partir do método Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) usando a ferramenta de escoamento Arc-CN. Por fim, os locais encontrados foram investigados quanto à sua adequação e implementação por verificação de campo do terreno.

Krois e Schulte (2014) apresentaram um método para identificar e classificar locais potenciais para técnicas de conservação do solo e da água. O método levou em consideração critérios de avaliação ambiental do local e um método de tomada de decisão conhecido como Processo de Hierarquia Analítica. Os dados espaciais foram processados através da aplicação de um sistema de informação geográfica e os locais potenciais foram classificados por uma avaliação multicritério com base em critérios meteorológicos, hidrológicos, topográficos, agronômicos e pedológicos. O método foi aplicado para identificar locais potenciais para terraços e sistemas de diques na bacia hidrográfica de Ronquillo, localizada no norte dos Andes do Peru. A análise indicou que 44% da área de captação do Rio Ronquillo era altamente adequada para a

implementação de terraços, e 24% da área de captação era altamente adequada para a implementação de sistemas de diques. Viu-se que a identificação preliminar de locais potenciais para técnicas de conservação do solo e da água pode ser uma ferramenta útil na execução de programas de conservação de recursos.

Al-Khuzai; Janna e Al-Ansari (2020) aplicaram técnicas de Sistema de Informações Geográficas (GIS) para identificar locais ótimos para captação de água na província de Al-Qadisiyah, Iraque. Os autores inicialmente obtiveram e reescalaram dados provenientes de repositórios globais, padronizando-os para uma resolução espacial adequada à análise. O modelo Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) foi empregado para determinar o potencial de escoamento superficial, gerando uma importante informação intermediária para o estudo. Adicionalmente, técnicas de Avaliação Multicritério foram utilizadas para avaliar a relevância relativa dos parâmetros adotados e definir níveis de adequabilidade para gerenciamento dos recursos hídricos. Com base em critérios hidrológicos e geomorfológicos específicos, foram delimitadas áreas aptas à captação de água, classificando-as em quatro categorias de adequação: muito baixa, baixa, moderada e alta. O estudo concluiu que o emprego de informações GIS representa uma ferramenta essencial e eficaz na identificação de locais promissores para construção de barragens, apoiando decisões estratégicas dos órgãos gestores de recursos hídricos.

A partir do avanço da tecnologia agregada ao uso da programação para análise de dados espaciais, tornou-se possível a detecção automática de barragens tendo como ponto de partida um conjunto de informações facilitando e diminuindo a possibilidade de erro nos estudos.

Foram desenvolvidas ferramentas independentes de SIG que analisam a topografia circundante de locais potenciais e fornecem detalhes de estruturas de contenção e zonas de armazenamento. Por exemplo, Petheram, Gallant e Read (2017) criaram um conjunto de algoritmos para auxiliar a localização de barragens, fornecendo dimensões de barragens e reservatórios. Wimmer; Pfeifer e Hollaus (2019) introduziram um método automatizado usando contornos para detectar possíveis localizações de reservatórios, calculando o comprimento da barragem e o volume do reservatório. Teschemacher; Bittner e Disse (2020) descrevem uma ferramenta MATLAB de código aberto para determinar propriedades de barragens e

bacias. Wang, Tian e Cao (2021) revisaram os métodos de localização de barragens e aferiram que os métodos de localização podem ser categorizados em três tipos:

1. Localização baseada em GIS;
2. Localização baseada em Tomada de Decisão multicritério (MCDM) e MCDM-GIS
3. Localização baseada em aprendizagem de máquina.

Modelos Digitais de Elevação (MDEs) são ferramentas fundamentais para a análise do relevo e são amplamente utilizados na seleção de locais para captação de água, especialmente em estudos hidrológicos e de planejamento territorial. Embora existam MDEs com alta resolução espacial — como os derivados de LiDAR — capazes de fornecer informações detalhadas com resolução inferior a 5 metros, esses modelos geralmente estão associados a custos elevados, o que os torna economicamente proibitivos para muitos projetos, especialmente em contextos acadêmicos ou de gestão pública com orçamento limitado.

Por outro lado, há diversos MDEs gratuitos amplamente utilizados, com resoluções em torno de 30 metros, que oferecem um bom compromisso entre disponibilidade, custo e qualidade. Entre os principais destacam-se o SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), o ASTER GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), o ALOS AW3D30 e o Topodata — este último desenvolvido pelo INPE com foco no território brasileiro, como discutido por Silva, Miranda e Candeias (2022) e também por Cirilo et al., (2014). No contexto regional, iniciativas como o projeto PE3D, promovido pelo governo do Estado de Pernambuco, merecem destaque por disponibilizarem gratuitamente MDEs de alta resolução baseados em tecnologia LiDAR, viabilizando análises detalhadas em escala local sem custos para o usuário.

O PE3D (Pernambuco Tridimensional) é um programa de mapeamento aerofotogramétrico e perfilamento a laser que visa cobrir todo o território do estado de Pernambuco com dados altimétricos de alta precisão. Utilizando tecnologia LiDAR, o projeto gera Modelos Digitais de Terreno (MDT) e Modelos Digitais de Elevação (MDE) com resolução espacial de 1 metro e erro altimétrico inferior a 25 cm. Além disso, são produzidas ortofotos na escala 1:5.000 e, para áreas urbanas selecionadas, ortofotos na escala 1:1.000 com resolução de 12 cm. Esses dados são disponibilizados

gratuitamente por meio do portal oficial do projeto, mediante cadastro prévio. O PE3D tem sido amplamente utilizado em diversas aplicações, como planejamento urbano, gestão de recursos hídricos, estudos de risco geotécnico e modelagem hidrológica, demonstrando sua importância como ferramenta de suporte à gestão territorial e ao desenvolvimento sustentável do estado (França et al., 2024; Silva, G. M.; Demetrio, 2020)

Schumann e Bates (2020) defenderam que MDEs com maior resolução e maior precisão devem estar disponíveis gratuitamente com cobertura global, pois os MDEs de resolução menor são pouco adequados para muitas aplicações hidrológicas em escala local. No entanto, o uso de MDEs com resolução espacial mais alta — ou seja, com pixels menores que representam áreas mais finas do terreno — pode introduzir limitações em certos métodos hidrológicos, especialmente aqueles que utilizam variáveis calculadas ponto a ponto (como declividade, direção de fluxo ou acúmulo de escoamento). Isso ocorre porque, à medida que a resolução aumenta, cada pixel passa a representar uma área muito pequena em relação à escala física da estrutura de captação de água (como uma bacia de drenagem ou um canal). Com isso, torna-se mais difícil integrar ou generalizar os resultados para captar corretamente o comportamento do sistema em uma escala significativa. Em outras palavras, o modelo pode capturar variações muito locais e pontuais do relevo, mas não necessariamente refletir o comportamento hidrológico real da área, exigindo um tratamento mais cuidadoso dos dados para evitar erros de interpretação. Assim, embora haja um incentivo para usar MDEs de resolução mais alta para modelagem hidrológica aprimorada, isso reduz a adequação de métodos que dependem de parâmetros definidos ponto a ponto, como a variável de inclinação identificada por Ammar et al. (2016), que têm sido amplamente utilizados até então.

Outra ferramenta recentemente criada para a localização automática de barragens foi o SiteFinder. O programa teve por objetivo fornecer uma ponte entre os critérios de inclinação baseados em pontos calculados em um ambiente GIS adotados por muitos pesquisadores para a seleção de locais de coleta de água e os métodos automatizados que consideram a topografia circundante de locais potenciais, mas funcionam fora de um ambiente GIS (Petheram et al., 2017, Wimmer et al., 2019, Teschemacher et al., 2020). A saída do software consiste na informação sobre o comprimento e a altura de potenciais estruturas de represamento e detalhes das áreas de armazenamento de água que elas poderiam criar a montante. Por fim, a ferramenta

foi desenvolvida de forma que para cada local analisado como local potencial para captação de água, várias alturas de barreira fossem consideradas, até uma altura máxima definida pelo usuário. Em resumo, o objetivo era criar um processo automatizado capaz de fornecer informações sobre o tamanho da barreira e os volumes de armazenamento de água para potenciais locais de coleta de água que não estão prontamente disponíveis no contexto conveniente e amplamente utilizado de um ambiente GIS.



## 2.4 ANÁLISE MULTICRITÉRIO (AHP) NO PLANEJAMENTO DE INFRAESTRUTURA HÍDRICA

O método Analytic Hierarchy Process (AHP), proposto por Thomas Saaty na década de 1970, consolidou-se como uma das metodologias mais eficazes no apoio à decisão multicritério. Trata-se de uma técnica estruturada que permite a decomposição de problemas complexos em uma hierarquia de critérios, facilitando a análise comparativa por meio de matrizes de julgamento paritário. O AHP é amplamente utilizado em diversos campos da engenharia, incluindo a gestão de recursos hídricos, justamente por sua capacidade de integrar critérios técnicos, econômicos e ambientais. Sua aplicabilidade se destaca especialmente em contextos nos quais a decisão envolve múltiplas variáveis qualitativas e quantitativas que precisam ser ponderadas de maneira objetiva.

A abordagem metodológica do AHP também favorece a participação de especialistas e tomadores de decisão, permitindo uma análise participativa e transparente. Nos últimos anos, seu uso vem sendo intensificado no planejamento de infraestrutura hídrica, uma vez que possibilita decisões mais fundamentadas sobre onde e como implantar estruturas como barragens (Oliveira; Duarte, 2025).

Com a crescente complexidade dos sistemas de dados utilizados na engenharia e na gestão pública, novas abordagens vêm sendo desenvolvidas para automatizar ou semi-automatizar a aplicação do AHP. Oliveira e Duarte (2025) propuseram um modelo inovador que permite converter automaticamente dados normalizados em escalas compatíveis com a escala de Saaty, possibilitando a geração de matrizes de comparação com mínima intervenção humana. Essa automatização representa um salto significativo na eficiência do processo decisório, principalmente em projetos de larga escala que envolvem análise de múltiplos locais ou cenários alternativos. A proposta dos autores envolve ainda a criação de funções específicas que traduzem dados objetivos em julgamentos subjetivos dentro da escala AHP, conferindo maior consistência e reprodutibilidade às decisões técnicas. Essa evolução permite que órgãos públicos e empresas utilizem o AHP com mais agilidade, favorecendo a padronização e a rastreabilidade dos processos decisórios.

No campo da segurança hídrica, o AHP também tem sido aplicado com sucesso na análise de risco de falhas em barragens. Um exemplo é o estudo conduzido por Mat Daud et al. (2021), que aplicaram o AHP para avaliar e hierarquizar

os principais fatores de risco associados à integridade estrutural da barragem Bukit Merah, na Malásia. A pesquisa identificou como critérios principais a infiltração em estruturas, falhas operacionais humanas e fenômenos naturais como chuvas extremas. O método AHP permitiu quantificar a influência relativa de cada fator e definir prioridades para ações corretivas e preventivas. Além disso, os autores validaram a consistência das avaliações utilizando a razão de consistência (CR), assegurando a confiabilidade dos resultados. Esse tipo de aplicação evidencia como o AHP pode ser uma ferramenta estratégica não apenas para planejamento, mas também para manutenção e monitoramento da segurança de estruturas existentes (Daud *et al.*, 2021).

A evolução do AHP também passa por sua integração com a lógica fuzzy, visando lidar com a imprecisão e a subjetividade inerente a muitos processos decisórios. No estudo de Esavi *et al.* (2012), a aplicação comparativa entre os métodos AHP tradicional e fuzzy-AHP em um projeto de locação de barragens subterrâneas na bacia de Taleghan, Irã, demonstrou a superioridade do modelo fuzzy em cenários com incertezas elevadas.

O uso de variáveis linguísticas permite uma representação mais fiel do julgamento humano, especialmente quando os dados são escassos ou qualitativos. Além disso, os autores demonstraram que o fuzzy-AHP resultou em maior precisão na definição dos locais prioritários para construção, quando comparado ao AHP clássico. Esse tipo de adaptação amplia o escopo de aplicação da técnica, tornando-a mais robusta para o contexto da gestão integrada de recursos hídricos (Esavi *et al.*, 2013)

Considerando o contexto atual do estado de Pernambuco, onde os desafios relacionados à escassez hídrica são agravados por eventos climáticos extremos, a adoção do AHP se apresenta como uma solução técnica e estratégica. Sua integração com sistemas de informação geográfica (SIG) e plataformas de modelagem ambiental pode aprimorar significativamente os processos de planejamento e tomada de decisão. Com a utilização de ferramentas semiautomatizadas, como as desenvolvidas por Oliveira e Duarte, torna-se possível aplicar o AHP em larga escala, mantendo a precisão e a transparência. Esse potencial justifica sua inclusão em projetos estruturantes para a expansão da infraestrutura hídrica do estado, alinhando tecnologia e gestão pública eficiente (Oliveira; Duarte, 2025).

A integração do Analytic Hierarchy Process (AHP) com Sistemas de Informações Geográficas (SIG) tem se consolidado como uma abordagem robusta para a seleção automática de locais para construção de barragens. Esta combinação aproveita a estrutura analítica do AHP para ponderar critérios decisórios múltiplos e a capacidade espacial dos SIG para analisar, sobrepor e visualizar dados georreferenciados. Com isso, é possível produzir mapas de adequação locacional com alto grau de precisão e confiabilidade, otimizando recursos e reduzindo o tempo de análise (Ali *et al.*, 2023)

Estudos recentes demonstram a aplicabilidade desse método em diversas regiões do mundo, inclusive em contextos semiáridos. Alrawi *et al.*, (2023) utilizaram a integração AHP-SIG na bacia de Al-Qalamoun, na Síria, para identificar áreas adequadas à construção de barragens de captação de água pluvial, validando os resultados com estruturas existentes. De forma similar, Shao *et al.*, (2020) desenvolveram o modelo DSSM (Dam Suitability Stream Model), integrando ordem de drenagem com AHP-SIG, aplicável à construção de barragens multifuncionais.

No contexto brasileiro, essa abordagem é particularmente promissora para regiões como o semiárido nordestino, onde a seleção eficiente de locais para novas barragens é fundamental para garantir a segurança hídrica. Oliveira e Duarte destacam a automatização do AHP com dados tabulares, permitindo a geração automatizada de matrizes de comparação a partir de dados geoespaciais, o que reduz o viés subjetivo e potencializa decisões baseadas em critérios técnicos e ambientais (Oliveira; Duarte, 2025).

Diversos critérios são utilizados em modelos AHP-SIG para determinar a adequação locacional, incluindo fatores físicos (declividade, geologia, ordem de drenagem), ambientais (uso do solo, cobertura vegetal, impacto ecológico) e socioeconômicos (proximidade à infraestrutura, densidade populacional, custo-benefício). Cada critério recebe um peso relativo definido com base no AHP, e os dados espaciais são processados via análise de sobreposição ponderada no SIG (Kharazi; Khazaeli; Heshmatpour, 2021).

A efetividade desses modelos foi demonstrada também no Iraque e na Índia. Othman *et al.* (2020) aplicaram o AHP-SIG para avaliar 14 camadas temáticas e comparar com barragens propostas pelo governo iraquiano. Esses estudos mostram que a metodologia é replicável e adaptável a diferentes realidades geográficas e climáticas

Além da flexibilidade, a integração AHP-SIG oferece vantagens operacionais como a automatização da seleção locacional, redução de custos com levantamentos de campo e maior transparência no processo decisório. A visualização espacial dos mapas de adequação torna o processo mais acessível a gestores públicos e comunidades envolvidas no planejamento hídrico (Ali *et al.*, 2023).

Apesar das vantagens, a metodologia também apresenta desafios, como a dependência de dados espaciais de alta qualidade e o conhecimento técnico necessário para operar os sistemas envolvidos. Além disso, a atribuição de pesos no AHP ainda pode conter subjetividade, embora isso possa ser mitigado com técnicas fuzzy ou aprendizado de máquina (Othman *et al.*, 2020)

O futuro dessa abordagem aponta para a incorporação de dados em tempo real (como sensores remotos e IoT), modelos baseados em inteligência artificial e maior participação dos stakeholders no processo de decisão. Rane; Achari; Choudhary, (2023) destaca a importância desses avanços para tornar os modelos mais dinâmicos, colaborativos e responsivos às necessidades locais.

Diante disso, a integração AHP-SIG representa uma ferramenta promissora para a locação automática de barragens, especialmente em regiões com escassez hídrica e desafios topográficos. Sua adoção em políticas públicas pode agilizar e tornar mais eficazes os projetos de infraestrutura hídrica, contribuindo para o desenvolvimento sustentável e a resiliência climática (Alrawi *et al.*, 2023).

### 3 METODOLOGIA

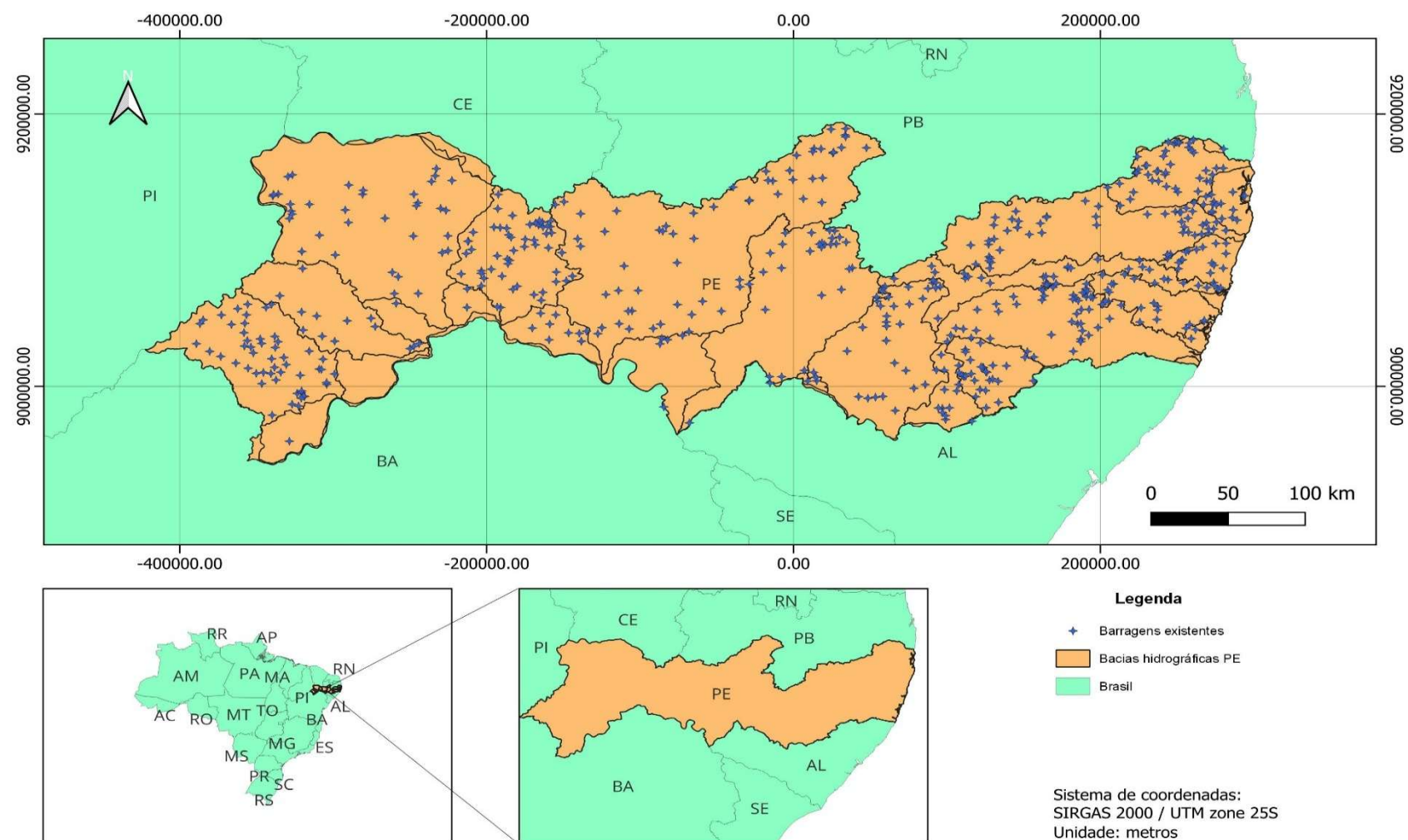
#### 3.1 ABRANGÊNCIA ESPACIAL DO ESTUDO

O Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) tem por finalidade o registro e o monitoramento de barragens destinadas a diversos usos, incluindo abastecimento humano, geração de energia, contenção de rejeitos industriais e mineração. No Brasil, atualmente são cadastradas 28.589 barragens destinadas a recursos hídricos, destacando-se a importância estratégica desses reservatórios para a gestão sustentável dos recursos naturais e segurança hídrica do país. Em Pernambuco, o SNISB registra um total de 587 barragens. Estas estruturas desempenham papéis fundamentais no abastecimento humano, no uso para a irrigação agrícola, no enfrentamento das secas e na prevenção contra inundações, totalizando uma capacidade de armazenamento de água de aproximadamente 16.616,38 hm<sup>3</sup> (BRASIL, 2025).

Na Figura 2, é possível visualizar a distribuição espacial dessas barragens ao longo das bacias hidrográficas localizadas em Pernambuco. Observa-se uma maior concentração das estruturas nos trechos médio e oriental do Estado, destacando-se as bacias dos rios Capibaribe, Una, Sirinhaém e Ipojuca. Já na região ocidental do Estado, notadamente nas bacias dos rios Pontal, Garças e Brígida, observa-se uma dispersão mais ampla, refletindo provavelmente aspectos físicos e demandas específicas dessas regiões.

Essa configuração espacial evidencia a necessidade de gestão integrada e de políticas públicas diferenciadas que atendam às particularidades de cada região hidrográfica, otimizando a utilização dos recursos hídricos disponíveis e garantindo a segurança hídrica estadual.

Figura 2 – Mapa com a disposição das barragens existentes em Pernambuco.

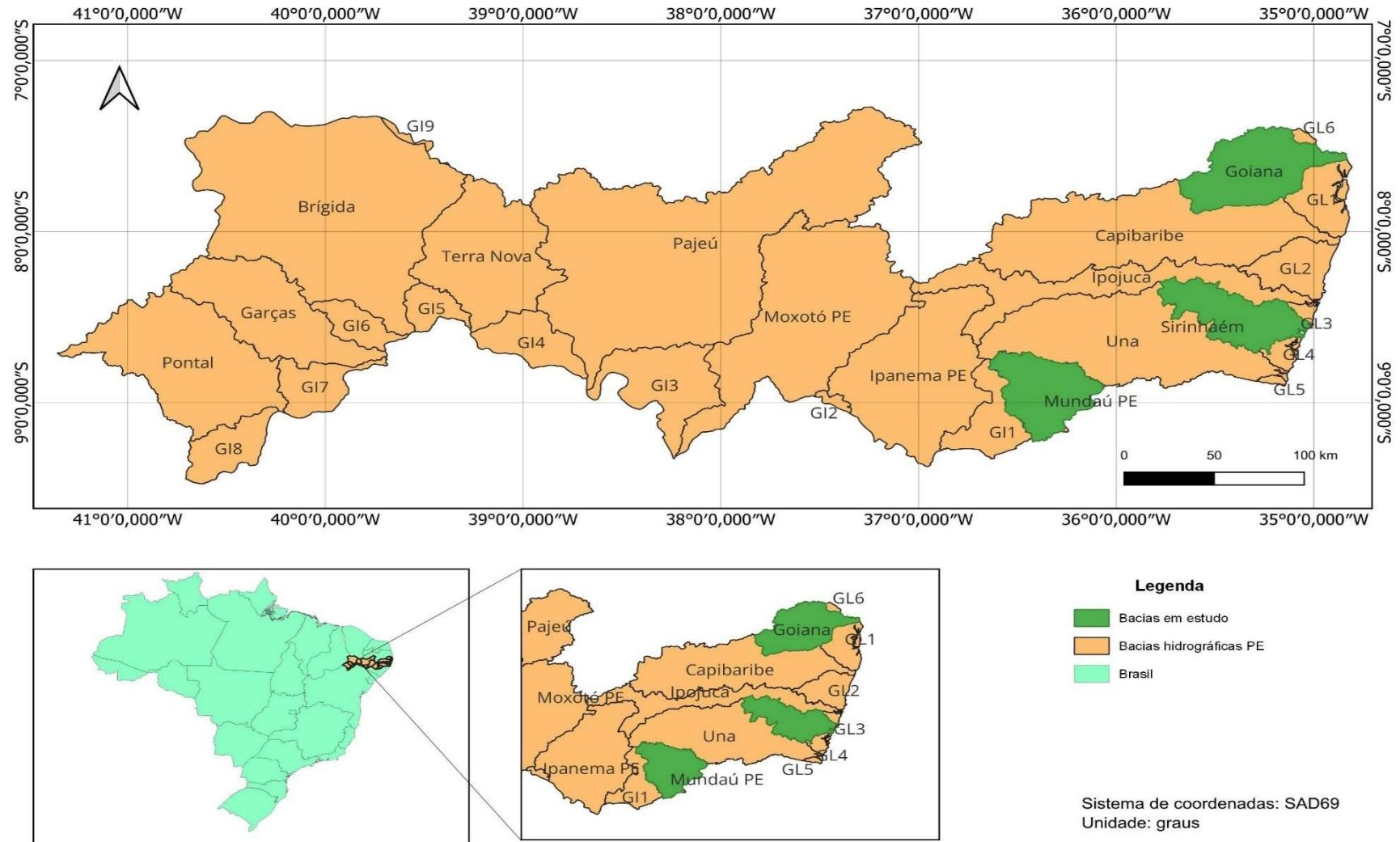


Fonte: A autora (2025)

O recorte espacial desta pesquisa foi redefinido com base em critérios metodológicos e operacionais, concentrando-se nas bacias hidrográficas dos rios Goiana, Sirinhaém e Mundaú, situadas na região leste do estado de Pernambuco. Essa delimitação resulta de uma decisão estratégica pautada na disponibilidade de dados geoespaciais e hidrológicos e na possibilidade de validação empírica dos modelos propostos, a partir de barragens previamente locadas pela equipe técnica da Secretaria de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco. A seguir, na Figura 3, observa-se a posição geográfica destas bacias no estado de Pernambuco.

A concentração das análises nessas três bacias oferece vantagens metodológicas distintas. Primeiramente, há representatividade hidrológica, pois as bacias selecionadas apresentam diferentes padrões de drenagem, cobertura do solo, densidade populacional e infraestrutura hídrica. Em segundo lugar, a presença de barragens localizadas manualmente permite realizar um confronto direto entre abordagens tradicionais e métodos automatizados de seleção de locais para reservatórios, o que fortalece a avaliação crítica e a validação cruzada dos resultados obtidos por meio do modelo multicritério proposto.

Figura 3 - Mapa de localização da área de estudo





A escolha dessas bacias também está alinhada às diretrizes do Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH), que prioriza regiões do semiárido e áreas densamente povoadas com déficit hídrico crônico para o desenvolvimento de projetos estruturantes em abastecimento e armazenamento. Portanto, a delimitação espacial adotada nesta pesquisa reflete não apenas a viabilidade técnica, mas também o compromisso com a aplicabilidade prática e a contribuição efetiva ao planejamento hídrico regional, com foco em soluções sustentáveis e escaláveis para o enfrentamento da escassez hídrica em Pernambuco.

Com relação à classificação do tamanho de barragens no Brasil, a Resolução nº 143/2012 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) (Brasil, 2012) estabelece que as barragens de acúmulo de água serão classificadas com base no volume total do reservatório, conforme Tabela 1 :

Tabela 1 – Classificação das barragens por volume

<b>Categoria da Barragem</b>	<b>Volume Total do Reservatório (m³)</b>
Pequena	$\leq 5 \times 10^6$
Média	5 a $75 \times 10^6$
Grande	75 a $200 \times 10^6$
Muito Grande	$\geq 200 \times 10^6$

Fonte: BRASIL (2012)

Já internacionalmente, a Comissão Internacional de Grandes Barragens (ICOLD) define uma “grande barragem” como na Tabela 2:

Tabela 2 – Classificação utilizada pela ICOLD para barragens

<b>Classificação</b>	<b>Critério de Altura</b>	<b>Critério de Volume do Reservatório</b>
Grande Barragem	Altura $\geq 15$ metros	-
Grande Barragem (*)	Altura entre 5 e 15 metros	E volume $> 3.000.000 \text{ m}^3$ ( $3 \times 10^6$ )

(\*) Barragens com altura inferior a 15 m também podem ser classificadas como "grandes" se o volume do reservatório exceder 3 milhões de m³.

Fonte: (ICOLD / CIGB, 2011)

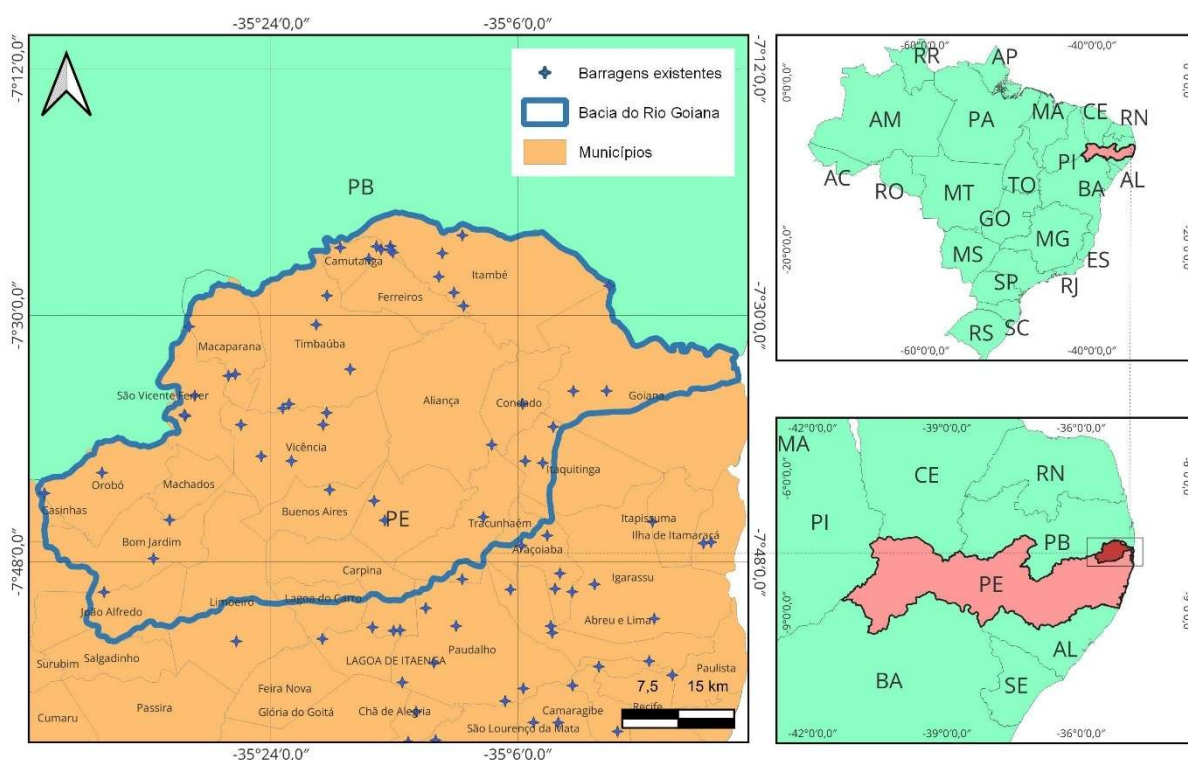
No Brasil, a classificação de barragens por tamanho baseia-se no volume total do reservatório, conforme estabelecido pela Resolução CNRH nº 143/2012.

Internacionalmente, a ICOLD considera tanto a altura da barragem quanto o volume do reservatório para definir uma "grande barragem". Esses critérios são fundamentais para a gestão da segurança e o planejamento de ações regulatórias. No entanto, neste estudo consideraremos a classificação sugerida pelo órgão governamental brasileiro.

### 3.1.1 Bacia do Rio Goiana

A bacia do Goiana corresponde à Unidade de Planejamento 1 do Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco e cobre 2 847,5 km<sup>2</sup>, cerca de 3% da área de Pernambuco. Seus limites se estendem entre as coordenadas geográficas de 7°22' S a 7°55' S e de 34°49' W a 35°42' W, alcançando 26 municípios — nove deles inteiramente contidos no perímetro da bacia, onze com sede inserida e seis apenas tangenciados pelos tributários (Figura 4). A configuração alongada, com relação comprimento/largura de 1,9, resulta de fraturas NE–SW que canalizam a drenagem em direção ao Atlântico. A porção ocidental faz divisa com a Serra da Borborema, enquanto o extremo leste se confunde com a planície costeira, onde se estabelecem áreas portuárias, polos industriais e um mosaico de manguezais (APAC, 2025)

Figura 4 – Mapa de localização geográfica da bacia do Rio Goiana.



Fonte: A autora (2025)

Do litoral ao planalto, coexistem os tipos climáticos As (tropical chuvoso com verão seco) e Aw (tropical úmido-subúmido). A normal climatológica 1961-1990 registra totais anuais de 1100 mm no alto curso e 1650 mm no baixo curso; cerca de 75% dessa chuva ocorre entre fevereiro e agosto. Oscilações interanuais associadas reduzem a precipitação em 20% nos anos de El Niño e elevam-na em até 15% durante La Niña. As temperaturas médias mantêm-se entre 23 °C (região serrana) e 26 °C (planície costeira), com evapotranspiração potencial anual superior a 1400 mm—parâmetro decisivo para estimar perdas em futuros reservatórios (Santos, 2010).

O relevo da bacia é bimodal. Na faixa litorânea dominam os Tabuleiros Costeiros, extensas superfícies aplainadas em altitudes inferiores a 80 m, esculpidas em sedimentos arenosos do Mioceno. A oeste ergue-se a Serra da Borborema, cuja crista cristalina ultrapassa 650 m. Entre esses extremos, o médio curso apresenta vales encaixados com declividades médias de 8%-12%, cenário favorável a barragens em cânion de boa relação volume/área inundada. Cálculos de PERES (2020) com grade SRTM-30 m indicam coeficiente de compacidade de 1,60 e fator de forma de 0,46, confirmando a tendência da bacia a produzir cheias relativamente concentradas, ainda que não tão bruscas quanto as de bacias mais circulares.

A bacia do rio Goiana conta hoje com um conjunto de 45 reservatórios formados por barragens privadas e públicas, conforme levantamento ilustrado na Tabela 3, totalizando cerca de 100 milhões m<sup>3</sup> de capacidade instalada para abastecimento, irrigação e controle de cheias. Estas estruturas regularizam o fluxo durante a estação seca e permitem a operação de sistemas agroindustriais na Mata Norte de Pernambuco, integrando-se à gestão de recursos hídricos (Brasil, 2025).

Tabela 3 – Informações sobre as barragens existentes na bacia hidrográfica Goiana.

Nome da Barragem	Lat.	Long.	Uso principal	Município	Capacidade (m³)	Classificação
Guararema	-7,49	-35,17	Abastecimento humano	ITAMBÉ	20.700.000,00	Média
Dr Murilo Tavares de Melo	-7,66	-35,13	Irrigação	ALIANÇA	17.860.000,00	Média
Siriji	-7,67	-35,41	Abastecimento humano	VICÊNCIA	17.260.000,00	Média
Pedra Fina	-7,75	-35,52	Abastecimento humano	BOM JARDIM	6.500.000,00	Média
Tiúma	-7,51	-35,35	Abastecimento humano	TIMBAÚBA	6.109.000,00	Média
Camará	-7,71	-40,06	Combate às secas	BODOCÓ	5.300.000,00	Média
Morojozinho	-7,73	-35,27	Abastecimento humano	NAZARÉ DA MATA	3.051.000,00	Pequena

Nome da Barragem	Lat.	Long.	Uso principal	Município	Capacidade (m³)	Classificação
Água Azul	-7,61	-35,38	Industrial	TIMBAÚBA	2.538.000,00	Pequena
Pau Amarelo	-7,42	-35,19	Irrigação	ITAMBÉ	2.400.000,00	Pequena
Zumbi	-7,42	-35,27	Irrigação	CAMUTANGA	1.700.000,00	Pequena
Massa d'água 16 Apac	-7,57	-35,30	Irrigação	TIMBAÚBA	1.685.000,00	Pequena
Caudaloso	-7,61	-35,39	Industrial	TIMBAÚBA	1.614.000,00	Pequena
Cabaçu	-7,47	-35,18	Irrigação	ITAMBÉ	1.347.000,00	Pequena
Engenho Pagi	-7,75	-35,26	Irrigação	NAZARÉ DA MATA	1.142.000,00	Pequena
Maranhão	-7,42	-35,27	Irrigação	CAMUTANGA	700.000,00	Pequena
Canguengo	-7,84	-35,60	Abastecimento humano	BOM JARDIM	595.000,00	Pequena
Jacarapina	-7,68	-35,07	Irrigação	ITAQUITINGA	560.000,00	Pequena
Condadinho	-7,62	-35,51	Regularização de vazão	SÃO VICENTE FÉRRER	434.000,00	Pequena
Santo Antônio	-7,42	-35,32	Abastecimento humano	CAMUTANGA	407.000,00	Pequena
Barragem da Ceva	-7,42	-35,25	Industrial	CAMUTANGA	400.000,00	Pequena
Fazenda Latão	-7,57	-35,44	Irrigação	MACAPARANA	395.000,00	Pequena
Vertente do Heráclito	-7,72	-35,68	Abastecimento humano	OROBÓ	366.000,00	Pequena
Açude da Pedra	-7,59	-34,99	Irrigação	GOIANA	358.000,00	Pequena
Serigi	-7,62	-35,50	Abastecimento humano	SÃO VICENTE FÉRRER	269.000,00	Pequena
Penedo Velho	-7,75	-35,14	Irrigação	TRACUNHAÉM	234.000,00	Pequena
Camurim	-7,64	-35,06	Irrigação	ITAQUITINGA	216.000,00	Pequena
Vundinha	-7,43	-35,28	Regularização de vazão	CAMUTANGA	194.000,00	Pequena
Bambu	-7,42	-35,26	Industrial	ITAMBÉ	150.000,00	Pequena
Bela Vista	-7,68	-35,38	Abastecimento humano	VICÊNCIA	144.000,00	Pequena
Campinas	-7,80	-35,54	Irrigação	BOM JARDIM	38.000,00	Pequena
Riacho do Escuro	-7,69	-35,61	Regularização de vazão	OROBÓ	37.000,00	Pequena
Mocambo	-7,45	-35,20	Abastecimento humano	ITAMBÉ	34.000,00	Pequena
Sapucaia	-7,62	-35,33	Irrigação	VICÊNCIA	21.000,00	Pequena
Catú	-7,59	-35,03	Irrigação	GOIANA	18.000,00	Pequena
Spray	-7,42	-35,26	Regularização de vazão	CAMUTANGA	15.000,00	Pequena
Açude do Alemão	-7,48	-35,33	Regularização de vazão	TIMBAÚBA	13.000,00	Pequena
Zenite	-7,61	-35,09	Abastecimento humano	CONDADO	3.000,00	Pequena
Macaparana	-7,57	-35,45	Regularização de vazão	MACAPARANA	1.000,00	Pequena
Coitadinha	-7,63	-35,44	Regularização de vazão	VICÊNCIA	1.000,00	Pequena
Caraú	-7,68	-35,09	Regularização de vazão	ITAQUITINGA	1.000,00	Pequena
Paji	-7,71	-35,33	Abastecimento humano	BUENOS AIRES	1.000,00	Pequena
Vertentinha	-7,63	-35,34	Regularização de vazão	VICÊNCIA	1.000,00	Pequena
Vertentinha	-7,63	-35,34	Regularização de vazão	VICÊNCIA	1.000,00	Pequena
Fazenda Massarandua	-7,51	-35,50	Irrigação	MACAPARANA	-	Pequena
Barragem Dois Rios	-7,46	-34,99	Abastecimento humano	GOIANA	-	Pequena

Fonte: BRASIL (2025).

Entre essas obras, a Barragem Siriji se destaca por sua relevância estratégica. O licenciamento foi iniciado em 2001, com eixo barrável na localidade de Poço Comprido, município de Vicência, a apenas 12 km da sede municipal e 75,4 km de Recife. De acordo com o SNISB, a barragem Siriji possui 11,2 m de altura e coroamento de concreto compactado a rolo (CCR); sua última inspeção, em 26 de março de 2024, classificou a estrutura como “atenção”, reforçando a necessidade de manutenção regular e atualização do Plano de Segurança de Barragens (SNISB, 2024).

A pressão antrópica sobre a bacia é historicamente vinculada à monocultura de cana-de-açúcar. Classificações de imagens LANDSAT-TM (2008) e RapidEye (2017) mostram que cana-de-açúcar + pastagens cobrem 60% da área; culturas diversificadas (mandioca, banana, fruticultura irrigada) ocupam 30%, e remanescentes de Mata Atlântica e restingas não chegam a 10% (Borges *et al.*, 2023). Entre 1985 e 2017 a cana-de-açúcar sofreu leve retração, porém a expansão urbana de Goiana e Carpina compensou a liberação de terras. Modelagem SWAT conduzida por Paz *et al.*, (2022) apontou que reflorestar 20% da bacia reduziria o carregamento de sedimentos em 37% e os picos de cheia de tempo de retorno decenal em 9%, benefícios diretos para a vida útil de futuras barragens.

A bacia do rio Goiana combina clima úmido, relevo diversificado e uso intensivo do solo, formando um sistema hidrológico sensível a alterações de cobertura e a extremos climáticos. A integração de dados físicos e socioambientais, como exposta aqui, potencializa a robustez de modelos de locação automática de barragens, permitindo que as soluções geradas conciliem segurança hídrica, rentabilidade agrícola e conservação de ecossistemas estuarinos.

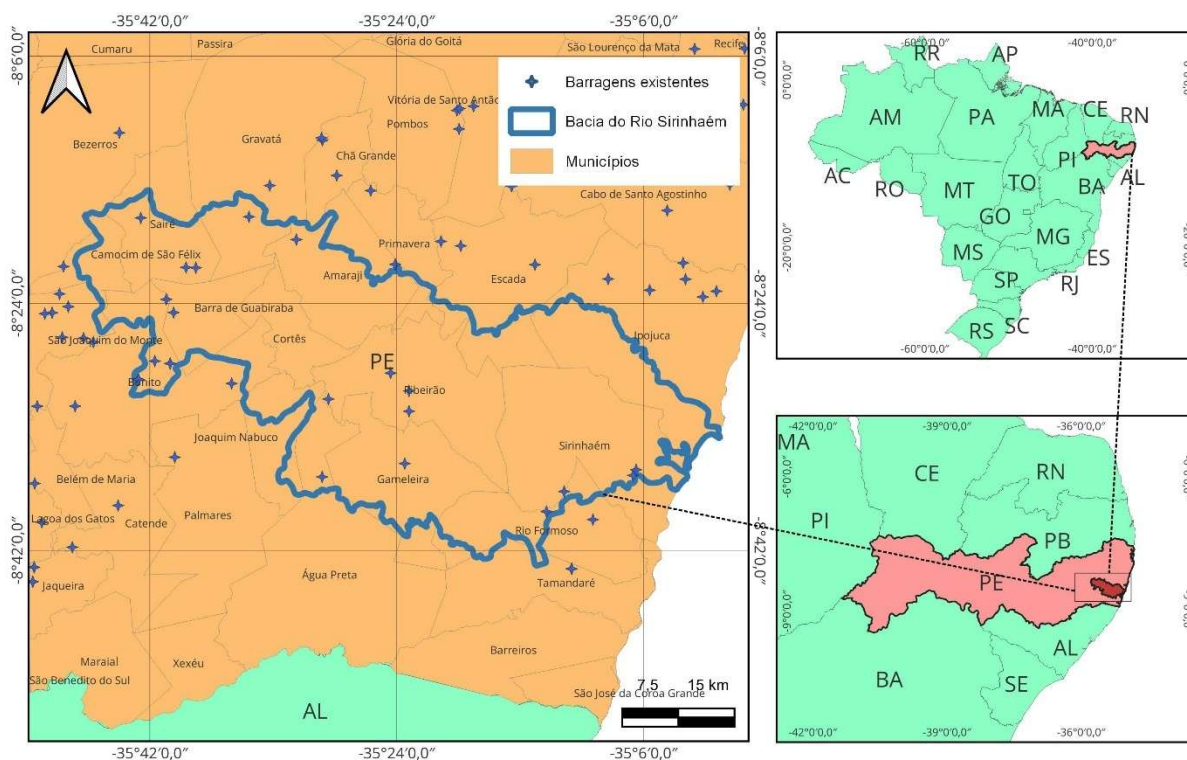
### **3.1.2 Bacia do Rio Sirinhaém**

A Bacia Hidrográfica do Rio Sirinhaém (BHRS), localizada no estado de Pernambuco, Brasil, é uma região de significativa importância ambiental, social e econômica (Figura 5). Compreender suas características geográficas, climáticas, geomorfológicas, hidrológicas e de uso do solo é fundamental para o planejamento e a gestão sustentável dos recursos hídricos (Esteves *et al.*, 2023).

A BHRS está situada entre as latitudes 08°16'05" e 08°44'50" S e longitudes 35°01'00" e 35°47'58" W, abrangendo uma área de aproximadamente 2090,64 km², o

que corresponde a 2,13% do território estadual. A bacia compreende 19 municípios, sendo que Cortês e Ribeirão estão totalmente inseridos nela, enquanto outros, como Amaraji, Barra de Guabiraba e Camocim de São Félix, têm suas sedes localizadas na bacia (APAC, 2025).

Figura 5 - Mapa de localização geográfica da bacia do Rio Sirinhaém.



Fonte: A autora (2025)

O clima predominante na BHRS é o tropical, classificado como As e Am segundo Köppen, caracterizado por verões quentes e secos e invernos amenos e chuvosos. A temperatura média anual é de 24,4°C, com máximas de 29°C no verão e mínimas de 20°C no inverno. A precipitação anual varia significativamente, de 550 mm no oeste a 2.300 mm no leste da bacia, com os meses mais chuvosos entre abril e julho (Ferraz, 2019).

O relevo da BHRS é diversificado, apresentando desde áreas planas até regiões montanhosas. A geologia é dominada por rochas cristalinas do Pré-Cambriano, especialmente do Complexo Migmatítico-Granitóide, que compõe cerca de 90% da área da bacia. Essas características influenciam diretamente na capacidade de infiltração e escoamento superficial das águas (Ferraz, 2019).

O Rio Sirinhaém é o principal curso d'água da bacia, com aproximadamente 158 km de extensão, nascendo no município de Camocim de São Félix e desaguando

no Oceano Atlântico. Seus principais afluentes incluem os rios Amaraji, Camaragibe, Tapiruçu e Sibiró à esquerda, e os riachos Seco, Tanque de Piabas e Várzea Alegre à direita. O rio Amaraji destaca-se como o afluente mais importante, com cerca de 65 km de extensão (Portela et al., 2023).

A Tabela 4 apresenta uma compilação detalhada das barragens existentes na Bacia Hidrográfica do Rio Sirinhaém, conforme levantamento realizado a partir do Cadastro Nacional de Barragens do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). A lista contempla 22 estruturas com variadas finalidades, predominando o uso para abastecimento humano e regularização de vazão, além de algumas destinadas à geração hidrelétrica e à irrigação. As barragens estão distribuídas em diversos municípios da bacia, com destaque para Bonito, Ribeirão e Sirinhaém, que concentram o maior número de empreendimentos. A classificação por porte segue os critérios do SNISB, indicando predominância de barragens de pequeno porte, embora também se identifiquem estruturas médias como a Bonitinho Novo (1.836.000 m<sup>3</sup>) e a PCH Pedra Furada – 1 (2.812.000 m<sup>3</sup>). Observa-se ainda que algumas barragens, como a Usina Estreliana e a Brejão, não possuem dados informados de capacidade, o que pode refletir lacunas no cadastro ou ausência de atualização das informações. Essa tabela evidencia a diversidade de funções que essas estruturas exercem na bacia e destaca a importância de seu monitoramento integrado, tanto para a gestão hídrica quanto para a segurança das populações e ecossistemas a jusante.

Tabela 4 - Informações sobre as barragens existentes na bacia hidrográfica Sirinhaém.

Nome da Barragem	Lat.	Long.	Uso principal	Município	Capacidade (m <sup>3</sup> )	Classificação
Barra de Guabiraba	-8,41	-35,67	Defesa contra inundações	BARRA DE GUABIRABA	18.400.000,00	Média
PCH Pedra Furada - 1	-8,52	-35,48	Hidroelétrica	RIBEIRÃO	2.812.000,00	Pequena
Amora Grande	-8,32	-35,52	Abastecimento humano	AMARAJI	2.788.000,00	Pequena
PCH Pau Sangue - Fio d'água	-8,60	-35,39	Hidroelétrica	GAMELEIRA	1.880.000,00	Pequena
Bonitinho Novo	-8,47	-35,69	Abastecimento humano	BONITO	1.836.000,00	Pequena
Boa Vista	-7,37	-37,22	Regularização de vazão	ITAPETIM	1.632.000,00	Pequena
Bonito Grande	-8,47	-35,68	Abastecimento humano	BONITO	856.000,00	Pequena
PCH Luiz Dias Lins (Antiga)	-8,65	-35,22	Hidroelétrica	RIO FORMOSO	560.000,00	Pequena

Nome da Barragem	Lat.	Long.	Uso principal	Município	Capacidade (m³)	Classificação
Manopla) - Manopla Ingaí	-8,51	-35,39	Regularização de vazão	RIBEIRÃO	504.000,00	Pequena
Antas	-9,09	-37,02	Irrigação	ÁGUAS BELAS	200.000,00	Pequena
Água Fria de Cima	-8,61	-35,11	Regularização de vazão	SIRINHAÉM	195.000,00	Pequena
Água Fria de Baixo	-8,60	-35,11	Regularização de vazão	SIRINHAÉM	132.000,00	Pequena
Mulungu	-8,60	-38,32	Abastecimento humano	FLORESTA	57.000,00	Pequena
Rio Bonito	-8,47	-35,68	Abastecimento humano	BONITO	50.000,00	Pequena
Mucuri	-8,49	-35,71	Regularização de vazão	BONITO	28.000,00	Pequena
Cachoeira do Galo	-8,40	-35,68	Regularização de vazão	BONITO	19.000,00	Pequena
Ditoso	-8,49	-35,41	Abastecimento humano	RIBEIRÃO	3.000,00	Pequena
Clipper	-8,30	-35,58	Regularização de vazão	GRAVATÁ	3.000,00	Pequena
Plaina (de Nível)	-8,61	-35,49	Abastecimento humano	ÁGUA PRETA	1.000,00	Pequena
Usina Estreliana	-8,53	-35,39	Regularização de vazão	RIBEIRÃO	-	Pequena
CGH Gindaí - Gindaí	-8,63	-35,20	Hidroelétrica	SIRINHAÉM	-	Pequena
Brejão	-8,36	-35,64	Abastecimento humano	SAIRÉ	-	Pequena

Fonte: BRASIL (2025).

A BHRS apresenta uma ocupação do solo predominantemente agrícola, com destaque para o cultivo de cana-de-açúcar, que ocupa aproximadamente 68,87% da área. Outras classes de uso incluem mata atlântica (10,75%), solo exposto (5,98%), manguezais (0,59%) e áreas urbanas (0,18%). Essa configuração reflete a intensa atividade agroindustrial na região e a necessidade de práticas de manejo sustentável.(Portela *et al.*, 2023)

A Bacia Hidrográfica do Rio Sirinhaém é uma região de complexidade ambiental e socioeconômica, exigindo abordagens integradas para sua gestão. A compreensão detalhada de seus aspectos geográficos, climáticos, geológicos, hidrológicos e de uso do solo é essencial para o desenvolvimento de políticas públicas eficazes e sustentáveis.

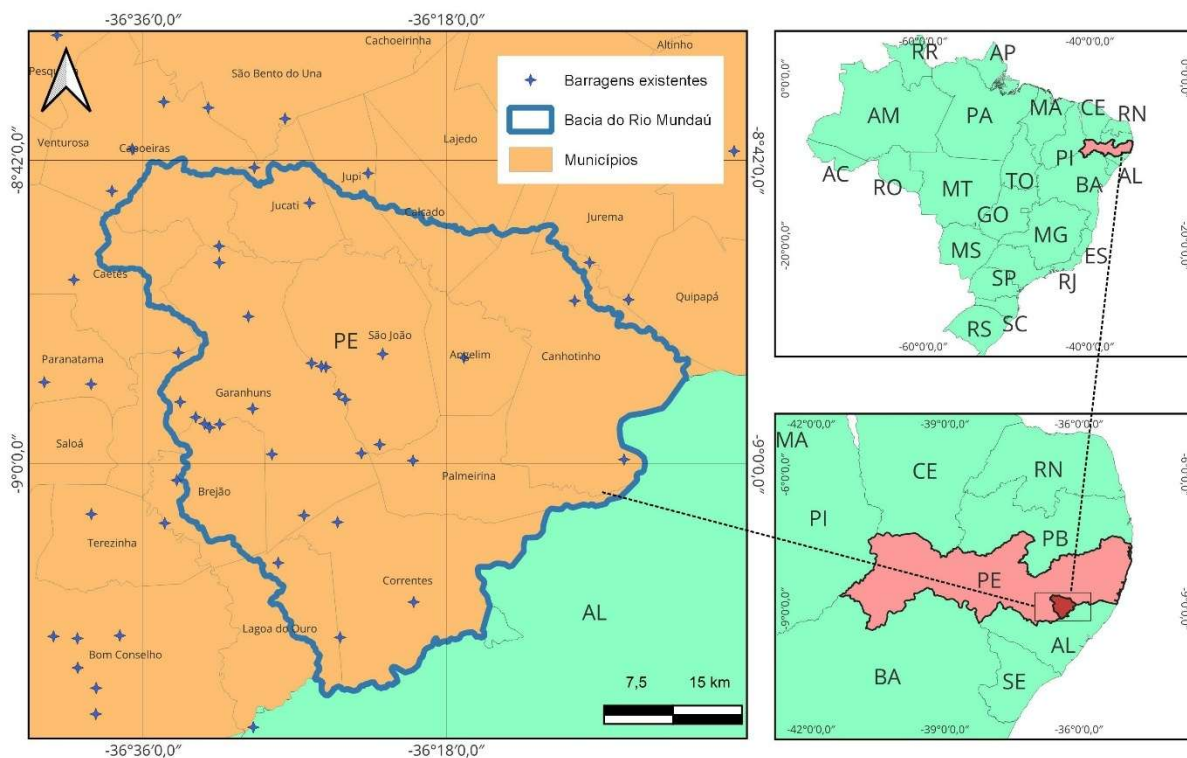
### 3.1.3 Bacia do Rio Mundaú

A Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú, situada nos estados de Pernambuco e Alagoas, é uma região de significativa importância ambiental e socioeconômica. Com uma área total de aproximadamente 4457,87 km², sendo 54,90% em Pernambuco e 45,10% em Alagoas, a bacia abrange 36 municípios, dos quais 19 estão em Alagoas



e 17 em Pernambuco (Oliveira; Nascimento, 2018). Neste estudo focaremos apenas na parte inserida no Estado de Pernambuco, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Mapa de localização geográfica da bacia do Rio Mundaú.



O rio Mundaú nasce no município de Garanhuns, em Pernambuco, e percorre cerca de 195 km até desaguar na Lagoa Mundaú, em Maceió, Alagoas. Seus principais afluentes incluem os rios Canhoto, Inhaúma e Satuba. A bacia apresenta uma diversidade de usos do solo, com predominância da agropecuária, especialmente nas áreas de planície, enquanto as regiões de relevo mais acidentado mantêm remanescentes de vegetação nativa (Gomes et al., 2016).

O clima da região é predominantemente tropical, classificado como Aw segundo Köppen, caracterizado por uma estação seca no inverno e uma chuvosa no verão. As temperaturas médias anuais variam entre 24°C e 26°C, com precipitações anuais que podem ultrapassar 1.500 mm em algumas áreas (Marcuzzo; Romero; Cardoso, 2011).

O relevo da bacia é marcado por altitudes que variam de 0 a 1.000 metros, com as maiores elevações localizadas no Planalto da Borborema. Essa diversidade altimétrica influencia diretamente os padrões de escoamento superficial e a distribuição da vegetação (Araújo, 2013).

A hidrografia da bacia é composta por uma rede de drenagem densa, com rios perenes e intermitentes que desempenham papel crucial no abastecimento de água para consumo humano, irrigação e atividades industriais. No entanto, a região enfrenta desafios relacionados à gestão dos recursos hídricos, como a poluição dos corpos d'água e a degradação das matas ciliares (Gomes et al., 2016).

A Tabela 5 apresentada constitui um levantamento sistemático das barragens localizadas na bacia hidrográfica do rio Mundaú, com base nos registros disponíveis no Cadastro Nacional de Barragens do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). Ela reúne dados georreferenciados (latitude e longitude), uso principal, município de localização, capacidade volumétrica e classificação das estruturas. Ao todo, foram identificadas 32 barragens cadastradas na bacia, destinadas principalmente ao abastecimento humano e à irrigação, além de algumas voltadas à regularização de vazão, controle de inundações e geração hidrelétrica. A capacidade total das barragens com volume informado soma aproximadamente 36.287.000 m<sup>3</sup>, revelando a importância estratégica desses reservatórios para a regulação hídrica em uma região marcada por significativa variabilidade climática e crescente demanda por água.

Tabela 5 – Informações sobre as barragens existentes na bacia hidrográfica Mundaú.

Nome da Barragem	Lat.	Long.	Uso principal	Município	Capacidade (m <sup>3</sup> )	Classificação
Mundaú II	-8,99	-36,47	Abastecimento humano	GARANHUNS	14.480.000,00	Média
Inhumas I	-8,99	-36,38	Abastecimento humano	GARANHUNS	7.870.000,00	Média
CGH Oriental - Barragem Maria Maior	-9,00	-36,12	Hidroeétrica	CANHOTINHO	4.000.000,00	Pequena
Massa d'água 4 Apac	-8,85	-36,50	Irrigação	GARANHUNS	2.830.000,00	Pequena
Cajarana	-8,79	-36,53	Irrigação	GARANHUNS	2.590.000,00	Pequena
Mundaú I	-8,95	-36,49	Abastecimento humano	GARANHUNS	1.969.000,00	Pequena
Garrote	-8,84	-36,17	Abastecimento humano	CANHOTINHO	894.000,00	Pequena
Riacho Rochedo	-9,00	-36,33	Abastecimento humano	PALMEIRINA	511.000,00	Pequena
Neves	-8,74	-36,44	Abastecimento humano	JUCATI	500.000,00	Pequena
Cova da Onça	-8,89	-36,36	Regularização de vazão	SÃO JOÃO	125.000,00	Pequena
Rio Correntes	-9,14	-36,33	Abastecimento humano	CORRENTES	120.000,00	Pequena
Da Serrinha	-9,10	-36,47	Defesa contra inundações	LAGOA DO OURO	108.000,00	Pequena
São Miguel	-9,06	-36,41	Irrigação	CORRENTES	103.000,00	Pequena
Sítio Timoteo	-8,95	-36,55	Irrigação	BREJÃO	48.000,00	Pequena
Dona Fátima	-8,90	-36,28	Irrigação	ANGELIM	39.000,00	Pequena

Nome da Barragem	Lat.	Long.	Uso principal	Município	Capacidade (m³)	Classificação
Fazenda Nova Shalon	-8,96	-36,54	Irrigação	BREJÃO	38.000,00	Pequena
Riacho da Palha	-9,17	-36,41	Abastecimento humano	CORRENTES	21.000,00	Pequena
Inhumas - Barragem de Nível	-8,98	-36,37	Abastecimento humano	SÃO JOÃO	18.000,00	Pequena
Pedra Redonda	-9,05	-36,44	Irrigação	GARANHUNS	13.000,00	Pequena
Sítio Brejinho	-8,96	-36,53	Irrigação	BREJÃO	10.000,00	Pequena
Fazenda Santa Marta II	-8,94	-36,40	Irrigação	GARANHUNS	-	Pequena
Itacatu	-8,80	-36,52	Abastecimento humano	GARANHUNS	-	Pequena
Massa d'Água #170248	-8,90	-36,42	Irrigação	SÃO JOÃO	-	Pequena
Massa d'Água #180435	-8,93	-36,41	Irrigação	SÃO JOÃO	-	Pequena
Sítio Mucambo	-8,90	-36,42	Irrigação	SÃO JOÃO	-	Pequena
Massa d'Água #93232	-8,90	-36,43	Irrigação	GARANHUNS	-	Pequena
Sem Nome	-8,96	-36,52	Irrigação	GARANHUNS	-	Pequena

Fonte: BRASIL (2025)

Dentre as estruturas, destacam-se a barragem Mundaú II (14.480.000 m³) e Inhumas I (7.870.000 m³), ambas classificadas como de porte médio e localizadas no município de Garanhuns, que concentra o maior número de empreendimentos na bacia. Outras barragens expressivas incluem a Maria Maior, de uso hidrelétrico em Canhotinho (4.000.000 m³), e a Massa d'Água 4 Apac (2.830.000 m³), voltada à irrigação. Em contrapartida, é notável a presença de diversas barragens de pequeno porte com volumes abaixo de 500.000 m³, muitas das quais estão voltadas ao atendimento local e agricultura familiar, como é o caso de estruturas em Brejão, Correntes e São João. Também se observa que um número considerável de barragens não possui dados volumétricos disponíveis, o que evidencia lacunas no sistema de monitoramento e na atualização cadastral do SNISB.

Essas informações são fundamentais para subsidiar decisões técnicas relativas à alocação de usos, operação dos reservatórios, avaliação de riscos e proposição de políticas públicas voltadas à segurança de barragens e à sustentabilidade hídrica regional. A existência de diferentes tipologias e capacidades exige uma abordagem integrada e preventiva de gestão, especialmente frente aos riscos associados à variabilidade pluviométrica e ao avanço de atividades antrópicas sobre áreas de recarga. Assim, o conhecimento detalhado das barragens da bacia do rio Mundaú contribui não apenas para a segurança hídrica e energética local, mas também para o planejamento territorial e a resiliência climática da região.

O uso do solo na bacia é caracterizado pela predominância de atividades agropecuárias, com destaque para o cultivo de cana-de-açúcar, milho e feijão, além da criação de gado. As áreas urbanas estão concentradas principalmente nas proximidades de Maceió e Garanhuns, enquanto as zonas rurais apresentam práticas agrícolas tradicionais (Araújo, 2013).

### 3.2 LOCASIN

O modelo LOCASIN (Location detection of retention and detention basins) é uma ferramenta computacional desenvolvida em MATLAB que permite a identificação automática de locais potenciais para a implementação de reservatórios e barragens. A ferramenta tem aplicação direta em diversos contextos relacionados à gestão dos recursos hídricos, como a mitigação de enchentes, o armazenamento hídrico para irrigação e a recarga de aquíferos (Teschemacher; Bittner; Disse, 2020).

O funcionamento do LOCASIN se baseia na análise automatizada de dados rasterizados da topografia, utilizando Modelos Digitais de Elevação (MDE) como principal fonte de informações. Inicialmente, a ferramenta determina automaticamente pontos adequados para barramento ao longo da rede de drenagem, baseando-se no cálculo do acúmulo de fluxo obtido a partir dos dados raster fornecidos.

Na sequência, o modelo avalia a orientação ideal dos eixos das barragens propostas com base em três critérios fundamentais: o eixo da barragem deve ser uma linha reta que passe pelo ponto identificado, ter o comprimento mínimo necessário para fechar o vale, e as elevações adjacentes precisam estar acima da elevação da crista projetada da barragem.

Após definida a orientação, o LOCASIN detalha a geometria das estruturas propostas, especificando parâmetros como altura máxima e mínima, largura da crista, inclinação dos taludes laterais e comprimento do eixo da barragem. Com base nestas informações geométricas, o modelo realiza cálculos detalhados das áreas e dos volumes de armazenamento potenciais para diferentes níveis de água nos reservatórios propostos, possibilitando a avaliação dinâmica e criteriosa das estruturas sugeridas.

A seleção das estruturas finais é conduzida por meio de uma função objetivo multicritério, permitindo ao usuário atribuir pesos a critérios específicos, tais como a relação entre o volume da barragem e o volume do reservatório, a área inundada e a compatibilidade das áreas inundadas com critérios ambientais e sociais previamente definidos, como evitar áreas urbanizadas ou privilegiar áreas agrícolas.

Ao concluir este procedimento, o LOCASIN gera automaticamente uma combinação otimizada de barragens, assegurando que as estruturas selecionadas não se sobreponham espacialmente. Além disso, fornece relatórios detalhados e visualizações gráficas que facilitam a interpretação e tomada de decisão.

### 3.2.1 Dados de entrada espaciais e processamento

Os dados em raster utilizados no estudo foram provenientes do projeto intitulado “Pernambuco tridimensional” (PE3D), sendo o modelo digital do terreno em alta resolução (1m) obtido pela tecnologia LiDAR – Light Detection and Ranging, processo de rastreamento a laser do terreno disponível no site <http://www.pe3d.pe.gov.br/>.

No presente estudo, o Modelo Digital de Terreno (MDT) do projeto PE3D foi reamostrado para 30 m visando tempo de processamento e compatibilidade de métodos; preserva-se a qualidade altimétrica de origem na medida do possível, embora haja perda de detalhe espacial inerente à reamostragem, porém nada que prejudique os resultados para grandes barragens. Embora o PE3D disponibilize dados com resolução de até 1 metro, considerou-se a pouca efetividade de se trabalhar com tal nível de detalhamento para áreas extensas, como bacias de contribuição de barragens, uma vez que a alta resolução teria impacto mínimo nos resultados práticos da análise. Registra-se, no entanto, que a precisão do modelo reamostrado é mantida. Não se deve comparar o PE3D utilizado, onde a precisão altimétrica é de ordem sub-métrica, com os dados da base global SRTM, por exemplo, onde os erros altimétricos são da ordem de 15m, o que comprometeria a qualidade dos resultados que seriam gerados.

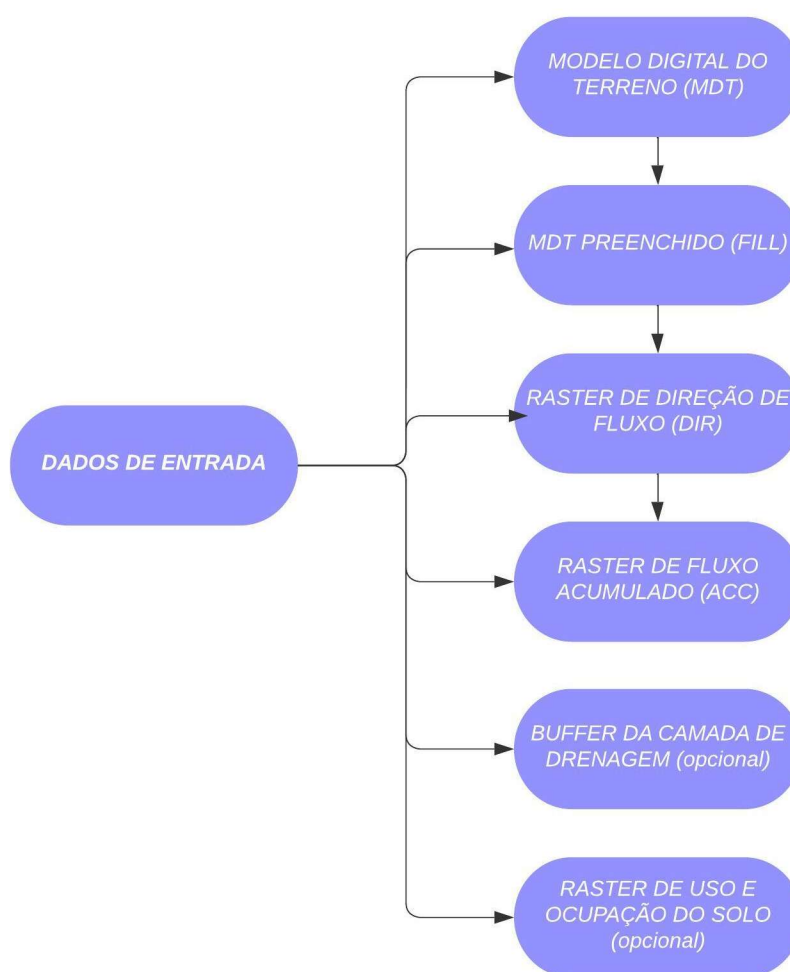
Uma vez que o Modelo Digital do Terreno pode conter imperfeições, uma ferramenta de preenchimento (Fill) foi usada para remover quaisquer 'depressões' a fim de se evitar erros na geração do raster da direção de fluxo. A próxima etapa cria um raster de direção de fluxo (Flow Direction) usando o MDT 'preenchido' como entrada. A direção do fluxo é definida como a direção de cada célula para a célula vizinha mais inclinada. O raster de direção de fluxo é então usado para produzir um raster de acumulação de fluxo (Flow accumulation), onde o acúmulo de fluxo é definido como o número de células que fluem para cada célula a jusante.

Duas camadas adicionais foram criadas com o objetivo de reduzir o tempo de processamento. A primeira, denominada “buffer”, foi gerada a partir da rede de drenagem com um deslocamento (offset) de 1000 metros, delimitando assim a área de interesse para as análises. A segunda camada corresponde ao uso e ocupação do solo, obtida a partir da Coleção 9 do MapBiomas, que disponibiliza o raster de cobertura e uso da terra do Brasil de 2023. Esses dados são produzidos por meio da

classificação pixel a pixel de imagens dos satélites Landsat, com resolução espacial de 30 metros, e estão acessíveis gratuitamente na plataforma oficial do projeto: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/> (Mapbiomas, 2025). A camada de uso e ocupação foi empregada para excluir áreas onde a implementação de barragens seria inviável, como zonas urbanizadas, garantindo maior precisão na seleção dos locais adequados para captação de água.

Portanto, as camadas raster da área de interesse para entrada no modelo são: MDT, MDT preenchido, direção de fluxo, fluxo acumulado, buffer e uso e ocupação do solo, como explanadas na Figura 7. Por fim, estas camadas em formato raster são transformados para o formato ASCII para poderem ser facilmente lidos pelo programa.

Figura 7 – Fluxograma dos dados espaciais de entrada necessários ao software.



Fonte: A autora (2025)

### 3.2.2 Parâmetros para definição das características da barragem e da bacia

As camadas do modelo digital do terreno, modelo digital do terreno preenchido, direção de fluxo, fluxo acumulado são obrigatórias para a análise topográfica de potenciais barragens e bacias, enquanto as camadas opcionais são usadas para avaliar os locais das barragens e bacias. Os parâmetros de entrada compreendem os limites para as dimensões, as características da geometria, o nível de detalhe da análise e opções de depuração, salvamento e plotagem. Desta forma, são determinantes para as características dos locais das bacias. A seguir é apresentada a Tabela 6 contendo os dados principais de entrada no modelo.

Tabela 6 – Principais parâmetros de entrada no modelo

Nome da variável	Definição
Dam_height_max	Altura máxima da barragem (m)
Dam_height_min	Altura mínima da barragem (m)
Dam_height_buffer	Valor do buffer de altura da barragem para a exclusão de barragens (m)
Dam_lenght_max	Comprimento máximo do eixo da barragem (m)
Exclude_longer_dams	Definição se o comprimento da barragem for um parâmetro de restrição (sim/não: 1/0)
bacia_volume_max	volume máximo de armazenamento da bacia (m <sup>3</sup> )
bacia_volume_min	volume mínimo de armazenamento da bacia (m <sup>3</sup> )
sV_min	volume específico mínimo (m, parâmetro opcional)
sV_max	volume específico máximo (m, parâmetro opcional)
barragem_slope_m	ângulo de inclinação: comprimento horizontal m por 1 m diferença de altura
barragem_crest_width	largura da crista da barragem (m)

Fonte: A autora (2025)

### 3.2.3 Análise do Rio

No algoritmo de análise do rio, os dados de entrada obrigatórios são importados e analisados para definir as células do rio com base no raster de acumulação de fluxo. As informações necessárias para esta análise são o MDT e o raster de direção de



fluxo. Finalmente, os pontos fluviais são avaliados em relação às suas localizações. Isso implica que os pontos fluviais que estão muito próximos das fronteiras ou que estão localizados em áreas restritas (por exemplo, dentro de assentamentos) são excluídos dos potenciais locais de barragem e das análises seguintes.

### **3.2.4 Análise do posicionamento da barragem**

A avaliação da melhor orientação do eixo da barragem é realizada para todos os potenciais locais de barragem separadamente. O MDE é recortado para as análises em relação ao ponto do rio e ao comprimento máximo predefinido da barragem para economizar tempo de processamento. O procedimento para determinar o posicionamento da barragem é baseado em três critérios:

1. O eixo da barragem deve ser uma linha quase reta passando pelo respectivo ponto do rio.
2. A orientação do eixo da barragem deve ser o caminho mais curto para fechar o vale.
3. A elevação nos limites do MDE recortado na extensão do eixo da barragem deve estar acima da crista da barragem.

As bases para a análise são múltiplos conjuntos de dados raster gerados, que são cruzados para estabelecer as orientações potenciais da barragem. Estes incluem a distância de qualquer célula raster ao ponto do rio, os ângulos da linha ao ponto do rio nas direções horizontal e vertical e uma separação das células no leste e oeste para garantir um posicionamento dos pontos finais da barragem em lados opostos ao ponto do rio. Além disso, a linha de costa para o nível potencial de água é determinada e avaliada em relação à elevação em extensão da barragem. O eixo final da barragem selecionado é a ligação mais curta de dois pontos na linha de costa, que atende às condições dos ângulos e, portanto, define uma linha reta através do ponto do rio.

### 3.2.5 Análise da barragem

A análise das barragens potenciais é realizada consecutivamente para todas as localizações possíveis de barragens e é separada em quatro etapas: Limites das bacias, características das barragens, áreas e volumes das bacias e avaliação das bacias. Caso um local não cumpra os critérios pré-definidos, é excluído após o respectivo passo.

#### 3.2.5.1 Limites da Bacia

O objetivo da primeira etapa é determinar a extensão aproximada de uma área potencial da bacia, necessária para recortar o MDE e, conseqüentemente, reduzir os principais requisitos de memória das etapas seguintes. A extensão é estimada incluindo todos os pontos que podem estar dentro da bacia. Estes compreendem todos os vizinhos a montante do ponto do rio da barragem com uma elevação abaixo das potenciais barragens nesses pontos vizinhos. Pode ocorrer que nenhum ponto fluvial com elevação acima da crista da barragem seja encontrado na extensão total do MDE analisado. Neste caso, a elevação da crista da barragem é definida como a elevação do vizinho a montante mais alto, onde a altura da barragem resultante precisa estar dentro da faixa predefinida.

#### 3.2.5.2 Características da barragem

As características da barragem e sua geometria são decisivas para a avaliação econômica de uma bacia e, por isso, são consideradas detalhadamente. A geometria das barragens é descrita por quatro parâmetros: a elevação da crista da barragem, a orientação do eixo da barragem, a largura da crista da barragem e os taludes perpendiculares ao eixo da barragem. A elevação da crista da barragem é definida pela cota do ponto do rio e a altura máxima da barragem.

A base para construir a superfície da barragem é a orientação do eixo da barragem. Em uma primeira etapa, a linha que representa o eixo da barragem é extrapolada para as bordas da bacia recortada. Em seguida, a barragem é ampliada e a elevação da superfície é registrada para cada ponto na barragem para as alturas potenciais predefinidas da barragem (etapas de definição das alturas máximas e

mínimas da barragem por avaliação das distâncias). O resultado representa as elevações de superfície de barragens com diferentes alturas máximas. A geometria final da barragem é obtida subtraindo-se a superfície da barragem e o MDE. Cada barragem potencial é descrita pela sua altura, volume e comprimento do eixo da barragem.

#### 3.2.5.3 Área e Volume da Bacia

O volume da bacia, também conhecido como volume de armazenamento, é o volume total de água que pode ser retido pela bacia. A eficiência potencial de uma bacia é geralmente avaliada com base neste volume de armazenamento. O LOCASIN calcula as áreas inundadas e os respectivos volumes de armazenamento para todas as alturas potenciais da barragem. A eficiência potencial de uma bacia é geralmente avaliada em relação ao seu volume de armazenamento. Já a área da bacia é a área inundada ou a extensão da superfície da bacia de retenção quando cheia a uma determinada altura de água. A determinação do volume e área da bacia é a etapa final na descrição de um local potencial para barragem. A análise é baseada na interseção do MDE recortado e as elevações de superfície para todas as alturas potenciais da barragem, resultando nas linhas costeiras de bacias potenciais.

#### 3.2.5.4 Avaliação da Bacia

A última etapa da análise da bacia é uma avaliação de todas as alturas potenciais da barragem e as respectivas bacias para cada local. A seleção da melhor barragem para um respectivo local é baseada em fatores de ponderação definidos pelo usuário. No início da avaliação, as alturas potenciais das barragens são verificadas em relação a critérios pré-definidos. Estes incluem os intervalos da altura da barragem, o comprimento da barragem, o volume da bacia e o volume específico. Além disso, o número de células restritas na área inundada é determinado e comparado com seus respectivos valores limite. Se todas as alturas potenciais da barragem forem excluídas, o local é rejeitado.

### **3.2.6 Combinação da bacia**

As bacias resultantes da análise anterior incluem todos os locais potenciais para barragens. No entanto, as áreas de barragens e bacias dos diferentes locais estão sobrepostas, o que implica que nem todas podem ser incluídas na mesma combinação de bacias. Assim, é necessário um sortimento das bacias com base em sua adequação.

### **3.2.7 Pós-processamento**

A seção de pós-processamento inclui o resumo, armazenamento e representação visual dos resultados.

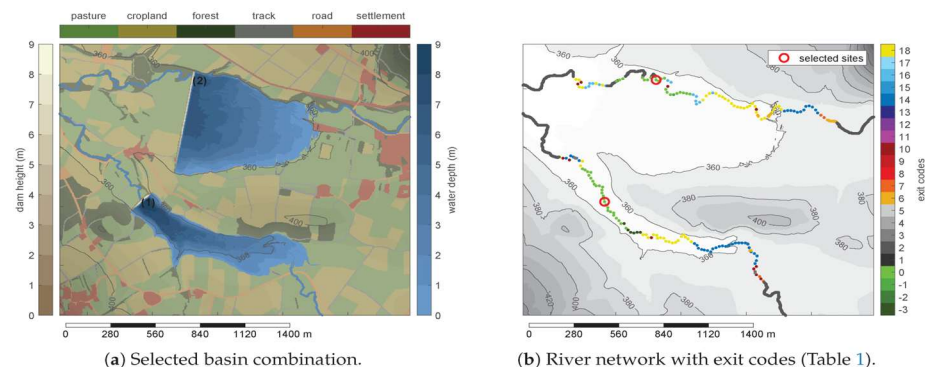
#### **3.2.7.1 Resumo dos Resultados**

Os resultados contêm informações sobre o processo de análise, as características de todos os possíveis locais de barragem e as barragens da combinação selecionada. O nível de detalhe necessário depende de outras aplicações planejadas; por exemplo, a visualização dos resultados ou estimativas de eficiência hidrológica de combinações de bacias.

#### **3.2.7.2 Representação visual**

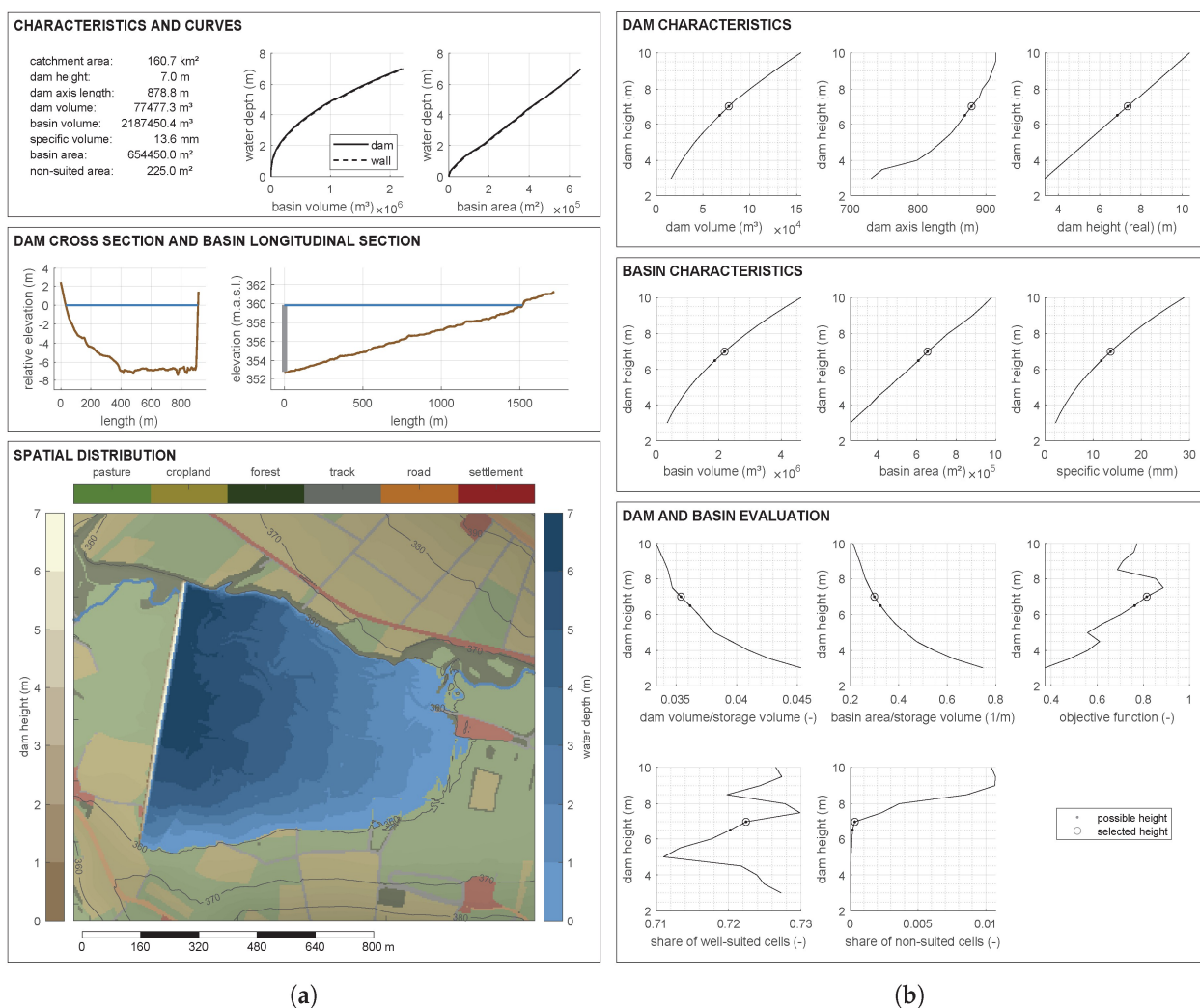
Os dados de saída resumidos podem ser analisados e visualizados de várias maneiras. A representação visual incluída compreende seis figuras: 1 e 2 fornecem uma visão geral dos resultados (Figura 8a) e o procedimento de classificação (Figura 8b). 3 e 4 caracterizam as bacias individuais em uma folha (Figura 9). 5 e 6 permitem comparar os locais das barragens (não mostrados).

Figura 8 – Distribuição espacial de barragens potenciais (a) e locais de bacias selecionados (b).



Fonte: Teschemacher et al. (2020)

Figura 9 – Ficha informativa de uma bacia exemplar. **(a)** Informações sobre a bacia selecionada: (1) curvas das lâminas d'água, do volume de armazenamento e da área de inundação; (2) Seção transversal da barragem e seção longitudinal da bacia; (vista superior da bacia. **(b)** Informações sobre todas as alturas potenciais da barragem: (1) características da barragem; (2) características da bacia; (3) critérios de avaliação de barragens e bacias.



Fonte: Teschemacher et al. (2020)

Enquanto a primeira página do informativo (Figura 9a) mostra as características da bacia para a altura da barragem selecionada, a segunda página (Figura 9b) permite entender a seleção e examinar as alternativas. A variável altura da barragem nesta ilustração corresponde à altura no ponto do rio onde o eixo da barragem cruza o talvegue, enquanto o termo altura da barragem (real) indica a altura máxima da estrutura inteira da barragem (considerando que, ao longo do eixo, alguns trechos podem ser mais altos que no cruzamento com o rio). Ou seja, “dam height” é local (no rio); “dam height (real)” é o pico ao longo de todo o eixo. As alturas possíveis de barragens marcadas representam alturas de barragens para as quais as bacias correspondentes atendem aos critérios definidos pelo usuário e, portanto, poderiam ser implementadas. Neste caso de teste, por exemplo, o número máximo de células inadequadas dentro de uma área de bacia faz com que o valor máximo da função de destino não seja selecionado. As diferentes curvas podem ser usadas para avaliar as propriedades em alturas alternativas de barragens e para ajustar os limites, se necessário.

### 3.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP PARA VALIDAÇÃO DOS LOCAIS

Com o objetivo de verificar a confiabilidade dos locais identificados automaticamente para a construção de barragens por meio do software LOCASIN, foi realizada uma validação utilizando o método Analytic Hierarchy Process (AHP). Essa validação buscou conferir se os critérios técnicos definidos convergiam com os resultados produzidos pelo modelo automatizado. A aplicação do AHP permitiu avaliar, sob a ótica de múltiplos critérios e de forma hierarquizada, o grau de adequação de cada local selecionado, promovendo uma análise comparativa objetiva entre as alternativas.

#### 3.3.1 Elaboração de mapas de critérios

Os mapas foram elaborados a partir de diferentes fontes de dados oficiais. A Tabela 7 resume todos os dados e as fontes consultadas para realização dos resultados. O fluxograma do método utilizado é mostrado na Figura 10. O método aplicado neste estudo consistiu em 4 estágios: (i) aquisição de dados, (ii) conversão de dados em formato de dados GIS, (iii) determinação de áreas adequadas para seleção de local de barragem com base no método AHP baseado em GIS, (iv) análise de precisão e comparação do resultado da análise AHP com o software LOCASIN.

Tabela 7 – Critérios utilizados para seleção dos locais pelo método AHP.

<b>Critérios</b>	<b>Dados</b>	<b>Fonte de dados</b>	<b>Formato dos dados</b>	<b>Análise</b>
Elevação	MDE	PE3D	raster	-
Declividade	MDE	PE3D	raster	Declive
Precipitação	Precipitação	HIDROWEB	Txt	IDW
Densidade de fluxo	MDE	PE3D	raster	Densidade de linha
Distância até estradas	Rodovias federais e estaduais	Metadados da ANA	Shapefile	Distância euclidiana
Tipo de solo	Solo	EMBRAPA	shapefile	Recurso para raster
Uso do solo	Uso e cobertura do solo	MapBiomass	raster	Recurso para raster

Fonte: A autora (2025)

Figura 10 – Fluxograma sobre a elaboração do mapa de critérios



Fonte: A autora (2025)

- Mapa de elevação:

O primeiro passo para aplicação do método foi a construção de mapas de elevação com dados provenientes do PE3D. Com auxílio do software Qgis foram recortados os dados de elevação para as bacias em estudo e reamostrados para uma resolução de 30 metros.



- Mapa de declividade

A partir do mapa de elevação, produziu-se o mapa de declividade a partir da função “slope” no Qgis. O mapa foi reclassificado conforme classes propostas pela Embrapa (Tabela 8).

Tabela 8 – Classificação de declividade do terreno proposta pela Embrapa.

<b>Declividade</b>	<b>Terreno</b>
0 – 3%	Plano
3 – 8%	Suave ondulado
8 – 20%	Ondulado
20 – 45%	Forte ondulado
45 – 75%	Montanhoso
75%	Escarpado

Fonte: EMBRAPA (2006)

- Mapa de precipitação

Para elaboração do mapa de precipitação, foram seguidos os passos:

1. Fez-se a identificação das estações pluviométricas inseridas e nas proximidades da bacia em estudo.
2. Foi realizado o download dos dados de precipitação diária de cada estação entre os anos de 1990 a 2024;
3. Calculou-se a precipitação acumulada anual média para cada estação;
4. Gerou-se um mapa IDW (Ponderação inversa da distância) a partir dos dados de chuva obtidos pelo Hidroweb.

- Mapa de densidade de fluxo

Também foi analisada a densidade de fluxo de cada bacia a partir da rede de drenagem gerada pelo MDE de alta resolução proveniente do PE3D. O comando “Line Density” do ArcMap foi utilizado para gerar o raster de densidade de fluxo das bacias. Áreas com maior densidade de drenagem seriam mais propensas à locação de barragens.

- Mapa de distância até estradas

Como a distância até estradas também é um fator muito importante a ser considerado para a locação de uma barragem, foram elaborados mapas de distância até as estradas estaduais e federais que cruzavam o interior da bacia hidrográfica. Os dados das rodovias federais e estaduais foram provenientes do mapeamento do Setor de Geotecnologias do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), atualizado no ano de 2006. A partir do shapefile das rodovias, utilizou-se a ferramenta “Euclidean Distance” no ArcMap e deste algoritmo são gerados raster’s da distância euclidiana até estradas.

- Mapa de tipo de solo

Os tipos de solos presentes na região foram analisados a partir do shapefile disponibilizado pela EMBRAPA em seu site. A partir disso, foram recortados os solos que compõem as áreas em estudo e foram reclassificados de 0 a 1 conforme maior ou menor propensão à locação de barragem com relação à infiltração do solo.

- Mapa de uso e ocupação do solo

Os tipos de uso e ocupação do solo foram obtidos a partir do raster de 2023 disponível no Mapbiomas, onde cada classe foi reclassificada de 0 a 1, de acordo com a menor ou maior adequabilidade de locação para barragens.

### **3.3.2 Ponderação dos critérios**

Para a atribuição de pesos aos critérios considerados na seleção dos locais potenciais para construção de barragens, foi utilizado o Método de Análise Hierárquica de Processos (AHP), proposto por Thomas Saaty (Saaty, 1980). Essa abordagem possibilita a quantificação da importância relativa entre múltiplos critérios a partir de comparações paritárias, fundamentadas tanto em dados objetivos quanto no julgamento de especialistas da área de recursos hídricos.

O processo seguiu uma estrutura metodológica em sete etapas, conforme detalhado a seguir:

#### Passo 1: Determinação dos pesos

Inicialmente, construiu-se uma matriz de comparação onde cada critério foi comparado aos demais em termos de importância relativa para a localização de barragens. Essas comparações foram expressas segundo a escala de Saaty (Tabela 9), que varia de 1 (igual importância) até 9 (extrema importância de um critério sobre outro).

Tabela 9 – Valores e definições de peso ou importância dos critérios.

<b>Nível de importância</b>	<b>Significado</b>
1	Igual
2	Um pouco Melhor
3	Algo Melhor
4	Moderadamente Melhor
5	Melhor
6	Bem Melhor
7	Muito Melhor
8	Criticamente Melhor
9	Absolutamente Melhor

Fonte: Drobne; Lisec (2009)

#### Passo 2: Soma das Colunas

As colunas da matriz foram somadas individualmente com o objetivo de viabilizar a etapa seguinte de normalização dos dados.

#### Passo 3: Normalização da Matriz

Cada valor da matriz foi dividido pela soma de sua respectiva coluna, obtendo-se uma matriz normalizada. Essa transformação garante que as comparações sejam convertidas em proporções relativas que somam 1 em cada coluna. Após este passo, somam-se as linhas da matriz normalizada.

#### Passo 4: Cálculo do Vetor de Pesos (**Autovetor W**)

A média dos valores das linhas da matriz normalizada foi então calculada. O vetor resultante representa os pesos relativos dos critérios, sendo este o autovetor principal da matriz.

#### Passo 5: Cálculo do Índice de Consistência (**IC**)

- Multiplicou-se a matriz original pela coluna dos pesos (autovetor  $W$ ) → gera um novo vetor  $D$ ;
- Dividiu-se cada elemento do vetor pelo peso correspondente de  $W$  → resulta em um vetor  $\lambda$ ;
- Calculou-se a média de  $\lambda$  → esse é o autovalor máximo  $\lambda_{\max}$

Onde:

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

Em que:

$\lambda_{\max}$  – Autovetor máximo;

$n$  – número de critérios.

#### Passo 6: Cálculo da Razão de Consistência (**RC**)

Como a matriz contém múltiplos caminhos pelos quais a importância relativa dos critérios pode ser avaliada, também é possível determinar o grau de consistência usado no desenvolvimento das avaliações. SAATY (1980) descreve um procedimento pelo qual é produzido um índice de consistência (IC) e uma razão de consistência (RC).

A razão de consistência (RC) define a probabilidade de que os valores da matriz tenham sido gerados aleatoriamente. Saaty sugere que matrizes com RC maiores que 0,10 devem ser reavaliadas. Além da razão de consistência geral, também é possível analisar a matriz para identificar onde ocorrem inconsistências.

A razão de consistência foi calculada por meio da equação 01:

$$RC = \frac{IC}{RI} \quad (1)$$

Onde:

- RI é o índice de consistência aleatória, obtido da Tabela 10;
- IC é Índice de Consistência.

Tabela 10 – Valores médios de RI

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fonte: SAATY (1980)

Após o cálculo do IC, a equação (1) é aplicada. Se o resultado for menor que 10%, pode-se dizer que as comparações em pares são aceitáveis. Se esse valor for maior que 10%, as comparações em pares são inconsistentes. Nesse caso, todo o processo deve ser repetido desde o início (Colak; Memisoglu; Gercek, 2020;(Chakraborty; Banik, 2006).

Essa metodologia proporcionou uma estrutura robusta e replicável para a ponderação dos critérios técnicos utilizados na seleção dos locais, considerando variáveis como declividade, uso do solo, precipitação, distância a vias de acesso, entre outros. A confiabilidade dos pesos obtidos e sua coerência interna foram validadas pela análise da razão de consistência, garantindo que a aplicação do AHP contribuiu efetivamente para uma tomada de decisão multicritério mais objetiva e fundamentada.

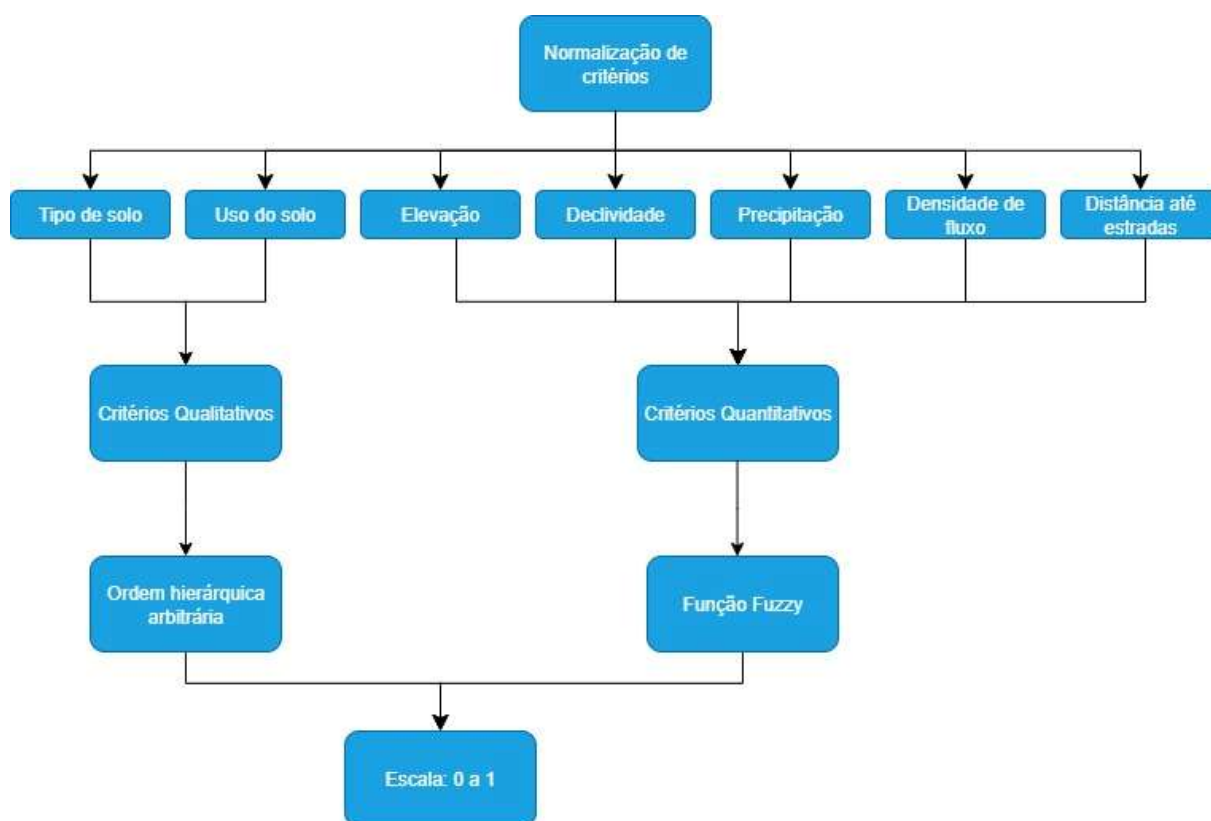
### 3.3.3 Normalização dos critérios

A etapa de normalização dos critérios seguiu abordagens distintas para dados qualitativos e quantitativos. Para os critérios qualitativos, como o uso e ocupação do solo e o tipo de solo, foi adotada uma normalização por ordem hierárquica arbitrária. Atribuiu-se pesos de 0 a 1 a cada tipologia de uso e tipo de solo, conforme julgamento adequado, considerando a contribuição relativa de cada classe para o risco de degradação ambiental. Tipologias com maior propensão para a locação de barragens receberam valores mais próximos de 1, enquanto aquelas com menor adequação

foram associadas a valores mais próximos de 0. Essa escala de avaliação possibilitou transformar variáveis categóricas em dados contínuos compatíveis com os demais critérios utilizados no modelo.

Para os critérios quantitativos, como declividade, distância até estradas, e densidade de drenagem, foi aplicada uma função de normalização linear. Esse procedimento ajustou as variáveis para uma escala comum entre 0 e 1, preservando sua distribuição original, mas eliminando a variação entre faixas de valores incompatíveis. O objetivo dessa transformação foi permitir que todos os critérios pudessem ser comparados diretamente no processo de sobreposição ponderada no ambiente SIG, mantendo a coerência matemática entre diferentes tipos de variáveis (Figura 11).

Figura 11 – Etapas de normalização dos dados



Fonte: A autora (2025)

### 3.3.4 Combinação dos critérios

Após a determinação dos pesos dos critérios por meio do método Analytic Hierarchy Process (AHP), foi realizada a etapa de combinação dos critérios, essencial para a geração do mapa final de adequação locacional para barragens. Essa etapa

consiste em uma sobreposição ponderada das camadas de informação espacial, integrando múltiplos fatores em uma única representação contínua de adequação.

A combinação foi executada no QGis, onde cada critério foi previamente normalizado em uma escala comum (0 a 1) para garantir a compatibilidade matemática entre variáveis de diferentes naturezas (qualitativas e quantitativas). Em seguida, cada camada raster representando um critério foi multiplicada pelo peso correspondente obtido na etapa de ponderação via AHP.

A equação geral que rege essa combinação é dada pela equação (2):

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j \cdot x_{ij} \quad (2)$$

Onde:

- $S_i$  é o valor final de adequação da célula;
- $w_j$  é o peso do critério  $j$  (definido pelo AHP);
- $x_{ij}$  é o valor normalizado da célula;
- $n$  é o número total de critérios considerados.

Esse procedimento resultou em um mapa contínuo de aptidão, em que cada célula espacial da bacia estudada recebeu um valor de score agregado que representa sua adequação relativa para a implementação de barragens. As áreas com maiores valores de score foram consideradas mais propícias, pois concentram simultaneamente características topográficas, hidrológicas e de infraestrutura favoráveis à construção de reservatórios.

Além disso, a abordagem permitiu realizar análises de sensibilidade, avaliando como variações nos pesos influenciam o posicionamento das áreas mais adequadas. Esse recurso é particularmente útil para ajustes estratégicos conforme diferentes prioridades de gestão (ex: priorizar proximidade a estradas vs. capacidade de armazenamento).

Ao final, o mapa final de adequação foi classificado em cinco categorias — muito baixa, baixa, moderada, alta e muito alta adequação — com base em intervalos

quantis do score final. Essa categorização facilitou a análise visual e a priorização de locais, sendo utilizada nas etapas seguintes de validação cruzada com os resultados do modelo LOCASIN.

### 3.4 ANÁLISE DE PRECISÃO

Para avaliar o desempenho e a acurácia da seleção dos locais mais adequados à construção de barragens, será utilizada a curva ROC (Receiver Operating Characteristic), uma ferramenta amplamente empregada na literatura para análise quantitativa de acurácia espacial (Tehrany; Pradhan; Jebur, 2013). A curva ROC é construída com base na relação entre a sensibilidade (proporção de acertos, no eixo vertical) e o complemento da especificidade, no eixo horizontal, e permite avaliar a capacidade discriminatória do modelo aplicado.

No contexto deste estudo, a sensibilidade (Eq. 1) representa a proporção de pixels corretamente classificados como locais adequados para implantação de barragens, enquanto a especificidade (Eq. 2) se refere à proporção de pixels corretamente identificados como inadequados:

$$\text{Sensibilidade} = \frac{TP}{TP+F} \quad (1)$$

$$\text{Especificidade} = \frac{TN}{FP+TN} \quad (2)$$

Em que:

- TP (true positive) é o número de pixels corretamente classificados como adequados;
- FN (false negative) é o número de pixels adequados, erroneamente classificados como inadequados;
- TN (true negative) é o número de pixels corretamente identificados como inadequados;
- FP (false positive) são os pixels inadequados incorretamente classificados como adequados (Rahmati; Kalantari; et al., 2019).



A partir da curva ROC, foi calculada a área sob a curva (AUC - Area Under the Curve), que varia entre 0 e 1. Quanto maior o valor de AUC, melhor o desempenho do modelo de predição. Segundo Rahmati et al., (2019), os intervalos de interpretação da AUC são os seguintes:

- 0,0–0,2: desempenho muito fraco;
- 0,2–0,4: fraco;
- 0,4–0,6: moderado;
- 0,6–0,8: bom;
- 0,8–1,0: excelente.

A validação dos resultados obtidos será realizada a partir da comparação entre o mapa de adequação gerado com base na análise hierárquica de processo e a localização das barragens geradas pelo LOCASIN ou sugeridas oficialmente, de modo a verificar a precisão da predição espacial.

### 3.5 ANÁLISE DAS BARRAGENS PROVENIENTES DO LOCASIN E PLANEJADAS

Nas áreas de estudo, as barragens posicionadas pelo LOCASIN e as barragens planejadas pela Secretaria de Recursos Hídricos e os níveis de adequação revelados pelo mapeamento de local de barragem foram combinados. Como resultado dessa sobreposição, as precisões de posicionamento das barragens foram analisadas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 IDENTIFICAÇÃO DOS LOCAIS POTENCIAIS PARA BARRAMENTOS

Considerando a flexibilidade operacional, detalhamento automatizado das análises e rapidez computacional oferecida, o modelo LOCASIN foi selecionado como ferramenta principal para a realização deste estudo. O objetivo central consistiu na identificação e localização de grandes barragens, conforme definido pela Resolução nº 143/2012 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) (Brasil, 2012). Foram identificados locais considerados aptos a receber estruturas com capacidade de armazenamento superior a 75.000.000 m<sup>3</sup> e inferior a 200.000.000 m<sup>3</sup>, em conformidade com a classificação de "grande barragem" apresentada na Tabela 1 da Seção 3.1 na Metodologia deste estudo.

Outros critérios foram considerados, como altura de barreira superior a 15m e menor do que 80 metros e o comprimento da barragem foi limitado a não mais que 2.000 m, bem como declividade da barragem de 2:1 e a largura da crista da barragem de 3 m (Tabela 11). As áreas a mais de 1km da rede de rios da bacia foram excluídas a fim de diminuir o tempo de processamento. As áreas de uso e ocupação do solo classificadas como "área urbana" também foram consideradas como critério de exclusão para processamento do software.

Tabela 11 – Parâmetros selecionados para execução do software.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Altura máxima	80
Altura mínima	15
Comprimento	2000
Volume máximo	200.000.000,00
Volume mínimo	75.000.000,00
Declividade da barragem	2
Largura da barragem	3
Limiar de acumulação	50.000

Fonte: A autora (2025)

Após preparação dos dados de entrada essenciais ao software, obteve-se resultados de possíveis barragens para 3 bacias hidrográficas pertencentes ao Estado de Pernambuco. São elas: Sirinhaém, Goiana e Mundaú.

#### 4.1.1 GOIANA

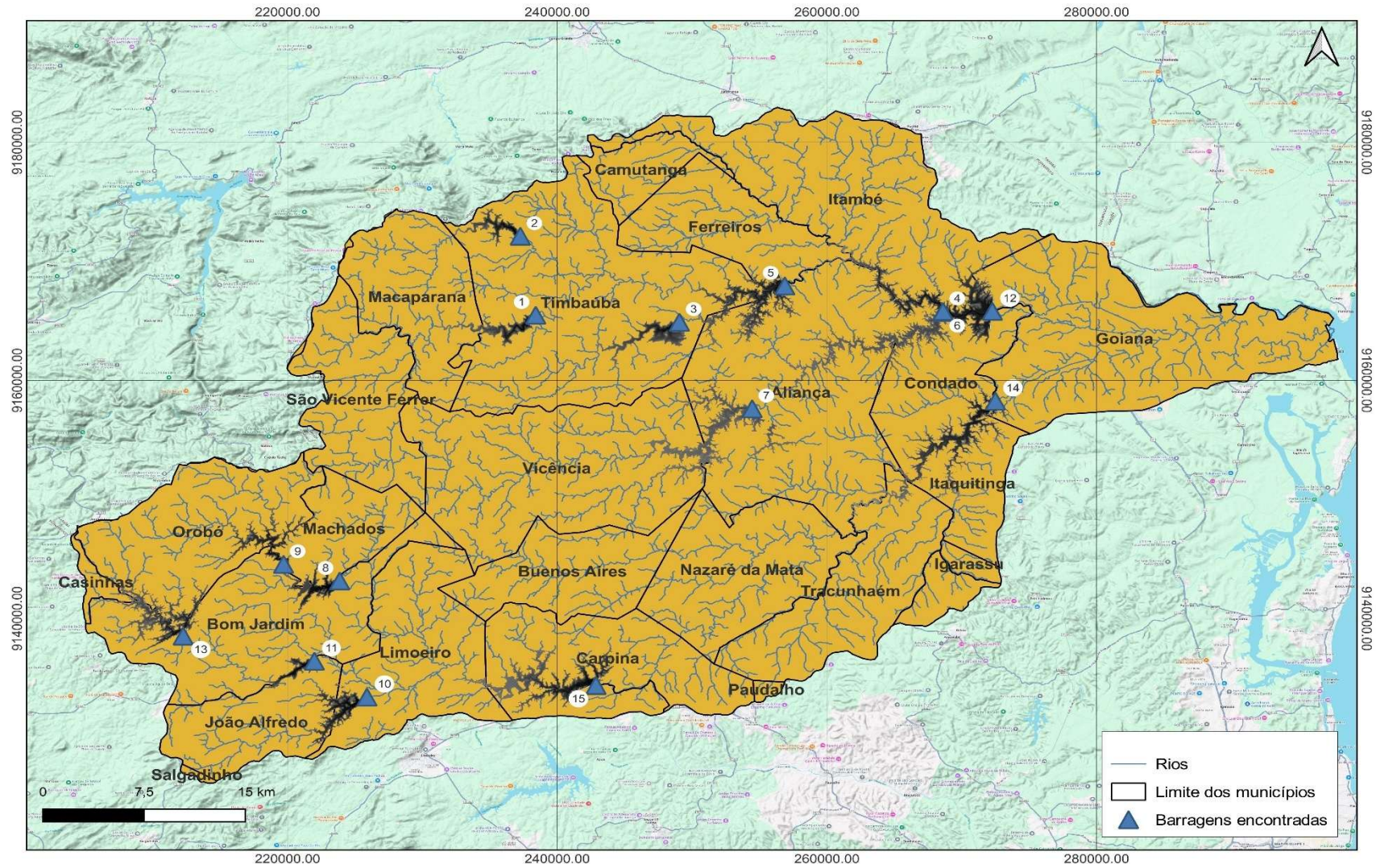
Foi conduzida uma análise automática de localização de barragens na bacia do rio Goiana com o algoritmo LOCASIN, aplicado ao modelo digital de terreno e ao mapeamento da rede de drenagem. O procedimento gerou quinze locais potenciais para implementação de estruturas de retenção, cuja distribuição espacial está apresentada na Figura 12.

A Tabela 12 resume, para cada local (bacias 1 a 15), as principais características hidrológicas e geométricas extraídas: área de captação, altura e comprimento de eixo do maciço, volume de enrocamento, volume inundado estimado, volume específico e extensão da área alagada.

Observa-se que as áreas de captação variam expressivamente, de 54,7 km<sup>2</sup> (bacia 2) a 1302,9 km<sup>2</sup> (bacia 12), evidenciando a heterogeneidade morfológica da bacia principal e de seus afluentes. As alturas das barragens oscilam entre 30 m (bacias 4, 5, 6 e 7) e 75 m (bacia 1), refletindo diferentes métricas de retenção projetada conforme o gradiente topográfico. Em paralelo, o comprimento de eixo do maciço apresenta variações de 510 m (bacia 9) a 3223 m (bacia 7), o que indica vales de largura contrastante e potenciais requisitos distintos de material.

Quanto aos volumes de enrocamento, a bacia 12 exige o maior aporte de material ( $4,66 \times 10^6$  m<sup>3</sup>), ao passo que a bacia 4 demanda apenas  $5,93 \times 10^5$  m<sup>3</sup>. Já o volume de armazenamento inundado atinge seu pico na bacia 12 ( $1,93 \times 10^8$  m<sup>3</sup>), seguida de perto pela bacia 14 ( $1,88 \times 10^8$  m<sup>3</sup>), enquanto os menores reservatórios ocorrem nas bacias 2 e 9 ( $8,85 \times 10^7$  m<sup>3</sup> e  $1,04 \times 10^8$  m<sup>3</sup>, respectivamente).

Figura 12 - Potenciais localizações de barragens encontradas para a Bacia do Rio Goiana.



Fonte: A autora (2025)

Tabela 12 - Características físicas das barragens identificadas – Bacia do Rio Goiana

	Barragem 01	Barragem 02	Barragem 03	Barragem 04	Barragem 05	Barragem 06
Área de captação (Km²)	126,94	54,74	90,20	798,26	487,78	457,52
Altura (m)	75,00	65,00	45,00	30,00	30,00	30,00
Comprimento do eixo (m)	844,80	1.429,02	2.960,14	1.005,88	2.351,25	1.231,88
Volume da barragem (m³)	2.071.443,82	2.409.975,01	1.845.873,46	593.165,68	1.563.419,05	806.873,09
Volume da bacia (m³)	137.872.634,06	88.472.102,27	114.817.854,66	110.423.800,65	141.307.521,18	163.300.278,34
V/Acap	1.086,14	1.616,34	1.272,89	138,33	289,70	356,92
Área da bacia (m²)	4.644.000,00	3.433.500,00	5.966.100,00	8.016.300,00	12.719.700,00	12.214.800,00

	Barragem 07	Barragem 08	Barragem 09	Barragem 10	Barragem 11	Barragem 12
Área de captação (Km²)	336,86	129,77	97,30	63,10	139,24	1.302,99
Altura (m)	30,00	60,00	50,00	35,00	65,00	35,00
Comprimento do eixo (m)	3.223,33	756,84	510,29	1.731,18	1.378,95	2.856,98
Volume da barragem (m³)	2.113.167,21	2.620.596,17	1.097.292,22	1.292.978,18	3.917.912,58	4.658.245,03
Volume da bacia (m³)	164.680.254,98	130.496.710,18	104.322.462,66	104.819.510,50	78.655.634,02	192.704.883,34
V/Acap	488,87	1.005,63	1.072,17	1.661,10	564,89	147,89
Área da bacia (m²)	14.704.200,00	4.586.400,00	6.020.100,00	6.511.500,00	2.545.200,00	10.361.700,00

	Barragem 13	Barragem 14	Barragem 15
Área de captação (Km²)	75,86	1.225,69	607,99
Altura (m)	45,00	30,00	30,00
Comprimento do eixo (m)	989,78	1.803,23	2.044,62
Volume da barragem (m³)	962.519,86	1.190.016,37	1.701.855,58
Volume da bacia (m³)	135.804.085,61	187.782.754,41	135.291.677,10
V/Acap	1.790,30	153,21	222,52
Área da bacia (m²)	10.346.400,00	16.090.200,00	13.416.300,00

Fonte: A autora (2025)

O volume específico, calculado como o volume inundado dividido pela área de captação, varia de 138,3 m³/km² (bacia 4) a 1790,3 m³/km² (bacia 13), evidenciando o

potencial de armazenamento por unidade de área drenante. As bacias 2 (1616,3 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>), 10 (1661,1 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>) e 13 (1790,3 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>) apresentam os maiores valores, indicando elevado rendimento hidráulico, enquanto as bacias 4 (138,3 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>) e 12 (147,9 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>) exibem os menores, sinalizando menor capacidade relativa de retenção. Em termos de impacto espacial, a área alagada projetada varia de  $2,55 \times 10^6$  m<sup>2</sup> (bacia 11) a  $16,1 \times 10^6$  m<sup>2</sup> (bacia 14), e as superfícies não inundadas acompanham essa mesma tendência de magnitude.

Em conjunto, os resultados destacam alternativas diversificadas: algumas bacias oferecem alta capacidade absoluta de armazenamento (12 e 14), enquanto outras destacam-se pela eficiência de retenção por km<sup>2</sup> drenado (2, 10 e 13). Essas características devem orientar a fase de detalhamento técnico e a avaliação ambiental de cada sítio.

As curvas Cota–Área–Volume apresentadas na Figura 13 revelam o comportamento hidráulico e morfológico de cada sítio potencial para barragens na bacia do rio Goiana. Nos primeiros metros de cota, observa-se um aumento discreto de área alagada e volume acumulado, pois apenas o fundo dos vales mais profundos é inundado. Entre aproximadamente 10 m e 30 m de cota, as curvas inclinam-se acentuadamente, indicando que pequenas elevações no nível d'água resultam em acréscimos volumétricos significativos — especialmente nas bacias 2, 10 e 13, que exibem saltos superiores a  $1 \times 10^7$  m<sup>3</sup> a cada metro adicional de cota, evidenciando alto rendimento em termos de armazenamento. A partir de 30 m, contudo, as curvas tendem a se aplainar, sinalizando limites topográficos do vale e redução do ganho volumétrico por metro de cota.

Nesse contexto, as bacias 12 e 14 destacam-se pelos maiores volumes absolutos, alcançando cerca de  $1,9 \times 10^8$  m<sup>3</sup> em cotas superiores a 30 m, reflexo de suas extensas áreas de captação e vales amplos. Por outro lado, a bacia 4 e, em menor grau, as bacias 5 e 6 apresentam expansão lateral mais restrita, com incremento volumétrico modesto mesmo em cotas elevadas, o que pode representar menor impacto territorial, mas também menor capacidade de armazenamento.

A comparação entre curvas mostra que o ponto de operação ideal de cada reservatório deve ser escolhido onde a inclinação da curva volume  $\times$  cota atinge seu máximo, de modo a maximizar ganho volumétrico com o menor acréscimo de altura da barragem. Para projetos que requerem variações frequentes de nível, as bacias

com fase intermediária mais pronunciada oferecem maior flexibilidade operacional, enquanto aquelas com platôs tardios demandarão estruturas mais altas e áreas alagadas amplas para atingir volumes elevados, impactando custos e áreas de inundação.

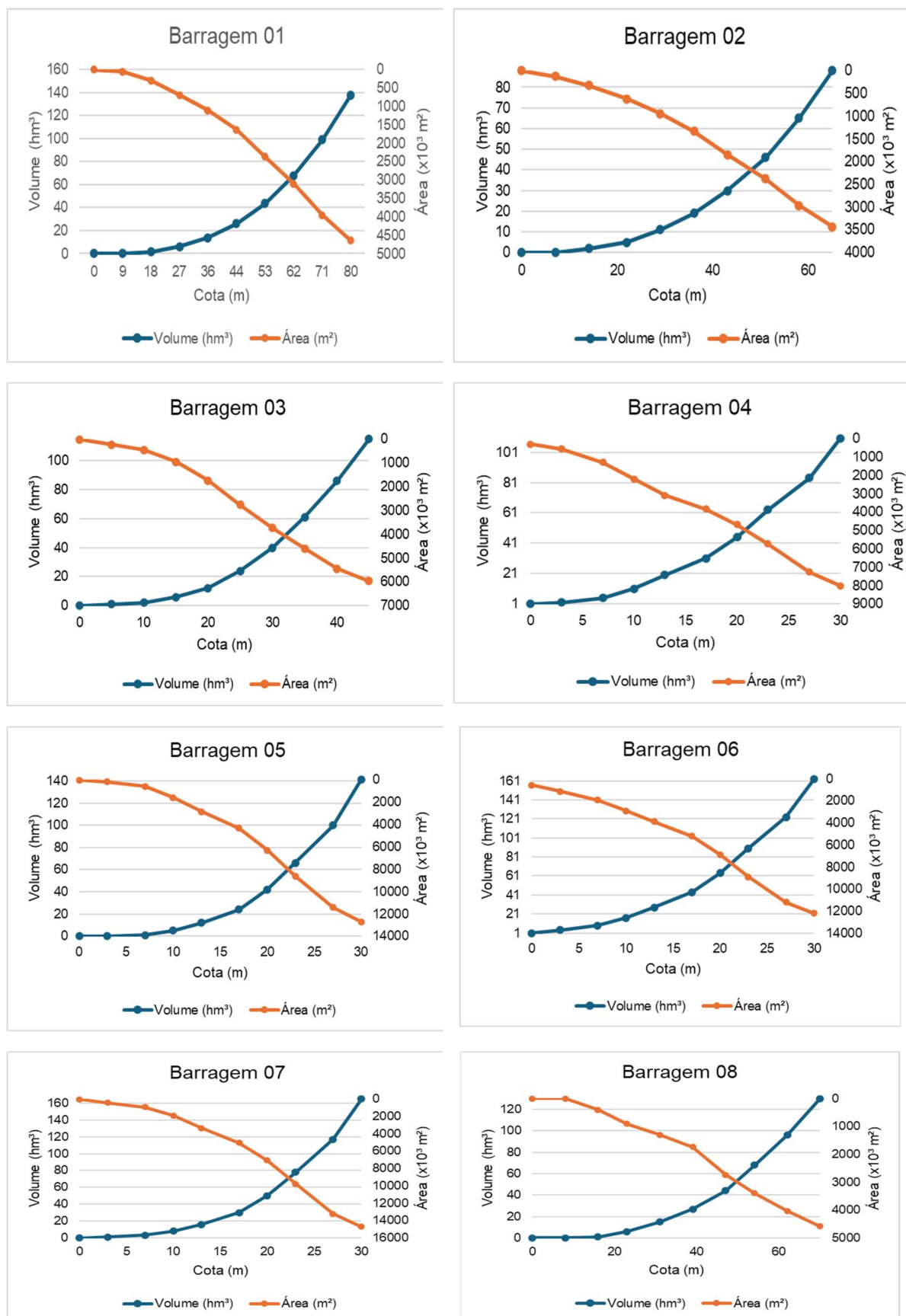
Em suma, a diversidade de perfis CAV na bacia do Goiana permite identificar alternativas que privilegiam capacidade absoluta (bacias 12 e 14), eficiência de armazenamento por metro de elevação (bacias 2, 10 e 13) ou mínimo impacto espacial (bacia 4). Esses resultados fundamentam a escolha da cota normal de reservação e orientam as avaliações de engenharia e estudos ambientais para cada local.

Com base nos resultados obtidos na bacia do rio Goiana, observa-se uma expressiva heterogeneidade entre os 15 sítios analisados quanto à área de captação, volume específico e curvas cota–área–volume (CAV). Tais variações indicam diferentes perfis de eficiência hidráulica e impacto espacial, sendo que as bacias 2, 10 e 13 apresentaram os maiores volumes específicos ( $>1600 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ), sugerindo elevado rendimento por unidade de área drenante. Esse padrão está em consonância com estudos recentes que destacam a importância de métricas como volume específico e inclinação das curvas CAV para a seleção otimizada de reservatórios, priorizando locais com maior eficiência volumétrica e menor necessidade de altura de barragem ou área alagada (Zytoon, Gharineiat, Alajarmeh, 2024a; Mohammed, Abed, 2024).

Além disso, os maiores volumes absolutos registrados nas bacias 12 e 14 ( $\sim 1,9 \times 10^8 \text{ m}^3$ ) mostram potencial de regulação hídrica de grande escala, mas com custos ambientais mais elevados, como amplas áreas de inundação. Essa dualidade entre capacidade absoluta e impacto territorial já foi discutida por Ghosh; Bera, (2024), que recomendam a consideração simultânea de fatores geomorfológicos, hidrológicos e socioambientais na seleção de locais para barragens. Assim, os achados deste estudo não apenas refletem padrões observados na literatura atual, como também reforçam a importância de etapas subsequentes de avaliação multicritério, especialmente em bacias tropicais com alta variabilidade topográfica.



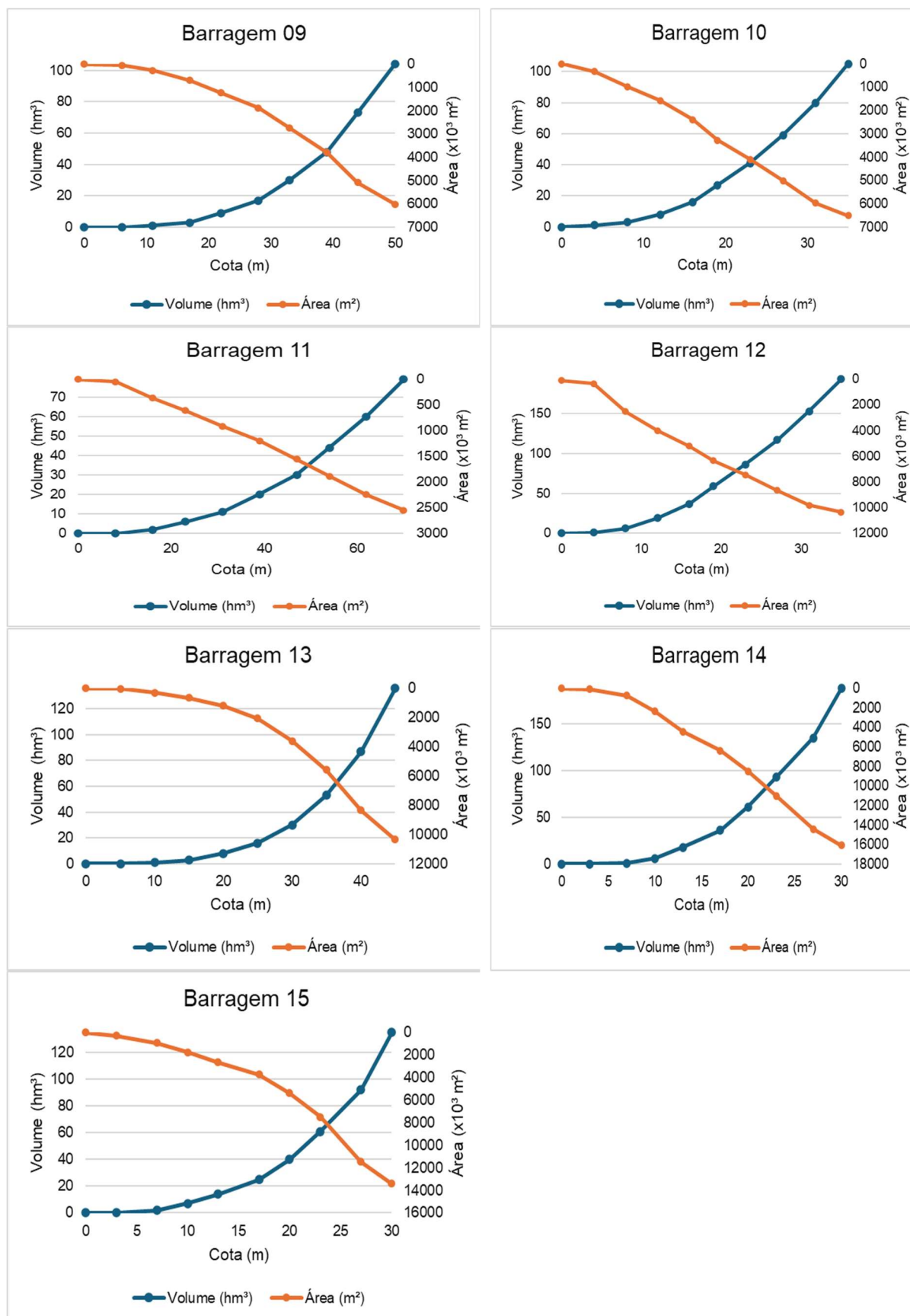
Figura 13 - Curvas cota – área – volume para as barragens identificadas – Rio Goiana.



Fonte: A autora (2025)



Figura 13 - Curvas cota – área – volume para as barragens identificadas – Rio Goiana (continuação).



Fonte: A autora (2025)

#### 4.1.2 SIRINHAÉM

Na análise espacial realizada com o LOCASIN na sub-bacia do Rio Sirinhaém (Figura 14), identificaram-se oito sítios potenciais para implementação de barragens, distribuídos ao longo dos principais afluentes e no curso principal do rio. A figura ilustra limites municipais, a rede de drenagem e os pontos de localização automática, numerados de 1 a 8 conforme sua ordem de processamento.

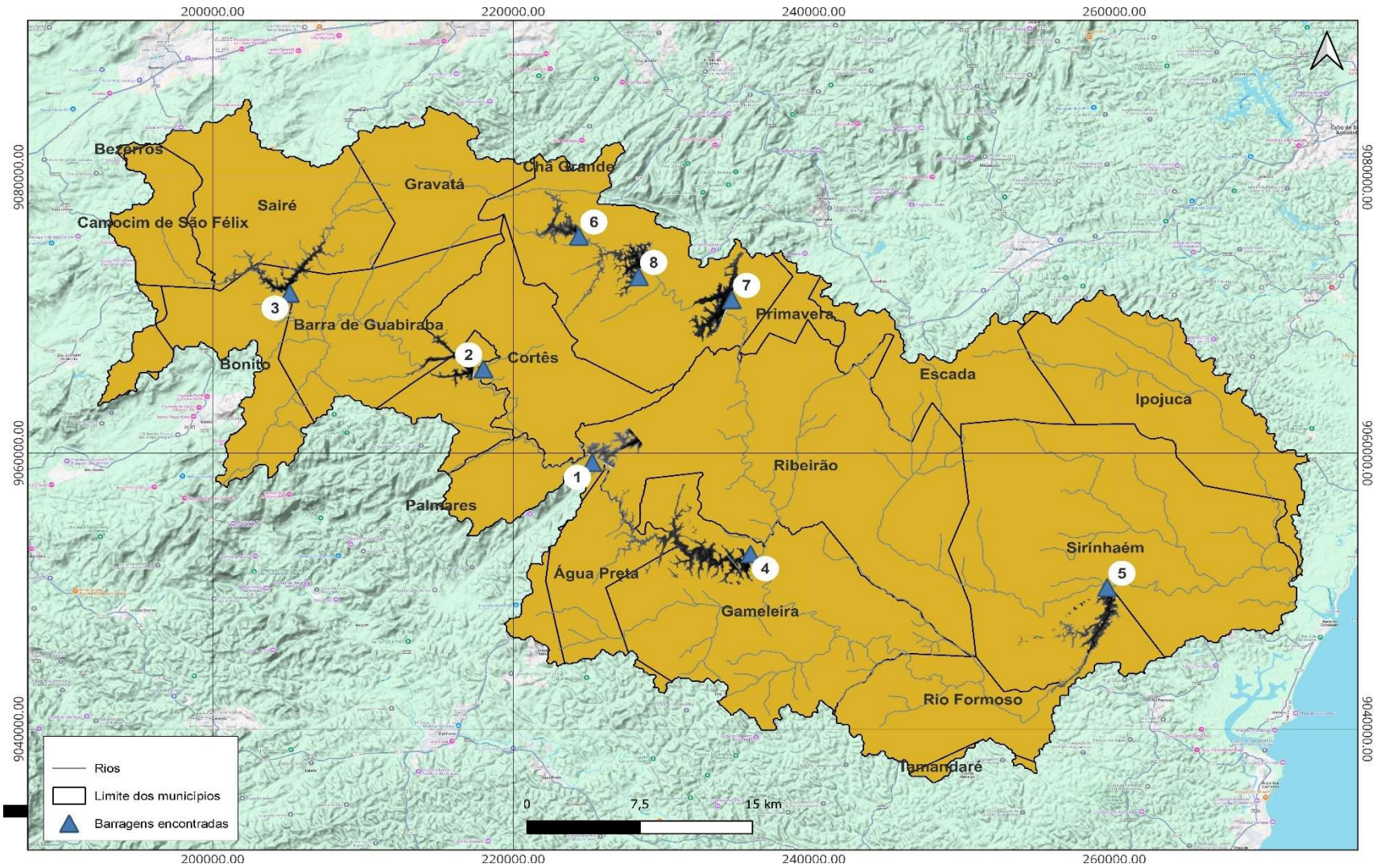
A Tabela 13 apresenta, para cada sítio, as variáveis-chave: área de captação, altura e comprimento de eixo da estrutura, volume de enrocamento estimado, volume inundado, volume específico (relação entre volume inundado e área de captação em  $\text{m}^3/\text{km}^2$ ), área alagada projetada.

Tabela 13 – Características físicas das barragens identificadas – Bacia do Rio Sirinhaém

	Barragem 01	Barragem 02	Barragem 03	Barragem 04
Área de captação (Km <sup>2</sup> )	538,57	407,13	179,54	610,01
Altura (m)	40,00	45,00	45,00	35,00
Comprimento do eixo (m)	2.197,36	1.120,09	630,69	1.649,99
Volume da barragem (m <sup>3</sup> )	3.809.035,25	2.235.358,55	717.896,08	3.277.531,96
Volume da bacia (m <sup>3</sup> )	112.397.118,28	82.676.728,52	87.657.759,14	187.248.064,77
V/Acap	208,70	203,07	488,23	306,96
Área da bacia (m <sup>2</sup> )	4.018.500,00	3.476.700,00	4.763.700,00	11.378.700,00
	Barragem 05	Barragem 06	Barragem 07	Barragem 08
Área de captação (Km <sup>2</sup> )	1.432,64	83,25	218,08	131,92
Altura (m)	35,00	80,00	29,90	40,00
Comprimento do eixo (m)	257,64	469,57	3.426,84	3.621,06
Volume da barragem (m <sup>3</sup> )	331.020,61	2.439.881,48	5.150.767,12	6.483.722,63
Volume da bacia (m <sup>3</sup> )	107.391.979,91	82.867.807,21	110.632.091,73	88.666.078,44
V/Acap	74,96	995,40	507,29	672,11
Área da bacia (m <sup>2</sup> )	6.046.200,00	3.183.300,00	5.980.500,00	5.216.400,00

Fonte: A autora (2025)

Figura 14 - Potenciais localizações de barragens identificadas para a Bacia do Rio Sirinhaém.



Fonte: A autora (2025)

Destacam-se sítios com ampla contribuição hidrográfica, como o ponto 5 (Sirinhaém), com área de captação de 1432,6 km<sup>2</sup>, e o ponto 4 (Gameleira), com 610,0 km<sup>2</sup>. Ambos requerem maciços relativamente moderados (35 m de altura) e apresentam volumes inundados de  $1,07 \times 10^8$  m<sup>3</sup> (Sirinhaém) e  $1,87 \times 10^8$  m<sup>3</sup> (Gameleira), refletindo vales largos e topografia favorável. Por outro lado, o sítio 7 (Primavera) concentra área de captação menor (83,3 km<sup>2</sup>) mas altíssima produtividade volumétrica por km<sup>2</sup>, com volume específico de 995,4 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>, consequência de um desnível acentuado (80 m de altura) e vales estreitos que inundam rapidamente.

A variação no comprimento do eixo do maciço também evidencia diferenças morfológicas: enquanto Gameleira e Sirinhaém demandam eixos de mais de 1600 m, o sítio 8 (Gravatá) exige apenas 257 m, devido à presença de um corredor topográfico estreito. Em termos de volumes de enrocamento, as barras com alturas maiores (pontos 2 e 3, com 45 m) atingem mais de  $2,2 \times 10^6$  m<sup>3</sup> de material, contrastando com morfologias de comprimento curto (ponto 8,  $331 \times 10^3$  m<sup>3</sup>).

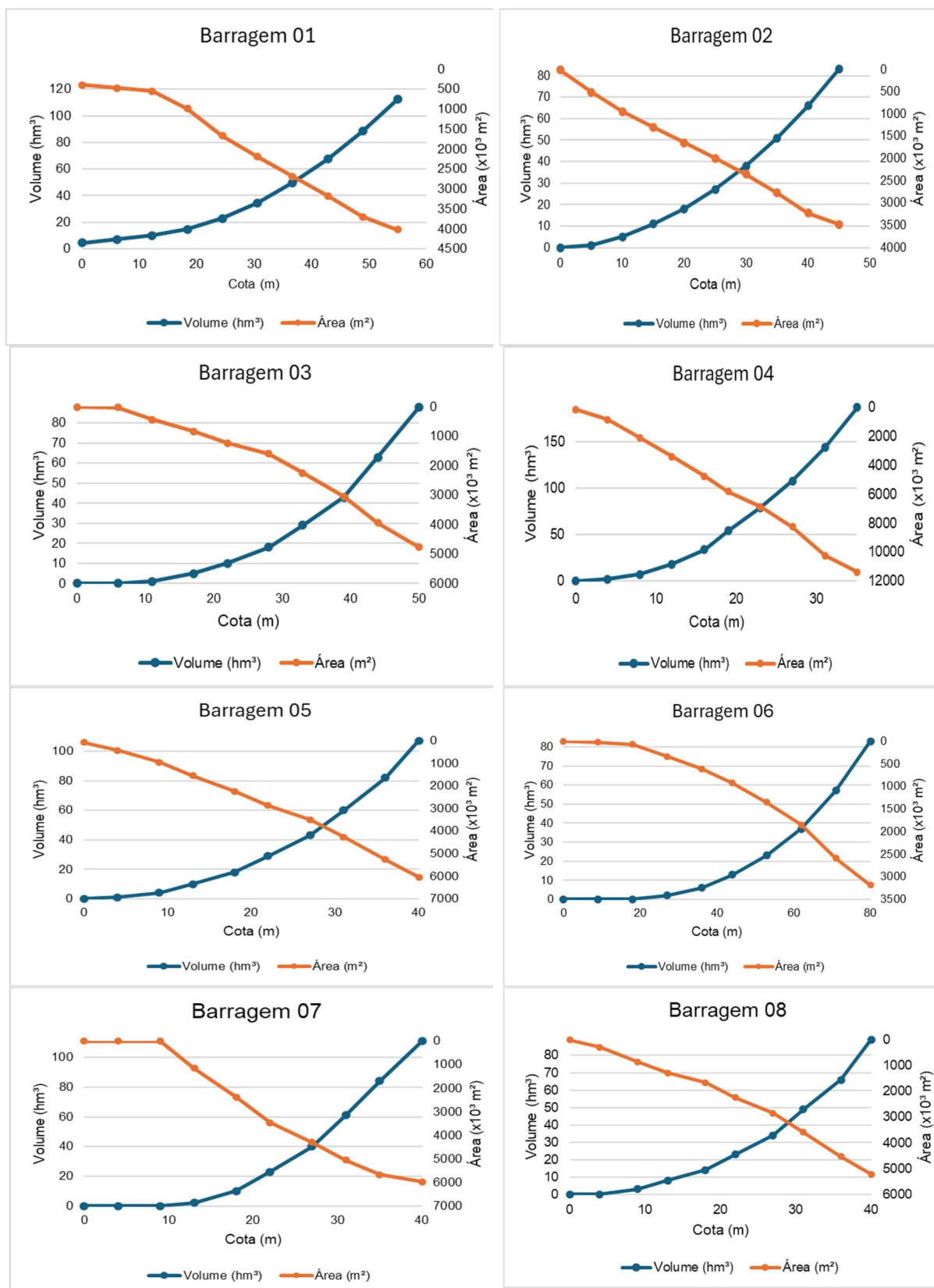
Quanto às áreas impactadas, observa-se que a faixa alagada oscila entre  $3,2 \times 10^6$  m<sup>2</sup> (ponto 6) e  $11,6 \times 10^6$  m<sup>2</sup> (ponto 4), sendo que a área remanescente não inundada acompanha inversamente as dimensões do espelho d'água. Esse balanço territorial é crucial para avaliação de impacto socioambiental e obras complementares.

Em conjunto, o mapa e a tabela revelam um leque de opções que atende a distintos objetivos de projeto: maximização de volume absoluto (Gameleira e Sirinhaém), eficiência volumétrica por unidade de área de contribuição (Primavera e Cortês) e menor extensão de barramento (Gravatá e Bonito). Esses resultados embasarão a escolha do sítio ótimo, a cota normal de operação e a estratégia de manejo ambiental na fase de detalhamento do estudo de viabilidade.

As curvas Cota–Área–Volume (Figura 15) para as oito sub-bacias do Sirinhaém revelam uma dinâmica comum, porém com nuances importantes que devem orientar a escolha do local e da cota de operação de cada reservatório. Nas cotas iniciais (até cerca de 5–10 m), todas as bacias inundam apenas o fundo de vale e acumulam volumes reduzidos, refletindo, nessa faixa, diferenças apenas pontuais de profundidade mínima. A partir daí, no “meio da curva” (aproximadamente 10–30 m), observa-se a fase mais crítica: cada metro adicional de cota produz saltos volumétricos que variam de modesto a extremamente acentuado, dependendo da morfologia da sub-bacia.



Figura 15 - Curvas cota – área – volume para as barragens identificadas – Rio Sirinhaém.



Fonte: A autora (2025)

Por exemplo, a Bacia 6—com área de contribuição de apenas 83 km<sup>2</sup>, mas desnível de 80 m—apresenta a inclinação mais íngreme, convertendo rapidamente poucos metros de altura em grandes volumes: seu volume específico de quase 1000 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup> demonstra altíssima eficiência de armazenamento por km<sup>2</sup> de bacia. Em contraste, a Bacia 5 (1432 km<sup>2</sup>) e a Bacia 4 (610 km<sup>2</sup>) exibem curvas mais suavizadas: embora acumulem, em cotas elevadas, volumes absolutos significativos ( $\approx 1,07 \times 10^8$  m<sup>3</sup> e  $1,87 \times 10^8$  m<sup>3</sup>, respectivamente), elas requerem elevações maiores para alcançar cada incremento volumétrico, devido à ampla planície de inundação.

Na etapa final (> 30 m), quase todas as curvas tendem a se aplainar, indicando o esgotamento do potencial hídrico das margens e a restrição imposta pela topografia residual. É nesse trecho que a Bacia 4 sobressai pelo maior volume total (cerca de  $1,87 \times 10^8$  m<sup>3</sup>), mas também pela necessidade de cotas mais elevadas para manter ganhos volumétricos. As bacias com platôs tardios — em especial a 4 e a 5 — implicarão em maciços mais altos e em maiores áreas alagadas para atingir os volumes pretendidos, elevando custos de construção e impactos ambientais.

Em termos de planejamento, a escolha da cota ideal deve recair sobre o ponto em que a curva volume × cota apresenta sua máxima declividade: nas bacias de maior inclinação (6, 8 e 3), esse ponto ocorre em cotas médias (10–20 m), favorecendo projetos que buscam flexibilidade operacional e menor altura de barragem. Já bacias como a 4 e a 5, com declividade mais suave, só começam a render grandes volumes em cotas superiores a 30 m, o que pode ser atrativo apenas em cenários que permitam elevações substanciais com consequente alagamento de áreas amplas.

Em síntese, as curvas Cota–Área–Volume destacam dois perfis de interesse na bacia do Sirinhaém:

- Alta eficiência volumétrica em baixas cotas (Bacias 6, 8 e 3), ideais para reservatórios com operação variável e menor investimento em altura.
- Maior capacidade absoluta em cotas elevadas (Bacia 4 e 5), indicadas quando se busca máximo armazenamento, desde que se admita alagamento extenso e estruturas mais altas.

A análise morfológica e hidrológica dos oito sítios potenciais na bacia do Rio Sirinhaém evidencia dois perfis contrastantes de viabilidade: locais de alta capacidade

absoluta, como os pontos 4 (Gameleira) e 5 (Sirinhaém), apresentam volumes acumulados superiores a  $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ , mas exigem estruturas extensas e cotas elevadas para operar eficientemente, o que implica maior impacto ambiental e custos de implantação. Já os pontos 6 (Primavera) e 8 (Cortês), embora menores em área de captação, destacam-se pelo alto volume específico ( $>670 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ), com ganho expressivo por metro de cota e menor extensão de barramento. Esses achados se alinham ao modelo de avaliação espacial multi-critério (AHP-GIS) proposto por Boonman; Fukuda; Junpen, (2025), que recomenda considerar simultaneamente produtividade volumétrica, impacto espacial e morfologia para selecionar locais com alta eficiência e menor intervenção territorial.

Além disso, os padrões observados nas curvas cota–área–volume (CAV) reforçam que a seleção da cota de operação deve priorizar o trecho onde a inclinação da curva é mais acentuada, otimizando o armazenamento com menor altura de barragem. A bacia 6 exemplifica esse comportamento, acumulando grandes volumes em cotas intermediárias (10–30 m) devido a um perfil topográfico íngreme. Esse tipo de análise volumétrica por cota foi igualmente valorizado no trabalho de Maafa; Badi, (2025), que revisaram 115 estudos sobre seleção de locais e destacaram o peso de critérios geomorfológicos — como declividade e comprimento de eixo — na determinação de locais ideais para infraestrutura hídrica. Assim, a diversidade morfológica da bacia do Sirinhaém reforça a importância de uma abordagem integrada, incorporando modelos multicritério, sensibilidade topográfica e impacto ambiental como determinantes no processo decisório.

#### **4.1.3 MUNDAÚ**

Para avaliar o potencial de regularização hídrica na sub-bacia do rio Mundaú, sete locais potenciais (Figura 16) para implementação de reservatórios foram identificados automaticamente pelo algoritmo LOCASIN a partir de variáveis morfométricas e geomorfológicas. A Tabela 14 apresenta os principais parâmetros coletados em cada sítio, incluindo área de contribuição, altura e comprimento do eixo da barragem, volumes de água estimados, eficiência volumétrica específica e extensão das áreas inundáveis adequadas ou não à implementação.

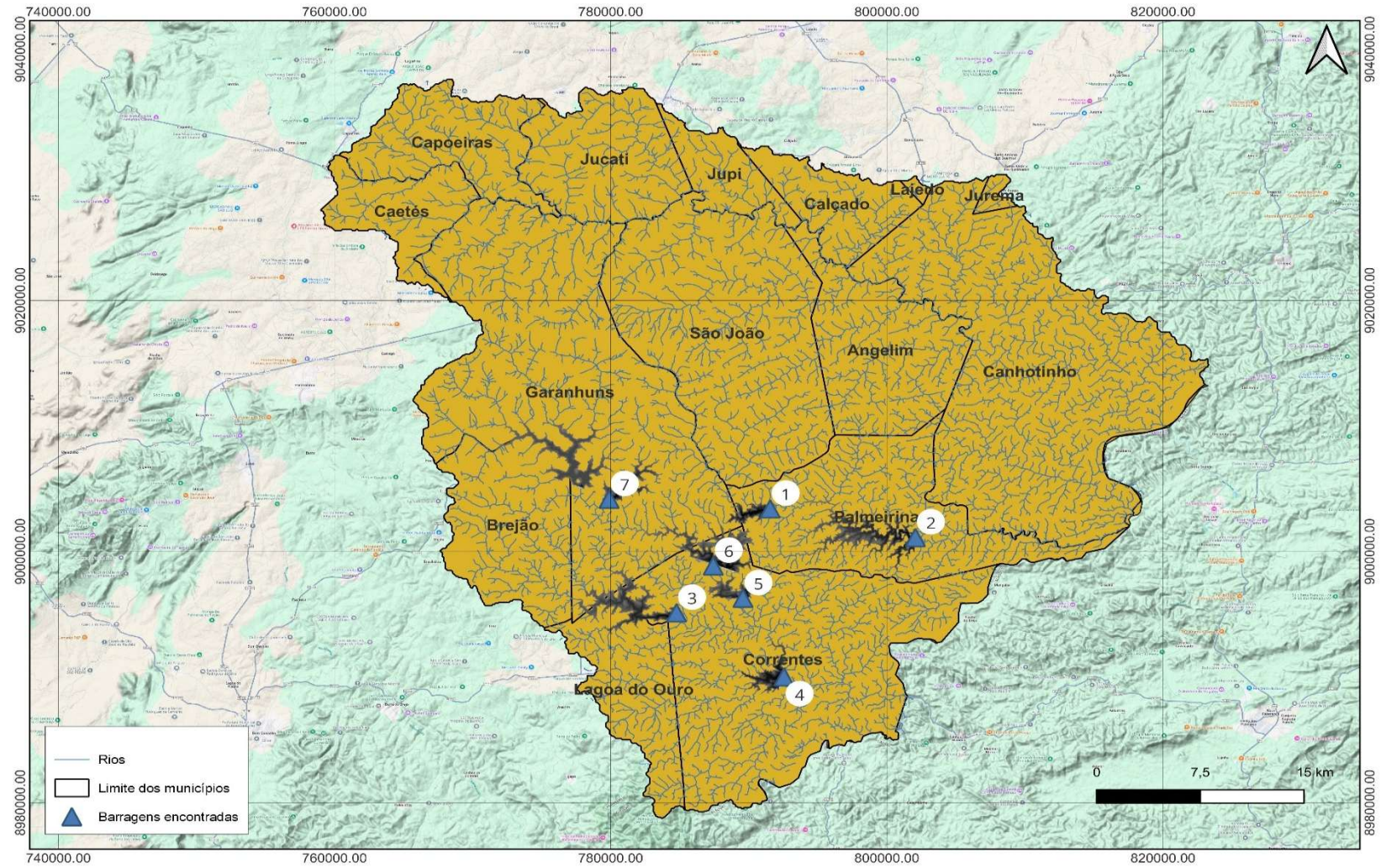
Tabela 14 - Características físicas das barragens identificadas – Bacia do Rio Mundaú

	<b>Barragem 01</b>	<b>Barragem 02</b>	<b>Barragem 03</b>	<b>Barragem 04</b>
<b>Área de captação (Km²)</b>	119,38	225,91	110,43	558,41
<b>Altura (m)</b>	65,00	50,00	60,00	45,00
<b>Comprimento do eixo (m)</b>	1.310,42	1.200,00	1.050,51	2.077,55
<b>Volume da barragem (m³)</b>	4.093.122,22	2.303.914,77	2.624.234,45	4.813.173,08
<b>Volume da bacia (m³)</b>	86.921.197,26	194.275.317,11	190.533.879,87	94.647.458,06
<b>V/Acap</b>	728,09	859,97	1.725,35	169,50
<b>Área da bacia (m²)</b>	2.840.400,00	11.729.700,00	10.515.600,00	4.138.200,00
	<b>Barragem 05</b>	<b>Barragem 06</b>	<b>Barragem 07</b>	
<b>Área de captação (Km²)</b>	265,50	255,79	171,23	
<b>Altura (m)</b>	70,00	50,00	40,00	
<b>Comprimento do eixo (m)</b>	1.629,81	5.787,75	3.409,39	
<b>Volume da barragem (m³)</b>	4.656.988,85	11.532.782,05	4.595.584,34	
<b>Volume da bacia (m³)</b>	76.970.800,63	187.978.898,97	194.277.964,84	
<b>V/Acap</b>	289,91	734,91	1.134,57	
<b>Área da bacia (m²)</b>	3.227.400,00	9.817.200,00	13.907.700,00	

Fonte: A autora (2025)



Figura 16 - Potenciais localizações de barragens identificadas para a Bacia do Rio Mundaú.



Fonte: A autora (2025)

Observa-se considerável heterogeneidade entre os pontos analisados. As áreas de contribuição oscilam de 110,43 km<sup>2</sup> (sítio 3) a 558,41 km<sup>2</sup> (sítio 4), refletindo distintos aportes de vazão potencial. Nem sempre o maior aporte se traduz em maior armazenamento: embora o sítio 4 disponha da maior captação, seu volume específico é o menor (169,50 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>) devido à limitação na altura da barragem (45 m) e à extensa área alagável exigida ( $4,14 \times 10^6$  m<sup>2</sup>). Em contraste, o sítio 3 combina altura intermediária (60 m) com comprimento de eixo de apenas 1050,51 m para atingir o maior volume específico (1725,35 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>), configurando um reservatório mais compacto, porém dependente de aporte hídrico reduzido.

No que tange aos aspectos construtivos, o sítio 6 requer o maior volume de material ( $1,15 \times 10^7$  m<sup>3</sup>) em função de seu longo eixo (5787,75 m), enquanto o sítio 2 se destaca pela menor demanda estrutural ( $2,30 \times 10^6$  m<sup>3</sup>), decorrente de comprimento de eixo reduzido (1 200 m) e altura moderada (50 m). Já o volume total armazenado a montante varia de  $7,70 \times 10^7$  m<sup>3</sup> (sítio 5) a  $1,95 \times 10^8$  m<sup>3</sup> (sítios 2 e 7), resultado do balanço entre oferta hídrica e configuração do vale. A extensão de áreas não adequadas à inundação — decorrente de restrições ambientais ou de uso do solo — varia de  $3,44 \times 10^6$  m<sup>2</sup> (sítio 5) a  $1,42 \times 10^7$  m<sup>2</sup> (sítio 7), indicando a necessidade de estudos complementares de impacto e compensações caso esses sítios sejam efetivamente selecionados.

A representação cartográfica dos sete sítios sobre o modelo de relevo sombreado, em conjunto com a malha viária e os limites municipais (Figura 1), realça a influência do gradiente topográfico e da rede de drenagem na escolha dos pontos. A bacia do Mundaú intersecciona onze municípios — entre eles Garanhuns, Brejão e Correntes — o que reforça a importância de integrar critérios socioambientais e logísticos à análise técnica. Em síntese, apesar de sítios como o 7 e o 2 apresentarem elevado potencial de armazenamento, a combinação de baixa eficiência volumétrica e amplas áreas não-adequadas sugere a adoção de estudos complementares para otimizar custo-benefício, minimizar impactos e garantir viabilidade ambiental antes da implementação definitiva.

As curvas Cota–Área–Volume das sete sub-bacias do Mundaú (Figura 17) revelam perfis hidráulicos marcadamente distintos, embora compartilhem o formato sigmoidal típico de reservatórios em vales alargados. Nos primeiros metros de cota (0–10 m), todas as bacias exibem incremento discreto de área e volume, pois apenas o leito principal é inundado. A partir daí, entretanto, surgem diferenças cruciais:

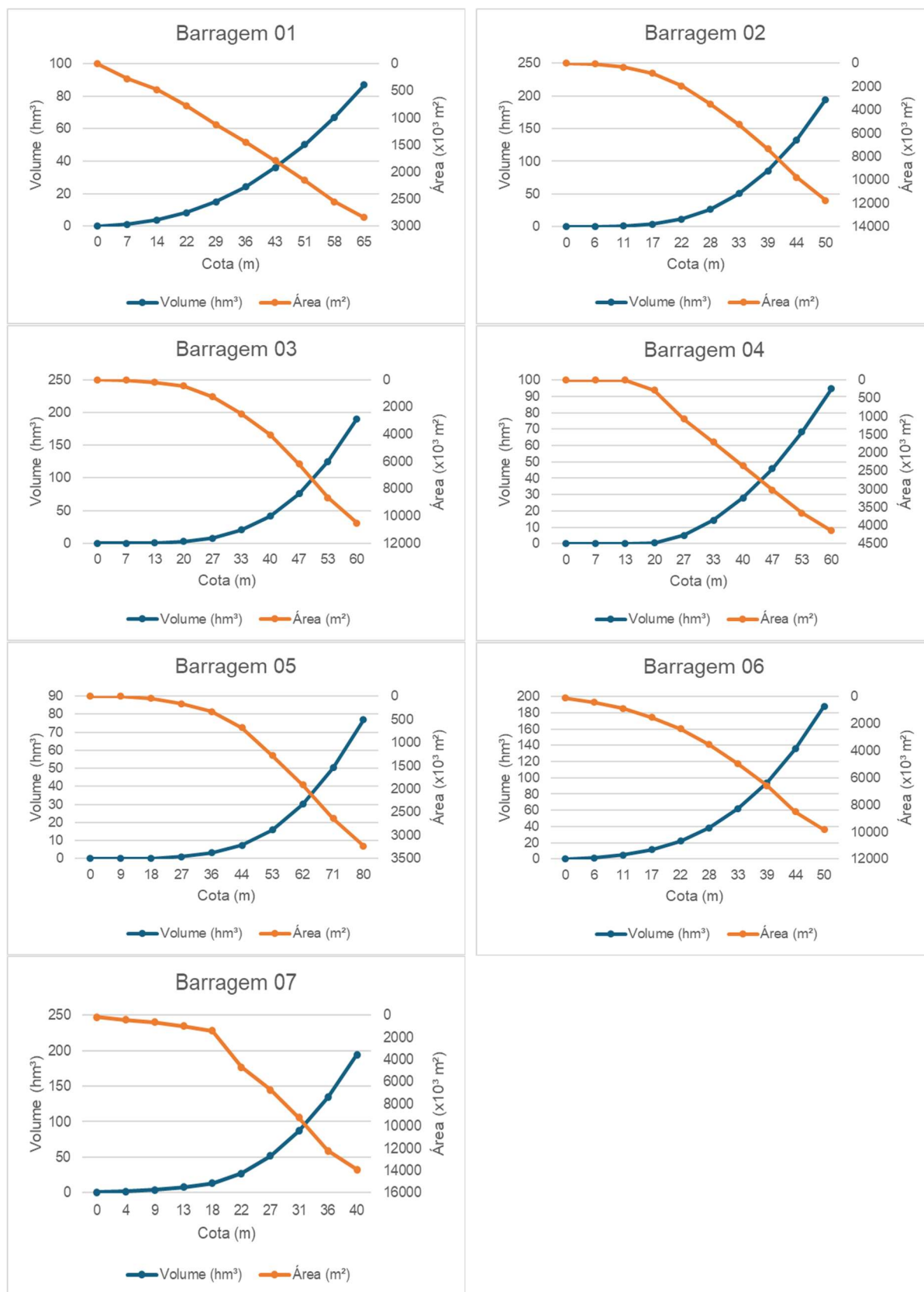
enquanto a Bacia 3 desponta com uma inclinação extraordinariamente íngreme entre 10 m e 30 m—refletindo seu volume específico de  $1\,725\text{ m}^3/\text{km}^2$ , o maior do conjunto—outras, como a Bacia 4, só passam a ganhar volume de modo significativo em cotas mais elevadas, acima de 30 m, evidenciando uma planície de inundação mais extensa e rasante.

As bacias 2 e 7, embora de área moderada ( $\approx 226$  e  $171\text{ km}^2$ ), acumulam volumes absolutos comparáveis ( $\approx 1,94 \times 10^8\text{ m}^3$ ), graças a vales relativamente profundos que garantem expansão volumétrica consistente toda vez que a cota sobe. Já a Bacia 5, com  $266\text{ km}^2$  de contribuição, e a Bacia 1, com apenas  $119\text{ km}^2$ , demonstram curvas intermediárias: apresentam boa resposta volumétrica em cotas médias (15–40 m), mas não alcançam nem a extrema eficiência volumétrica da Bacia 3 nem a altíssima capacidade absoluta das bacias 2 e 7.

No estágio final das curvas ( $> 40\text{ m}$ ), observa-se um aplainamento geral, sinalizando o limite topográfico do vale remanescente. Nesse trecho, apenas a Bacia 6—com cota máxima projetada de 50 m—mantém ganho volumétrico razoável, graças ao seu desnível intermediário. Em contrapartida, a declividade mais suave das bacias 4 e 5 implica na necessidade de ceder cotas ainda mais altas para atingir incrementos de volume semelhantes aos das bacias de vales mais estreitos.

Em conjunto, essas CAVs indicam que, para projetos que privilegiam flexibilidade operacional e mínimos custos de elevação, as bacias 3, 7 e 2 são as mais favoráveis, pois convertem poucos metros adicionais de cota em grandes reservas d'água. Por outro lado, quando o objetivo é maximizar o volume absoluto — mesmo com maciços mais altos e áreas alagadas amplas —, as bacias 2 e 7 se destacam pela combinação de profundidade de vale e extensão de planície favorável. Essas diferenças devem orientar a escolha da cota normal de reservação, o dimensionamento do maciço e a avaliação de impactos ambientais em cada sítio.

Figura 17 - Curvas cota – área – volume para as barragens encontradas – Rio Mundaú.



Fonte: A autora (2025)

A análise dos sete sítios potenciais para reservatórios na bacia do Rio Mundaú revelou padrões morfométricos distintos que influenciam diretamente a eficiência volumétrica e os impactos associados à implantação das barragens. O destaque para a bacia 3, com volume específico de  $1725 \text{ m}^3/\text{km}^2$ , confirma o papel crítico do gradiente topográfico e da configuração do vale na maximização do armazenamento hídrico, especialmente em altitudes intermediárias (10–30 m). Este comportamento é coerente com o estudo de Latif; Sabbaghian; Fereshtehpour, (2025), que aplicaram um modelo de avaliação multicritério orientado por risco para priorizar reservatórios em regiões semiáridas, integrando critérios técnicos e socioambientais para classificar os sítios com melhor relação entre capacidade e impacto contextual.

Além disso, os limites físicos e de uso do solo observados em bacias como a 7 (com elevada capacidade absoluta em torno de  $1,95 \times 10^8 \text{ m}^3$  e áreas não inundáveis extensas de aproximadamente  $1,42 \times 10^7 \text{ m}^2$ ) reforçam a importância de incorporar critérios ambientais, logísticos e sociais na fase de triagem de sítios. Weiss; Moody; Pracheil, (2025) demonstraram, ao avaliar o uso de turbinas tipo parafuso de Arquimedes em barragens não energizadas, que mesmo em locais com alta capacidade técnica, fatores como conectividade ecológica, impacto territorial e aceitação social podem limitar a viabilidade final do projeto. Tais evidências reforçam que, mesmo nos sítios mais promissores do Mundaú, é essencial aplicar abordagens integradas e orientadas por critérios múltiplos para assegurar a sustentabilidade e eficácia dos projetos de regularização hídrica.



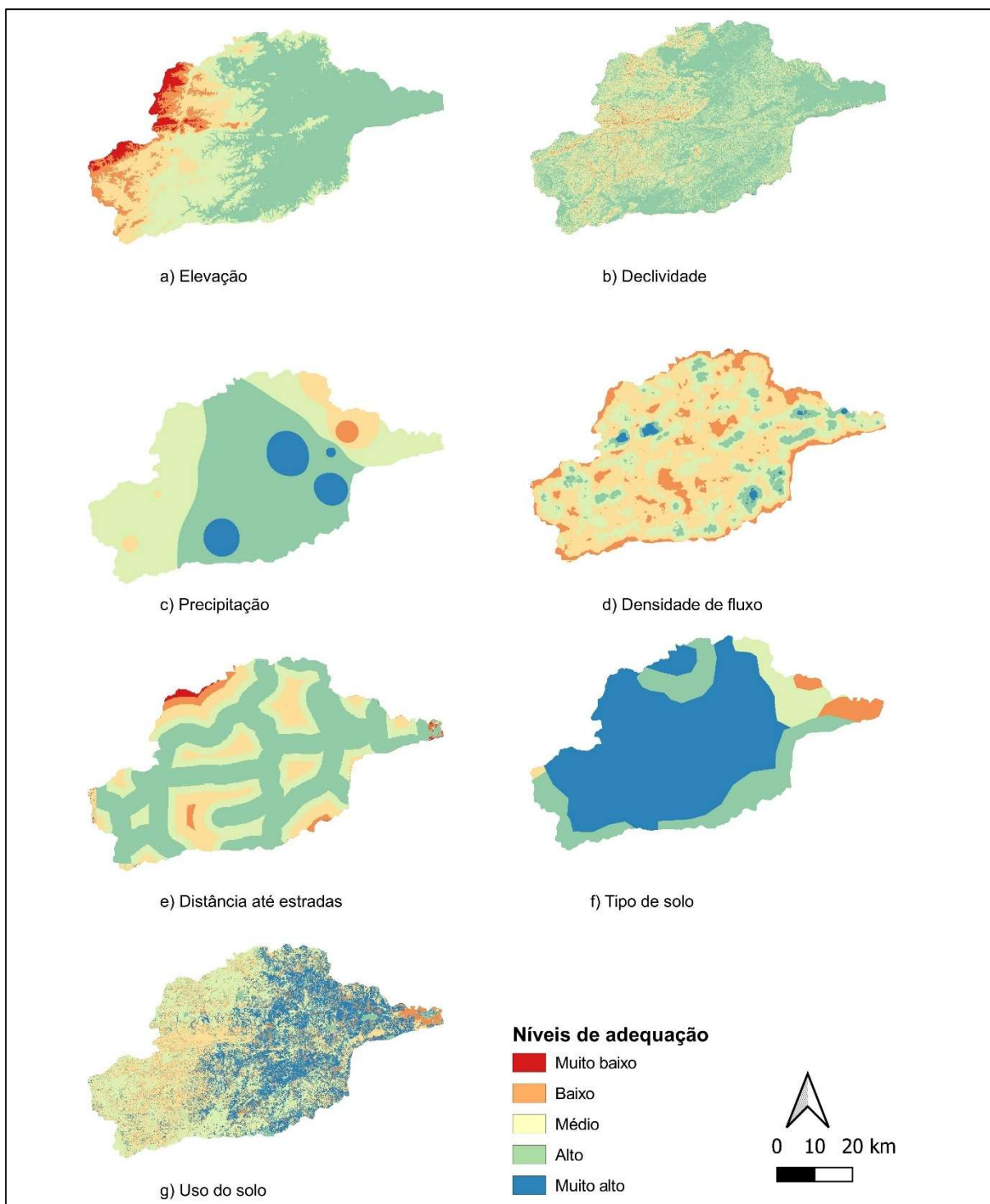
## 4.2 VALIDAÇÃO DOS LOCAIS DE BARRAGENS COM O MÉTODO AHP

### 4.2.1 BACIA DO RIO GOIANA

#### 4.2.1.1 Critérios de adequação

A escolha dos critérios para a localização automatizada de barragens foi fundamentada em abordagens metodológicas amplamente adotadas na literatura, especialmente no contexto de regiões semiáridas. Os critérios selecionados (Figura 18) de elevação, declividade, precipitação, densidade de fluxo, distância até estradas, tipo de solo e uso do solo refletem as características físicas, ambientais e socioeconômicas que influenciam diretamente a viabilidade técnica e econômica da implementação de barragens.

Figura 18 – Mapas classificados de critérios padronizados para seleção de locais para barragens na Bacia do Rio Goiana



Fonte: A autora (2025)

## Elevação

Foi utilizado um Modelo Digital de Elevação (MDE) com resolução de 30 m para a Bacia do Rio Goiana, cujos valores altimétricos variam de 691 a 0 metros acima do nível do mar (Figura 18a). A elevação constitui um critério essencial na definição de áreas adequadas para construção de barragens, pois afeta diretamente o acúmulo e o escoamento da água superficial e subterrânea. Nesse contexto, regiões de menor elevação são consideradas mais favoráveis à implementação de estruturas de barragem, já que apresentam maior potencial de retenção de água de chuva e aquíferos (Al-Ruzouq et al., 2019). Pode-se verificar na Tabela 15 que as alturas menores que 134 obtiveram nível de classificação de 5.

Tabela 15 – Níveis de adequação para o mapa de elevação na bacia do Rio Goiana.

<b>Critério</b>	<b>Subcritério</b>	<b>Valor de adequação</b>	<b>Nível de adequação</b>
<b>Elevação</b>	> 534	1	Muito baixo
	401 – 534	2	Baixo
	267 – 401	3	Médio
	134 – 267	4	Alto
	<= 134	5	Muito alto

Fonte: A autora (2025)

## Declividade

O raster de declividade é apresentado na Figura 18b com valores entre 0 e 68,22%. A declividade influencia diretamente o escoamento superficial e o risco de erosão em torno do reservatório. Em declives muito acentuados, o corte e a escavação tornam-se mais custosos e há maior tendência à erosão de taludes, comprometendo a estabilidade da barragem. Por outro lado, declividades suaves permitem formação de lâmina d'água mais estável e reduzem a velocidade do escoamento, favorecendo a infiltração e a sedimentação controlada (Karakuş; Yildiz, 2022). As áreas com pontuação 5 se concentram em planícies suaves e topos suavizados, enquanto as encostas íngremes no alto da bacia receberam pontuação 1, conforme a Tabela 16.



Tabela 16 - Níveis de adequação para o mapa de declividade na bacia do Rio Goiana.

<b>Critério</b>	<b>Subcritério</b>	<b>Valor de adequação</b>	<b>Nível de adequação</b>
<b>Declividade</b>	> 68.22	1	Muito baixo
	68.22 – 51.17	2	Baixo
	51.17 – 34.11	3	Médio
	34.11 – 17.06	4	Alto
	<=17.06	5	Muito alto

Fonte: A autora (2025)

## Precipitação

O mapa de precipitação média anual (mm) foi obtido por interpolação das estações pluviométricas disponíveis no HidroWeb, variando de 0 a 1178 mm (Figura 18c). A quantidade de chuva define o volume disponível para o enchimento natural do reservatório: regiões com pluviometria elevada garantem aporte hídrico mais constante ao longo do ano (Rajakaruna; Ghosh; Holmatov, 2023). Os valores máximos (> 1 026 mm) ocorrem no leste da bacia, refletindo influência orográfica, e foram classificados como “muito alto” (Tabela 17).

Tabela 17 - Níveis de adequação para o mapa de precipitação na bacia do Rio Goiana.

<b>Critério</b>	<b>Subcritério</b>	<b>Valor de adequação</b>	<b>Nível de adequação</b>
<b>Precipitação (mm)</b>	0 – 569.67	1	Muito baixo
	569.67 – 721.78	2	Baixo
	721.78 – 873.89	3	Médio
	873.89 – 1025.99	4	Alto
	> 1026.00	5	Muito alto

Fonte: A autora (2025)

## Densidade de fluxo

A densidade de drenagem, definida como o comprimento total de canais de escoamento por unidade de área da bacia, reflete diretamente a eficiência do escoamento superficial e a conectividade hidrológica do território. Em estudos recentes de seleção de locais para barragens, demonstra-se que bacias com maior densidade de drenagem apresentam maior probabilidade de recarga de aquíferos e

aporte contínuo de água, tornando-se mais adequadas para a implementação de reservatórios (Mohammed; Pradhan; Ajaj, 2019 ;Karakuş; Yildiz, 2022). Por outro lado, áreas com baixa densidade de drenagem tendem a acumular menos volumes de escoamento de superfície, o que pode comprometer a viabilidade hidráulica da barragem.

Na bacia do Rio Goiana, os valores de densidade de drenagem variam de 0,00 a 3,95 km/km² (Figura 18d). O subcritério com densidade entre 2,85 e 3,75 km/km² recebeu pontuação 4 (“alto”), enquanto valores superiores a 3,75 km/km² foram classificados como 5 (“muito alto. A distribuição espacial mostra concentrações de alta densidade a oeste do planalto, onde a rede de drenagem é mais ramificada, e valores baixos nas planícies mais amplas (Tabela 18; Figura 18d).

Tabela 18- Níveis de adequação para o mapa de densidade de drenagem na bacia do Rio Goiana.

<b>Critério</b>	<b>Subcritério</b>	<b>Valor de adequação</b>	<b>Nível de adequação</b>
<b>Densidade de drenagem</b>	0 – 1.04	1	Muito baixo
	1.04 – 1.94	2	Baixo
	1.94 – 2.85	3	Médio
	2.85 – 3.75	4	Alto
	> 3.75	5	Muito alto

Fonte: A autora (2025)

**Distância até estradas**

A proximidade em relação à malha viária exerce papel central na escolha do local de uma barragem, uma vez que influencia diretamente os custos de transporte de materiais e o acesso para obras e manutenção. Estudos recentes confirmam que áreas próximas às estradas reduzem significativamente os dispêndios logísticos durante as fases de construção e operação, sem, no entanto, impactar de forma desproporcional os aspectos socioambientais quando estabelecidas distâncias mínimas adequadas (Zytoon; Gharineiat; Alajarmeh, 2024b).

Na bacia do Rio Goiana, a distância até redes rodoviárias principais foi calculada com a ferramenta Euclidean Distance do ArcGIS, variando de 0 a 10,70 km

(Figura 18e). Com base nessa distribuição espacial, definiu-se a seguinte reclassificação de adequabilidade através da Tabela 19:

Tabela 19- Níveis de adequação para o mapa de distância até estradas na bacia do Rio Goiana.

<b>Critério</b>	<b>Subcritério</b>	<b>Valor de adequação</b>	<b>Nível de adequação</b>
<b>Distância até estradas (km)</b>	> 9.31	1	Muito baixo
	9.31 – 6.98	2	Baixo
	6.98 – 4.65	3	Médio
	4.65 – 2.33	4	Alto
	<=2.33	5	Muito alto

Fonte: A autora (2025)

A análise espacial evidenciada na Figura 18e revela que corredores rodoviários densos se concentram nas porções centrais eixos de desenvolvimento regional, enquanto as extremidades mais remotas da bacia, com menor acesso viário, apresentam baixa adequabilidade para implementação de barragens.

### **Tipo de solo**

Os diferentes tipos de solo presentes na bacia do Rio Goiana exercem influência direta nas propriedades hidráulicas e geotécnicas dos reservatórios propostos, afetando infiltração, permeabilidade, estabilidade das margens e custos de obras. A Tabela 20 reclassifica essas unidades em cinco níveis de adequabilidade para a implementação de barragens:

GZn1, ESKg1 (solos pedregosos) – Pontuação 1 (“muito baixo”): caracterizam-se por alta proporção de cascalho e rochas, baixa coesão e elevada permeabilidade preferencial, o que dificulta o controle da infiltração e aumenta o risco de instabilidade em taludes.

RLe10 (solos rasos) – Pontuação 2 (“baixo”): com espessura limitada sobre rocha-mãe, esses solos apresentam capacidade de armazenamento de água restrita e menores reservas de matéria orgânica, resultando em baixa retenção hídrica e maior suscetibilidade à erosão.

PACd (solos de profundidade média a alta) – Pontuação 3 (“médio”): solos com granulometria equilibrada que oferecem condições intermediárias de infiltração e suporte estrutural, adequados quando combinados com outros critérios favoráveis, mas sem oferecer vigorosos mecanismos de impermeabilização natural (Zhang *et al.*, 2020)

PVAd53, LVAd5, SXe8, TCo11 (solos argilosos e franco-argilosos) – Pontuação 4 (“alto”): argilas finas e siltes conferem maior coesão e menor condutividade hidráulica, reduzindo perdas por infiltração e promovendo estabilidade de taludes; entretanto, demandam cuidado quanto a suscetibilidade a fissuração pós-seca (Patle *et al.*, 2019)

PVAe11, PVe4 (solos volumosos e férteis) – Pontuação 5 (“muito alto”): caracterizados por textura argilosa com alto teor de matéria orgânica e boa estruturação, apresentam baixa permeabilidade intrínseca e elevada capacidade de retenção de água, favorecendo a formação e manutenção da lâmina d’água em reservatórios.

Essas distinções permitem priorizar áreas em que solos menos permeáveis e mais estáveis contribuem para reduzir custos de impermeabilização e obras de compactação, garantindo maior segurança hidráulica e geotécnica na construção de barragens.

Tabela 20 - Níveis de adequação para o mapa de tipo de solo na bacia do Rio Goiana.

<b>Critério</b>	<b>Subcritério</b>	<b>Valor de adequação</b>	<b>Nível de adequação</b>
<b>Tipo de solo</b>	GZn1, ESKg1	1	Muito baixo
	Rle10	2	Baixo
	PACd	3	Médio
	PVAd53, LVAd5, Sxe8, Tco11	4	Alto
	PVAe11, Pve4	5	Muito alto

Fonte: A autora (2025)

#### **Explicação dos tipos de solos:**

GZn1 - Gleissolos Sálcos Sódicos

ESKg1 - Espodossolos Ferrihumiluvicos Hidromorficos

RLe10 - Neossolos Litólicos Eutróficos + Argissolos Vermelho-Amarelos Eutróficos + Afloramentos de Rochas

PACd - Argissolos Acinzentados Ditróficos + Espodossolos Ferrilúvicos Hidromórficos + Argissolos Vermelho-Amarelos Ditróficos

PVAd53 - Argissolos Vermelho-Amarelos Ditróficos + Planossolos Háplicos Eutróficos + Latossolos Amarelos Ditróficos

LVA5 - Latossolos Vermelho-Amarelos Ditróficos + Argissolos Vermelho-Amarelos Ditróficos

Sxe8 - Planossolos Háplicos Eutróficos + Argissolos Vermelho-Amarelos Eutróficos + Neossolos Litólicos Eutróficos

Tco11 - Luvisolos Cômicos Órticos + Neossolos Litólicos Eutróficos + Planossolos Háplicos Eutróficos

PVAe11 - Argissolos Vermelho-Amarelos Eutróficos + Argissolos Vermelhos Eutróficos + Neossolos Litólicos Eutróficos

Pve4 - Argissolos Vermelhos Eutróficos + Argissolos Vermelho-Amarelos Eutróficos

## Uso do solo

A Tabela 21 apresenta a reclassificação dos principais usos do solo observados na bacia do Rio Goiana em cinco níveis de adequabilidade para implementação de barragens. Cada categoria reflete aspectos distintos de permeabilidade, aporte de sedimentos e viabilidade logística:

Área urbana (1 – Muito baixo). A impermeabilização intensa e a presença de infraestrutura elevam o escoamento rápido e aumentam riscos de poluição, além de implicar conflitos socioambientais.

Agricultura (2 – Baixo). Embora áreas agrícolas possam oferecer acesso facilitado, o uso de máquinas pesadas e práticas de irrigação intensiva reduzem a infiltração natural e elevam a taxa de erosão do solo.

Floresta (3 – Médio). Coberturas florestais promovem estabilidade de taludes e retenção de água no perfil do solo, mas ainda podem apresentar restrições de acesso e exigem cuidados quanto à conservação da vegetação nativa.

Corpo d'água (4 – Alto). Presença de cursos ou espelhos d'água facilita o enchimento inicial e garante disponibilidade hídrica imediata, embora possa demandar adaptações na infraestrutura para controle de inundações.

Terra estéril (5 – Muito alto). Áreas com solo exposto, sem uso agrícola ou urbano, oferecem baixa suscetibilidade à erosão e infraestrutura mínima, simplificando as obras de contenção e impermeabilização.

Essa gradação permite priorizar áreas em que o uso do solo contribui positivamente para o controle de sedimentos, a estabilidade hidrológica e a logística de construção de barragens na região

Tabela 21- Níveis de adequação para o mapa de uso do solo na bacia do Rio Goiana.

<b>Critério</b>	<b>Subcritério</b>	<b>Valor de adequação</b>	<b>Nível de adequação</b>
<b>Uso do solo</b>	Área urbana	1	Muito baixo
	Agricultura	2	Baixo
	Floresta	3	Médio
	Corpo d'água	4	Alto
	Terra estéril	5	Muito alto

Fonte: A autora (2025)

#### 4.2.1.2 Matriz de comparação em pares e pesos de critérios

Seguindo a metodologia AHP, foram avaliados sete critérios para determinar a adequação dos locais considerados na pesquisa, conforme apresentados na Tabela 7. As comparações seguiram a escala fundamental proposta por Saaty (1980). Foram comparados os sete critérios entre si, atribuindo-lhes valores relativos conforme sua importância. Para compor a matriz final, adotaram-se as médias geométricas dos valores atribuídos nas comparações par a par, complementadas pelas informações extraídas da literatura especializada (Tabela 22).

Tabela 22 – Pesos dos critérios utilizados na seleção dos locais

<b>Critério</b>	<b>Densidade de Drenagem</b>	<b>Precipitação</b>	<b>Uso do Solo</b>	<b>Tipo de Solo</b>	<b>Declividade</b>	<b>Elevação</b>	<b>Distância até Estradas</b>	<b>Pesos</b>
<b>Densidade de Drenagem</b>	1	2	3	3	5	6	9	33.64%
<b>Precipitação</b>	0.50	1	2	3	4	6	7	24.06%
<b>Uso do Solo</b>	0.33	0.50	1	2	4	5	6	17.06%
<b>Tipo de Solo</b>	0.33	0.33	0.50	1	3	3	5	11.63%
<b>Declividade</b>	0.20	0.25	0.25	0.33	1	2	4	6.54%
<b>Elevação</b>	0.17	0.17	0.20	0.33	0.50	1	3	4.57%
<b>Distância até Estradas</b>	0.11	0.14	0.17	0.20	0.25	0.33	1	2.50%

Fonte: A autora (2025)

A avaliação gerada por meio da matriz de comparação obteve uma razão de consistência (RC) de 0,039. Considerando que este valor é inferior ao limite recomendado por Saaty (menor que 0,1), conclui-se que as avaliações obtidas foram consistentes e podem ser consideradas válidas. Os resultados da análise indicaram que os critérios Densidade de drenagem e precipitação receberam os maiores pesos, demonstrando maior importância relativa no processo de seleção de locais para barragens. Por outro lado, os critérios Elevação e Distância até estradas obtiveram os menores pesos relativos, indicando menor relevância na determinação das áreas adequadas (Tabela 22).

A aplicação do método AHP na bacia do Rio Goiana demonstrou robustez na priorização de critérios relevantes para a viabilidade técnica e ambiental de barragens. Atribuir maior peso à densidade de drenagem (33,64%) e à precipitação (24,06%) é coerente com estudos recentes que apontam esses fatores como determinantes na sustentabilidade hídrica de reservatórios. Fakpor et al., (2025), ao aplicarem AHP para modelar a aptidão de locais para pequenas hidrelétricas na Nigéria, identificaram que drenagem e precipitação foram os fatores mais influentes na viabilidade de geração contínua de energia hídrica, o que respalda a hierarquia estabelecida na análise do Goiana.

Além disso, a distribuição espacial da adequabilidade, com 83,47% da área classificada como média a alta, revela uma bacia com ampla aptidão para regularização hídrica, especialmente nas regiões centrais próximas aos principais cursos d'água. Esse padrão se alinha aos achados de Anwer; Hassan, (2025), que identificou em Al Dinder, Sudão, que áreas com baixa declividade, solos favoráveis e

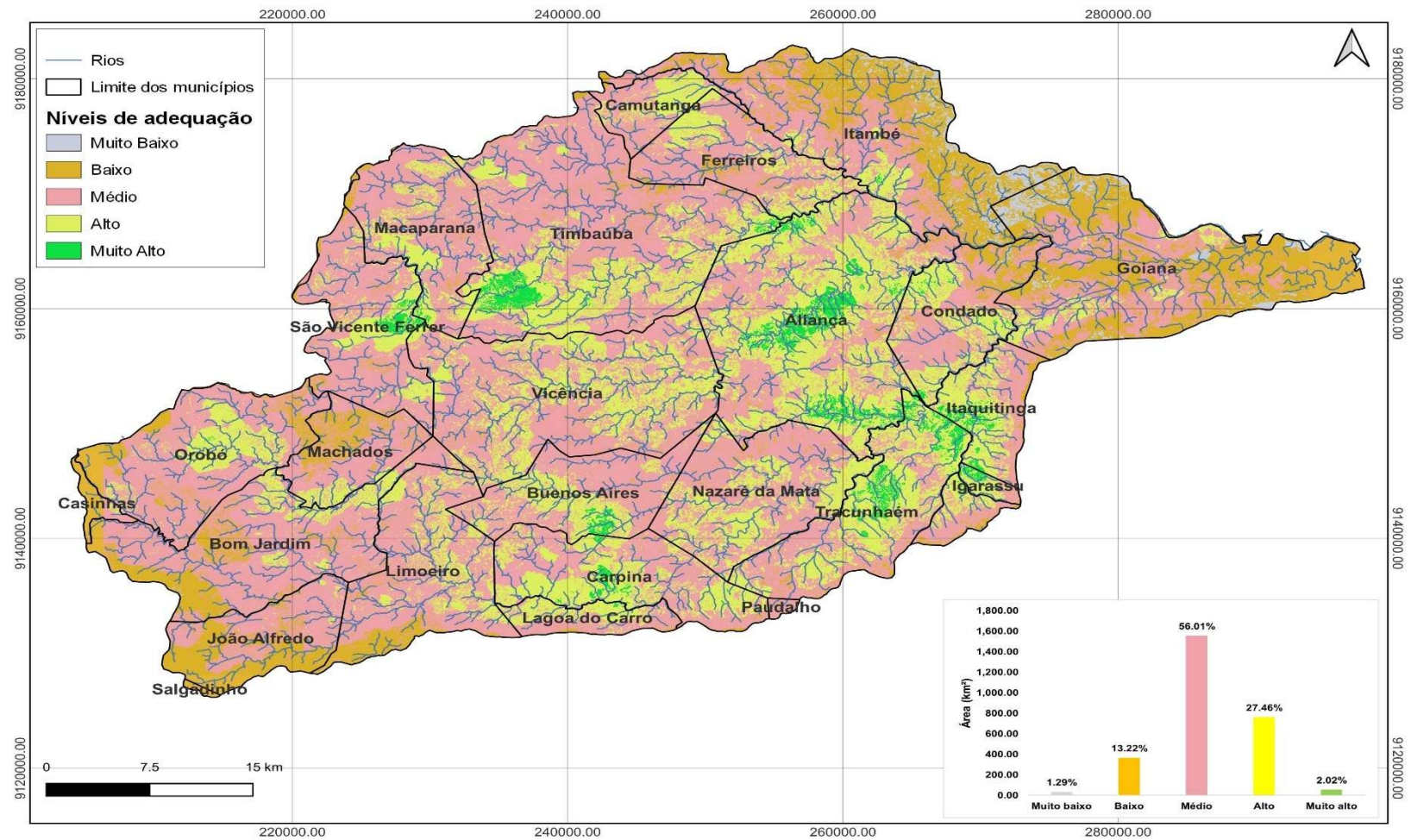
uso do solo não conflitivo ampliam consideravelmente a área disponível para barragens, mesmo em contextos ambientais diversos.

#### 4.2.1.3 Mapa de adequação

Os resultados permitiram classificar a área estudada em categorias de adequabilidade, distribuídas da seguinte forma: "muito alta" (2,02%), "alta" (27,46%), "média" (56,01%), "baixa" (13,22%) e "muito baixa" (1,29%). Observou-se que as classes "alta" e "média" ocuparam a maior extensão espacial da bacia, totalizando 83,47% da área. Regiões com adequabilidade "muito alta" (2,02%) concentram-se predominantemente nas áreas centrais e próximas aos principais cursos d'água da bacia hidrográfica estudada. Em contraste, as regiões com adequabilidade "muito baixa" (1,29%) se encontram principalmente nas áreas periféricas. Além disso, notou-se uma distribuição relativamente homogênea das áreas classificadas como adequabilidade "média" (56,01%) ao longo de toda a extensão da área de estudo (Figura 19).



Figura 19 – Mapa de adequação da bacia do Rio Goiana.

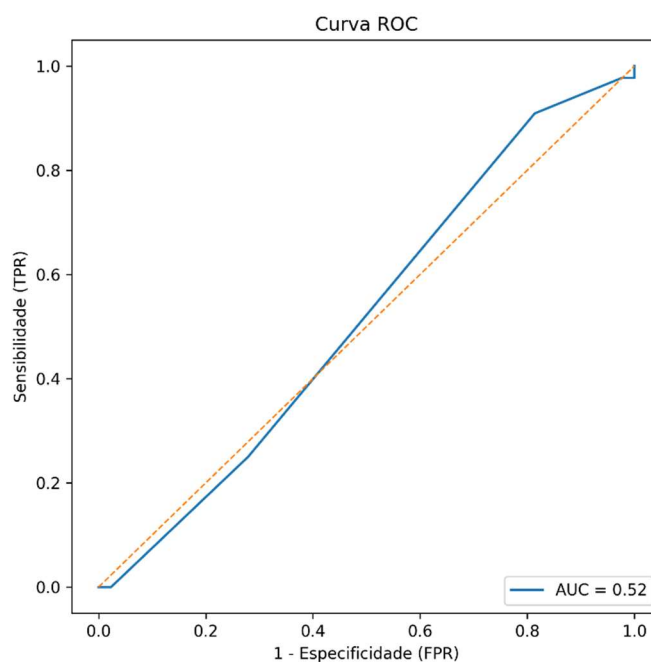


Fonte: A autora (2025)

#### 4.2.1.4 Avaliação de precisão

Para mensurar a confiabilidade do mapa de adequabilidade de locais para barragens, foi construída a curva ROC. Esse método utiliza a área sob a curva (AUC), cujo valor varia de 0,5 (classificador aleatório) a 1,0 (classificador perfeito), como métrica de acurácia. Inicialmente, organizou-se um conjunto de dados que relaciona cada nível de adequabilidade do mapa ao número de barragens existentes alinhadas a essas classes. Com as informações de 43 barragens existentes na área de estudo, calculou-se a AUC, obtendo-se o valor de 0,52. Esse resultado situa o modelo na faixa de desempenho “moderado” (0,4–0,6), evidenciando também moderada concordância entre o mapa de adequabilidade e a distribuição real das barragens (Figura 20).

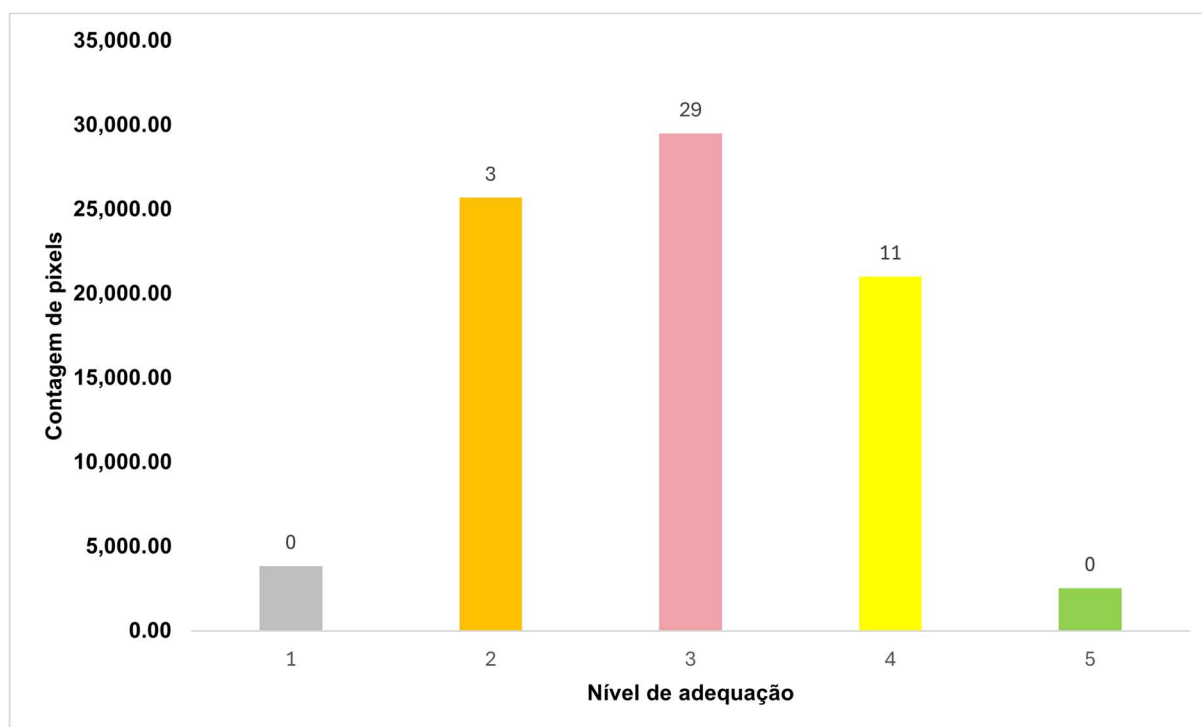
Figura 20 -Curva ROC para a adequação dos locais das barragens obtidas no mapa



Fonte: A autora (2025)

Pode-se inferir da Figura 21 que a maioria das barragens existentes (29) se encontram em locais de adequação média na bacia, enquanto 11 estão posicionadas em locais de alta adequabilidade.

Figura 21 - Validação do mapa de adequação do local da barragem usando barragens atuais conhecidas na área de estudo (os números acima das colunas mostram a quantidade atual das barragens)



Fonte: A autora (2025)

O uso da curva ROC para validação do mapa de adequabilidade, embora tenha revelado um desempenho apenas moderado ( $AUC = 0,52$ ), reflete uma prática cada vez mais comum em estudos recentes de seleção de sítios com suporte em SIG e AHP. De acordo com Aashish Kumar Karki et al., (2025), que aplicaram AHP e Fuzzy AHP para avaliação de suscetibilidade a inundações, a AUC é uma ferramenta confiável para verificar a acurácia preditiva de modelos multicritério, com valores superiores a 0,75 considerados bons e acima de 0,8 como excelentes. Nesse contexto, o valor obtido no presente estudo sugere necessidade de ajustes metodológicos ou inclusão de variáveis adicionais para maior refinamento do modelo.

Além disso, Mukomberanwa; Chaipa; Mutowo, (2025), ao utilizar o AHP para seleção de aterros sanitários no Zimbábue, também enfatizaram a limitação de acurácias intermediárias em ambientes com intensa urbanização e escassez de dados, similares à realidade do território estudado. Assim, a predominância de barragens existentes em áreas de adequabilidade média (29 das 43) não necessariamente compromete a robustez do modelo, mas destaca a complexidade da realidade hidrológica e territorial, reforçando a necessidade de ajustes contínuos no

processo decisório multicritério e possíveis integrações com abordagens fuzzy ou machine learning para aumento de desempenho preditivo.

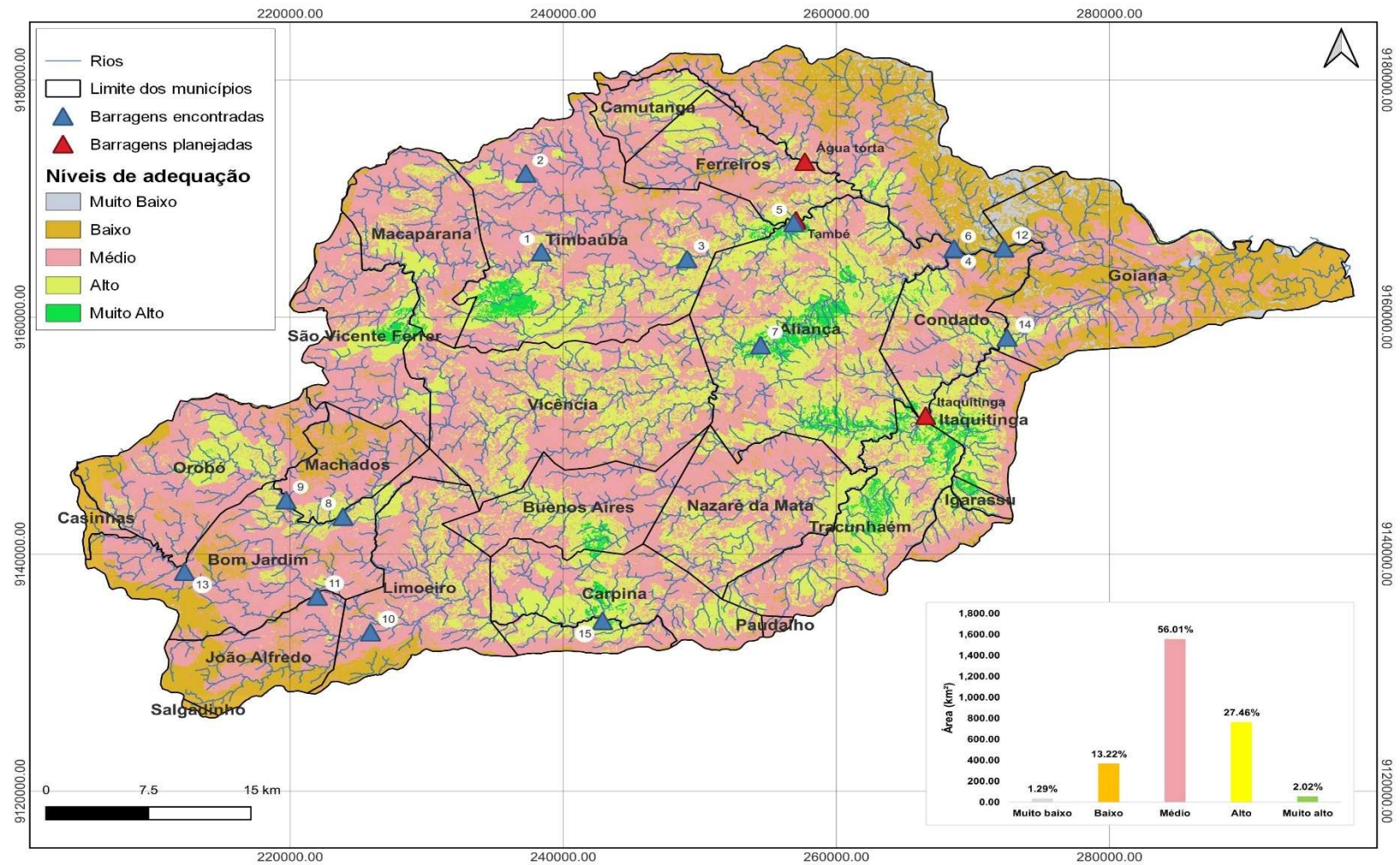
#### 4.2.1.5 Análise das barragens encontradas e planejadas

Após análise da precisão do mapa através das barragens existentes, analisou-se também a adequabilidade das barragens encontradas pelo software LOCASIN e as planejadas pela Secretaria de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco. Ao todo, foram 17 dispostas dentro da bacia do Rio Goiana, sendo 15 encontradas pelo software e 2 planejadas.

A partir da Figura 22, pode-se observar sua disposição no território da bacia onde as barragens encontradas estão sinalizadas com o símbolo azul e as planejadas, com o símbolo vermelho. Das barragens planejadas (uma no município de Itaquitinga e outra no município de Aliança), 100% coincidiram com terrenos de alta adequação. Das barragens encontradas, 26% estão em alta, 67% em média, 7% em baixa adequação. Percebe-se pelo mapa que foi encontrada uma barragem em Aliança quase no mesmo local da barragem planejada pela secretaria, conferindo uma validação ainda mais assertiva para os resultados deste estudo.

Com base em artigos recentes que aplicaram o método AHP em conjunto com SIG para validação de locais de infraestrutura hídrica ou ambiental, observa-se um crescente consenso sobre a eficácia dessa abordagem. O estudo de Onglassynov et al., (2025), por exemplo, ao aplicar AHP-GIS para recarga artificial de aquíferos no Cazaquistão, mostrou que a validação de campo corroborou amplamente os resultados do modelo, com áreas altamente favoráveis também sendo priorizadas por planos governamentais. Essa congruência entre dados modelados e decisões políticas fortalece a credibilidade do método.

Figura 22 – Categorias de adequação dos locais para barragens na bacia do Rio Goiana.



Fonte: A autora (2025)



No contexto brasileiro, a coincidência de 100% entre os locais de barragens planejadas pela Secretaria de Recursos Hídricos de Pernambuco e os pontos de alta adequabilidade do modelo reforça o argumento de acurácia metodológica. Esse tipo de validação empírica, semelhante ao relatado por Mukomberanwa; Chaipa; Mutowo, (2025) em estudos de destinação de resíduos em Zimbábue, sustenta que, mesmo em contextos com desafios de dados ou orçamentários, a integração entre técnicas multicritério e ferramentas geoespaciais pode fornecer resultados robustos e replicáveis. Essas evidências endossam a confiabilidade do LOCASIN e sugerem que o método tem alto potencial de replicação para outras bacias hidrográficas brasileiras com necessidades semelhantes de planejamento hídrico

## **4.2.2 BACIA DO RIO SIRINHAÉM**

### **4.2.2.1 Critérios de adequação**

Os critérios de adequação seguiram as mesmas premissas propostas para a bacia do Rio Goiana, onde foram classificados de 1 a 5 conforme Tabela 23 e Figura 23. A Figura 23 apresenta, em painéis (a) a (g), os mapas de adequabilidade obtidos para cada critério, enquanto a Tabela 23 resume os intervalos de valor de cada atributo, sua conversão em escore de 1 (muito baixo) a 5 (muito alto) e o correspondente nível qualitativo.

No que se refere aos atributos topográficos, observa-se no mapa de elevação (Figura 23a) que as áreas de menor altitude (até aproximadamente 172 m, as tonalidades verdes-escuro a azul) concentram os escores mais elevados (4 e 5), indicando melhor adequabilidade para a formação de reservatórios, em função do menor desnível relativo e do menor custo de escavação. Em contraste, as regiões de altas cotas (acima de 687 m, em tons alaranjados) foram classificadas como “muito baixo” (nível 1) segundo os intervalos da Tabela 23. A declividade complementar (Figura 23b) reforça esse padrão: encostas suaves (< 8,5%, nível 5) concentram-se nos vales principais, ao passo que vertentes íngremes (> 34%, nível 1) correspondem às divisórias de drenagem menos propícias a barramentos.

O critério de precipitação média anual (Figura 23c) evidencia bolsões de pluviosidade mais elevada (acima de 1.625 mm, escore 5), associados à porção nordeste da bacia, representando melhor potencial de recarga do reservatório. As

zonas intermediárias (1.396–1.564 mm, nível 3) perfazem grande parte da área central, enquanto os valores mais baixos ( $< 1.291$  mm, nível 1) ocorrem no extremo ocidental, restringindo a atratividade. De modo análogo, o mapa de densidade de drenagem (Figura 23d) atribui altas adequabilidades (nível 5) a trechos com rede fluvial mais densa ( $> 1,29$  km/km<sup>2</sup>), favorecendo maior captação de água, e penaliza zonas de drenagem esparsa ( $< 0,32$  km/km<sup>2</sup>) com níveis muito baixos de adequabilidade.

Quanto aos fatores de acesso e logística, o atributo distância até estradas (Figura 23e) mostra que áreas próximas às vias (até 2,1 km, nível 5) são mais bem avaliadas, facilitando transporte de materiais e manutenção. A adequabilidade decresce gradualmente até 8,4 km (nível 2) e torna-se “muito baixa” além de 8,4 km (nível 1), de acordo com os intervalos listados na Tabela 23.

Os parâmetros de solo e cobertura do terreno exibem forte heterogeneidade espacial. No mapa de tipo de solo (Figura 23f), as unidades SXe8 (solo argiloso profundo) obtiveram escore máximo (5), refletindo alta coesão e baixa permeabilidade; unidades LAd5 (solos pedregosos) foram classificadas com nível 1. Já o uso do solo (Figura 23g) demonstra que cursos d’água naturais alcançam nível 4, florestas nível 3 e áreas urbanas nível 1, refletindo restrições ambientais e sociais à implementação de novos reservatórios.

A combinação destes padrões espaciais permite identificar zonas com sinergia de bons desempenhos: particularmente, setores centrais e nordeste da bacia concentram altitudes moderadas, declividades suaves, elevada precipitação e boa densidade de drenagem, além de solos favoráveis e proximidade a estradas. Tais áreas emergem como as mais promissoras para prosseguimento da análise multicritério (AHP), pois atendem simultaneamente às exigências hidrológicas, geotécnicas e logísticas detalhadas na Tabela 23.

Tabela 23 - Níveis de adequação para o mapa na bacia do Rio Sirinhaém.

<b>Critério</b>	<b>Subcritério</b>	<b>Valor de adequação</b>	<b>Nível de adequação</b>
Densidade de drenagem (km/km <sup>2</sup> )	<=0.32	1	Muito baixo
	0.32 - 0.64	2	Baixo
	0.64 - 0.96	3	Médio
	0.96 - 1.29	4	Alto
	>=1.29	5	Muito alto
Precipitação (mm)	<=1291.73	1	Muito baixo
	1291.73 - 1396.56	2	Baixo
	1396.56 - 1564.52	3	Médio
	1564.52 - 1625.45	4	Alto
	>1625.45	5	Muito alto
Uso do solo	Área urbana	1	Muito baixo
	Agricultura	2	Baixo
	Floresta	3	Médio
	Corpo d'água	4	Alto
	Terra estéril	5	Muito alto
Tipo de solo	LAd5	1	Muito baixo
	PVAe7	2	Baixo
	-	3	Médio
	PVAd53	4	Alto
	SXe8	5	Muito alto
Declividade (%)	>=34.16	1	Muito baixo
	34.16 - 25.62	2	Baixo
	25.62 - 17.08	3	Médio
	17.08 - 8.54	4	Alto
	<=8.54	5	Muito alto
Elevação (m)	> 687.33	1	Muito baixo
	515.76 – 687.33	2	Baixo
	344.18 – 515.76	3	Médio
	172.60 – 344.18	4	Alto
	≤ 172.60	5	Muito alto
Distância até estradas (km)	> 8.41	1	Muito baixo
	6.31 – 8.41	2	Baixo
	4.20 – 6.31	3	Médio
	2.10 – 4.20	4	Alto
	≤ 2.10	5	Muito alto

Fonte: A autora (2025)

**Explicação dos tipos de solos:**

LAd5 - Latossolos Amarelos Distróficos + Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos

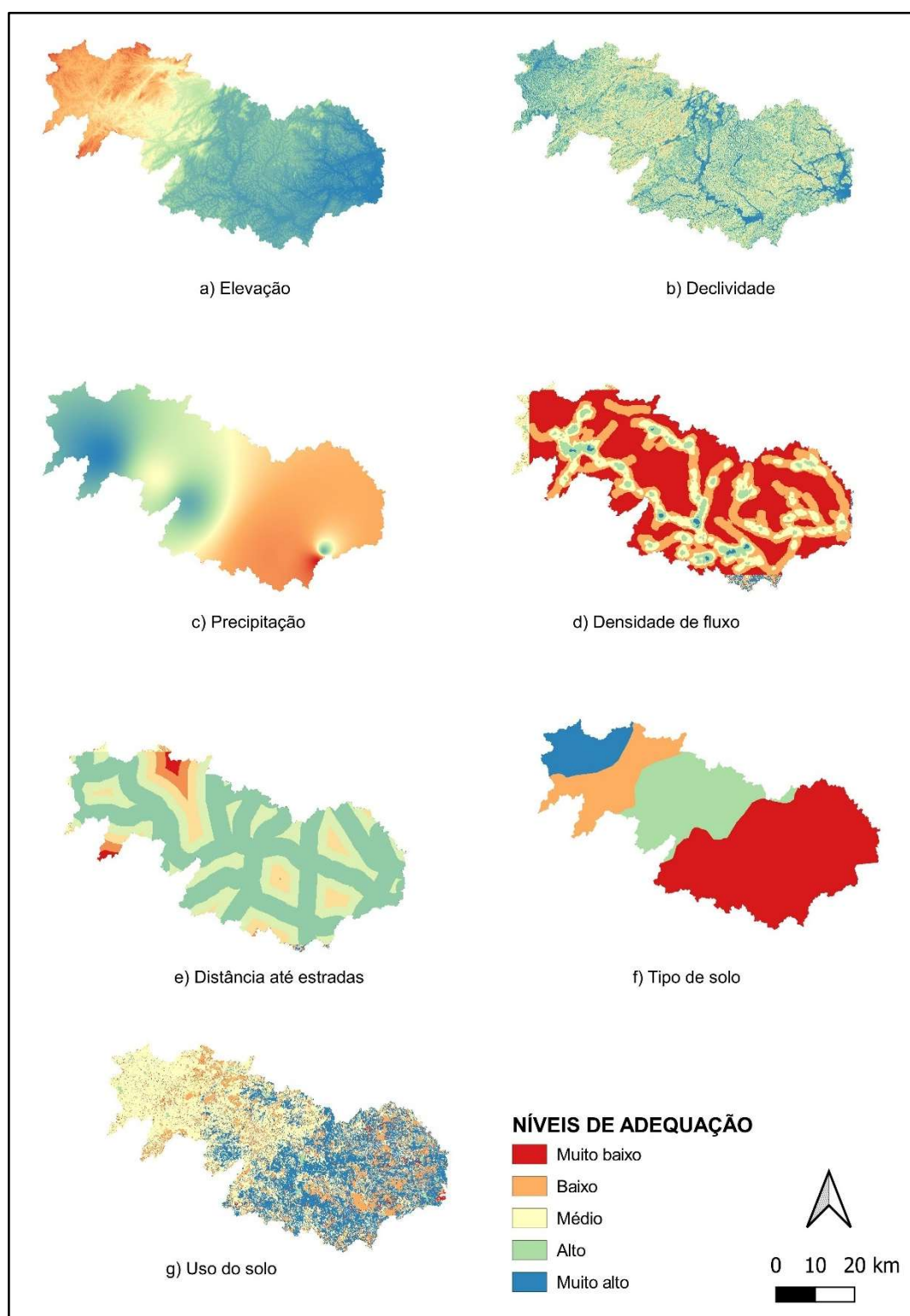
PVAe7 - Argissolos Vermelho-Amarelos Estróficos + Neossolos Litólicos Distróficos + Planossolos Haplicos Distróficos



PVAd53 - Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos + Planossolos Haplicos Eutróficos + Latossolos Amarelos Distróficos

SXe8 - Planossolos Haplicos Eutróficos + Argissolos Vermelho-Amarelos Eutróficos + Neossolos Litólicos Eutróficos

Figura 23 - Mapas classificados de critérios padronizados para seleção de locais para barragens na Bacia do Rio Sirinhaém



Fonte: A autora (2025)

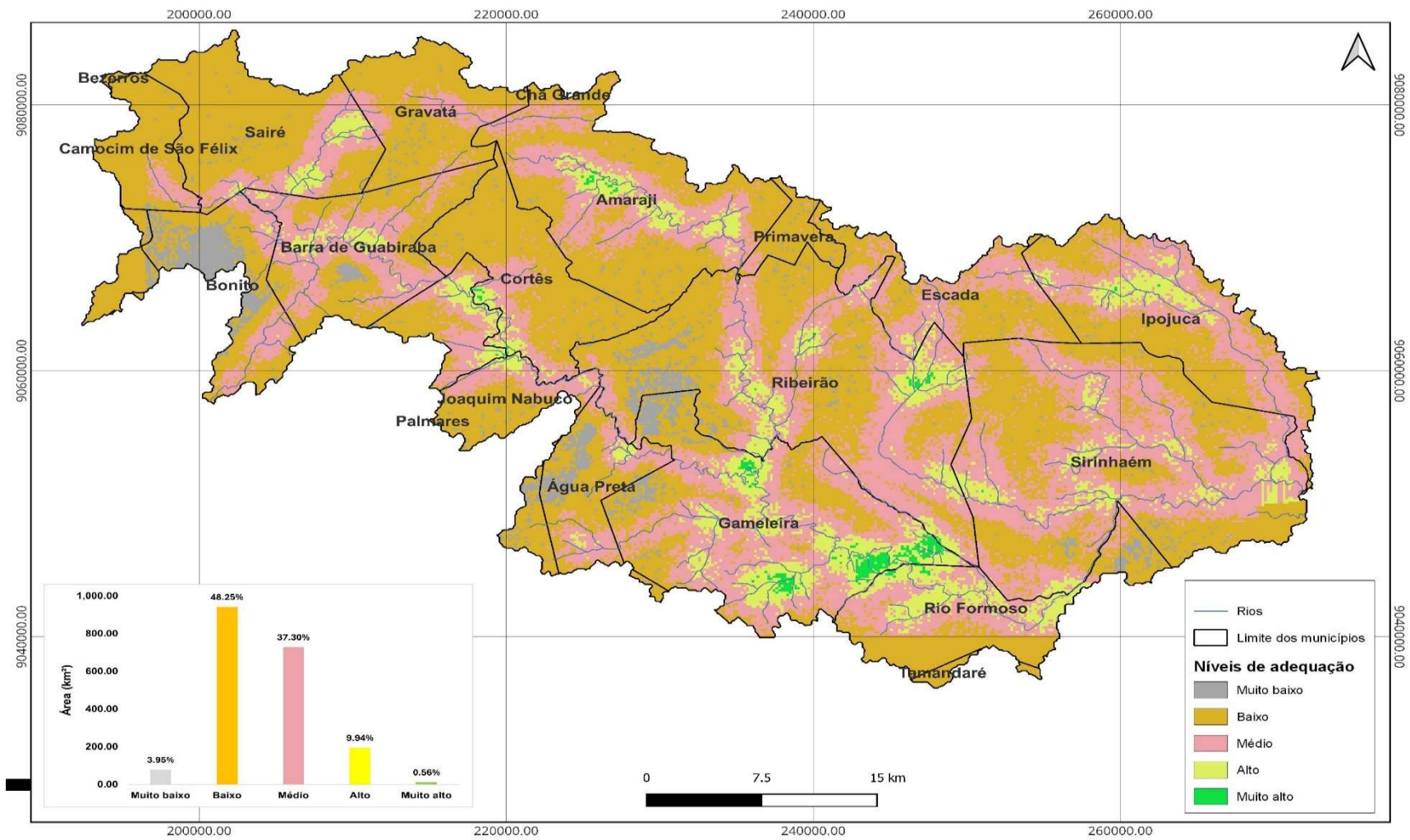
#### 4.2.2.2 Matriz de comparação em pares e pesos de critérios

Os pesos utilizados para categoria também foram os mesmos para as três bacias, conforme previsto na Tabela 22.

#### 4.2.2.3 Mapa de adequação

O mapa de adequação seguiu também a mesma metodologia para as três bacias e os resultados permitiram classificar a área estudada em categorias de adequabilidade, distribuídas da seguinte forma: "muito alta" (0,56%), "alta" (9,94%), "média" (37,30%), "baixa" (48,25%) e "muito baixa" (3,95%). Observou-se que as classes "média" e "baixa" ocuparam a maior extensão espacial da bacia, totalizando 85,55% da área. Regiões com adequabilidade "muito alta" (0,56%) concentram-se predominantemente nas áreas ao sul e próximas aos principais cursos d'água da bacia hidrográfica estudada. Em contraste, as regiões com adequabilidade "muito baixa" (3,95%) se encontram principalmente nas áreas periféricas (Figura 24).

Figura 24 - Mapa de adequação da bacia do Rio Sirinhaém.



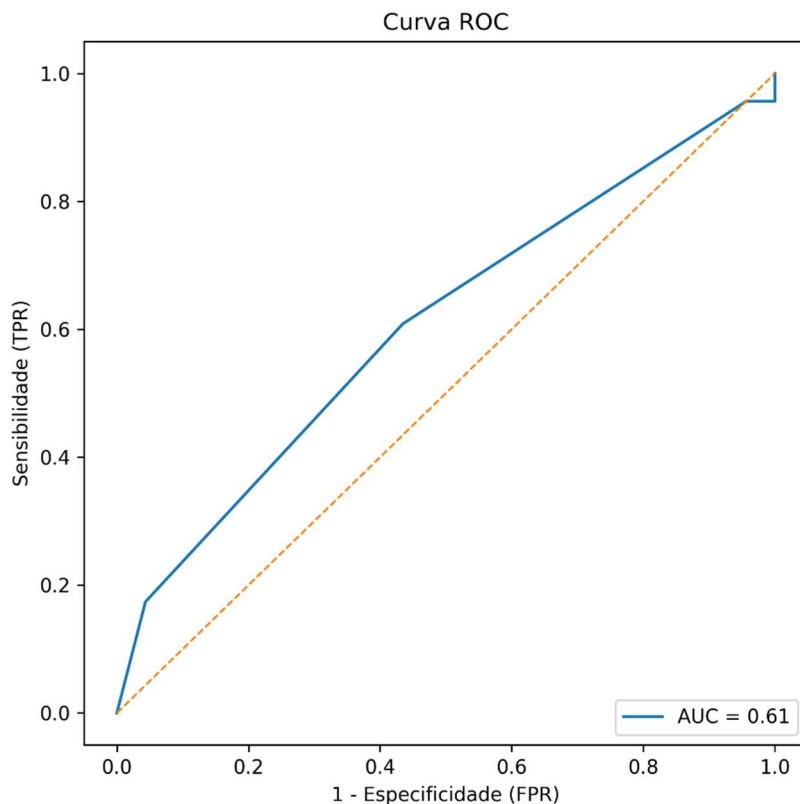
Fonte: A autora (2025)

#### 4.2.2.4 Avaliação de precisão

O modelo de classificação de adequação para implementação de barragens na bacia do Rio Sirinhaém foi avaliado confrontando as predições probabilísticas geradas pelo AHP com as 22 barragens existentes, registrando-se verdadeiros positivos, falsos positivos, verdadeiros negativos e falsos negativos em diferentes limiares de corte. Em seguida, construiu-se a Curva ROC para relacionar sensibilidade (TPR) e taxa de falsos positivos (FPR) e calculou-se a Área Sob a Curva (AUC).

Na Figura 25, o AUC alcançou 0,61, refletindo desempenho satisfatório de discriminação — superior ao acaso ( $AUC = 0,5$ ). Para limiares muito restritivos ( $FPR \approx 0$ ), a sensibilidade ainda é baixa ( $< 0,2$ ), evidenciando que a redução extrema de falsos positivos sacrifica a detecção de verdadeiros positivos. Com o relaxamento do limiar — deslocando-se ao longo da linha tracejada — a TPR eleva-se até cerca de 0,6 para  $FPR \approx 0,4$ , demonstrando o trade-off clássico entre sensibilidade e especificidade.

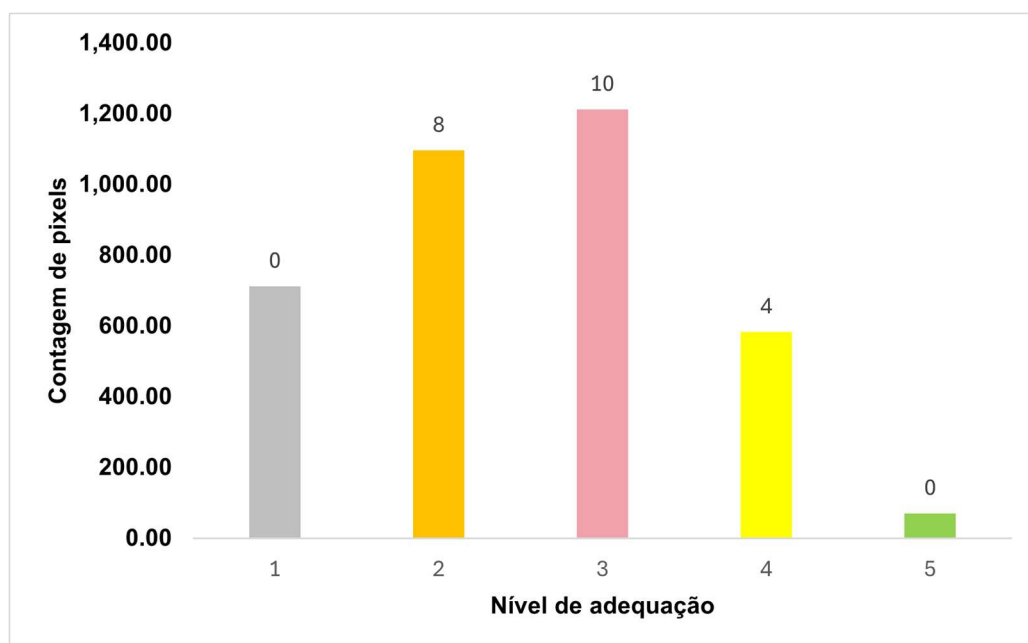
Figura 25 - Curva ROC para a adequação dos locais das barragens obtidas no mapa.



Fonte: A autora (2025)

A distribuição das 22 barragens nos níveis de adequação calculados pelo AHP aparece na Figura 26. Não há registros em “muito baixa” (nível 1) nem em “muito alta” (nível 5); 8 barragens encontram-se em “baixa” (nível 2), 10 em “média” (nível 3) e 4 em “alta” (nível 4). Essa concentração em classes intermediárias sugere alinhamento razoável entre o critério AHP e as escolhas históricas, ao passo que as áreas de pontuação máxima (nível 5) podem ter sido inviabilizadas por restrições logísticas, ambientais ou socioeconômicas não incluídas no modelo.

Figura 26 - Validação do mapa de adequação do local da barragem usando barragens atuais conhecidas na área de estudo (os números acima das colunas mostram a quantidade atual das barragens).



Fonte: A autora (2025)

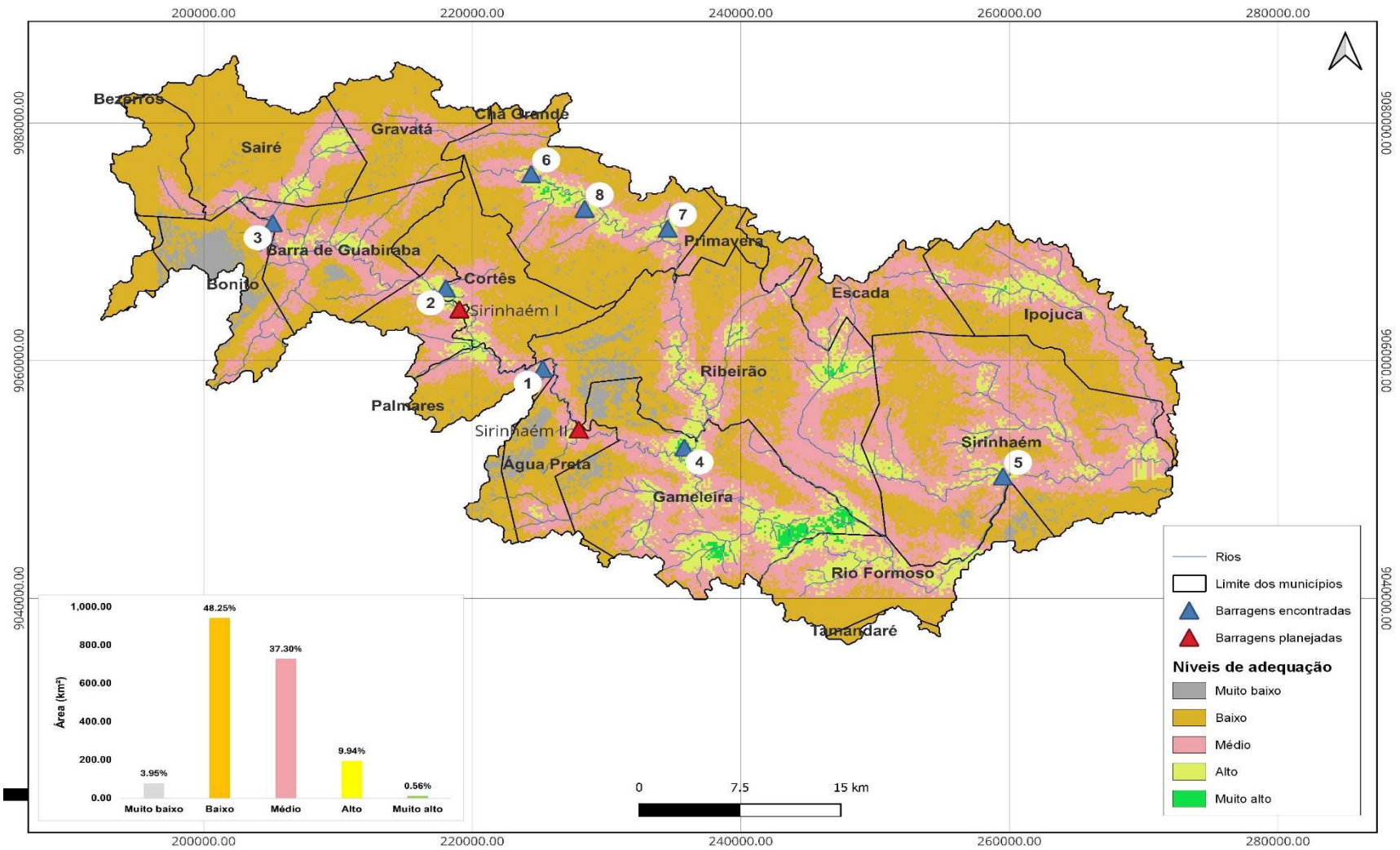
Em conclusão, a análise demonstra que o AHP oferece capacidade confiável de identificação de zonas adequadas, embora a inclusão de variáveis adicionais (acesso, custos de obra, condicionantes socioambientais) e o refinamento dos pesos hierárquicos possam elevar tanto o AUC quanto a precisão na seleção de áreas de adequação máxima.

#### 4.2.2.5 Análise das barragens encontradas e planejadas

A partir do mapa de adequação, validou-se os resultados das barragens para a bacia do rio Sirinhaém. Observa-se na Figura 27 que as duas barragens planejadas intituladas de Sirinhaém I e II pela Secretaria de Recursos Hídricos do Estado se encontram em áreas de alta adequabilidade. Já as 8 barragens encontradas pelo LOCASIN estão 25% em áreas de muito alta adequabilidade, 63% em áreas de alta e 13% em áreas de média adequabilidade. Pode-se verificar que nenhuma barragem foi encontrada em locais classificados como baixa e muito baixa adequabilidade.



Figura 27 - Categorias de adequação dos locais para barragens na bacia do Rio Sirinhaém.



Fonte: A autora (2025)



### 4.2.3 BACIA DO RIO MUNDAÚ

#### 4.2.3.1 Critérios de adequação

Para a bacia do Rio Mundaú, a caracterização espacial dos locais potenciais para implementação de barragens também considerou sete critérios já apresentados anteriormente. A Figura 28 apresenta, em painéis (a) a (g), os mapas de adequabilidade segundo cada atributo, enquanto a Tabela 24 detalha os intervalos de cada subcritérios, o escore de 1 (“muito baixo”) a 5 (“muito alto”) e o nível qualitativo correspondente.

No aspecto topográfico, o mapa de elevação (Figura 28a) destaca que as cotas inferiores a 409 m (nível 5) concentram as melhores condições, pois permitem maior capacidade de armazenamento com menor escavação. As elevações médias (409–702 m, níveis 3 e 4) apresentam adequabilidade intermediária, e as zonas acima de 849 m (nível 1) são desfavorecidas devido ao maior custo de obra e ao menor controle de vazão. A declividade (Figura 28b) reforça essa tendência: encostas suaves ( $\leq 26\%$  → nível 5) localizam-se principalmente próximo ao leito principal, enquanto declividades superiores a 105% (nível 1) ocorrem nas serras marginais, pouco propícias a barramentos.

O critério de precipitação anual média (Figura 28c) mostrou duas concentrações pluviométricas distintas: valores entre 867 – 935 mm (nível 3) dominam o centro da bacia, enquanto faixas superiores a 1002 mm (nível 5) estão concentradas sobretudo no setor nordeste. As menores chuvas ( $< 799$  mm, nível 1) ocorrem no extremo oeste, reduzindo aí a viabilidade de captação. De modo complementar, a densidade de drenagem (Figura 28d) atribui “muito alto” (nível 5) aos trechos com rede fluvial mais adensada ( $> 2,29$  km/km<sup>2</sup>), principalmente ao longo dos tributários centrais, e penaliza áreas de drenagem esparsa ( $< 0,57$  km/km<sup>2</sup>, nível 1), relegadas a menor prioridade.

Em termos de acessibilidade, o mapa de distância até estradas (Figura 28e) evidencia que as zonas até 0,26 km das rodovias (nível 5) são as mais favorecidas logisticamente. A adequabilidade diminui para faixas intermediárias (0,26–1,04 km, níveis 3–4) e torna-se “muito baixa” além de 1,04 km (nível 1), refletindo o aumento de custos com transporte de materiais.

O tipo de solo (Figura 28f) apresenta uma divisão clara: a unidade PVA d2 (solos aluviais profundos) obteve escore máximo (nível 5), em razão de baixa permeabilidade e alta coesão; já as áreas com unidade RRe3 (solos rasos sobre rocha) ficaram em “muito baixo” (nível 1). Por fim, o uso do solo (Figura 28g) mostra grande heterogeneidade: zonas agrícolas e de floresta recebem adequabilidade média (níveis 2–3), corpos d’água natural nível 4 e áreas urbanas nível 1, devido a restrições ambientais e de ocupação.

A sobreposição destes padrões indica que as porções centrais e nordeste da bacia do Mundaú, onde se combinam baixas altitudes, declividades suaves, elevada precipitação, alta densidade de drenagem, proximidade a estradas e solos adequados, emergem como as mais promissoras para prosseguimento da análise multicritério (AHP). Esses locais serão priorizados na atribuição de pesos e no cálculo do índice sintético de adequabilidade, visando à seleção final dos sítios de barragem.

Tabela 24 - Níveis de adequação para o mapa na bacia do Rio Mundaú.

<b>Critério</b>	<b>Subcritério</b>	<b>Valor de adequação</b>	<b>Nível de adequação</b>
Densidade de drenagem (km/km <sup>2</sup> )	≤ 0.57	1	Muito baixo
	0.57 – 1.14	2	Baixo
	1.14 – 1.72	3	Médio
	1.72 – 2.29	4	Alto
	>2.29	5	Muito alto
Precipitação (mm)	≤ 799.85	1	Muito baixo
	799.85 – 867.42	2	Baixo
	867.42 – 935.00	3	Médio
	935.00 – 1002.57	4	Alto
	> 1002.57	5	Muito alto
Uso do solo	Área urbana	1	Muito baixo
	Agricultura	2	Baixo
	Floresta	3	Médio
	Corpo d'água	4	Alto
	Terra estéril	5	Muito alto
Tipo de solo	RRe3	1	Muito baixo
	-	2	Baixo
	-	3	Médio
	-	4	Alto
	PVAd2	5	Muito alto
Declividade (%)	> 105.9752	1	Muito baixo
	79.48 – 105.97	2	Baixo
	52.99 – 79.48	3	Médio
	26.49 – 52.99	4	Alto
	≤ 26.49	5	Muito alto
Elevação (m)	>849.55	1	Muito baixo
	702.84 - 849.55	2	Baixo
	556.13 - 702.84	3	Médio
	409.43 - 556.13	4	Alto
	≤409.43	5	Muito alto
Distância até estradas (km)	> 1.04	1	Muito baixo
	0.78 - 1.04	2	Baixo
	0.52 - 0.78	3	Médio
	0.26 - 0.52	4	Alto
	≤0.26	5	Muito alto

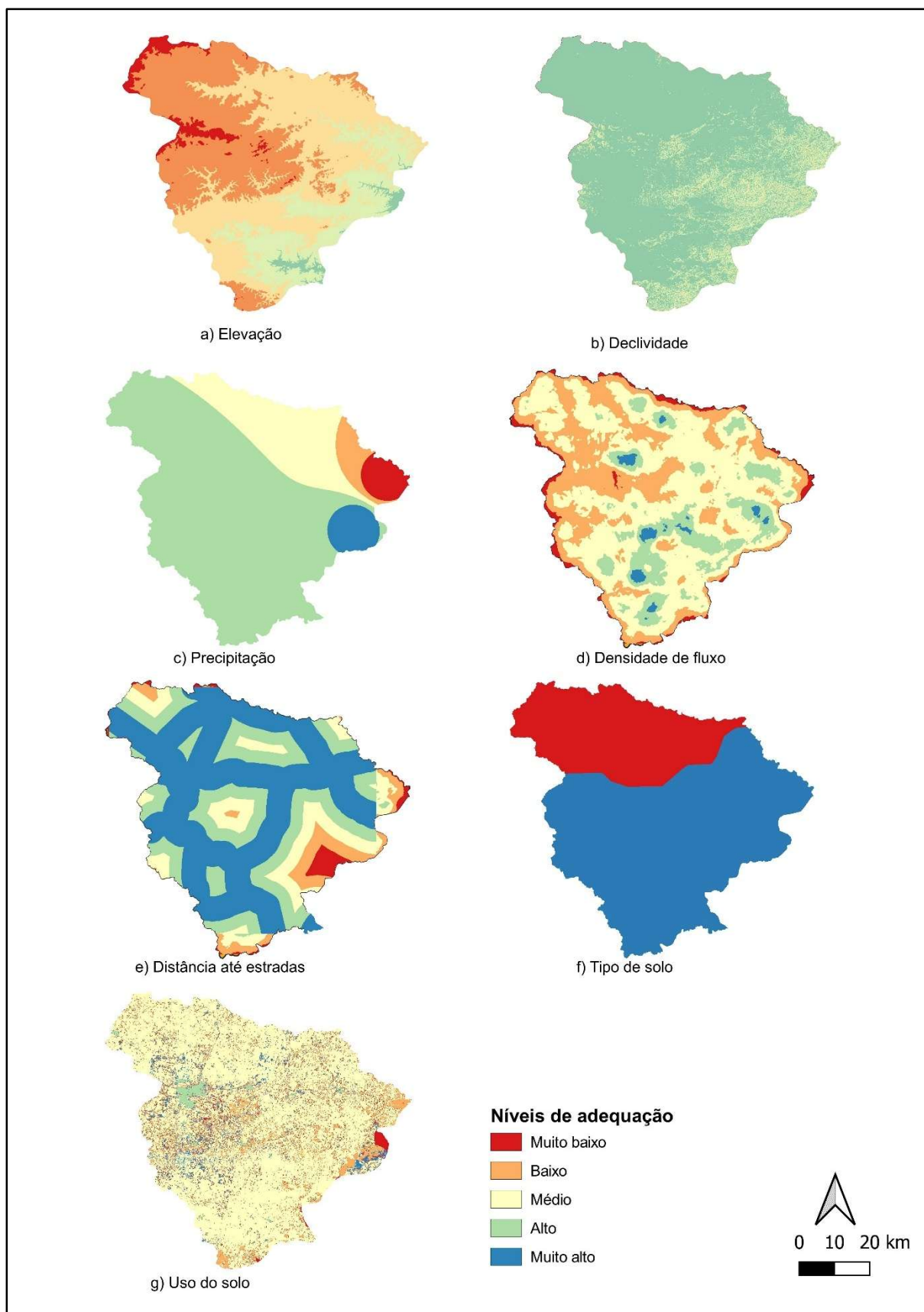
Fonte: A autora (2025)

**Explicação dos tipos de solos:**

RRe3 – RRe - Neossolos Regolíticos Eutroficis

PVAd2 - PVAd - Argissolos Vermelho-Amarelos Distroficis

Figura 28 - Mapas classificados de critérios padronizados para seleção de locais para barragens na Bacia do Rio Mundaú.



Fonte: A autora (2025)

#### 4.2.3.2 Matriz de comparação em pares e pesos de critérios

Os pesos utilizados para categoria foram os mesmos para as três bacias, conforme previsto na Tabela 22.

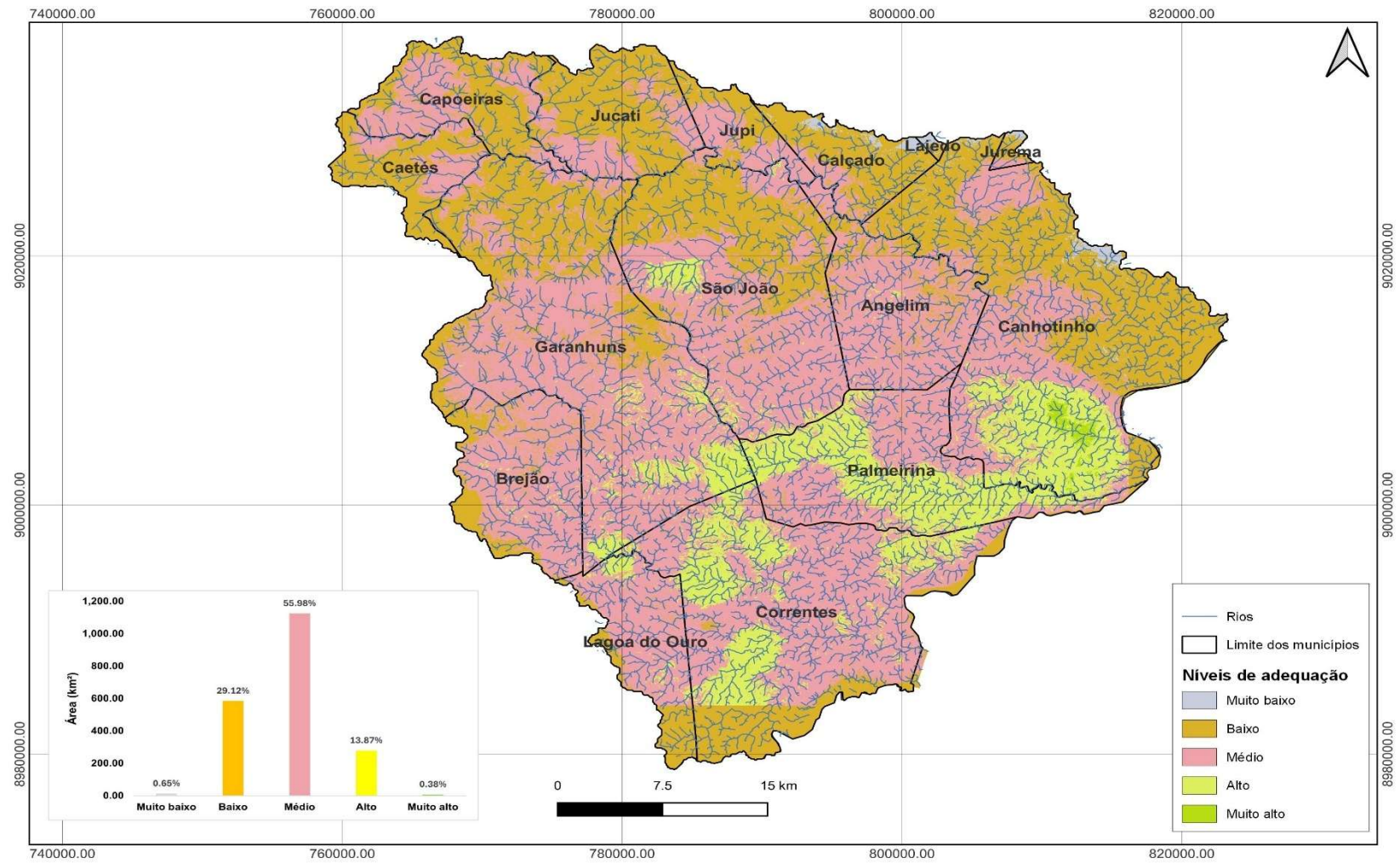
#### 4.2.3.3 Mapa de adequação

Na bacia do Rio Mundaú, o mapa da Figura 29 sintetiza, para cada pixel, o nível de adequabilidade à implementação de barragens em cinco categorias (muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto), complementado por um gráfico de barras que quantifica a extensão de cada classe. Observa-se que a categoria “médio” domina com 55,98% da área, concentrando-se nas zonas centrais e meridionais (municípios de Garanhuns, Brejão e parte de Lagoa do Ouro), onde a combinação equilibrada de declividade, precipitação e proximidade a estradas configura condições promissoras para uma avaliação mais detalhada via AHP. Em contraste, quase 30% da bacia encontra-se em nível “baixo”, sobretudo no extremo norte e leste (regiões de Capoeiras, Caetés e Jucati), onde altitudes elevadas, encostas íngremes ou menor pluviosidade reduzem a viabilidade inicial.

A classe “alto”, que abrange 13,87% do território, forma corredores lineares ao longo dos cursos d’água principais (notadamente entre Palmeirina e Correntes) e em bolsões centrais, locais em que a declividade suave, a densidade de drenagem favorável e o fácil acesso rodoviário justificam prioridade em estudos subsequentes. As faixas “muito baixo” (0,65%) e “muito alto” (0,38%) aparecem em áreas pontuais: as primeiras nos topos de serra de Capoeiras, onde a topografia extrema inviabiliza barramentos, e as segundas em vales profundos próximos a Palmeirina e à Lagoa do Ouro, onde altitude reduzida, encostas amenas, solos coesivos e chuvas abundantes atingem o escore máximo.

Em termos gerais, cerca de 85% da bacia apresenta adequabilidade de nível médio a baixo, indicando que a maior parte do território requer adaptações ou investimentos adicionais. Apenas uma fração restrita – cerca de 14% – atinge níveis “alto” e “muito alto”, concentrando-se em áreas que combinam condições hidrológicas, geotécnicas e logísticas ideais. Esses resultados são fundamentais para orientar a seleção dos sítios prioritários na fase de AHP e modelagem hidrossedimentológica, concentrando esforços nas localidades com maior potencial de sucesso.

Figura 29 - Mapa de adequação da bacia do Rio Mundaú.



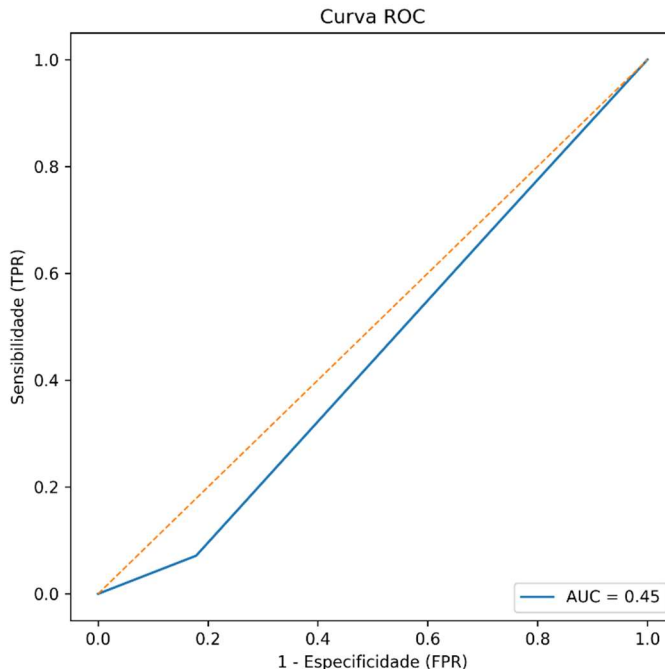
Fonte: A autora (2025)

#### 4.2.3.4 Avaliação de precisão

Para a bacia do Rio Mundaú, o desempenho do modelo AHP foi avaliado sobre 28 barragens existentes. As probabilidades geradas pelo AHP foram confrontadas com a presença real das barragens em vários limiares de corte, permitindo traçar a Curva ROC (Figura 30) e calcular a Área Sob a Curva (AUC).

Na Figura 30, a Curva ROC revela AUC de 0,45, indicando poder de discriminação inferior ao acaso ( $AUC = 0,5$ ). Em limiares muito restritivos ( $FPR \approx 0$ ), a sensibilidade permanece abaixo de 10%, o que demonstra extrema dificuldade em reconhecer verdadeiros positivos quando se busca minimizar falsos positivos. Ao relaxar o limiar, a sensibilidade atinge cerca de 40% para  $FPR \approx 0,4$ , mas isso se faz às custas de um elevado número de classificações incorretas. O desempenho global sugere que o modelo, nas condições atuais, não captura adequadamente as variáveis que diferenciam áreas com e sem barragens no Mundaú.

Figura 30 - Curva ROC para a adequação dos locais das barragens obtidas no mapa.

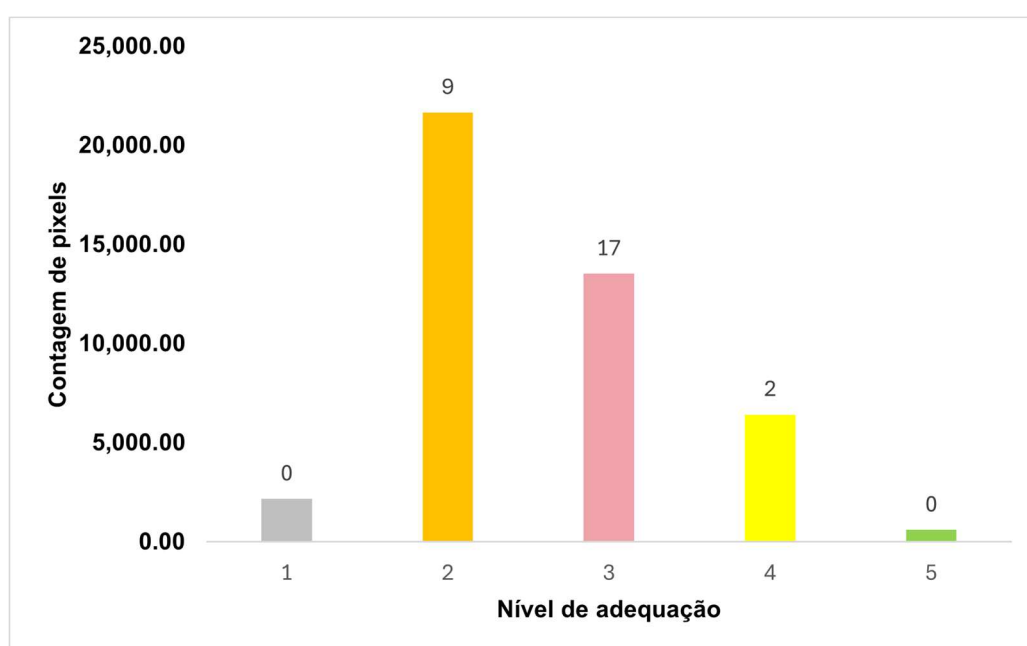


Fonte: A autora (2025)

A distribuição das 28 barragens em função dos níveis de adequação calculados pelo AHP é apresentada na Figura 31. Constatou-se ausência de barragens em

classes “muito baixa” (nível 1) e “muito alta” (nível 5); 9 barragens situam-se em adequação “baixa” (nível 2), 17 em “média” (nível 3) e apenas 2 em “alta” (nível 4). Essa concentração nas faixas intermediárias indica que as escolhas históricas de implementação tendem a ocorrer em locais de adequação moderada, enquanto áreas avaliadas como ideais pelo modelo (nível 5) permanecem subexploradas ou inviabilizadas por condicionantes não contemplados.

Figura 31 - Validação do mapa de adequação do local da barragem usando barragens atuais conhecidas na área de estudo (os números acima das colunas mostram a quantidade atual das barragens).



Fonte: A autora (2025)

Em síntese, o AHP, aplicado isoladamente, mostra-se insuficiente para discriminar com confiança zonas aptas no Rio Mundaú. A inclusão de variáveis adicionais, tais como restrições ambientais específicas, acesso rodoviário e custos de implementação, aliada ao reequilíbrio dos pesos dos critérios, poderá elevar o AUC e aprimorar a correspondência entre a classificação de adequação e a localização real das barragens.

#### 4.2.3.5 Análise das barragens encontradas e planejadas

No mapa da Figura 32, as sete barragens detectadas automaticamente pelo LOCASIN (triângulos azuis) distribuem-se de forma expressiva em áreas de alta

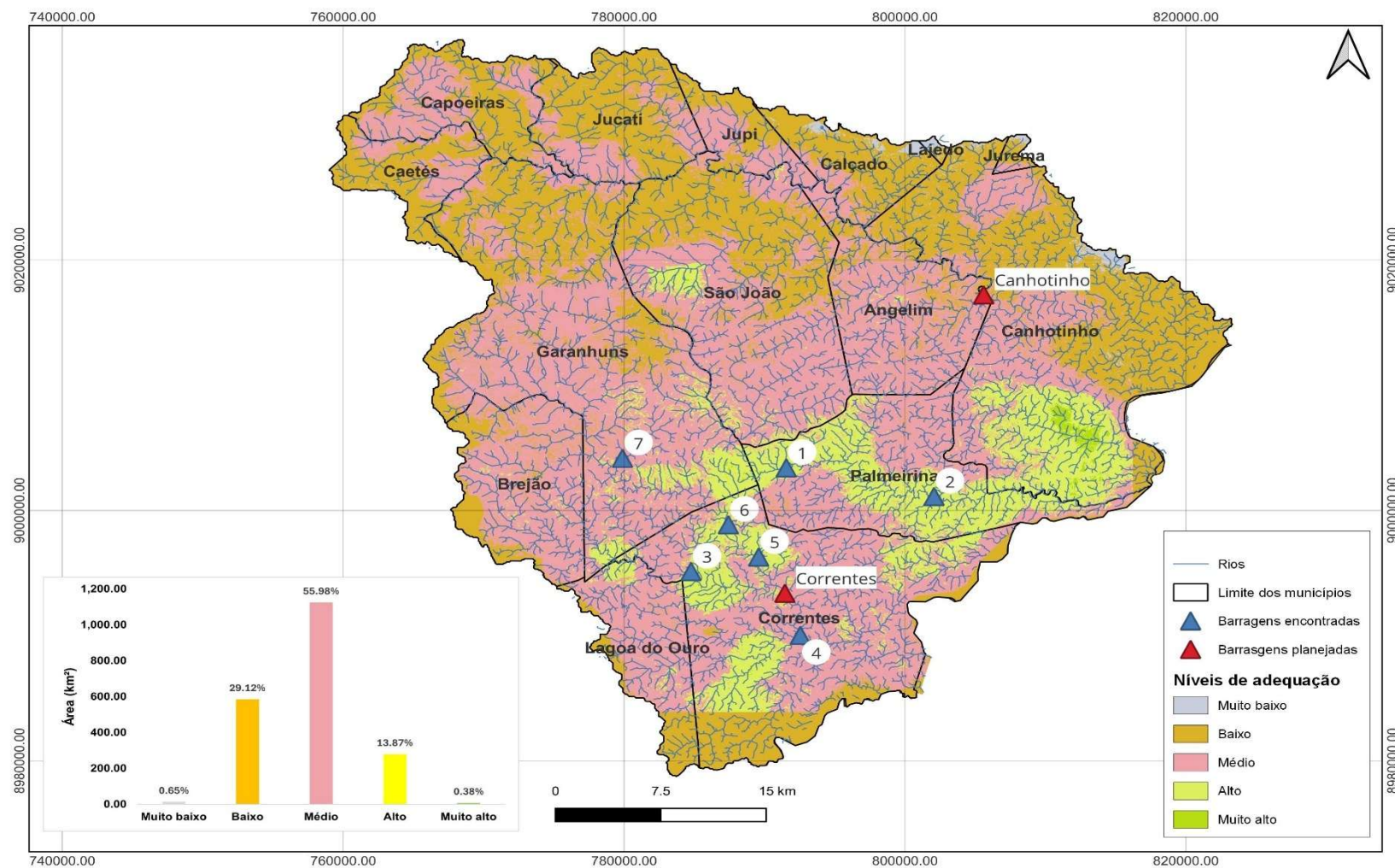


viabilidade: cinco (71%) encontram-se em zonas de adequabilidade alta, contornando principalmente os vales mais favoráveis da bacia, onde declividades suaves, solos coesivos e redes de drenagem densas se combinam com bom acesso viário. Uma única barragem (15%) situa-se em área de adequabilidade muito alta, posicionada num bolsão de vale profundo em que a confluência de pluviometria elevada, altitude reduzida e consistência do solo atinge o grau máximo de viabilidade. Apenas uma das estruturas identificadas (14%) recai em setor de adequabilidade média, demonstrando como o LOCASIN consegue priorizar regiões de maior potencial técnico.

Em contraponto, as duas barragens planejadas pela Secretaria de Recursos Hídricos – Correntes e Canhotinho (triângulos vermelhos) – estão ambas instaladas em áreas de adequabilidade média. Essa classificação intermediária indica que, embora atendam a requisitos básicos de declividade e captação, não exploram plenamente as condições hidráulicas e geotécnicas mais vantajosas apontadas pelo modelo. A sobreposição evidencia um desalinhamento entre o planejamento institucional e os resultados quantitativos do AHP automatizado: as áreas apontadas como de maior potencial (alta e muito alta adequabilidade) não foram selecionadas nos projetos oficiais.

Este contraste sugere uma reavaliação criteriosa dos locais aprovados, pois realocar as barragens de Correntes e Canhotinho para trechos vizinhos em níveis alto ou muito alto poderia reduzir custos de construção, otimizar o armazenamento hídrico e minimizar impactos ambientais. A capacidade do LOCASIN de identificar automaticamente os pontos de maior adequabilidade provê uma base objetiva para que gestores ajustem o zoneamento de novas barragens, assegurando maior eficiência técnica e sustentabilidade na gestão dos recursos hídricos da bacia do Rio Mundaú.

Figura 32 – Mapa de adequação com as barragens encontradas e planejadas para a bacia do Rio Mundaú.



Fonte: A autora (2025)

## 5 CONCLUSÕES

Este estudo desenvolveu e implementou uma metodologia automatizada para a identificação e seleção estratégica de locais para implementação de barragens, integrando Modelos Digitais de Terreno (MDT) com a metodologia de Análise Multicritério (Analytic Hierarchy Process – AHP), objetivando aprimorar a escolha mais adequada de locais para implementação de barragens, tendo como estudo de caso este tipo de obra existente ou projetado no estado de Pernambuco. A partir das análises conduzidas e dos resultados obtidos, é possível apresentar as seguintes conclusões:

- A integração dos dados espaciais de alta resolução do projeto Pernambuco Tridimensional (PE3D) com técnicas avançadas de geoprocessamento se demonstrou eficaz para a identificação precisa e detalhada de locais potenciais para a construção de barragens. Esta abordagem permitiu uma avaliação refinada das características morfométricas e topográficas nas bacias hidrográficas estudadas, proporcionando subsídios técnicos robustos para a seleção adequada das áreas mais promissoras;
- A aplicação do método automatizado por meio do software LOCASIN mostrou elevado desempenho operacional, caracterizado por uma alta capacidade de processamento e pela rapidez na identificação de locais tecnicamente viáveis. Destacaram-se 15 locais potenciais na bacia hidrográfica do Rio Goiana, 8 na bacia do Rio Sirinhaém e 7 na bacia do Rio Mundaú. Esses locais apresentaram uma relação otimizada entre o volume de água armazenável e a extensão da área inundada, indicando uma eficiente utilização espacial com redução significativa dos impactos ambientais;
- A validação dos locais selecionados por intermédio da Análise Multicritério AHP confirmou uma alta aderência dos resultados obtidos aos critérios técnicos, ambientais e socioeconômicos estabelecidos. Os resultados das análises ROC permearam o patamar entre 50 a 60%, confirmando a robustez metodológica, a precisão analítica e a aplicabilidade prática do método proposto;

- O uso da metodologia AHP proporcionou uma análise estruturada e transparente. Tal transparência pode favorecer o engajamento das partes interessadas, potencializando a aceitação das decisões estratégicas decorrentes do estudo e reforçando a confiabilidade das soluções propostas;
- Comparativamente às abordagens tradicionais, baseadas na identificação manual e subjetiva, a metodologia desenvolvida pode levar a vantagens expressivas em termos de eficiência, rapidez, precisão e replicabilidade.
- O estudo destaca a relevância de integrar múltiplos fatores geográficos, ambientais e socioeconômicos na concepção e execução de projetos de infraestrutura hídrica. A consideração desses fatores garante uma abordagem holística, que equilibra sustentabilidade ambiental, viabilidade econômica e responsabilidade social, minimizando potenciais conflitos e maximizando os benefícios diretos e indiretos para a população local;
- Por fim, o estudo reforça a importância estratégica do investimento em tecnologias e abordagens contemporâneas para enfrentar desafios complexos relacionados à gestão hídrica. O uso integrado de informações geoespaciais detalhadas e técnicas analíticas avançadas constitui uma prática recomendável, passível de replicação em outras regiões com desafios semelhantes, potencializando o desenvolvimento sustentável e a segurança hídrica.

## 6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento deste estudo busca proporcionar reflexões sobre as estratégias adotadas na pesquisa, desde as etapas metodológicas e processos de análise, até a interpretação dos resultados e formulação das conclusões apresentadas. Considerando a relevância dos temas tratados e as possibilidades de ampliação científica, sugerem-se as seguintes recomendações para trabalhos futuros:

- Aplicar a metodologia desenvolvida neste trabalho em outras escalas de bacias hidrográficas, incluindo regiões com características distintas em termos de geomorfologia, climatologia e densidade de infraestrutura hídrica. Isso permitirá avaliar a generalidade e adaptabilidade da abordagem proposta, além de promover comparações que aprimorem sua robustez e eficácia operacional;
- Expandir a aplicação da metodologia para áreas com maior diversidade de condições climáticas, especialmente regiões semiáridas e áreas metropolitanas densamente povoadas. Avaliar como variações climáticas regionais podem influenciar a precisão da análise multicritério, permitindo ajustes metodológicos específicos e regionalizados;
- Investir em pesquisas e levantamentos adicionais que integrem dados geoespaciais mais detalhados sobre variáveis ambientais, sociais e econômicas locais. Recomenda-se especificamente aumentar a resolução espacial e temporal das informações utilizadas, com o objetivo de garantir maior acurácia e confiabilidade nas decisões relacionadas à seleção de locais para construção de barragens;
- Avaliar e testar outros métodos e algoritmos de localização automatizada de barragens além do software LOCASIN, promovendo estudos comparativos detalhados que possam identificar eventuais vantagens operacionais ou limitações específicas de cada ferramenta tecnológica disponível;

- Realizar estudos complementares para validar a metodologia AHP com a inclusão de critérios adicionais ou alternativos, como fatores econômicos detalhados, impactos socioculturais e vulnerabilidades ecológicas específicas, permitindo análises ainda mais abrangentes e sustentáveis;
- Explorar a integração de ferramentas avançadas de inteligência artificial, aprendizado de máquina e mineração de dados geoespaciais na metodologia proposta, buscando otimizar o processo de seleção de locais potenciais para infraestrutura hídrica e aumentando a capacidade preditiva e adaptativa da abordagem;
- Promover estudos e simulações adicionais utilizando diferentes cenários climáticos projetados para o futuro, a fim de verificar a capacidade adaptativa da infraestrutura hídrica planejada, avaliando especificamente sua eficiência sob eventos climáticos extremos e mudanças climáticas previstas;
- Incentivar a realização de pesquisas interdisciplinares que integrem hidrologia, economia ambiental, sociologia e gestão pública para fornecer uma base técnica robusta e multidimensional ao planejamento e execução de políticas públicas relacionadas à locação de barragens.
- Elaborar um algoritmo de locação de barragens com interface gráfica de modo a facilitar a interação do usuário com os parâmetros a serem inseridos.

## 7 REFERÊNCIAS

AASHISH KUMAR KARKI *et al.* Comparative analysis between AHP & Fuzzy AHP: a case study on flood susceptibility of koshi river basin. **Journal of land management and geomatics education**, [s. l.], vol. VII, nº 2082, 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Conjuntura de Recursos Hídricos do Brasil**. Brasília: [s. d.], 2024. Disponível em: [www.gov.br/ana/pt-br](http://www.gov.br/ana/pt-br). .

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil: Informe 2020**. Brasília: [s. d.], 2020. Disponível em: [www.ana.gov.br](http://www.ana.gov.br). .

AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA (APAC). **Bacia do rio Goiana. Recife**,. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/bacias-hidrograficas-rio-goiana/164-bacias-hidrograficas-rio-goiana/194-bacia-do-rio-goiana>. Acesso em: 27 abr. 2025.

AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA (APAC). **BACIA DO RIO SIRINHAÉM**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <http://200.238.107.184/bacias-hidrograficas/40-bacias-hidrograficas/205-bacia-do-rio-sirinhaem>. Acesso em: 29 abr. 2025.

AHMAD, B. A. **The application of GIS based multi-criteria analysis for selecting an optimum water reservoir site**. 2014. [s. l.], 2014. Disponível em: <http://eprints.utm.my/id/eprint/50777/>. Acesso em: 6 jul. 2025.

AHMAD, B. A.; SHAHABI, H.; AHMAD, B. Bin. Application of GIS based multi-criteria analysis in site selection of water reservoirs (case study: Batu Pahat, Malaysia). **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, [s. l.], vol. 9, nº 11, p. 995–1005, 2015.

AHMADI, H.; SHAMSAI II, A. **Preliminary Site Selection of Pumped Storage Hydropower Plants-A GIS-based approach**. [S. l.]: [s. d.], 2009.

AL-ADAMAT, R. GIS as a decision support system for siting water harvesting ponds in the basalt aquifer/NE Jordan. **Journal of Environmental Assessment Policy and Management**, [s. l.], vol. 10, n° 2, p. 189–206, 2008.

ALI, Z. *et al.* Hybrid Fuzzy AHP and Frequency Ratio Methods for Assessing Flood Susceptibility in Bayech Basin, Southwestern Tunisia. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], vol. 15, n° 21, 2023.

AL-KHUZAIE, M. M.; JANNA, H.; AL-ANSARI, N. Assessment model of water harvesting and storage location using GIS and remote sensing in Al-Qadisiyah, Iraq. **Arabian Journal of Geosciences**, [s. l.], vol. 13, n° 21, 2020a.

AL-KHUZAIE, M. M.; JANNA, H.; AL-ANSARI, N. Assessment model of water harvesting and storage location using GIS and remote sensing in Al-Qadisiyah, Iraq. **Arabian Journal of Geosciences**, [s. l.], vol. 13, n° 21, 2020b.

ALRAWI, I. *et al.* Insights of dam site selection for rainwater harvesting using GIS: A case study in the Al- Qalamoun Basin, Syria. **Heliyon**, [s. l.], vol. 9, n° 9, 2023.

AL-RUZOUQ, R. *et al.* Dam site suitability mapping and analysis using an integrated GIS and machine learning approach. **Water (Switzerland)**, [s. l.], vol. 11, n° 9, 2019.

AMMAR, A. *et al.* **Identification of suitable sites for rainwater harvesting structures in arid and semi-arid regions: A review**. [S. l.]: International Research and Training Center on Erosion and Sedimentation and China Water and Power Press, 2016.

ANWER, H. A.; HASSAN, A. Identifying Suitable Dam Locations in Al Dinder: Integrating GIS, Remote Sensing, and Hydrological Factors. **International Journal of Engineering and Geosciences**, [s. l.], vol. 10, n° 3, p. 290–302, 2025.



ARAÚJO, M. S. **Indicadores Socioambientais e aplicabilidade no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Mundaú-PE**. 2013. Dissertação de Mestrado - UFS, São Cristóvão - SE, 2013.

BABAN, S. M. J.; WAN-YUSOF, K. Modelling Optimum Sites for Locating Reservoirs in Tropical Environments. **Water Resources Management**, [s. l.], vol. 17, p. 1–17, 2003. Disponível em: <http://nativenet.uthscsa.edu/archive/nl/9409/0019.html>.

BOONMAN, A.; FUKUDA, S.; JUNPEN, A. Spatial Multi-Criteria Land Suitability Analysis for Community-Scale Biomass Power Plant Site Selection. **Energies**, [s. l.], vol. 18, nº 17, 2025.

BORGES, A. P. de L. *et al.* USO DA GEOINFORMAÇÃO PARA ANÁLISE DA VULNERABILIDADE À EROSÃO HÍDRICA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GOIANA. **Caderno de Geografia**, [s. l.], vol. 33, nº 73, p. 366, 2023.

BRASIL. **Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens – SNISB**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/portal-snisb/consultar-barragem>. Acesso em: 29 abr. 2025.

BRASIL; CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS (CNRH). Resolução nº 143, de 10 de julho de 2012. **Estabelece diretrizes para a classificação de barragens por volume total do reservatório e altura do maciço**: Brasília, DF,

BRASIL; MINISTÉRIO DA ECONOMIA. SECRETARIA ESPECIAL DO PROGRAMA DE PARCERIAS DE INVESTIMENTOS. **Plano Integrado de Longo Prazo de Investimentos em Infraestrutura (PILPI): relatório consolidado**. Brasília: [s. d.], 2021.

BRASIL; MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL; AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH): Síntese executiva**. Brasília: [s. d.], 2019.

BRASIL. MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. SECRETARIA NACIONAL DE SEGURANÇA HÍDRICA. **Plano Nacional de Recursos Hídricos: PNRH 2022-2040 – Plano de Ação: Estratégia para a Implementação. Volume II.** Brasília: [s. d.], 2022.

CAPILLA, J. A.; CARRIÓN, J. A.; HERNANDEZ, E. Optimal site selection for upper reservoirs in pump-back systems, using geographical information systems and multicriteria analysis. **Renewable Energy**, [s. l.], vol. 86, p. 429–440, 2016.

CASTELLI, F.; MASI, M.; ARRIGHI, C. Participatory multi-criteria decision making for optimal siting of dams. 2024, Vienna, Austria. **EGU General Assembly 2024**. Vienna, Austria: [s. d.], 2024.

CHAKRABORTY, S.; BANIK, D. Design of a material handling equipment selection model using analytic hierarchy process. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], vol. 28, nº 11–12, p. 1237–1245, 2006.

CIRILO, J. A. *et al.* PERNAMBUCO TRIDIMENSIONAL: Base de dados espaciais para planejamento urbano e gestão territorial. 2014, Bento Gonçalves. (ABRHidro, Org.) **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**. Bento Gonçalves: [s. d.], 2014.

COLAK, H. E.; MEMISOGLU, T.; GERCEK, Y. Optimal site selection for solar photovoltaic (PV) power plants using GIS and AHP: A case study of Malatya Province, Turkey. **Renewable Energy**, [s. l.], vol. 149, p. 565–576, 2020.

DAUD, N. M. *et al.* Dam failure risk factor analysis using AHP method. 2021. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. [S. l.]: IOP Publishing Ltd, 2021.

DROBNE, S.; LISEC, A. Multi-attribute Decision Analysis in GIS: Weighted Linear Combination and Ordered Weighted Averaging. **Informatica**, [s. l.], vol. 33, p. 459, 2009. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/220166125>.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: [s. d.], 2006. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/93143/1/sistema-brasileiro-de-classificacao-dos-solos2006.pdf>. Acesso em: 8 abr. 2025.

ESAVI, V. *et al.* Comparison the AHP and FUZZY-AHP Decision Making Methods in Underground DAM Site Selection in Taleghan Basin. [s. l.], vol. 22, p. 27–34, 2013.

ESTEVES, L. V. *et al.* Caracterização Morfométrica e Uso do Solo da Bacia Hidrográfica do Rio Sirinhaém (BHRS), Pernambuco, Brasil. [s. l.], p. 2609–2623, 2023.

FAKPOR, A. M. *et al.* GIS-Based Modeling of Site Suitability and Capacity for Small Hydropower Generation in Edo State, Southern Nigeria. **European Scientific Journal, ESJ**, [s. l.], vol. 21, nº 21, p. 78, 2025.

FERRAZ, G. F. **Simulação hidrológica e hidrodinâmica do impacto de enchentes na bacia do rio Sirinhaém e avaliação de sistema de controle proposto**. 2019. Dissertação de mestrado - UFPE, [s. l.], 2019.

FOUDI, S. *et al.* The impact of multipurpose dams on the values of nature's contributions to people under a water-energy-food nexus framing. **Ecological Economics**, [s. l.], vol. 206, 2023.

FRANÇA, L. L. S. *et al.* Aplicação da extração automática de Rede de Drenagem na Engenharia Urbana a partir de dados de alta resolução do PE3D utilizando softwares livres. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s. l.], vol. 17, nº 1, p. 349–365, 2024.

GHOSH, A.; BERA, B. Identification of potential dam sites for severe water crisis management in semi-arid fluoride contaminated region, India. **Cleaner Water**, [s. l.], vol. 1, 2024.

GÖKMENER, S. *et al.* Site selection for floating photovoltaic system on dam reservoirs using sine trigonometric decision making model. **Ocean Engineering**, [s. l.], vol. 281, 2023.

GOMES, D. D. M. *et al.* Mapeamento e caracterização dos sistemas ambientais da bacia hidrográfica do Rio Mundaú - PE/AL. **Caderno de Geografia**, [s. l.], vol. 26, nº 2, 2016.

GRANADOS, A. *et al.* Exploring the role of reservoir storage in enhancing resilience to climate change in southern europe. **Water (Switzerland)**, [s. l.], vol. 13, nº 1, 2021.

GRGET, G.; BAČIĆ, M. Importance of long-term monitoring of the earth dams. 2024. **Proceedings of 10th Symposium on Doctoral Studies in Civil Engineering**. [S. l.]: University of Zagreb Faculty of Civil Engineering, 2024. p. 35–43. Disponível em: <https://www.grad.hr/phd-simpozij/2024/clanak/04/>.

ICOLD / CIGB. **Constitution Statuts**. [S. l.]: [s. d.], 2011.

IEA. **Economic Benefits of Multipurpose Hydropower Reservoirs in the United States**. [S. l.]: [s. d.], 2015. Disponível em: <http://energy.gov/downloads/doe-public-> .

INTERNACIONAL HYDROPOWER ASSOCIATION. **Harnessing the power of dams for flood protection**. [S. l.], 2023. Disponível em: [https://www.hydropower.org/blog/harnessing-the-power-of-dams-for-flood-protection?utm\\_source](https://www.hydropower.org/blog/harnessing-the-power-of-dams-for-flood-protection?utm_source). Acesso em: 30 jun. 2025.

IPCC. **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge/New York: [s. d.], 2022.

JEULAND, M. The economics of dams. **Oxford Review of Economic Policy**, [s. l.], vol. 36, nº 1, p. 45–68, 2020.

KADAM, A. K. *et al.* Identifying Potential Rainwater Harvesting Sites of a Semi-arid, Basaltic Region of Western India, Using SCS-CN Method. **Water Resources Management**, [s. l.], vol. 26, n° 9, p. 2537–2554, 2012.

KALDI, J.; BACHU, S. Site Selection and Storage Capacity for Geosequestration of Carbon Dioxide. 2009, VANCOUVER, BC, CANADA. **AAPG/SEG/SPE HEDBERG CONFERENCE “GEOLOGICAL CARBON SEQUESTRATION: PREDICTION AND VERIFICATION”**. VANCOUVER, BC, CANADA: [s. d.], 2009.

KALOGEROPOULOS, K. *et al.* Geographic information systems and remote sensing for local development. Reservoirs positioning. *In: GEOINFORMATICS FOR GEOSCIENCES: ADVANCED GEOSPATIAL ANALYSIS USING RS, GIS AND SOFT COMPUTING*. [S. l.]: Elsevier, 2023. p. 223–243.

KARAKUŞ, C. B.; YILDIZ, S. Gis-multi criteria decision analysis-based land suitability assessment for dam site selection. **International Journal of Environmental Science and Technology**, [s. l.], vol. 19, n° 12, p. 12561–12580, 2022.

KELMAN, R. *et al.* Sustainable Hydropower Planning in Gabon. [s. l.], 2022. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/2212.09901>.

KENNISH, R. *et al.* Selecting sites for large-scale deployment of artificial reefs in Hong Kong: Constraint mapping and prioritization techniques. 2002. **ICES Journal of Marine Science**. [S. l.]: Academic Press, 2002.

KHARAZI, P.; ARAB KHAZAEI, E.; HESHMATPOUR, A. Delineation of suitable sites for groundwater dams in the semi-arid environment in the northeast of Iran using GIS-based decision-making method. **Groundwater for Sustainable Development**, [s. l.], vol. 15, 2021.

KHARAZI, P.; KHAZAEI, E. A.; HESHMATPOUR, A. Delineation of suitable sites for groundwater dams in the semi-arid environment in the northeast of Iran using GIS-based decision-making method. **Groundwater for Sustainable Development**, [s. l.], vol. 15, 2021.

KROIS, J.; SCHULTE, A. GIS-based multi-criteria evaluation to identify potential sites for soil and water conservation techniques in the Ronquillo watershed, northern Peru. **Applied Geography**, [s. l.], vol. 51, p. 131–142, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.04.006>.

LATIF, A.; SABBAGHIAN, R. J.; FERESHTEHPOUR, M. **Risk-informed multi-criteria assessment of dam reservoirs for floating photovoltaic farms in arid and semi-arid regions**. [S. l.]: [s. d.], 2025. Disponível em: <https://www.authorea.com/users/815921/articles/1325985-risk-informed-multi-criteria-assessment-of-dam-reservoirs-for-floating-photovoltaic-farms-in-arid-and-semi-arid-regions?commit=678dd74d4cc70708bfa0ef57b70f5b2ed2689608>.

LEE, S.; KANG, D. Analyzing the effectiveness of a multi-purpose dam using a system dynamics model. **Water (Switzerland)**, [s. l.], vol. 12, nº 4, 2020.

LEMPERIÈRE, F. *et al.* The huge potential of new dams is based upon pumping. 2022. **E3S Web of Conferences**. [S. l.]: EDP Sciences, 2022.

LIU, J. *et al.* **Method for site selection of underground reservoir in over-exploitation area and determination of regulation and storage capacity**. Concessão: 2019.

LOPES, P. V. F. *et al.* Sustainability assessment model for Brazilian hydroelectric projects using multicriteria analysis. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, [s. l.], vol. 51, 2022.

LUIS-RUIZ, J. M. *et al.* Optimal location of hydraulic energy storage using geographic information systems and multi-criteria analysis. **Journal of Energy Storage**, [s. l.], vol. 49, 2022.

MAAFA, Z.; BADI, I. Integrating Multi-Criteria Decision-Making and Geographic Information Systems in Landfill Site Selection: A Comprehensive Review.

**International Journal of Sustainable Development Goals**, [s. l.], vol. 1, p. 289–309, 2025.

MAPBIOMAS. **Projeto de mapeamento anual da cobertura e uso do solo do Brasil**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/>. Acesso em: 30 maio 2025.

MARCUZZO, F. N.; ROMERO, V.; CARDOSO, M. R. D. DETALHAMENTO HIDROMORFOLÓGICO DA BACIA DO RIO MUNDAÚ. 2011, Maceió. **XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Maceió: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2011.

MASI, M. *et al.* Participatory multi-criteria decision making for optimal siting of multipurpose artificial reservoirs. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], vol. 370, 2024.

MOHAMED, N. N. Importance of Aswan High Dam to Egypt. *In*: HANDBOOK OF ENVIRONMENTAL CHEMISTRY. [S. l.]: Springer Verlag, 2019. vol. 79, p. 53–72.

MOHAMMED, H. A.; ABED, B. S. Feasibility and Storage Capacity of Water Harvesting Dams in Al-Ghadaf Valley / Western Iraq. **International Journal of Design and Nature and Ecodynamics**, [s. l.], vol. 19, nº 5, p. 1715–1724, 2024.

MUKOMBERANWA, N. T.; CHAIPA, B.; MUTOWO, G. GIS-Integrated Analytical Hierarchy Process (AHP) for optimal landfill site selection in Kadoma City, Zimbabwe. **Sustainable Environment**, [s. l.], vol. 11, nº 1, 2025.

NATHAN, R.; LOWE, L. The Hydrologic Impacts of Farm Dams. **Australasian Journal of Water Resources**, [s. l.], vol. 16, nº 1, p. 75–83, 2012.

NOORI, A. M.; PRADHAN, B.; AJAJ, Q. M. Dam site suitability assessment at the Greater Zab River in northern Iraq using remote sensing data and GIS. **Journal of Hydrology**, [s. l.], vol. 574, p. 964–979, 2019.

OLIVEIRA, M. A.; NASCIMENTO, J. P. H. Análise estrutural da Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú, nordeste do Brasil, a partir da extração de lineamentos de drenagem e relevo. 2018. **SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOGRAFIA**. [S. l.]: [s. d.], 2018. Disponível em: <https://www.sinageo.org.br/2018/trabalhos/1/1-386-2137.html>. Acesso em: 1 maio 2025.

OLUSHOLA SO; EHIGIATOR-IRUGHE R. **Bathymetric and Volumetric Analysis of Jebba (Hydropower) Dam Harnessing its Capability for Multipurpose Use** *Nigerian Journal of Environmental Sciences and Technology (NIJEST)* [www.nijest.com](http://www.nijest.com). [S. l.]: [s. d.], 2017. Disponível em: [www.nijest.com](http://www.nijest.com). .

ONGLASSYNOV, Z. *et al.* GIS-Based Multi-Criteria Assessment of Managed Aquifer Recharge (MAR) Zones Using the Analytic Hierarchy Process (AHP) Method in Southern Kazakhstan. **Water (Switzerland)**, [s. l.], vol. 17, nº 18, 2025.

OTHMAN, A. A. *et al.* GIS-Based modeling for selection of dam sites in the Kurdistan Region, Iraq. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, [s. l.], vol. 9, nº 4, 2020.

PADMAVATHY, A. S. *et al.* Checkdam site selection using GIS approach. **Advances in Space Research**, [s. l.], vol. 13, nº 11, p. 123–127, 1993.

PARRA, G. G.; TEIXEIRA, B. A. N. Analysis of scenarios resulting from the soil sealing of spaces intended for the circulation and permanence of pedestrians. **Urbe**, [s. l.], vol. 12, 2020.

PATLE, G. T. *et al.* Estimation of infiltration rate from soil properties using regression model for cultivated land. **Geology, Ecology, and Landscapes**, [s. l.], vol. 3, nº 1, p. 1–13, 2019.

PAZ, Y. M. *et al.* PLANEJAMENTO E GESTÃO AMBIENTAL DE BACIAS HIDROGRÁFICAS A PARTIR DA MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA E ESTUDO DE CENÁRIOS ALTERNATIVOS DE USO E COBERTURA DO SOLO  
ENVIRONMENTAL MANAGEMENT OF WATERSHEDS FROM THE



HYDROSEDIMENTOLOGICAL MODELING AND STUDY OF ALTERNATIVE LAND COVER SCENARIOS. [s. l.], nº 3, p. 675–687, 2022.

PERES, J. M. **CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GOIANA, PERNAMBUCO, BRASIL**. 2020. Trabalho de conclusão de curso - UFRPE, [s. l.], 2020.

PETHERAM, C.; GALLANT, J.; READ, A. An automated and rapid method for identifying dam wall locations and estimating reservoir yield over large areas. **Environmental Modelling and Software**, [s. l.], vol. 92, p. 189–201, 2017.

PORTELA, B. M. *et al.* Análise da vulnerabilidade à inundação na Bacia Hidrográfica do rio Sirinhaém, utilizando o Método de Análise Hierárquica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s. l.], vol. 16, nº 03, p. 1247–1262, 2023.

RAHMATI, O. *et al.* GIS-based site selection for check dams in watersheds: Considering geomorphometric and topo-hydrological factors. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], vol. 11, nº 20, 2019a.

RAHMATI, O. *et al.* PMT: New analytical framework for automated evaluation of geo-environmental modelling approaches. **Science of the Total Environment**, [s. l.], vol. 664, p. 296–311, 2019b.

RAJAKARUNA, P.; GHOSH, S.; HOLMATOV, B. Analysis of Rainfall Variability and Water Extent of Selected Hydropower Reservoir Using Google Earth Engine (GEE): A Case Study from Two Tropical Countries, Sri Lanka and Vietnam. [s. l.], 2023.

RANE, N. L.; ACHARI, A.; CHOUDHARY, S. P. MULTI-CRITERIA DECISION-MAKING (MCDM) AS A POWERFUL TOOL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT: EFFECTIVE APPLICATIONS OF AHP, FAHP, TOPSIS, ELECTRE, AND VIKOR IN SUSTAINABILITY. **International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science**, [s. l.], 2023.

RODRIGUES DE OLIVEIRA, B.; APARECIDO QUEIROZ DUARTE, M. Automatic and Semi-automatic Analytic Hierarchy Process (AHP). [s. l.], 2025. Disponível em: <https://editorapantanal.com.br/journal>.

SANTANA, A. C. A. de *et al.* Estudo de tendência de mudanças climáticas, eventos extremos e análise comparativa entre dois municípios de regiões distintas do semiárido pernambucano. **Geografia Ensino & Pesquisa**, [s. l.], vol. 28, p. e86280, 2024.

SANTOS, A. M. dos. **IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE OS RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GOIANA-PERNAMBUCO**. 2010. Dissertação - UFPE, Recife, 2010.

SCHUMANN, G. J. P.; BATES, P. D. **Editorial: The Need for a High-Accuracy, Open-Access Global Digital Elevation Model**. [S. l.]: Frontiers Media S.A., 2020.

SHAO, Z. *et al.* Identification of potential sites for a multi-purpose dam using a dam suitability stream model. **Water (Switzerland)**, [s. l.], vol. 12, nº 11, 2020.

SILVA, G. M.; DEMETRIO, J. G. A. Uso de imagens do projeto PE3D para nivelamento de poços a serem usados em confecção de mapas potenciométricos. **Aguas Subterraneas**, [s. l.], vol. 34, nº 1, p. 103–111, 2020.

SILVA, J. F.; MIRANDA, R. Q.; CANDEIAS, A. L. B. Análise dos Modelos Digitais de Elevação (PE3D, SRTM-30, SRTM-90, ASTER GDEM, TOPODATA, TANDEM-X, ALOS PALSAR e ALOS AW3D30) e a necessidade da produção de dados altimétricos em excelência no Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s. l.], vol. 15, nº 3, p. 1543–1555, 2022.

SUNIL, A.; SINGH, R.; MOLAKALA, M. Adaptive (re)operations facilitate environmental flow maintenance downstream of multi-purpose reservoirs. [s. l.], 2024.

T. L. SAATY. **The Analytic Hierarchy Process**. New York: [s. d.], 1980.

TEHRANY, M. S.; PRADHAN, B.; JEBUR, M. N. Spatial prediction of flood susceptible areas using rule based decision tree (DT) and a novel ensemble bivariate and multivariate statistical models in GIS. **Journal of Hydrology**, [s. l.], vol. 504, p. 69–79, 2013.

TESCHEMACHER, Sonja; BITTNER, D.; DISSE, M. Automated location detection of retention and detention basins for water management. **Water (Switzerland)**, [s. l.], vol. 12, nº 5, 2020.

TESCHEMACHER, S.; BITTNER, D.; DISSE, M. Automated location detection of retention and detention basins for water management. **Water (Switzerland)**, [s. l.], vol. 12, nº 5, 2020.

TONÉ, A.; LIMA NETO, I. Modelagem simplificada do fósforo total em lagos e reservatórios brasileiros. **Revista DAE**, [s. l.], vol. 221, nº 68, p. 142–156, 2020.

TORTAJADA, C. Dams: An Essential Component of Development. **Journal of Hydrologic Engineering**, [s. l.], vol. 20, nº 1, 2015.

TSIKO, R. G.; HAILE, T. S. Integrating geographical information systems, fuzzy logic and analytical hierarchy process in modelling optimum sites for locating water reservoirs. A case study of the debub district in eritrea. **Water (Switzerland)**, [s. l.], vol. 3, nº 1, p. 254–290, 2011.

TÜRK, Ö.; TÜRK, N. Integrating a dam on a territory with multiple reservoirs. 2022. **E3S Web of Conferences**. [S. l.]: EDP Sciences, 2022.

WANG, Y.; TIAN, Y.; CAO, Y. Dam siting: A review. **Water (Switzerland)**, [s. l.], vol. 13, nº 15, p. 1–21, 2021.

WEISS, K. M.; MOODY, K. N.; PRACHEIL, B. M. Contextualizing Non-Powered Dam Site Selection for Archimedes Screw Turbines: A Methodology for Responsible Archimedes Screw Turbine Conversion at Existing Dams. **Energies**, [s. l.], vol. 18, nº 16, 2025.

WIMMER, M. H.; PFEIFER, N.; HOLLAUS, M. Automatic detection of potential dam locations in digital terrain models. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, [s. l.], vol. 8, n° 4, p. 1–14, 2019.

ZHANG, R. *et al.* Influences of water chemical property on infiltration into mixed soil consisting of feldspathic sandstone and aeolian sandy soil. **Scientific Reports**, [s. l.], vol. 10, n° 1, 2020.

ZHANG, X. *et al.* **Review of Effects of Dam Construction on the Ecosystems of River Estuary and Nearby Marine Areas**. [S. l.]: MDPI, 2022.

ZIADAT, F. *et al.* A Participatory GIS Approach for Assessing Land Suitability for Rainwater Harvesting in an Arid Rangeland Environment. **Arid Land Research and Management**, [s. l.], vol. 26, n° 4, p. 297–311, 2012.

ZYTOON, A.; GHARINEIAT, Z.; ALAJARMEH, O. **Supplementary Dam Site Selection Using GIS-Remote Sensing Approach: A Case Study of Wivenhoe Dam**. [S. l.]: [s. d.], 2024a. Disponível em: <https://www.preprints.org/manuscript/202404.0244/v1>.

ZYTOON, A.; GHARINEIAT, Z.; ALAJARMEH, O. **Supplementary Dam Site Selection Using GIS-Remote Sensing Approach: A Case Study of Wivenhoe Dam**. [s. l.], 2024b. Disponível em: <https://www.preprints.org/manuscript/202404.0244/v1>.