



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ANÁLISE E PLANEJAMENTO
ESPACIAL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

LEONARDO WILTON NUNES DE CARVALHO

**AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA NO ENTORNO DA BARRAGEM FLORES
(MARANHÃO), COM BASE EM FATORES HIDROLÓGICOS E NA DINÂMICA DE
USO DA TERRA**

**TERESINA-PI
2025**

LEONARDO WILTON NUNES DE CARVALHO

**AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA NO ENTORNO DA BARRAGEM FLORES
(MARANHÃO), COM BASE EM FATORES HIDROLÓGICOS E NA DINÂMICA DE
USO DA TERRA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Análise e Planejamento Espacial do Instituto Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Análise e Planejamento Espacial.

Área de concentração: Planejamento territorial e geoprocessamento

Orientador: Professor Dr. Reurysson Chagas de Sousa Morais

**TERESINA-PI
2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Carvalho, Leonardo Wilton Nunes de
C331a Avaliação da segurança no entorno da barragem Flores (Maranhão), com
base em fatores hidrológicos e na dinâmica de uso da terra / Leonardo Wilton
Nunes de Carvalho. - 2025.
87 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado Profissional em Análise e Planejamento Espacial) -
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus
Teresina Central, 2025.

Orientador : Prof Dr. Reurysson Chagas de Sousa Moraes.

1. Uso e cobertura do solo. 2. Segurança de barragens . 3. Medidas
mitigadoras . 4. Monitoramento de áreas de risco. I.Título.

CDD - 910

Elaborado por Maria Rosismar Farias CRB 3/631

LEONARDO WILTON NUNES DE CARVALHO

AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA NO ENTORNO DA BARRAGEM FLORES
(MARANHÃO), COM BASE EM FATORES HIDROLÓGICOS E NA DINÂMICA DE
USO DA TERRA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Análise e Planejamento Espacial do Instituto Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Análise e Planejamento Espacial.

Aprovada em: 18/07/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Reurysson Chagas de Sousa Morais (Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. Mauro César de Brito Sousa
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Prof. Dr. Lizandro Pereira de Abreu
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Aos pais, amigos e familiares.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu Deus, por me permitir o dom da vida, e me conceder a oportunidade de crescimento pessoal e profissional, me encorajando nos momentos mais difíceis, e proporcionando passar por todas as etapas desse mestrado.

Agradeço, também à minha esposa Gladys Clarice Carvalho de Andrade e ao meu filho Guilherme Levi Andrade de Carvalho, pela paciência e compreensão nesse momento que necessitei dedicar as atenções para realização do mestrado. Ao meu pai João Alves de Carvalho Neto (*in memoriam*) e minha mãe Maria Auxiliadora de Carvalho Nunes Alves que sempre batalharam para que esse objetivo fosse cumprido. Aos meus irmãos Mayra Karine, Rosa Larisse e Vitor Alexandre pelo apoio e incentivo. Aos demais familiares, avós, tios, tias, primos, primas, cunhados, cunhadas e sobrinhos, que sempre estiveram na torcida pelo meu êxito.

A todos os meus amigos do mestrado profissional MAPEPROF/IFPI turma 2023: Bento, Bruno, Daniel, Francisca Rosa, Jean, Leda, Raylla, Sérgio, Taís e Tácito, pelos momentos de estudos.

Aos professores, Dra. Laudénides Pontes, Dra. Valdira Brito, Dr. Francílio de Amorim, Dra. Bruno Iwata, Dr. Antônio Joaquim, Dra. Sammya Chaves pelos ensinamentos e compartilharem seus conhecimentos.

Ao professor Dr. Glairton Cardoso pelas contribuições no seminário integrador, Dr. Franklin Roberto da Costa pelas considerações no momento da qualificação, e ao professor Dr. Lizandro Pereira Abreu pelas observações na defesa do trabalho final. Ao professor Dr. Mauro César de Brito Sousa, que esteve presente com suas considerações desde o início do trabalho até o momento da apresentação final.

Ao professor coordenador do MAPEPROF e orientador deste projeto, Dr. Reurysson Chagas de Sousa Morais, pela paciência, o incentivo e colaboração no desenvolvimento e na conclusão deste trabalho.

Aos servidores do IFPI do Campus Teresina Central, desde os seguranças, demais professores do campus, servidores administrativos, em especial ao colega de mestrado Felipe Dantas, pois todos foram fundamentais em todo processo. Aos alunos da graduação do curso de Geoprocessamento Rayane Alves e Vírgilio Cardozo, por estarem sempre dispostos a auxiliar nas minhas dúvidas.

Aos diretores do Instituto Federal do Maranhão/Campus Timon, professores Rommel Neves e Deusdete Brito que deram todo o apoio necessário. Aos chefes de Departamento do IFMA/Campus Timon, professores Roberto Imperes e Fabrizio Caldas que deram o suporte para a realização do mestrado. Aos professores da área de Edificações do IFMA/Campus Timon, coordenadora Patrícia Pereira, e professores Dr. Danilo Prado e Araci Parente pelo apoio e ajuda durante todo o percurso. Ao professor André Wallas, que disponibilizou o seu precioso tempo para realizar o voo com seu drone na barragem Flores. E todos os demais professores e servidores do IFMA/Campus Timon pelo incentivo e torcida para a realização deste trabalho.

Muito obrigado à todos!

O que prevemos raramente ocorre; o que
menos esperamos chega”.

Benjamin Disraeli

RESUMO

Mudanças na cobertura e uso da terra em bacias hidrográficas estão frequentemente associadas a alterações hidrológicas com potencial impacto sobre os sistemas de armazenamento de água. Erosão, margens e assoreamento estão entre os principais problemas encontrados em lagos de barragens. No estado do Maranhão, a bacia de contribuição da barragem Flores vem passando por importantes mudanças na paisagem decorrente da ampliação da fronteira agrícola no Cerrado. Órgãos estatais de gestão de barragens tem demonstrado preocupação com as condições ambientais de entorno e segurança da barragem Flores, haja vista os eventos recentes de cheias. Este estudo tem como objetivo avaliar a influência das mudanças na paisagem e eventos extremos na segurança no entorno da barragem Flores, localizada no município de Joselândia, estado do Maranhão. Para tanto, buscou-se: (i) analisar as mudanças de cobertura e uso da terra no entorno da barragem, a partir de dados do projeto MapBiomas; (ii) identificar a ocorrência de meses extremamente chuvosos e sua associação com a vazão do rio Flores e nível da barragem homônima; (iii) avaliar as condições da proteção das margens da barragem Flores a partir da estimativa de cobertura florestal da sua APP e entorno; e (iv) observar a parede da barragem e seu entorno, com uso de drone. Realizou-se, inicialmente, a caracterização geoambiental do entorno da barragem Flores, considerando os aspectos geológicos, geomorfológicos e vegetacionais; e dos principais usos do lago da barragem pela população, bem como suas características socioeconômicas. Por fim, foi utilizado drone para observação das condições gerais da estrutura da barragem.

Palavras-chave: Uso e cobertura do solo. Segurança de barragens. Medidas Mitigadoras. Monitoramento de Áreas de Risco.

ABSTRACT

Changes in land cover and user in river basins are often associated with hydrological changes that have a potential impact on water storage systems. Bank erosion and siltation are among the main problems found in dam lakes. In the state of Maranhão, the basin contributing to the Flores dam has been undergoing significant changes in the landscape due to the expansion of the agricultural frontier in the Cerrado. State dam management agencies have shown concern about the environmental impact of conditions around and the safety of the Flores dam, given the recent flooding events. This study aims to evaluate the influence of changes in the landscape and extreme events on the safety of the area around the flores dam, located in the municipality of Joselândia, state of Maranhão. To this end, we sought to: (i) analyze the changes in land cover and use around the dam, based on data from the MapBiomass project; (ii) identify the occurrence of extremely rainy months and their association with the flow of the Flores River and the level of the dam of the same name; (iii) assess the conditions of protection of the banks of the Flores dam based on the estimated forest cover of its APP and surroundings; and (iv) observe the dam wall and its surroundings, using a drone. Initially, the geoenvironmental characterization of the surroundings of the Flores dam was carried out, considering the geological, geomorphological and vegetation aspects, and the main uses of the dam lake by the population, as well as its socioeconomic characteristics. Finally, a drone was used to observe the general conditions of the dam structure.

Keywords: Land use and coverage; Dam safety; Mitigating measures; Monitoring of risk areas.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica do rio Flores, Maranhão.

Figura 2 - Uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do rio Flores no Maranhão em 1985.

Figura 3 - Uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do rio Flores no Maranhão em 2000.

Figura 4 - Uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do rio Flores no Maranhão em 2023.

Figura 5 – Variação interanual de uso e cobertura do solo em km² na bacia hidrográfica do rio Flores no Maranhão.

Figura 6 – NDVI no entorno da barragem do rio Flores no Maranhão.

Figura 7 – Histograma com os valores do NDVI por classes.

Figura 8 – Variação interanual das vazões médias anuais na bacia hidrográfica do rio Flores no Maranhão(1985 – 2014).

Figura 9 – Variação interanual da precipitação na bacia hidrográfica do rio Flores no Maranhão.

Figura 10 – Gráfico da Precipitação x Vazão na bacia hidrográfica do rio Flores no Maranhão.

Figura 11 – Variação mensal histórica de precipitação na bacia hidrográfica do rio Flores no Maranhão.

Figura 12 – Gráfico boxplot para pluviometria ao longo dos meses.

Figura 13 – Fotografia da parede da barragem Flores.

Figura 14 – Fotografia da ocupação das margens da barragem Flores.

LISTA DE TABELAS

Quadro 01 – Classificação da condição de precipitação da BHRF com base p-quantil (qp) da precipitação observada.

Quadro 02 – Valores do NDVI, com a respectiva interpretação.

Quadro 03 – Valores absolutos e percentuais das formações vegetais na BHRF em 1985.

Quadro 04 – Valores absolutos e percentuais das formações vegetais na BHRF no ano 2000.

Quadro 05 – Valores absolutos e percentuais das formações vegetais na BHRF no ano 2023.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANCOLD	Comissão Australiana de Grandes Barragens
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANM	Agência Nacional de Mineração
ANSI	American National Standards Institute
APPs	Áreas de Preservação Permanente
ASCE	American Society of Civil Engineers
BHRA	Bacia Hidrográfica do Rio Araguaia
BHRI	Bacia Hidrográfica do Rio Itapecuru
BHRF	Bacia Hidrográfica do Rio Flores
BHRP	Bacia Hidrográfica do Rio Parnaíba
CCR	Concreto Compactado a Rolo
CDA	Canadian Dam Association
CRI	Categoria de Risco
DPA	Dano Potencial Associado
FEMA	Federal Emergency Management Agency
GEE	Google Earth Engine
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
ICOLD	International Commission on Large Dams
IDF	Intensidade – Duração - Frequência
IoT	Internet das Coisas
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
LIDar	Light Detection and Ranging
MATOPIBA	Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia
MSI	Multispectral Instrumental
NDSP	National Dam Safety Program
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
ONGs	Organização Não Governamentais
PAE	Plano de Ação de Emergência
PMP	Precipitação Máxima Provável
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
PSA	Pagamento por Serviços Ambientais

PSB	Política de Segurança de Barragens
RSB	Regulamento de Segurança de Barragens
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TR	Tempo de Retorno

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
---	-------------

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	COBERTURA E USO DA TERRA.....	19
2.2.	SEGURANÇA DE BARRAGENS	26
2.3.	POLÍTICAS DE SEGURANÇA DE BARRAGENS NO BRASIL E NO MUNDO	39
2.4.	MEDIDAS MITIGADORAS	43
2.5.	MAPEAMENTO DE ÁREAS DE RISCO.....	48
3	MATERIAIS E MÉTODOS	52
3.1	ÁREA DE ESTUDO	52
3.2	BASE DE DADOS.....	54
3.3	ANÁLISE DE DADOS	55
4	RESULTADOS	58
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	78
	REFERÊNCIAS	79

1 INTRODUÇÃO

As barragens, especialmente as de grande porte, apresentam frequentemente um alto risco de rompimento, o que justifica a necessidade de vigilância constante para avaliação de segurança (Silva; Silva, 2020). O monitoramento de barragens é uma ação essencial nos planos de gestão de risco, pois deve ser rigoroso para garantir a segurança dessas construções, prevenindo acidentes, protegendo o meio ambiente e as comunidades ao redor, além de indicar o risco potencial de rompimento, visando à proteção de vidas humanas (Oliveira; Guimarães, 2019).

O monitoramento de barragens é um processo fundamental para garantir a segurança e prever desastres ambientais e humanos. A complexidade e o rigor desse monitoramento dependem das legislações e normas técnicas adotadas de acordo com cada país. No Brasil, tragédias recentes (como a do Estado do Rio Grande do Sul) mostraram a importância de práticas de monitoramento e legislações mais rígidas, que são responsabilidade da Agência Nacional de Mineração (ANM), do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) e da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), dependendo do tipo de barragem (mineração, hidrelétrica, contenção de água, entre outras) (Watzko, 2007).

Em outros países, principalmente naqueles com grande histórico de mineração e infraestrutura hídrica, o monitoramento de barragens segue padrões que incluem tecnologias avançadas, maior regulamentação e transparência (Souza *et al.*, 2023). Antes de 2010, não havia legislação específica sobre a segurança de barragens no Brasil. Em razão de graves acidentes ambientais causados por rompimento de barragens, surgiu a necessidade de uma atuação mais rigorosa por parte do Governo Federal nesse tema. Em setembro de 2010, foi sancionada a Lei 12.334, que institui a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) (Tarller, 2022).

Ao longo das últimas décadas, a bacia de drenagem da barragem Flores, localizada no estado do Maranhão, passou por mudanças significativas na estrutura da paisagem, sobretudo devido à expansão da fronteira agrícola no sul do estado (Cabacinha; Castro; Gonçalves, 2010).

Essas mudanças podem ocasionar alterações na hidrologia local, aumentando o aporte de escoamento superficial e de sedimentos (Dias; Matos, 2023). Soma-se a isso o aumento da frequência de eventos climáticos extremos, como chuvas extremas.

Como exemplo, fatores naturais e antrópicos, influenciaram em alterações na Bacia Hidrográfica do Rio Itapecuru(BHRI), Maranhão (Pereira; Moraes, 2022).

Na estrutura da barragem, a erosão interna, conhecida como piping, pode acontecer quando a água se infiltra por fissuras ou falhas na estrutura, transportando partículas do material da barragem. Esse processo pode criar cavidades internas e prejudicar a estrutura, elevando o risco de rompimento. A pressão na barragem, definida como uma força exercida pela coluna de água sobre a estrutura da barragem, é outro fator de risco. Essa pressão depende da altura da água armazenada, da densidade do fluido e da aceleração gravitacional, sendo um fator crítico para a segurança e estabilidade da barragem (Silva *et al.*, 2020).

Por outro lado, chuvas extremas, principalmente em bacias hidrográficas já saturadas ou com elevado grau de desmatamento ou impermeabilização, podem acarretar inundações súbitas que sobrecarregam a barragem. Se a capacidade de descarga for insuficiente, pode ocasionar o transbordamento da barragem. Em situação de chuvas intensas, os extravasores de emergência podem ser submetidos a volumes de água muito superiores à sua capacidade projetada, resultando em erosão e exposição da fundação da barragem, o que pode comprometer toda estrutura. Alterações climáticas podem modificar os padrões de precipitação na bacia, tornando eventos extremos mais frequentes e intensos, elevando assim o risco de falha (Marengo, 2008).

Diante do exposto, esta pesquisa busca responder ao seguinte questionamento: qual a influência que as modificações na paisagem e ocorrência de eventos pluviométricos extremos exercem sobre a segurança no entorno da barragem Flores, no estado do Maranhão? Parte-se da hipótese que as modificações na paisagem decorrentes da alteração dos padrões de cobertura e uso da terra, associada a ocorrência de eventos extremos provocam alterações hidrológicas que afetam a segurança no entorno da barragem Flores (MA).

O objetivo geral desse estudo é avaliar a influência das mudanças na paisagem e eventos pluviométricos extremos na segurança do entorno da barragem Flores, estado do Maranhão, a partir da integração de dados hidrológicos, de cobertura e uso da terra e inspeção visual da área na parede da barragem. Para tanto, definiu-se os seguintes objetivos específicos: (i) analisar as mudanças de cobertura e uso da terra no entorno da barragem a partir de dados do Projeto MapBiomass; (ii) Identificar a ocorrência de meses extremamente chuvosos e sua associação com a vazão do rio

Flores e nível da barragem homônima; (iii) avaliar as condições da proteção das margens da barragem Flores a partir da estimativa de cobertura florestal da sua APP e entorno; e (iv) observar a parede da barragem e seu entorno, com uso de drone.

Em síntese, diante do potencial risco a barragens em regiões submetidas a intensas modificações ambientais, este estudo assume importância fundamental ao tratar da proteção ambiental e segurança da barragem. Espera-se que os resultados desta pesquisa revelem as influências que alterações nos parâmetros hidrológicos da bacia de contribuição da barragem Flores, decorrentes de ações antrópicas e naturais, exercem sobre o risco potencial de rompimento. Além disso, pretende-se oferecer subsídios para o monitoramento contínuo e gestão da barragem, com foco especial no seu entorno.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 COBERTURA E USO DA TERRA

As alterações na cobertura da terra, como desmatamento e urbanização, provocam impactos significativos nos parâmetros hidrológicos das bacias hidrográficas, modificando o ciclo hidrológico e afetando processos como a infiltração, escoamento superficial, evapotranspiração e recarga de aquíferos (Gomes *et al.*, 2020).

O uso da terra tem um papel fundamental na regulação dos parâmetros hidrológicos. A velocidade da água pode aumentar em ambientes com maior impermeabilização e menor cobertura vegetal, acarretando impactos negativos como erosão e enchentes. Estratégias como reflorestamento, conservação do solo e infraestrutura verde são essenciais para mitigar esses efeitos e promover um equilíbrio hidrológico sustentável (Martins; Galvani, 2020).

Dentre os desafios pertencentes à ciência hidrológica, observa-se a análise de impactos das mudanças na cobertura e uso da terra em bacias hidrográficas. Um dos problemas metodológicos enfrentados é a limitada quantidade de dados de longo prazo, em diversos locais do mundo, onde as medidas ou mapeamento dos corpos d'água apenas se consolidaram com o avanço da tecnologia (Garofolo; Rodriguez, 2022).

O uso da terra influencia diretamente no ciclo hidrológico, afetando variáveis como: (i) infiltração, processo pelo qual a água da chuva penetra no solo, determinante para a recarga de aquíferos e a formação do fluxo subterrâneo, onde áreas vegetadas facilitam a infiltração, enquanto superfícies impermeáveis diminuem esse processo. A taxa de infiltração depende da porosidade, textura do solo, cobertura vegetal e compactação do terreno; (ii) escoamento superficial é quantidade de água que não infiltra no solo e escoar sobre a superfície, podendo causar enchentes e erosão, o escoamento superficial aumenta em áreas urbanizadas ou com solo compactado, onde uma menor quantidade de água se infiltra, e a maior parte escoar pela superfície; (iii) evapotranspiração é a soma da evaporação da água do solo e da transpiração das plantas, influenciando a disponibilidade hídrica. A evapotranspiração é influenciada pela cobertura vegetal, onde áreas com florestas apresentam maior evapotranspiração do que áreas desmatadas ou urbanizadas; (iv) e acúmulo de água

no solo, que é a capacidade de retenção hídrica do solo, sendo maior em áreas com vegetação densa e solos pouco compactados (Guimarães; Landau, 2022).

A expansão da agropecuária sobre biomas brasileiros, especialmente sobre o Cerrado, resulta em uma descaracterização ambiental associada à supressão da cobertura vegetal, levando à erosão dos solos, assoreamento dos corpos hídricos e alterações no regime hidrológico dos rios. Esse cenário fica mais evidente na região de fronteira agrícola brasileira conhecida como MATOPIBA, que compreende os estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, onde se encontra a bacia hidrográfica do rio Flores, situado no Maranhão, nordeste do Brasil. Como exemplo, nos últimos anos, a bacia hidrográfica do rio Itapecuru, tem passado por uma expansão significativa das áreas destinadas as práticas de agricultura e pecuária (Pereira; Moraes, 2022).

Pereira e Moraes (2022) destacam a importância de analisar as modificações decorrentes das atividades antrópicas e suas consequências para as bacias hidrográficas, reconhecidas como espaços de análise e planejamento ambiental. Esses ambientes possuem características sistêmicas, marcadas por troca de energia e matéria, típicas de sistemas abertos, que tornam as bacias hidrográficas vulneráveis às pressões humanas e naturais. Uma das consequências dessas alterações é o aumento do escoamento superficial. Com a supressão da vegetação, as águas das chuvas atingem os cursos d'água rapidamente, reduzindo o tempo de resposta da bacia hidrográfica a eventos de precipitação e elevando o risco de enchentes (Gomes *et al.*, 2020).

A intervenção humana no meio ambiente através das mudanças no uso e cobertura da terra é uma prática antiga, intensificada com o crescimento populacional e o desenvolvimento socioeconômico, que promovem a expansão urbana, intensificação da agricultura e exploração dos recursos naturais. Esse processo acarreta uma maior pressão sobre os ecossistemas e paisagens, especialmente no meio rural (Garofolo; Rodriguez, 2022). A título de exemplo, o desmatamento ou urbanização podem compactar o solo e diminuir a infiltração de água, resultando em aumento do escoamento superficial e redução da recarga dos aquíferos subterrâneos (Pedron *et al.*, 2004).

Estudos sobre mudanças no uso e cobertura das terras ajudam a entender a transformação do espaço geográfico e fornecem subsídios essenciais para o planejamento sustentável do meio rural, contribuindo para uma melhor utilização dos

recursos naturais, aumento da produção dos pequenos agricultores e melhoria da qualidade de vida (Turetta, 2011). Em áreas agrícolas, analisar as mudanças nos padrões de uso e ocupação das terras é especialmente relevante para orientar tomada de decisões baseadas em dados e contribuir para o desenvolvimento sustentável.

As bacias hidrográficas estão expostas a constantes modificações, sejam elas de origem natural ou antrópica. As pesquisas que abordam esse ambientes necessitam de atualizações contínuas para acompanhar as condições ambientais (Pereira; Moraes, 2022).

Bacia hidrográfica é a área delimitada topograficamente, onde toda água da chuva, nascentes e afluentes convergem para um rio principal, lago ou oceano. Ela é delimitada por divisores de água, que são pontos elevados do terreno, como serras e montanhas. As bacias hidrográficas são fundamentais para: abastecimento de água para consumo humano, agricultura e indústria; regulação do ciclo hidrológico e controle de enchentes; preservação da biodiversidade e dos ecossistemas aquáticos; e geração de energia hidrelétrica (Ferreira, 2018).

Os principais componentes de uma bacia hidrográfica são: rio principal (curso d'água que recebe a drenagem dos afluentes), afluentes (rios menores que desaguam no rio principal), divisores de água (áreas mais altas que separam diferentes bacias), nascentes (locais onde os rios se formam) e foz (ponto onde o rio deságua em um outro corpo d'água – rio, lago ou mar. Um exemplo de bacia hidrográfica é a bacia amazônica, a maior do mundo, que drena um grande volume de água para o Oceano Atlântico (Fernandes; Souza, 2013).

O desmatamento e a agricultura em larga escala intensificam a erosão do solo, levando a grandes quantidades de sedimentos aos corpos d'água. Isso pode impactar negativamente a qualidade da água, obstruir cursos d'água e diminuir a capacidade dos reservatórios (Tiecher; Minella, 2015). Mudanças no uso e cobertura da terra afetam diretamente os recursos hídricos, pois alteram os níveis de escoamento superficial e subterrâneo, além de modificar componentes da biosfera, atmosfera e, especificamente, o fluxo de água e energia (Garofolo; Rodriguez, 2022).

Essas mudanças também influenciam o regime de cheias dos rios, resultando em picos de vazão mais altos na estação chuvosa e vazões mínimas mais baixas na estação seca, afetando os ecossistemas aquáticos e a biodiversidade. A localização das mudanças na cobertura e uso da terra também é importante: uma intervenção à montante de um determinado local na bacia hidrográfica, pode ter impacto distinto de

uma intervenção à jusante, pois o contexto hidrológico é fundamental para determinar onde, quando e como ocorrem os processos hidrológicos (Garofolo; Rodriguez, 2022).

A relação entre uso da terra e processos erosivos está fortemente ligada aos parâmetros hidrológicos que controlam o escoamento superficial, a infiltração e a retenção de água no solo. A forma como o solo é utilizado influencia significativamente a erosão, tanto em intensidade quanto em extensão (Ferreira; Ferreira, 2019).

Os parâmetros hidrológicos são variáveis usadas para caracterizar o comportamento da água no ciclo hidrológico, ajudando no planejamento e na gestão de recursos hídricos. Os principais parâmetros hidrológicos são: precipitação, vazão, evapotranspiração, infiltração, escoamento superficial, umidade do solo, tempo de concentração e nível d'água. Esses parâmetros são de grande importância para análises hidrológicas, previsão de enchentes, dimensionamento de barragens e gestão dos recursos hídricos (Tucci; Silveira, 2002).

A precipitação é a quantidade de água que cai sobre a superfície terrestre na forma de chuva, neve ou granizo, medida em milímetros(mm). Já vazão é o volume de água que passa por uma seção de um rio ou canal por unidade de tempo, geralmente expresso em m^3/s (metros cúbicos por segundo). A vazão é influenciada pela infiltração, escoamento superficial e características do solo e vegetação da região (Santos, 2013).

A umidade do solo é a quantidade de água armazenada no solo em um dado período, importante para a agricultura e o ciclo hidrológico. O tempo de concentração é o tempo que a água leva para escoar da parte mais distante da bacia hidrográfica até a saída da mesma. Enquanto o nível d'água é a altura da lâmina d'água em rios, reservatórios ou aquíferos, usada para monitoramento hidrológico (Oliveira; Guimarães, 2019).

O escoamento refere-se ao deslocamento da água sobre ou abaixo da superfície do solo. Pode ser classificado como: escoamento superficial (água que não infiltra e flui sobre o solo em direção a rios e lagos), escoamento subsuperficial (água que se move abaixo da superfície, mas acima do lençol freático), e escoamento subterrâneo (fluxo de água que ocorre nas camadas mais profundas do solo, contribuindo para a recarga dos aquíferos) (Guimarães, 2012).

A velocidade da água pode aumentar ou reduzir dependendo do tipo de cobertura do solo e do manejo utilizado. Essa velocidade depende de fatores como declividade do terreno, tipo de solo e cobertura vegetal. Diferentes formas de usos da

terra podem modificar significativamente essa variável: ruas asfaltadas e construções aumentam a velocidade do escoamento superficial devido à menor infiltração e ao escoamento concentrado em sistemas de drenagem artificial; a remoção da vegetação diminui a rugosidade do solo, contribuindo para o deslocamento da água e aumentando a velocidade do escoamento; as raízes das árvores e a matéria orgânica no solo aumentam a rugosidade e a infiltração, diminuindo a velocidade do escoamento superficial; e pastagens e agricultura conservacionista, podem diminuir a velocidade do escoamento, se houver práticas como terraceamento e plantio em nível (Bias *et al.*, 2012).

O aumento da velocidade da água pode causar erosão do solo, transportando sedimentos para rios e represas, provocando assoreamento. Em áreas urbanizadas, a alta velocidade do escoamento superficial pode levar a inundações mais rápidas e intensas, elevando o risco de enchentes. A menor infiltração diminui a recarga dos aquíferos, afetando o abastecimento de água subterrânea, reduzindo a disponibilidade hídrica (Campagnolo *et al.*, 2018).

Erosão é o processo de desgaste, transporte e deposição de partículas do solo devido à ação da água, vento ou outros agentes naturais. A erosão do solo pode ser acelerada por fatores antrópicos, como desmatamento, práticas agrícolas inadequadas e urbanização desordenada. A erosão do solo na bacia de contribuição pode aumentar consideravelmente o aporte de sedimentos ao reservatório, causando seu assoreamento, reduzindo sua capacidade de armazenamento e alterando a dinâmica do fluxo de água (Martins *et al.*, 2017).

O uso da terra modifica as características naturais do terreno, impactando a estabilidade do solo e sua resistência à erosão. As principais formas de cobertura e uso da terra e seus impactos nos processos erosivos incluem:

- Vegetação nativa: possui alta cobertura do solo, reduzindo a energia das gotas de chuva, promovendo maior infiltração e reduzindo o escoamento superficial e a erosão);
- Agricultura: dependendo do tipo de manejo, pode expor o solo à erosão devido à remoção da cobertura vegetal, compactação do solo e uso inadequado de práticas conservacionistas);
- Pastagens: o pisoteio do gado pode compactar o solo, reduzindo a infiltração de água e aumentando o escoamento superficial e a erosão laminar);

- Áreas urbanizadas: superfícies impermeáveis – asfalto e concreto - reduzem a infiltração, aumentam o escoamento superficial e contribuem para processos erosivos, como ravinamento e formação de voçorocas);
- Desmatamento: a retirada da vegetação expõe o solo à ação direta da chuva, favorecendo o desprendimento de partículas e o transporte pelo escoamento superficial) (Vidaletti *et al.*, 2020).

Os principais parâmetros hidrológicos que controlam a relação entre uso da terra e processos erosivos são infiltração e o escoamento superficial (refere-se à capacidade do solo de absorver a água da chuva).

Solos florestados apresentam, em forma geral, maior infiltração devido à presença de matéria orgânica e estrutura do solo preservada. Já em áreas compactadas – pastagens, áreas urbanas – há menor infiltração, que resulta no aumento do escoamento superficial e da erosão (Guimarães, 2012).

O escoamento superficial (é o fluxo de água sobre a superfície do solo quando a infiltração é insuficiente). A forma de uso da terra altera a quantidade e velocidade do escoamento. Enquanto a vegetação densa reduz a energia cinética da chuva e a velocidade do escoamento, diminuindo a produção e o transporte de sedimentos, superfícies impermeáveis aumentam o escoamento e a força erosiva da água. Logo, a tipologia de uso e cobertura das terras influencia a quantidade de sedimentos transportados, afetando rios e lagos, causando assoreamento (Klein; Klein, 2014).

A escolha do uso da terra tem impacto direto nos processos erosivos, por meio da modificação dos parâmetros hidrológicos. Práticas conservacionistas, como o plantio em contorno, cobertura vegetal permanente e terraceamento, são fundamentais para reduzir a erosão e manter a sustentabilidade dos recursos hídricos e do solo (Tavares; Reis, 2017).

A variação do uso da terra no tempo (Delimitação do Escoamento) refere-se às mudanças nas características do uso da terra ao longo dos anos, impactando a dinâmica do escoamento superficial. Modificações como desmatamento, urbanização ou práticas agrícolas alteram a infiltração, a vazão e o volume de escoamento, afetando a hidrologia da bacia hidrográfica (Guimarães, 2012).

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), do inglês *Normalized Difference Vegetation Index* é um dos índices de vegetação mais largamente usados em sensoriamento remoto para monitoramento da cobertura vegetal da Terra (Santos; Hacon; Neves, 2023).

As principais aplicações do NDVI são: agricultura de precisão (monitoramento do vigor das plantações, identificação de estresse hídrico ou pragas); gestão florestal (detecção de desmatamento, regeneração de áreas); monitoramento de seca (avaliação da saúde da vegetação ao longo do tempo); estudos ambientais e climáticos (análise de mudanças no uso da terra e impactos ambientais); e planejamento urbano (mapeamento de áreas verdes nas cidades) (Ramos; Ferreira, 2015).

Entre as principais vantagens do NDVI estão: a simplicidade para calcular, compatibilidade com diversos sensores (ex: Landsat, Sentinel, MODIS), possibilidade de aplicação em séries temporais para análises históricas. Já, as principais limitações do NDVI são: a influência das nuvens, sombra, umidade do solo e cobertura do solo não vegetal, em áreas com vegetação muito densa, o índice pode sofrer saturação (não mostra variações finas), a não distinção dos diferentes tipos de vegetação (Santos; Hacon; Neves, 2023).

2.2 SEGURANÇA DE BARRAGENS

As barragens e reservatórios para abastecimento de água estão entre as primeiras grandes obras construídas pela humanidade, com registros históricos de barragens construídas há pelo menos 5 mil anos (Gorkos, 2022).

Barragens, açudes e barreiros são estruturas utilizadas para armazenamento de água, que se diferenciam pela finalidade, porte e construção. As barragens são estruturas mais robustas e multifuncionais, enquanto açudes e barreiros são reservatórios menores, voltados para usos locais e rurais, localizada em rios e grandes cursos d'água. Os açudes são represas menores, geralmente feitos de terra compactada, utilizados para abastecimento rural, dessedentação animal e irrigação. É um termo bastante utilizado no Nordeste do Brasil, principalmente em regiões semiáridas e em pequenos rios (Guidicini; Jardim, 2021).

Os barreiros são estruturas bem menores, geralmente uma depressão de solo revestida de argila e solo, construída para receber água das chuvas, impedindo a infiltração. Sua principal função é dessedentação de animais, uso local, pastagens, áreas rurais e pequenas plantações (Brito *et al.*, 2019). As barragens são estruturas artificiais, construídas para represar grandes volumes de água em rios ou cursos d'água. Geralmente, são feitas de concreto, terra compactada ou enrocamento(rochas). Sua função pode incluir geração de energia hidrelétrica, abastecimento de água, controle de enchentes e irrigação (Henrique; Santana, 2018).

Uma barragem é definida como qualquer estrutura em um curso de água, permanente ou temporário, projetada para conter ou armazenar substâncias líquidas ou misturas de líquidos e sólidos, englobando o barramento e as estruturas associadas. Essas construções são projetadas para diversos fins, como controle de inundações, geração de eletricidade, abastecimento de água para consumo humano e dessedentação de animais, uso comercial ou recreativo, contenção de rejeitos de mineração (Silva; Silva, 2020).

As barragens, ao armazenarem grandes volumes de água, são classificadas como obras de infraestrutura de grande porte, e, como tal, apresentam riscos que podem impactar significativamente as comunidades, bens materiais, serviços públicos essenciais, infraestrutura urbana, economia e meio ambiente (Gorkos, 2022).

O risco de rompimento de barragens é uma preocupação importante, especialmente em situações de mudanças hidrológicas na bacia de contribuição ou

de eventos extremos, como chuvas intensas, que podem afetar a segurança e a integridade das estruturas das barragens (Silva, 2019).

A segurança de barragens tem sido uma preocupação constante da sociedade, pois, se não forem monitoradas e mantidas adequadamente, suas falhas podem comprometer a segurança das propriedades e o equilíbrio ecológico dos ambientes. Diversos métodos de monitoramento têm sido desenvolvidos para simular o comportamento das barragens, como métodos determinísticos e estatísticos, modelos matemáticos lógicos e híbridos, e esquemas de simulação numérica, visando detectar anomalias e prevenir falhas estruturais (Zhao *et al.*, 2021).

Falhas em barragens ocorrem desde que as primeiras foram construídas e ocasionaram perdas materiais substanciais, o que reforça a adoção de medidas de prevenção de danos, com a inspeção de rotina e monitoramento de emergência em caso de risco iminente, para detectar anomalias e prevenir possíveis falhas (Zhao *et al.*, 2021). Embora os riscos de rompimento com grandes danos sejam baixos, eles tendem a aumentar com o tempo se as atividades de manutenção e conservação das barragens não forem adequadamente realizadas. À medida em que se ampliam os mecanismos de degradação, aumentam-se os riscos potenciais, e os reparos se tornam mais complexos e caros (Gorkos, 2022).

A maioria das patologias e defeitos nas estruturas de barragens ocorre na superfície das estruturas, tornando essencial detectar danos superficiais em tempo hábil para garantir um alerta precoce do sistema de segurança e evitar problemas futuros (Henriques; Roque, 2015).

O acúmulo de sedimentos no reservatório diminui a capacidade de armazenamento de água e pode levar a um transbordamento durante eventos de chuva intensa, sobrecarregando a barragem, especialmente se os vertedouros não tiverem sido projetados para volumes excessivos de água. A carga adicional dos sedimentos pode alterar a pressão hidrostática na estrutura da barragem, o que contribui para sua instabilidade. O aumento no fluxo da água também amplia a pressão contra as paredes da barragem, podendo levar a uma condição de rompimento (Silva; Passos, 2022).

No Brasil, a construção e a manutenção das barragens seguem normas e critérios diferentes, o que afeta a confiabilidade dessas estruturas. Ao longo da sua vida útil, a infraestrutura das barragens pode se desgastar ampliando o risco de rompimento. O colapso de barragens pode ocasionar danos ambientais, econômicos

e sociais de longo prazo, aumentando o risco à vida (Silva; Silva, 2020). Esses rompimentos afetam a confiança das pessoas nas empresas e nas instituições governamentais. Entre os fatores que contribuem para o colapso dessas estruturas estão: o projeto inadequado, localização inapropriada, negligência no processo de construção e operação, e ausência de procedimentos de segurança apropriados (Silva, 2019).

Além de benefícios socioeconômicos, as barragens são potenciais causadoras de impactos sistêmicos no meio e na saúde pública, especialmente em casos de falhas, que resultam em tragédias pessoais, altos níveis de mortalidade e morbidade, impactos diretos e indiretos no progresso político, social e econômico, criando ciclos viciosos e muito vulneráveis. Esses eventos podem desencadear doenças e agravos em saúde, além de comprometer as condições de vida da população (Silva; Silva, 2020).

O aquecimento global, ao alterar o regime de chuvas, também contribui para a insegurança das barragens, exigindo a adaptação das estruturas às novas condições climáticas (Campolina; Gianasi, 2020). A gestão dos riscos de rompimento de barragens, face às alterações hidrológicas e eventos extremos, exige monitoramento contínuo, manutenção regular e, em muitos casos, a atualização dos sistemas de controle de cheias e vertedouro. Além disso, a reavaliação periódica das condições de operação e adaptação aos novos cenários tornam-se fundamentais para garantir a segurança a longo prazo (Silva, 2019).

A segurança de barragens é um tema fundamental para a proteção de vidas humanas, do meio ambiente e das infraestruturas próximas a essas estruturas. As barragens são construídas para diversos fins, como geração de energia hidrelétrica, abastecimento de água, irrigação e contenção de rejeitos de mineração. No entanto, sua operação inadequada ou falhas estruturais podem causar desastres de grandes proporções (Pereira, 2021).

As barragens podem apresentar diferentes tipos de riscos, dependendo do seu projeto, operação e manutenção. Alguns dos principais riscos incluem: erosão interna e infiltração (a passagem de água através da barragem pode levar à erosão dos materiais internos, comprometendo sua estabilidade), falhas estruturais (problemas na construção, como uso de materiais inadequados ou erros de projeto, podem reduzir a resistência da estrutura), chuvas intensas e eventos climáticos extremos (o excesso de água pode gerar sobrecarga e levar ao transbordamento ou rompimento da

barragem), atividade sísmica (terremotos podem causar fissuras ou deslocamentos na estrutura, aumentando o risco de falhas), e a má gestão operacional (falhas no controle de comportas e na manutenção podem comprometer a segurança) (Silva *et al.*, 2020).

Para diminuir os riscos e garantir a segurança das barragens, algumas medidas de prevenção e monitoramento devem ser adotadas (Tercini *et al.*, 2021):

- planejamento e construção segura: Uso de tecnologias avançadas para análise geotécnica e estrutural, projetos compatíveis com as condições geológicas e climáticas da região, construção com materiais de alta qualidade e respeito às normas técnicas;
- monitoramento e inspeções periódicas: Instalação de sensores para medir deslocamentos, infiltrações e pressões internas; inspeções regulares para detectar fissuras, infiltrações e outros sinais de deterioração; e manutenção preventiva para corrigir problemas antes que se tornem críticos;
- Planos de Ação de Emergência – PAE: desenvolvimento de planos detalhados para ações em caso de risco iminente, treinamento de equipes e simulações de evacuação para a população local, comunicação eficiente com órgãos de defesa civil e comunidades próximas).

A título de exemplo, barragem de Orós, situada no Ceará e reconhecida como uma das maiores barragens de terra do mundo, entrou em colapso em 26 de março de 1960 em decorrência dos impactos de chuvas torrenciais. A estrutura tinha 54 metros de altura e 620 metros de comprimento, com um reservatório capaz de armazenar aproximadamente 2,1 bilhões de metros cúbicos de água. Apesar dos alertas frequentes de evacuação, estima-se que cerca de mil pessoas perderam a vida por não terem deixado suas casas (Lima; Silva, 2020).

A barragem de Banqiao, construída na província de Henan, China, colapsou em 5 de agosto de 1975 devido às chuvas torrenciais causadas pelo tufão Nina. O colapso desencadeou uma reação em cadeia, rompendo outras 61 barragens e resultando em uma das maiores catástrofes relacionadas a barragens da história, com cerca de 85 mil mortes imediatas, e aproximadamente outras 145 mil pessoas morreram dos impactos causados, como fome e epidemias. As principais causas e falhas identificadas foram: chuvas extremas além da capacidade projetada da

barragem, má gestão de comportas (que impediu o controle do nível da água), projetos inadequados para eventos climáticos extremos (Valencio; Gonçalves, 2006).

As barragens de Euclides da Cunha e Armando Salles, com um volume de 13,6 e 25,9 milhões de m³, respectivamente, localizadas em São Paulo, romperam no dia 20 de janeiro de 1977, a partir de uma ruptura tipo cascata. O rompimento ocorreu após três semanas de intensas chuvas, onde aproximadamente 4000 casas foram atingidas, felizmente sem perdas de vidas (Saliba, 2009).

Em 17 de junho de 2004, a barragem de Camará, localizada na Paraíba, rompeu, liberando 17 milhões de m³ de água, devido problemas na rocha de fundação da ombreira esquerda. Um grande orifício se abriu, esvaziando o reservatório, que tinha capacidade para 26,5 milhões de m³ de água. A barragem, feita de concreto compactado a rolo (CCR), possuía 50 metros de altura e 296 metros de comprimento. A inundação causou danos ao longo de 20 km, e resultou na morte de 6 pessoas, deixou 3 mil pessoas desabrigadas, além de destruir pontes e deixar cidades sem comunicação e energia (Neto *et al.*, 2017).

Em 27 de maio de 2009, a Barragem Algodões I, em Cocal, Piauí, rompeu-se, liberando cerca de 50 milhões de m³ de água. O desastre afetou cerca de 4 mil pessoas e resultando na morte de nove delas. Após o ocorrido, somente 2 mil famílias conseguiram retomar as atividades que realizavam na região do Vale do Pirangi (Soares; Viana, 2017).

A ruptura de duas barragens em Minas Gerais, em Mariana (2015) e em Brumadinho (2019), causou a morte de centenas de pessoas e prejudicou a maior parte das bacias do Rio Doce e do Rio Paraopeba. Pesquisadores destacam que esses eventos desastrosos começaram com o licenciamento ambiental e continuaram com uma gestão ineficaz de reparação de danos, ocasionando muito sofrimento social. Após os desastres, as instituições públicas, além de não estabelecerem o marco regulatório, contribuíram para sua flexibilização (Vargas; Piga; Nogueira, 2022). Vargas, Piga e Nogueira (2022) afirma que, como resultado, as empresas de mineração puderam introduzir a cultura do novo coronelismo nos sistemas de governança, ou seja, não somente prevaleceram seus interesses frente às demandas das vítimas, como também ampliaram o controle territorial das áreas afetadas pelos desastres.

Em fevereiro de 2017, o vertedouro da barragem de Oroville, na Califórnia, sofreu erosão intensa devido a fortes chuvas. A falha do vertedouro levou à evacuação

de cerca de 188 mil pessoas, temendo um possível colapso total da estrutura. As principais causas e falhas identificadas foram: deficiência na manutenção da barragem, que permitiu erosões estruturais, falhas no projeto do vertedouro (que não suportou a vazão necessária) e a ausência de um plano de evacuação eficiente (Silva, 2019).

Em 25 de janeiro de 2019, a barragem B1 da Mina do Córrego do Feijão, operada pela Vale, rompeu-se na cidade de Brumadinho, Minas Gerais. O colapso liberou aproximadamente 12 milhões de m³ de rejeitos, soterrando instalações da própria mineradora e comunidades vizinhas. O desastre resultou em 272 mortes e impactos ambientais severos (Silva, 2020).

Segundo a reportagem do g1 do Estado da Bahia, no dia 12 de julho de 2019, a barragem do Quati, situada na divisa da Bahia com Sergipe, no município de Pedro Alexandre, inundou a cidade e o município vizinho Coronel João Sá. Com 20 metros de altura e 200 metros de comprimento, rompeu em 11 de julho de 2019, deixando cerca de 500 pessoas desabrigadas (O **Globo**, 2019).

Noticiários locais do estado do Maranhão mencionaram que as fortes chuvas que atingiram todo o estado em 2020 fizeram 13 cidades decretarem emergência. De acordo com a reportagem, cerca de 130 mil pessoas foram afetadas e mais de 1500 famílias ficaram desabrigadas em várias regiões do estado. O município de Boa Vista do Gurupi, cidade localizada a 500 km de São Luís, foi afetado com a cheia do Rio Gurupi. Com a chegada do período chuvoso, o nível do rio subiu mais de seis metros, inundando casas, plantações e causando transtornos à população. O ponto mais afetado pela enchente localizava-se na área central da cidade. As fortes chuvas na Região Metropolitana de São Luís, também causaram alagamentos em bairros no Maiobão, em Paço do Lumiar (O **Globo**, 2019).

Segundo reportagem local, em 2023, o rio Flores atingiu o nível de alerta, e a barragem Flores, ficou cerca de 20 cm para transbordar, ameaçando as populações dos municípios de Pedreiras e Trizidela do Vale, especialmente as que vivem em comunidades vizinhas à barragem Flores (Blog do **Carlinhos**, 2023).

Notícias recentes do dia 02 de maio de 2024, a barragem da Usina hidrelétrica 14 de julho, situada entre as cidades de Cotiporã e Bento Gonçalves, no estado do Rio Grande do Sul, não resistiu ao grande acúmulo de chuvas e rompeu. Houve ordem de evacuação das casas próximas ao local desde que o risco de colapso foi detectado.

Várias pessoas morreram, em uma das maiores tragédias já ocorridas em solo brasileiro (**O Globo**, 2024).

A segurança de barragens é uma questão crítica que requer planejamento adequado, fiscalização rigorosa e investimentos em tecnologia. O não cumprimento dessas medidas pode resultar em tragédias ambientais, sociais e econômicas irreparáveis. Portanto, a adoção de práticas rigorosas de monitoramento e um compromisso com a transparência são essenciais para prevenir desastres e garantir a segurança da população (Pereira, 2019).

Dentre as principais causas e falhas observadas no rompimento da barragem do Fundão, em 5 de novembro de 2015, na cidade de Mariana, Minas Gerais, destacam-se: erosão interna e liquefação do rejeito na barragem, falta de monitoramento eficaz e negligência na gestão de riscos e deficiências estruturais no projeto e ampliação sem estudos adequados (Souza *et al.*, 2021).

Esses desastres mostraram a necessidade de aprimorar a fiscalização e endurecer a legislação sobre barragens, além de reforçar a importância de sistemas de monitoramento contínuos e planos de emergência eficazes e a adoção de métodos de construção mais seguros, evitando barragens alteadas a montante. Cada um dos desastres apresentados trouxe lições importantes que impulsionaram mudanças na legislação, melhoramento nas tecnologias de monitoramento e fiscalização intensa (Sena; Silva; Ferreira, 2022).

As principais causas e falhas identificadas na Barragem B1, em Brumadinho, foram: liquefação estática do rejeito, levando ao colapso repentino, laudos técnicos questionáveis e pressão para manter a barragem em operação, além da ausência de sistemas adequados de alerta para evacuação da população. Como lições aprendidas podemos listar: fortalecimento da legislação brasileira, proibindo barragens alteadas a montante, investimentos em monitoramento geotécnico avançado e tecnologia de alerta precoce, responsabilização criminal e indenizações às vítimas (Azevedo *et al.*, 2020).

Os principais aprendizados com o rompimento da Barragem Banqiao, na China foram: a importância de projetar barragens para resistir a eventos climáticos severos, necessidade de mecanismos eficientes para liberação de água em emergências e o desenvolvimento de sistemas de previsão meteorológica para tomada de decisões preventivas (Valencio; Gonçalves, 2006).

Com o rompimento da barragem de Oroville, nos Estados Unidos, houveram alguns aspectos de aprendizagem como: a importância da manutenção regular de barragens e infraestrutura associada, necessidade de testes periódicos para verificar a integridade estrutural e o desenvolvimento de melhores protocolos de evacuação para emergências (Silva, 2019).

O Tempo de Recorrência ou de retorno (TR) é um conceito muito utilizado na engenharia de barragens, mas as mudanças climáticas e alterações no uso da terra estão levando a cálculos tradicionais cada vez menos precisos. Estudos orientam que é preciso atualizar as metodologias, incorporando análises de cenários climáticos futuros e técnicas avançadas de modelagem hidrológica para melhorar a segurança das barragens (Tagata, 2024).

O aumento da variabilidade climática e as mudanças nos padrões de precipitação podem comprometer as previsões baseadas no TR, tornando insuficientes os projetos hidráulicos baseados em séries históricas passadas. As mudanças climáticas estão alterando a frequência e a intensidade das chuvas, tornando eventos extremos mais recorrentes do que o previsto pelas séries históricas tradicionais. Isso pode levar a um subdimensionamento da barragem, devido ao aumento inesperado da vazão e ocorrência de eventos com TR alto, como por exemplo, enchentes de 100 anos acontecendo em intervalos menores. Estudo desenvolvido pelo IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas sobre o aumento da intensidade das chuvas e impacto no ciclo hidrológico mostraram que o risco de enchentes extremas está aumentando globalmente devido ao aquecimento global) (Marengo, 2008). Portanto, estudos sobre erosão, assoreamento e uso da terra são essenciais para o planejamento e gestão dos recursos hídricos (Martins *et al.*, 2017).

As modificações no uso da terra devido ao desmatamento, urbanização e mudanças na cobertura vegetal influenciam a infiltração e o escoamento superficial, alterando os cálculos hidrológicos que determinam o TR. Segundo Tucci e Silveira (2002), a urbanização crescente aumenta a vazão e reduz a eficiência de estruturas hidráulicas projetadas com dados antigos.

Na Modelagem Hidrológica Defasada, o uso de séries históricas curtas ou desatualizadas pode gerar falhas no cálculo do TR, pois não incorporam tendências recentes das chuvas. Silva e Silva (2020) destacam que séries históricas passadas podem não representar corretamente as tendências futuras de precipitação.

No modelo de sedimentação são apresentados, matematicamente ou de formas computacionais, simulações do transporte e da deposição de sedimentos em rios, reservatórios e outras superfícies. Esses modelos ajudam no planejamento de barragens, controle de erosão e previsão do assoreamento de corpos hídricos (Almeida; Serra, 2017).

Os padrões de tormenta em projetos de barragem referem-se às condições climáticas extremas que devem ser consideradas no planejamento e no dimensionamento das barragens para garantir sua segurança e estabilidade ao longo do tempo. Esses padrões têm como objetivo proteger as estruturas de barragens contra eventos meteorológicos severos, como ventos fortes e chuvas intensas, que podem causar transbordamento ou a falha da barragem (Tagata, 2024).

Os principais aspectos a serem considerados para os padrões de tormenta são: a precipitação máxima esperada, onde o volume de chuva e a intensidade de precipitação são fatores cruciais no projeto de uma barragem. As chuvas extremas podem ocorrer em diferentes regiões e devem ser calculadas com base em dados históricos climáticos. A curva de intensidade-duração-frequência (IDF) é comumente usada para determinar a precipitação máxima esperada em um determinado período de retorno, que pode ser de 10, 25, 50 ou 100 anos, dependendo da importância da barragem (Anderáos; Araujo; Nunes, 2013).

O perfil hidrológico e hidráulico, onde a água da chuva coletada pela bacia de drenagem da barragem deve ser adequadamente gerida. Isso inclui considerar o escoamento superficial, o qual pode variar de acordo com a topografia e a vegetação local. O projeto hidráulico deve dimensionar corretamente a vazão máxima de projeto, levando em conta não só a intensidade da chuva, mas também a velocidade do escoamento e o tempo de resposta da bacia (Brito *et al.*, 2019).

As mudanças climáticas podem afetar a frequência e intensidade de eventos meteorológicos extremos, como chuvas mais fortes ou secas mais longas. Portanto, é importante projetar barragens com uma margem de segurança para lidar com incertezas. Estudos de cenários futuros, baseados em projeções climáticas, também devem ser considerados para avaliar como os padrões de tormenta podem evoluir ao longo do tempo (Marengo, 2008).

O sistema de drenagem de uma barragem é fundamental para evitar que a água da chuva cause sobrecarga e infiltração, o que pode afetar a estabilidade da estrutura. O dimensionamento de vertedouros (estruturas que permitem a drenagem

do excesso de água) e sistemas de drenagem interna deve ser capaz de suportar grandes volumes de água sem comprometer a integridade da barragem (Guimarães; Neto, 2022).

O estudo de inundações, em áreas onde a barragem possa causar inundações em situações extremas, é necessário elaborar um plano de contingência para as populações próximas. O impacto de tormentas extremas deve ser modelado para garantir que as barragens suportem eventos meteorológicos adversos sem causar danos (Pereira, 2021).

Um planejamento eficaz requer uma análise aprofundada dos riscos hidrológicos, levando em conta não apenas os registros históricos de eventos climáticos, mas também os possíveis efeitos das mudanças climáticas. O dimensionamento adequado das estruturas de drenagem, aliado à elaboração de planos de emergência bem definidos, é essencial para mitigar riscos, proteger a população e preservar o meio ambiente nas áreas potencialmente afetadas (Thomé; Lago, 2017).

A identificação de eventos extremos de chuva envolve análise de séries históricas de precipitação, a utilização de índices climáticos - como o R95p, que representa a precipitação acima do percentil 95 -, além da modelagem hidrológica e meteorológica, e da aplicação de limiares críticos estabelecidos de acordo com as particularidades locais (ex: deslizamentos em áreas com solo saturado) (Barbino *et al.*, 2024).

Eventos extremos são fenômenos climáticos ou meteorológicos que se desviam significativamente dos padrões esperados em uma dada região e período do ano. Eles incluem secas severas, ondas de calor, geadas intensas, tempestades, furacões e precipitações excessivas. Com o avanço das mudanças climáticas globais, esses eventos têm se tornado mais frequentes e intensos, causando impactos expressivos para o meio ambiente, a economia e a sociedade como um todo (Nascimento, 2024).

As principais causas dos eventos extremos incluem o aumento da temperatura global, as alterações nos padrões de circulação atmosférica, as mudanças nos ciclos oceânicos - como El Niño e La Niña -, além do desmatamento e da urbanização desordenada, que intensificam os efeitos climáticos em escala local (Januario, 2021).

Entre as principais consequências dos eventos extremos destacam – se os deslizamentos, a erosão, a perda da biodiversidade e a degradação do solo. Além

disso, esses fenômenos provocam desalojamentos, aumento da incidência de doenças, insegurança alimentar, prejuízos na agricultura, danos à infraestrutura e elevação dos custos relacionados a seguros e serviços públicos (Barbino *et al.*, 2024).

Ao avaliar os impactos das chuvas em diferentes condições, podemos considerar cinco cenários: estado extremamente seco, estado seco, estado normal, estado úmido e estado extremamente úmido. Esses cenários refletem o nível de saturação hídrica do solo e a capacidade dos sistemas naturais e urbanos de absorverem as águas das precipitações (Oliveira, 2022).

No estado extremamente seco, prolonga – se um período sem chuvas, que pode durar meses ou até anos. Nessa condição, o solo torna - se ressecado e compactado, apresentando baixa capacidade de infiltração. A vegetação se torna escassa ou até mesmo morre devido à perda da cobertura vegetal. O solo frequentemente apresenta rachaduras, há aumento da poeira em suspensão, os rios secam ou mantêm volumes reduzidos, e a umidade relativa do ar atinge níveis muito baixos (Nascimento, 2024).

Em estados extremamente secos, a infiltração da água é mínima, pois o solo não está endurecido e incapaz de absorver adequadamente a precipitação, que escoar rapidamente pela superfície. Chuvas rápidas e intensas podem causar enxurradas violentas e causar erosões significativas, além da formação de canais erosivos, como voçorocas e ravinas. Mesmo com pouca chuva, há risco de alagamentos urbanos devido à impermeabilização natural do solo ressecado. Apesar da precipitação, a recuperação dos recursos hídricos e da vegetação tende a ser lenta e gradual (Januario, 2021).

No estado seco, o solo apresenta ressecamento, os rios registram vazões reduzidas e a vegetação manifesta sinais de estresse. Chuvas intensas podem provocar enxurradas e erosão severa. Devido à baixa capacidade inicial de infiltração do solo seco, o escoamento superficial aumenta, favorecendo a formação de ravinas, a perda de nutrientes do solo e enchentes rápidas (Barbino *et al.*, 2024).

No estado normal, o solo mantém um equilíbrio adequado de umidade, os rios apresentam fluxo regular e a vegetação permanece saudável. As chuvas, geralmente, moderadas a fortes, são absorvidas sem causar impactos significativos, desde que não se prolonguem por longos períodos. Nesse cenário, os riscos são controlados, embora eventos de chuva intensa possam ocasionar alagamentos localizados e saturação do solo (Januario, 2021).

No estado úmido, o solo fica encharcado, os lençóis freáticos elevam - se e os rios atingem níveis próximos à sua capacidade máxima. As chuvas tornam - se extremamente perigosas, pois o solo já não consegue absorver mais água. Nesse contexto, podem ocorrer deslizamentos, transbordamentos de rios, enchentes em áreas urbanas e rurais, perda de plantações e interrupções nos serviços essenciais (Nascimento, 2024).

No estado extremamente úmido, as chuvas são intensas e persistem por dias ou semanas. O solo fica completamente saturado, de modo que qualquer precipitação adicional resulta em escoamento superficial. Os rios e lagos transbordam ou atingem seus níveis máximo de cheia, enquanto o lençol freático permanece elevado, sem capacidade para armazenamento extra. As encostas ficam instáveis, as áreas alagadas se expandem e a infraestrutura fica comprometida, aumentando o risco de colapso em barragens e redes de drenagem (Januario, 2021).

Os principais impactos das chuvas em estado extremamente úmido são as inundações severas e de longa duração, causadas pela incapacidade da água em escoar. Podem ocorrer deslizamentos de terra e encostas, principalmente em áreas mal planejadas. Ocorre a perda total das lavouras, pois solos encharcados matam as raízes. A contaminação de água potável favorece a proliferação de doenças como leptospirose, dengue e hepatite A. As comunidades ficam isoladas e os serviços públicos essenciais - como energia, transporte e saúde - entram em colapso (Oliveira, 2022).

A classificação das chuvas é fundamental para a formulação de políticas públicas voltadas à gestão de riscos e à infraestrutura de barragens. Com o agravamento das mudanças climáticas, que intensificam a frequência e intensidade de eventos extremos, torna - se cada vez mais urgente a adoção de critérios precisos e adaptativos para identificação e manejo eficaz desses eventos (Jansen; Vieira, 2022).

A classificação das chuvas é uma ferramenta essencial para compreender os padrões climáticos de uma região e, em especial, para identificação de eventos extremos. Esses eventos, como tempestades intensas e chuvas prolongadas exercem grande impacto sobre áreas urbanas e rurais, contribuindo para enchentes, deslizamentos de terra e danos à infraestrutura (Delgado; Santos, 2013).

As chuvas podem ser classificadas de diferentes maneiras, considerando critérios como intensidade, duração, frequência, origem e distribuição espacial (Junior, 2022) .

A intensidade da chuva é medida em milímetros por hora(mm/h) e permite sua classificação em diferentes categorias: nula (0 mm/h); muito leve (entre 0,1 e 1 mm/h); leve (1,1 até 5 mm/h); moderada (entre 5,1 e 25 mm/h); forte (entre 25,1 e 50 mm/h); e muito forte (acima de 50,1 mm/h). Os eventos extremos geralmente envolvem chuvas muito fortes concentradas em curtos períodos de tempo (Delgado; Santos, 2013).

A duração da chuva é um fator determinante na severidade de um evento. Ela pode ser classificada como de curta duração (minutos a poucas horas, comum em temporais), média duração (de algumas horas até um dia) e longa duração (vários dias consecutivos, geralmente associada a frentes frias ou zonas de convergência). Mesmo chuvas de intensidade moderada, quando prolongadas, podem provocar desastres significativos, como enchentes e deslizamentos (Junior, 2022).

A classificação das chuvas com base na frequência e raridade utiliza dados estatísticos históricos para estimar a precipitação máxima provável (PMP) e o tempo de recorrência de eventos extremos. Quanto mais raro o evento, maior sua relevância para a gestão de riscos, devido ao potencial de causar impactos severos e inesperados (Taborda; Detzel; Andrade, 2024).

A classificação das chuvas de acordo com sua origem é fundamental para entender seu comportamento e prever sua intensidade. Entre os principais tipos, destacam – se: chuvas convectivas, típicas do verão, com alta intensidade, ocorrência localizada e de curta duração; chuvas orográficas, provocadas pela elevação do relevo, como em regiões de serras; chuvas frontais, associadas a atuação de frentes frias ou quentes, geralmente mais extensas e duradouras; e chuvas ciclônicas, relacionadas a ciclones extratropicais ou tropicais. As chuvas convectivas são associadas a eventos extremos em áreas urbanas, enquanto as chuvas frontais podem causar enchentes em grandes bacias hidrográficas (Delgado; Santos, 2013).

Os órgãos de meteorologia e defesa civil adotam critérios padronizados para emissão de alertas, com base na intensidade e no volume da chuva. Entre eles, destaca – se o alerta amarelo (chuva entre 20 e 30 mm/h), o alerta laranja (entre 30 e 50 mm/h) e o alerta vermelho (mais de 50 mm/h ou acumulados superiores a 100 mm em 24 h) (Januario, 2021).

2.3 POLÍTICAS DE SEGURANÇA DE BARRAGENS NO BRASIL E NO MUNDO

No Brasil, a segurança de barragens é regulamentada pela Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), instituída pela Lei nº 12.334/2010. Os órgãos responsáveis pela fiscalização variam conforme o tipo de barragem: Agência Nacional de Mineração – ANM (barragens de mineração), Agência Nacional de Águas e Saneamento básico – ANA (barragens para usos múltiplos de recursos hídricos), Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (barragens de usinas hidrelétricas) e órgãos ambientais estaduais e federais, dependendo da jurisdição (Pereira, 2021).

O Plano Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) é um conjunto de diretrizes e ações voltadas para garantir a segurança de barragens no Brasil. Ele foi instituído pela Lei nº 12.334/2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e define normas para fiscalização, manutenção e monitoramento dessas estruturas (PNSB, 2000).

O objetivo do PNSB é a busca pela prevenção de acidentes e a diminuição dos riscos associados a barragens, garantindo sua operação segura e protegendo a população, o meio ambiente e a infraestrutura próxima (Araujo; Ruas; Lisboa, 2020).

Após os desastres em Mariana (2015) e Brumadinho (2019), a legislação foi alterada, não aceitando barragens com método de alteamento a montante e ampliando as exigências de monitoramento (Laschefski, 2020).

A implementação de planos de emergência eficazes, monitoramento contínuo e adoção de melhores práticas na construção são medidas essenciais para evitar tragédias semelhantes no futuro (Gorkos, 2022).

A segurança de uma barragem é avaliada com base em critérios técnicos e regulatórios, incluindo: Categoria de Risco – CRI (considera características técnicas da barragem, estado de conservação e plano de segurança), Dano Potencial Associado – DPA (avalia possíveis impactos em caso de rompimento, considerando perdas humanas, impactos socioeconômicos e ambientais), classificação das barragens (as barragens são classificadas em níveis de risco - alto, médio ou baixo), Elaboração do Plano de Segurança da Barragem – PSB (documento obrigatório para barragens de maior risco, contendo inspeções, monitoramento e medidas de emergência), Plano de Ação de Emergência – PAE (obrigatório para barragens com alto Dano Potencial Associado - DPA, detalhando ações em caso de acidente),

fiscalização pelos órgãos competentes (cada setor tem um órgão responsável - ANA, ANEEL, ANM, IBAMA, entre outros) (Leão; Santiago, 2022).

O PNSB é essencial para garantir a segurança hídrica, energética e ambiental, evitando tragédias como os rompimentos de barragens ocorridos no Brasil nos últimos anos (Figueiredo, 2020).

A segurança de barragens é regulamentada em diversos países por meio de legislações específicas que estabelecem diretrizes para construção, operação, manutenção, monitoramento e planos de emergência (Silva, 2019). Abaixo estão algumas das principais legislações e normas sobre o tema ao redor do mundo:

No Brasil temos a Lei nº 12.334/2010, que institui a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), e a Lei nº 14.066/2020, que atualiza a Lei nº 12.334/2010, tornando as normas mais rigorosas após desastres como Brumadinho e Mariana) e as Normas da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA, que regulamentam fiscalização e monitoramento) (Neves *et al.*, 2023).

Nos Estados Unidos, o Programa Nacional de Segurança de Barragens (NDSP – National Dam Safety Program), a FEMA – 93(Federal Emergency Management Agency), assemelha – se a Lei brasileira nº 12.334/2010 nos critérios de risco como: potencial de dano à vida humana, potencial de dano econômico e ambiental, altura e volume dos reservatórios. Em ambos os países, a responsabilidade primária é do empreendedor: manutenção adequada, monitoramento técnico e resposta a riscos identificados. Os pontos comuns entre as legislações, como por exemplo, plano de emergência e fiscalização técnica representam a adoção de diretrizes federais para segurança de barragens estabelecidas pela ICOLD (International Commission on Large Dams). As legislações de segurança de barragens no Brasil possuem grandes diferenças estruturais em relação a legislação americana, no que diz respeito à organização federativa e a divisão de responsabilidades entre os entes da federação (Silva, 2019).

No Canadá, Dam Safety Guidelines (Guia da Segurança em Barragens), Canadian Dam Association – CDA, 2005, revisada em 2013, define padrões para segurança, inspeções e planos de emergência) e as regulamentações podem variar entre as províncias. Tanto a legislação do Canadá, quanto a legislação brasileira estão alinhadas com os padrões internacionais da ICOLD. O Brasil possui uma legislação federal estruturada e obrigatória, o Canadá possui um modelo mais descentralizado e técnico. Apesar disso, os dois países possuem pontos comuns como: foco em

prevenção e mitigação de riscos, classificação de barragens por potencial de dano, planos de emergência, responsabilidade do empreendedor e inspeções técnicas regulares (Zuffo; Genovez, 2009).

Na China, existem os Normativos sobre Segurança de Barragens e a China tem uma das maiores redes de barragens do mundo, com monitoramento rigoroso em estruturas estratégicas. A legislação vigente é uma atualização das “Diretrizes para Avaliação de Segurança de Barragens”, estabelecida no ano 2000. A legislação chinesa é centralizada e possui alta orientação do Estado, enquanto a legislação brasileira é descentralizada e possui um forte envolvimento legal. Apesar dessas diferenças, os dois países convergem em vários pontos fundamentais: classificação por risco, responsabilidade do empreendedor, inspeções e monitoramento, plano de ação de emergência, fiscalização governamental e uso de padrões internacionais alinhados com a ICOLD (Silva, 2019).

Na Austrália, Dam Safety Act 1978(Decreto de Segurança de Barragens de 1978) e o Dam Safety Code(Código de Segurança de Barragens), toda barragem deve ser operada e mantida pela ANCOLD – Comissão Australiana de Grandes Barragens (Australian Commission on Large Dams) e pela NSW Dam Safety Committee Technical Guidelines – NSW Diretrizes Técnicas do Comitê de Segurança de Barragens, e são aplicadas por estados e territórios, seguindo regulamentações específicas. A legislação australiana compartilha diversos princípios fundamentais com a legislação brasileira, mesmo com diferenças estruturais na área jurídica e administrativa, ambos países seguem as diretrizes internacionais voltadas à gestão de riscos, prevenção de desastres, proteção de vidas humanas e do meio ambiente (Zuffo; Genovez, 2009).

Na África do Sul, National Water Act (Lei Nacional da Água, 1998) – regulamenta barragens e outras infraestruturas hídricas, exigindo auditorias de segurança periódicas) e Dam Safety Regulations (Regulamentos de Segurança de Barragens, 1986, revisados em 2012 – define critérios de segurança e inspeção). A legislação da África do Sul possui diferenças em termos de organização administrativa, escala e nível de detalhamento legal em relação a legislação brasileira. Porém, os dois países convergem em aspectos voltados à segurança estrutural, prevenção de riscos, proteção da vida humana e do meio ambiente, especialmente porque seguem os padrões das boas práticas internacionais da ICOLD (Silva, 2019).

Em Portugal, o Decreto lei 11/90, de 6 de janeiro que aprova o Regulamento de Segurança de Barragens - RSB, o decreto lei nº 409/93, de 14 de dezembro de 1993

– MDN, 1993 - que aprova o Regulamento de Pequenas Barragens e a Portaria nº 847/93, DR 213/93, Série I – B, que aprova as normas de observação e inspeção de barragens. Tanto em Portugal como no Brasil, há obrigatoriedade legal de notificação imediata às autoridades em caso de qualquer incidente ou sinal de comprometimento da segurança da barragem. Em ambos os países é necessário: classificar as barragens, responsabilizar o proprietário, plano de segurança de barragem, plano de ação de emergência, inspeções técnicas e fiscalização. Além de adotar as normas internacionais da ICOLD (Zuffo; Genovez, 2009).

Cada país adota normas específicas baseadas em seus desafios geográficos e climáticos, mas as diretrizes internacionais, como as da International Commission on Large Dams (ICOLD) – Comissão Internacional de Grandes Barragens, influenciam muitas dessas legislações (Valencio; Gonçalves, 2006).

Existem normas e regulamentos internacionais, como os da ICOLD e ANSI/ASCE que estabelecem critérios para o projeto de barragens em função de eventos climáticos extremos, ajudando a padronizar os cálculos e garantir a segurança das estruturas (Valencio; Gonçalves, 2006).

2.4 MEDIDAS MITIGADORAS

Medidas mitigadoras são ações adotadas para diminuir ou minimizar os impactos negativos de uma atividade humana sobre o meio ambiente, a saúde pública ou a sociedade. Tais medidas não eliminam totalmente os impactos, mas ajudam atenuá-los, tornando-os menos prejudiciais. São essenciais no planejamento ambiental e fazem parte dos processos de licenciamento ambiental, exigidos para grandes empreendimentos (Matos, 2015).

As mudanças na cobertura e uso da terra têm impactos em várias vertentes dos parâmetros hidrológicos de bacias hidrográficas. Essas modificações podem comprometer a quantidade e a qualidade da água disponível, que aumentam os riscos de desastres hidrológicos, como inundações e o rompimento de barragens, e afetam a sustentabilidade dos recursos hídricos. A gestão integrada e sustentável dos solos é importante para mitigação dos impactos e garantia da resiliência das bacias hidrográficas (Dias; Matos, 2023). Devido ao potencial de destruição decorrente do rompimento de barragens, a adoção de medidas de mitigação e controle dos impactos hidrológicos são essenciais para diminuir o risco de rompimento de barragens (Campolina; Gianasi, 2020).

As Áreas de Preservação Permanente (APPs) desempenham um papel fundamental na proteção dos recursos hídricos e na redução do risco de rompimento de barragens. As APPs ajudam a manter a estabilidade das margens dos corpos d'água, prevenindo a erosão e o assoreamento, que podem comprometer a integridade estrutural das barragens. A vegetação nativa presente nessas áreas também atua como um filtro natural, reduzindo a carga de sedimentos e poluentes que chegam aos reservatórios (Borges *et al.*, 2011).

A redução do assoreamento em reservatórios é importante para garantir a capacidade de armazenamento e eficiência ao longo do tempo. O assoreamento que ocorre em virtude do acúmulo de sedimentos transportados pelos rios, reduz a profundidade dos reservatórios e compromete suas funções, como a geração de energia, abastecimento de água e controle de cheias. Para mitigar esse problema, é fundamental adotar práticas de manejo sustentável das bacias hidrográficas, como reflorestamento das margens, controle da erosão do solo, construção de barreiras de contenção e manutenção de áreas de preservação permanente. Essas medidas auxiliam para diminuir o transporte de sedimentos para corpos d'água, alongando a

vida útil dos reservatórios e protegendo o meio ambiente (Barbosa; Pinto; Castro, 2014).

A estabilização das margens é uma prática fundamental para diminuir os riscos de deslizamentos, principalmente em áreas vulneráveis à erosão e instabilidade do solo. Técnicas de reflorestamento com plantio de vegetação nativa, construção de muros de arrimo, uso de geossintéticos e drenagem apropriada são eficientes para aumentar a coesão do solo e evitar que ele seja deslocado. A vegetação, por exemplo, auxilia na fixação dos solos, ao passo que sistema de drenagem previnem o acúmulo de água em excesso, um dos fatores principais que ocasionam deslizamentos. A adoção dessas medidas visa proteger tanto o ambiente local como também infraestruturas e comunidades que vivem em áreas de risco (Montevecchi; Teiga; Maia, 2009).

Garantir a qualidade da água nos reservatórios é fundamental para preservar a saúde pública e os ecossistemas aquáticos, além de assegurar o abastecimento de água potável. A diminuição do risco de contaminação pode ser atingida por meio de práticas de manejo sustentável, como o controle do uso de agrotóxicos e fertilizantes nas áreas próximas, assim como a proteção de áreas de preservação permanente nas bacias hidrográficas. A implantação de sistemas de monitoramento da qualidade da água permite também identificar fontes de poluição e adotar medidas preventivas. Essas ações auxiliam a prevenir a entrada de poluentes como metais pesados, nutrientes em excesso e microrganismos patogênicos, mantendo a água mais limpa e segura para consumo humano e uso agrícola (Silva *et al.*, 2022).

Dentre as medidas de controle de poluição, destacam-se: implementação de políticas rigorosas de controle do desmatamento; incentivo à recuperação de áreas desmatadas, especialmente em regiões críticas para a recarga hídrica; e promoção do uso sustentável da terra, incluindo práticas de agricultura e silvicultura que preservem a vegetação nativa (Siqueira, 2017).

Gandour (2021) destaca que os instrumentos legais de controle do desmatamento são essenciais para preservação dos ecossistemas, a manutenção do equilíbrio climático e a proteção da biodiversidade. Tais instrumentos englobam fiscalização, aplicação de multas e penas severas em caso de desmatamento ilegal, além de incentivos para práticas de manejo florestal sustentável. O autor destaca, ainda, o fortalecimento das leis ambientais, o monitoramento por satélite e a educação

ambiental como ferramentas, prevenção ao desmatamento e uso sustentável dos recursos naturais.

Mariano, Aquino e Junior (2022) afirmam que o incentivo à recuperação de áreas desmatadas, principalmente em regiões de recarga hídrica, é uma estratégia essencial para recuperar a funcionalidade dos ecossistemas e garantir a disponibilidade de água em longo prazo. Soma-se a isso a promoção de políticas públicas que promovem o reflorestamento, como programas de pagamento por serviços ambientais (PSA), os incentivos fiscais para proprietários de terras que adotem práticas sustentáveis. Parcerias com ONGs, empresas e populações locais também ajudam acelerar o processo de recuperação, promover a proteção dos recursos hídricos e da biodiversidade e mitigar os impactos das mudanças climáticas, avaliam os autores.

Didonet, Souza e Souza (2015) argumentam que a promoção do uso sustentável da terra é fundamental para equilibrar a produção agrícola e silvicultural com a conservação ambiental, garantindo a preservação da vegetação nativa e a manutenção dos serviços ecossistêmicos. Práticas como a agrofloresta, a agricultura de conservação e o manejo florestal sustentável são alguns exemplos que integram produção e preservação. O incentivo a essas práticas é essencial para garantir um desenvolvimento econômico sustentável e ambiente responsável.

A estrutura agrária e questões macroeconômicas também devem ser consideradas no processo de mitigação dos impactos das mudanças do uso da terra. Segundo Turetta (2011), a presença do Estado através de unidades de conservação, infraestrutura, assentamentos e incentivos, é um fator importante no ordenamento de uso da terra; assim como o papel do grande capital (grandes fazendas), dos pequenos núcleos fundiários e da demanda nacional e internacional por produtos agropecuários.

A ocupação desordenada do solo em áreas próximas às barragens pode aumentar o risco de erosão e deslizamentos, além de alterar o regime de escoamento das águas pluviais. A gestão adequada do uso da terra é fundamental para minimizar esses impactos hidrológicos. As ações necessárias para mitigação são: planejamento urbano e rural que considere a capacidade de suporte dos solos e a proximidade de corpos d'água; restrição à ocupação de áreas de risco e implementação de zonas de amortecimento ao redor dos reservatórios; e promoção de práticas agrícolas sustentáveis, que reduzam o escoamento superficial e a erosão (Bispo; Levino, 2011).

Bispo e Levino (2011) argumentam que ao planejar a ocupação e uso da terra, é fundamental avaliar a resistência do solo à construção, evitar a sobrecarga que possa levar à erosão, compactação ou deslizamentos.

A restrição à ocupação de áreas de risco e a implementação de zonas de amortecimento ao redor dos reservatórios são importantes medidas para prevenção de desastres naturais e garantia a proteção dos recursos hídricos. Políticas rigorosas de planejamento territorial e fiscalização são essenciais para garantir que essas áreas sejam preservadas, promovendo a segurança da população e a integridade dos reservatórios que abastecem as comunidades e geram energia (Carvalho; Galvão, 2015).

Técnicas como o plantio em contorno, terraceamento e uso de culturas auxiliam na desaceleração do fluxo de água pluvial, permitindo uma maior infiltração no solo e reduz a perda de nutrientes. O plantio direto, que evita a aração do solo, diminui a erosão ao manter a estrutura do solo intacta. A agrofloresta e a rotação de culturas promovem uma cobertura vegetal constante, que protege o solo contra a degradação. O incentivo a essas práticas, através da formação de agricultores e políticas de incentivo, favorece para uma agricultura mais produtiva e sustentável, que preserva o solo e diminui os impactos ambientais (Didonet; Souza; Souza, 2015).

Estudos sobre a mudança de uso e cobertura das terras permitem compreender os processos de modificação do espaço geográfico e são importantes devido à necessidade de conhecimento da fragilidade das terras e dos recursos naturais. Em áreas agrícolas, o estudo da mudança do padrão de uso e ocupação das terras se faz necessário à medida que esta análise poderá ser utilizada para subsidiar processos de tomada de decisões e contribuir para o planejamento sustentável do meio rural, promovendo a utilização eficiente dos recursos naturais, além de aumentar a produção e a qualidade de vida do pequeno agricultor (Garofolo; Rodriguez, 2022).

O monitoramento contínuo das condições hidrológicas e estruturais das barragens é fundamental para identificar problemas antes que eles se agravem. Esse monitoramento inclui a medição dos níveis de água, controle de erosão nas margens e verificação de falhas. São recomendadas inspeções regulares das barragens, com atenção especial para sinais de desgaste, erosão e infiltrações; o uso de tecnologias avançadas, como sensores e drones, para monitoramento em tempo real; implementação de planos de manutenção preventiva, incluindo a remoção periódica de sedimentos dos reservatórios (Silva; Silva, 2020).

A educação ambiental e a conscientização das comunidades locais sobre a importância da preservação dos recursos hídricos e das áreas de proteção são fundamentais para o sucesso das medidas de mitigação. Comunidades bem-informadas são mais propensas a colaborar na proteção das barragens e no uso sustentável do solo. Dentre as principais estratégias a serem adotadas, destacam-se as campanhas educativas sobre a importância das APPs e do reflorestamento; envolvimento da comunidade em projetos de recuperação ambiental; e treinamento de agricultores e proprietários de terras em práticas sustentáveis de uso da terra (Borges *et al.*, 2011).

A busca de informações, a discussão e organização de argumentos em uma visão local, conhecendo os mecanismos de participação, possibilita que a comunidade acadêmica também produza informações de conhecimentos sobre o local. Discussões, trabalhos de campo, análise de riscos, consulta a legislação, produção de materiais e divulgação que embase inclusive demandas que podem ser direcionadas aos conselhos gestores ambientais em diferentes níveis (local, municipal, estadual) (Turetta, 2011).

A combinação dessas medidas pode significativamente diminuir os riscos hidrológicos associados às barragens. A manutenção das APPs, a redução do desmatamento, a gestão adequada do uso da terra, o monitoramento regular, o reflorestamento e a educação ambiental são peças chave para garantir a segurança das barragens e proteção das comunidades e ecossistemas a jusante (Borges *et al.*, 2011).

2.5 MAPEAMENTO DAS ÁREAS DE RISCO

A segurança de barragens tem se beneficiado de avanços tecnológicos que permitem um monitoramento mais preciso, detecção precoce de falhas e uma resposta mais rápida a potenciais riscos. Algumas das principais inovações tecnológicas na área são: os sensores Inteligentes e IoT (Internet das Coisas). Os sensores inteligentes instalados nas barragens coletam dados em tempo real e os enviam para sistemas centralizados de monitoramento. Eles podem medir variáveis como: pressão da água e infiltração; movimentação estrutural; variação e atividade sísmica; temperatura e umidade do solo (Oliveira; Guimarães, 2019). Por exemplo, sistemas de fibra óptica são usados para detectar pequenas deformações nas estruturas antes que se tornem críticas.

O uso de drones equipados com câmeras com sensores térmicos e Lidar (Light Detection and Ranging) permite inspeções detalhadas e frequentes, sem necessidade de intervenção humana direta. Já imagens de satélite ajudam a monitorar mudanças na superfície das barragens e nos reservatórios. Os principais benefícios são: inspeções mais rápidas e seguras; detecção de anomalias estruturais e vazamentos invisíveis a olho nu; cobertura de áreas de difícil acesso (Gorkos, 2022). Por exemplo, a NASA utiliza imagens de satélite para monitorar grandes barragens ao redor do mundo, identificando deslocamentos no terreno.

A Inteligência Artificial e o Big Data ajudam na análise preditiva, permitindo antecipar falhas estruturais. Algoritmos analisam milhares de dados históricos e em tempo real para prever padrões de risco. Os principais benefícios são: detecção de anomalias que podem indicar falhas iminentes; melhor tomada de decisões baseadas em dados; redução de falsos alarmes (Oliveira; Guimarães, 2019). Por exemplo, empresas como a Vale implementaram modelos preditivos baseados em IA após o desastre de Brumadinho para aumentar a segurança de suas barragens.

A modelagem computacional possibilita a previsão de cenários de rompimento e simula estratégias de resposta distintas. Softwares avançados simulam cenários possíveis de colapso, fluxo de água em caso de rompimento e impactos ambientais e sociais. Como por exemplo, podemos citar o software HEC-RAS, amplamente utilizado para simular inundações e rompimentos de barragens, auxiliando na criação de planos de emergência (Silva, 2019).

Os avanços em telecomunicações e automação possibilitam sistemas de alerta precoce mais eficientes, que informam rapidamente as comunidades próximas sobre possíveis riscos. A título de exemplo, algumas barragens utilizam torres de sirenes automáticas, SMS e aplicativos para alertar a população e equipes de emergência (Gorkos, 2022).

A nanotecnologia e os materiais inteligentes, são novos materiais com propriedades autorreparadoras e resistência aprimorada, que estão sendo desenvolvidos para aumentar a durabilidade das barragens. Um bom exemplo disso é o concreto com nanopartículas de óxido de grafeno, que melhora a resistência à infiltração e aumenta a vida útil da estrutura (Ribeiro; Leoncini; Santos, 2022).

O mapeamento de áreas que podem ser afetadas em caso de rompimento de barragem é uma prática essencial para a gestão de riscos e a proteção das populações que vivem próximas a essas estruturas. Esse mapeamento possibilita a identificação das áreas que seriam inundadas ou diretamente, facilitando a evacuação rápida e eficaz em caso de emergência (Campos *et al.*, 2014).

O mapeamento das áreas de risco contribui para o planejamento territorial ao apontar áreas inadequadas para a construção de habitações, escolas, ou outros empreendimentos com grande concentração populacional. Para Campos *et al.* (2014), o conhecimento antecipado dessas áreas também auxilia na preservação de ecossistemas sensíveis, prevenindo a degradação ambiental e facilitando a adoção de medidas de mitigação.

Em locais com ocupação já consolidadas, o mapeamento das áreas de risco visa subsidiar a elaboração de planos de contingência detalhados, que contemple sistemas de alertas e comunicação de emergência, além do treinamento da população para enfrentar situações de perigo. Essas ações reforçam a confiança entre a população, as autoridades e as empresas responsáveis pela gestão das barragens (Campos *et al.*, 2014).

Ao identificar as áreas potencialmente afetadas, é possível adotar medidas preventivas para proteger infraestruturas críticas, como estradas, pontes e redes de energia. Empresas e indústrias situadas em áreas de risco podem elaborar planos de continuidade de negócios, diminuindo perdas econômicas em caso de rompimento (Campos *et al.*, 2014).

A inspeção da barragem é outro recurso essencial para avaliar sua segurança, pois permite identificar diretamente fenômenos que possam impactá-las. Esse

processo permite monitorar o estado da crista da barragem, possibilitando a implementação de medidas necessárias para garantir a sua segurança. O programa de inspeção exige uma inspeção visual cuidadosa não apenas das características mais evidentes, mas também das anomalias pequenas, que são negligenciadas e de difícil acesso devido à falta de mão-de-obra (Henriques; Roque, 2015).

Um equipamento de monitoramento avançado pode fornecer a caracterização detalhada das barragens com base nos princípios de engenharia, além de avaliar seu desempenho físico no ambiente natural, prevenindo desastres naturais e mitigando riscos socioeconômicos. A inspeção por visão artificial é uma etapa crucial nesse monitoramento, mas, devido à complexidade e altura das barragens, a detecção visual costuma ser perigosa e dispendiosa (Zhao *et al.*, 2021).

O avanço das tecnologias na área de segurança de barragens reduz significativamente o risco de desastres, tornando as inspeções mais eficientes e a tomada de decisões mais assertiva. A combinação de sensores inteligentes, IA, drones e modelagem computacional permite um monitoramento mais preciso e ações preventivas eficazes. O futuro da segurança de barragens está na automação, na análise de dados em tempo real e no uso de materiais inovadores (Gorkos, 2022).

Drones, também conhecidos como VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados) são aeronaves leves operadas remotamente, e representam uma tecnologia cada vez mais presente no uso civil. Suas características estruturais, aliadas ao custo relativamente baixo e à facilidade de operação, têm contribuído para a crescente adoção desses equipamentos nos últimos anos. Este projeto propõe uma aplicação voltada para captação de imagens em áreas de difícil acesso em barragens, como as faces de montante e jusante da crista, a tomada d'água e o vertedouro (Henriques; Roque, 2015).

Imagens aéreas sempre se destacaram como um diferencial para qualquer empreendimento, pois oferecem perspectivas únicas e pouco convencionais que naturalmente atraem a atenção de potenciais clientes. Entre as formas mais acessíveis e práticas de capturar esse tipo de imagem é o uso de drones, que se destaca pela eficiência, baixo custo e facilidade de operação (Rodrigues *et al.*, 2020).

Os drones podem ser classificados com base em diversos critérios, como o tipo de sustentação no ar, o nível de autonomia, o peso e a fonte de alimentação. Essas características são fundamentais para determinar a adequação do equipamento a diferentes tipos de missão. Por exemplo, planejar operações de longo alcance, é

essencial considerar modelos com maior autonomia de voo, maior capacidade de carga e eficiência energética (Valavanis; Vachtsevanos, 2015).

A classificação técnica mais relevante dos drones está relacionada ao tipo de tipo de sustentação. Os dois principais tipos são os drones de asas fixas e os de asas rotativas. O termo “asa fixa”, é amplamente utilizado na aviação, refere - se a aeronaves que utilizam asas estáticas em conjunto com o deslocamento do ar para gerar sustentação. Drones desse tipo são mais velozes e ideais para missões de longa distância. Embora normalmente exijam pistas para decolagem e pouso, versões mais leves podem ser lançadas manualmente (Rodrigues *et al.*, 2020).

Os drones de asas rotativas, conhecidos também como multirotores, possuem um ou mais rotores. Dessa forma, podem ser classificados em tricópteros, quadricópteros, hexacópteros, octacópteros, com configurações de 3, 4, 6 e 8 hélices, respectivamente (Valavanis; Vachtsevanos, 2015).

Os VANT's são ideais para o levantamento de grandes áreas de barragens, pois possibilitam a geração de fotogrametria digital a baixo custo, permitindo o monitoramento em tempo real de barragens. Através da combinação das imagens capturadas pelos VANT's, é possível construir um modelo 3D detalhado da barragem, no qual as áreas de interesse são registradas e medidas com precisão. A criação desse modelo 3D baseia - se principalmente em algoritmos de processamento de imagem, que incluem extração de características, cálculo de pontos e outras técnicas avançadas. A precisão de nuvem de pontos é avaliada por meio da comparação entre diferentes conjuntos de dados. Dessa forma, a inspeção detalhada e o monitoramento emergencial da barragem podem ser realizados com base nesse modelo tridimensional (Henriques; Roque, 2015).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A Bacia Hidrográfica do Rio Flores localiza-se na cidade de Joselândia (Figura 1), a 276 km de São Luís, no estado do Maranhão, e abrange uma área de 5.423 km² (correspondente a 1,64% do estado) com capacidade para 1,4 bilhão de metros cúbicos de água. O rio Flores, um dos principais afluentes do rio Mearim, drena os municípios de Fernando Falcão, Tuntum, Barra do Corda, Joselândia, São José dos Basílios e Santo Antônio dos Lopes. Sua bacia hidrográfica abrange uma diversidade de ecossistemas, por estar inserida em uma zona de transição entre os biomas Caatinga, Cerrado e pré-amazônico.

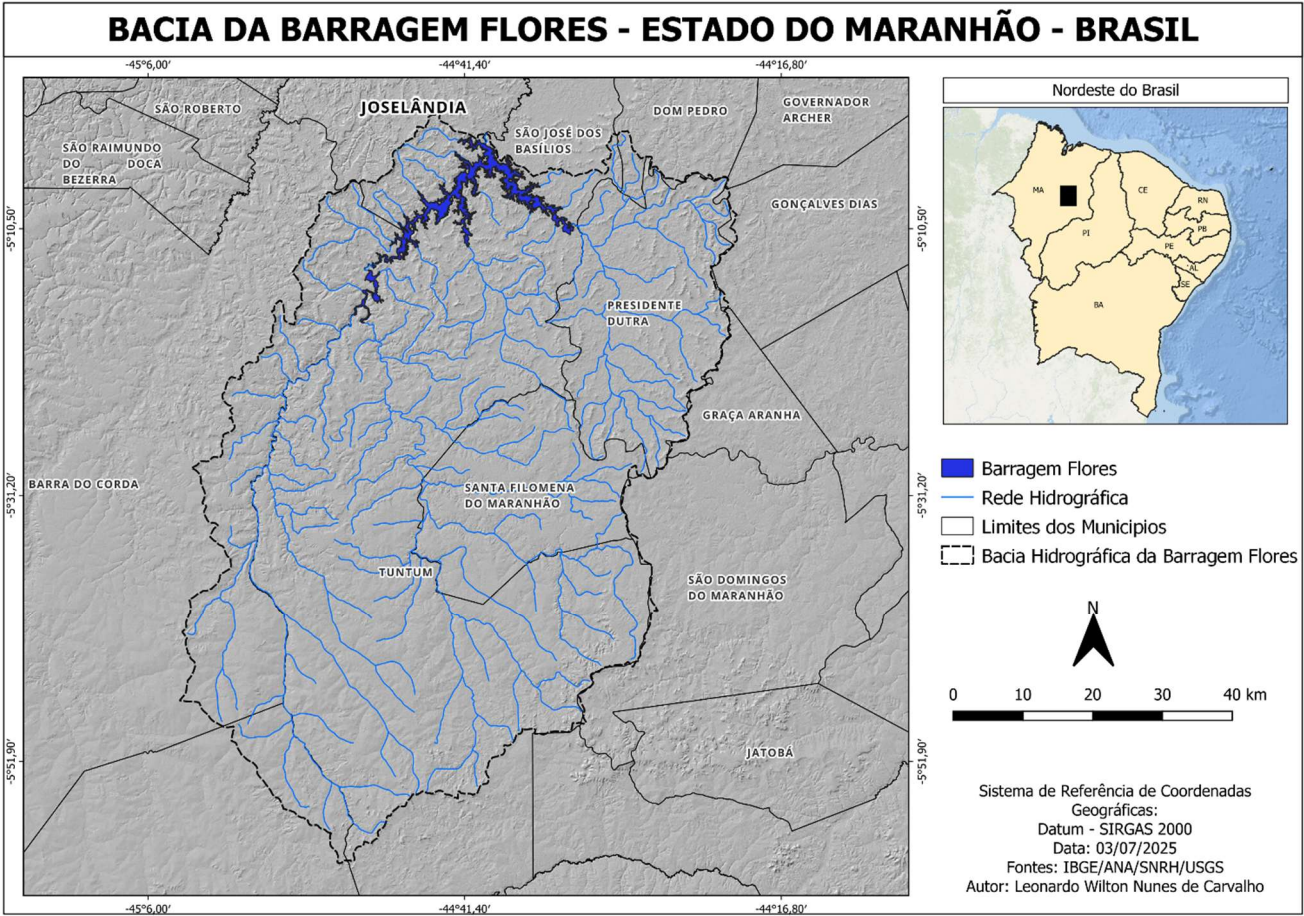
O município de Joselândia, possui uma área de 703 km², cuja densidade demográfica é de 21,23 hab./km², com uma população (2022) de 14.924 habitantes, e uma população estimada em 2024 de 15.235 habitantes. O índice de desenvolvimento humano (IDH) é de 0,561(2010), com trabalho e rendimento de 2,3 salários-mínimos.

Quanto às características climáticas, predomina clima do tipo subúmido, com transição para o semiárido, com duas estações bem definidas, uma estação úmida (novembro a maio) e outra seca (junho a outubro).

Em relação aos aspectos geológicos e pedológicos, o rio Flores apresenta solos tipo luvisolos crômico pálidos e argissolos vermelho – amarelo distróficos, como também argissolos vermelho – amarelo estróficos.

A construção da Barragem Flores foi iniciada em 1983 e concluída em 1987 com o objetivo de controlar as enchentes da bacia do Mearim; melhorar a navegabilidade; aproveitar a água para agricultura irrigada; e aproveitamento energético. Na época a proposta previa a construção de outras barragens ao longo do curso do rio Mearim e de seus principais afluentes – Grajaú, Corda e Flores.

Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica do rio Flores, Maranhão.



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

3.2 BASE DE DADOS

Neste trabalho adotou-se uma abordagem analítica-descritiva, partindo da delimitação automática da bacia hidrográfica, com uso de dados Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), conforme metodologia utilizada por Moraes e Sales (2016) para extração automática de drenagem e delimitação da bacia de contribuição da barragem. Todos os mapas temáticos foram gerados com o auxílio do software QGIS, versão 3.28, adotando-se o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000).

Os dados hidrológicos e de qualidade de água foram obtidos no banco de dados mantidos e disponibilizados pela Agência Nacional das Águas (ANA) através da plataforma Hidroweb (<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/>). Foram levantados dados referentes a estação fluviométrica Flores localizada na cidade de Joselândia, estado do Maranhão (33270000).

As leituras foram realizadas diariamente, permitindo o cálculo das médias mensais para cada ano, em seguida calculou - se a média anual para todos os anos do período analisado.

Os dados das estações pluviométricas localizadas na BHRF foram coletados no site da ANA através da plataforma hidroweb, mas apenas as estações Campo Largo, Flores, Peritoró e Santa Vitória apresentaram registros no período de 1985 a 2023. Para cada uma dessas estações, foram calculadas as médias anuais e, em seguida, obteve-se a média interanual da pluviometria entre as quatro estações. A partir dessas médias interanuais, foi determinada a média histórica.

Os dados de cobertura e uso da terra da Bacia Hidrográfica do Rio Flores (BHRF), para os anos de 1985 a 2023 (39 anos), foram na plataforma do Projeto Mapbiomas com uso *toolkit* para o Google Earth Engine (GEE) elaborado por Siqueira (2020). Após o download dos mapas anuais e tabela contendo as respectivas áreas das classes, procedeu-se a tabulação e análise gráfica com uso de planilha eletrônica e *software* de SIG.

3.3 ANÁLISE DE DADOS

Após a tabulação dos dados, foi aplicado o teste *Shapiro-Wilk* para avaliar a normalidade dos dados. Todos os testes estatísticos foram realizados conduzidos com um nível de significância de 0,05. A presença de tendências monotônicas nos dados de precipitação e vazão foi verificada pelo teste não-paramétrico Mann-Kendall.

As mudanças entre as classes de cobertura e uso da terra foram quantificadas em termo de percentuais, com representações gráficas. As análises estatísticas foram realizadas em Python, com o intuito de garantir a transparência e reprodutividade das análises.

A identificação dos meses excepcionalmente secos e chuvosos foi realizada pela metodologia de anos-padrão, empregando-se a técnica dos quantis, conforme descrito por Schneider e Silva (2014) e utilizada por Oliveira, Silva e Lima (2017). Para isso, as proporções dos valores de precipitação histórica foram estabelecidas para definir as classes de condição de precipitação. Valores de precipitação acumulada mensal inferiores ao percentil p_5 e superiores ao percentil p_{95} foram classificados como "Extremamente seco" e "Extremamente úmido", respectivamente. A classe "Normal" foi delimitada pelos percentis p_{25} e p_{75} , enquanto as demais categorias de precipitação estão especificadas no Quadro 01.

Quadro 01 – Classificação da condição de precipitação da BHRF com base p-quantil (qp) da precipitação observada.

Cor	Classe	Intervalos	Código
	Extremamente seco	$q_0 \leq \text{Prec} < q_5$	1
	Seco	$q_5 \leq \text{Prec} < q_{25}$	2
	Normal	$q_{25} \leq \text{Prec} < q_{75}$	3
	Úmido	$q_{75} \leq \text{Prec} < q_{95}$	4
	Extremamente úmido	$q_{95} \leq \text{Prec} \leq q_{100}$	5

Fonte: Schneider e Silva (2014); Zavattini e Boin (2013).

A avaliação das condições da proteção das margens da barragem Flores foi realizada por meio da estimativa de área de cobertura florestal, utilizando o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), com base em imagens atuais do satélite Sentinel-2, sensor Multispectral Instrument (MSI). Inicialmente, foi definido um buffer de dois quilômetros no entorno da barragem.

O NDVI é um indicador que mede a vitalidade da vegetação a partir da diferença entre a reflectância da luz no espectro do infravermelho próximo (NIR) e do

vermelho (RED) (Silva *et al.*, 2016). Essas bandas são obtidas por sensores em satélite, drones ou aeronaves, onde o NDVI é obtido pela fórmula abaixo:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$

Sendo que NIR é o infravermelho próximo (a vegetação saudável reflete bastante essa radiação), e RED é o vermelho (a vegetação saudável absorve bastante essa radiação para a fotossíntese).

O quadro 02 representa os valores do NDVI, que varia entre - 1 e + 1, bem como são interpretados esses dados:

Quadro 02 – Valores do NDVI, com a respectiva interpretação.

Valor NDVI	Interpretação
Próximo de - 1	Água, neve ou nuvens espessas
0 a 0,1	Superfícies áridas, solos expostos
0,2 a 0,4	Vegetação esparsa, pastagens
0,5 a 0,7	Vegetação moderada a densa
Acima de 0,7	Floresta tropical, vegetação densa

Inspeções sobre a parede da barragem Flores e no seu entorno foram realizadas utilizando drone DJI Mini 2. As imagens capturadas possibilitaram uma análise detalhada dos diferentes usos do solo, além de permitir a avaliação das condições de conservação e a identificação de possíveis patologias estruturais.

Considera – se drone qualquer aeronave capaz de ser controlada nos três eixos sem a presença de piloto a bordo, ou seja, operada remotamente por meio de controle via rádio. Devido à sua versatilidade e facilidade de uso, a popularidade desses equipamentos tem crescido continuamente (Canarim; Pisani, 2021).

Sistemas Aéreos Remotamente Pilotados (SARPs) são popularmente conhecidos como drones. O termo “drone”, em inglês, significa “zangão” – uma abelha macho que não possui ferrão – em referência ao som contínuo emitido por esses equipamentos, semelhante ao zumbido do inseto. A nomenclatura se popularizou especialmente com a ampliação do uso desses sistemas para fins recreativos e domésticos (Gorkos, 2022).

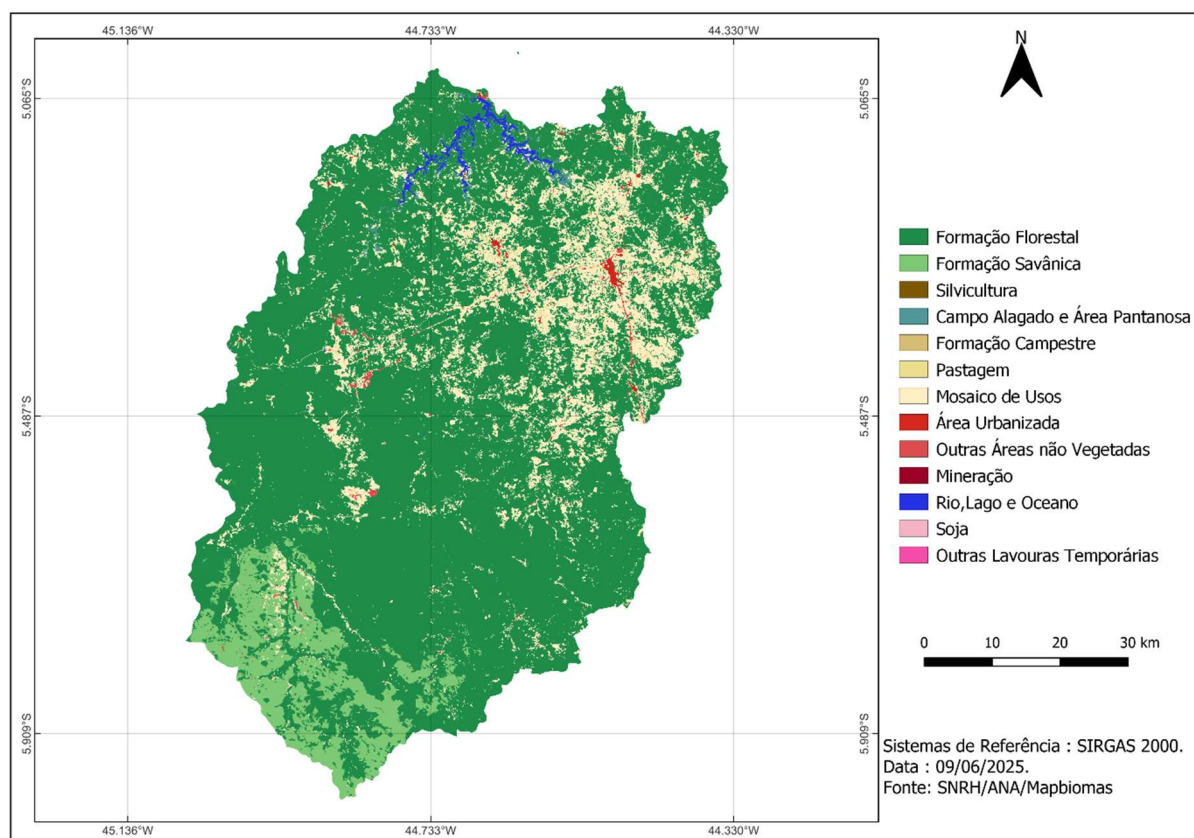
O uso de drones na coleta de dados torna – se especialmente valioso em locais de difícil acesso por terra, como taludes de aterros e cortes de grande porte, geralmente formados por bancadas e patamares. Essa tecnologia também se mostra eficiente em levantamentos de áreas de barragens, sejam elas de concreto ou de aterro, onde o acesso é limitado ou arriscado. Com isso, os drones contribuem para uma coleta de informações mais rápida e precisa, fundamental para a elaboração de

diversos projetos que envolvem profissionais como engenheiros, topógrafos, geógrafos, entre outros (Canarim; Pisani, 2021).

4 RESULTADOS

O mapa de cobertura e uso da terra da bacia hidrográfica do rio Flores, apresentado na Figura 2, revela importantes transformações no solo ao longo dos anos. Em 1985 a bacia exibia um nível de ocupação muito baixo, com apenas 0,56% (conforme Quadro 02) de sua área dedicada à pastagem, o que indicava uma ocupação relativamente incipiente e ainda em processo de alteração. Nesse período, a predominância era da Formação Florestal, que ocupava a maior parte da região, seguida pelas áreas de Mosaico de Usos, Savânica e Pastagem. Esta configuração reflete uma paisagem majoritariamente natural, com o uso mais restrito do solo para atividades agrícolas ou pecuárias.

Figura 2 – Uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do rio Flores no Maranhão em 1985.



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Ao longo dos anos, até o ano 2000, observou – se uma estabilidade na distribuição dos tipos de uso da terra, com poucas mudanças significativas, quando se observa uma discreta expansão das áreas de pastagem. Contudo, a partir desse momento, nota – se uma leve expansão das áreas de pastagem, embora ainda discreta. Esse aumento pode ser interpretado como uma indicação das pressões

socioeconômicas e ambientais que passaram a influenciar as práticas de uso do solo, refletindo um movimento gradual de conversão de áreas naturais para atividades mais voltadas à exploração agropecuária.

O quadro 03 representa os valores absolutos em metros quadrados das formações vegetais na BHRF em 1985, bem como os respectivos valores relativos em percentuais.

Quadro 03 – Valores absolutos e percentuais das formações vegetais na BHRF em 1985.

Formação	Valor absoluto(km ²)	Valor relativo (%)
Formação Florestal	4.145	75,83
Mosaico de Usos	795	14,54
Formação Savânica	401	7,34
Rio, Lago e Oceano	32	0,59
Pastagem	31	0,57
Campo Alagado e Área Pantanosa	27	0,49
Outras Áreas não vegetadas	21	0,38
Área Urbanizada	14	0,26
Formação Campestre	0,88	0,02

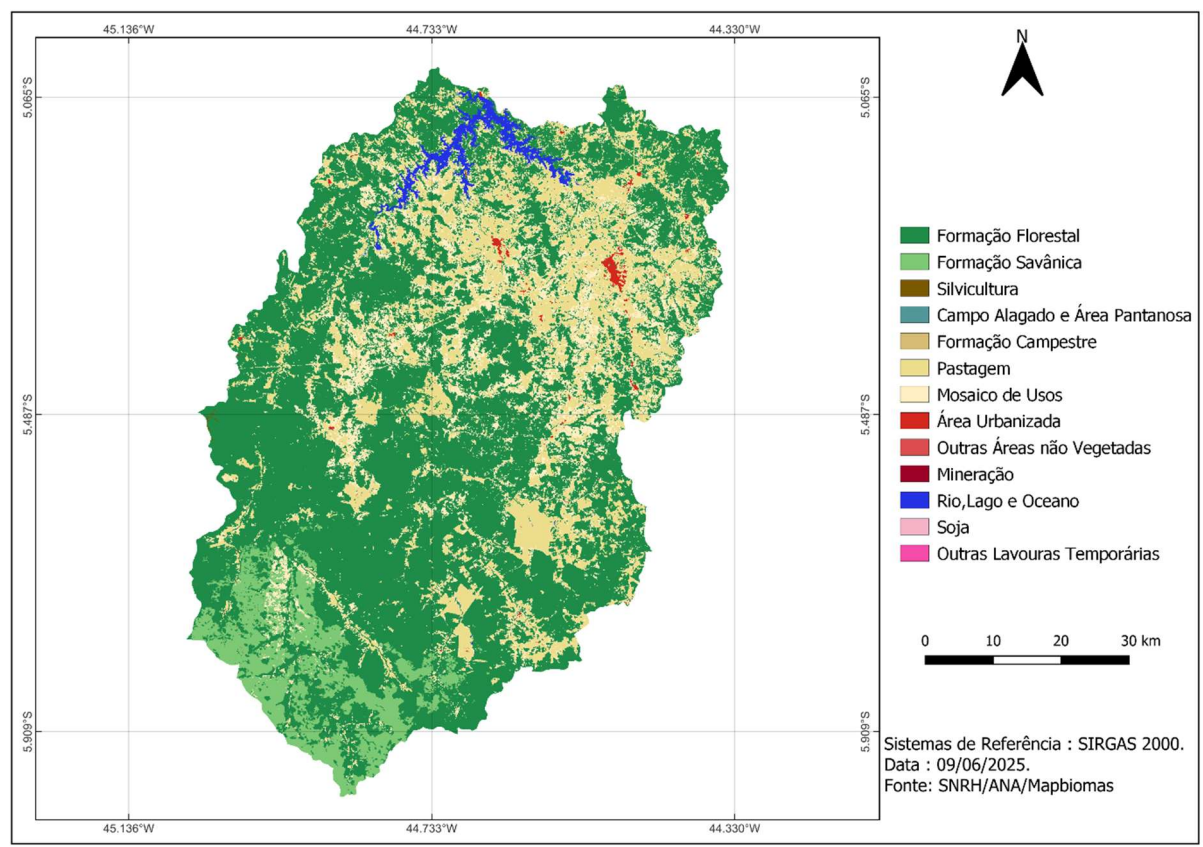
Fonte: elaborado pelo autor (2025).

A partir dos anos 2000, a BHRF passou a vivenciar mudanças substanciais no uso e cobertura da terra. O mapa apresentado na Figura 3 ilustra claramente o padrão de distribuição das classes de uso e cobertura da terra nesse período. Observa - se uma redução significativa das áreas ocupadas por formações Florestais e Savânicas, que cederam espaço para a expansão das pastagens e, principalmente, para o avanço de atividades agrícolas.

A introdução do plantio de soja, contribuiu para a conversão de mata nativa em áreas de cultivo. Além disso, a silvicultura e outras lavouras temporárias também desempenharam um papel importante nesse processo, acelerando a substituição de coberturas naturais por culturas que melhoram a renda da população local. Essa mudança reflete uma intensificação da exploração agropecuária na região, com impactos diretos na biodiversidade local, na dinâmica hidrológica da bacia e na

qualidade dos serviços ecossistêmicos, como controle da erosão e a manutenção da fertilidade do solo. A transformação do uso da terra a partir de 2000 é um indicativo claro de como as atividades econômicas e as demandas agrícolas têm moldado a paisagem da bacia hidrográfica, com repercussões ambientais de longo prazo.

Figura 3 – Uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do rio Flores no Maranhão em 2000.



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

O quadro 04 representa os valores absolutos em metros quadrados das formações vegetais na BHRF no ano 2000, bem como os respectivos valores relativos em percentuais.

Quadro 04 – Valores absolutos e percentuais das formações vegetais na BHRF no ano 2000.

Formação	Valor absoluto(km²)	Valor relativo (%)
Formação Florestal	3.312	60,59
Mosaico de Usos	745	13,63
Formação Savânica	373	6,82
Rio, Lago e Oceano	70	1,28
Pastagem	936	17,12

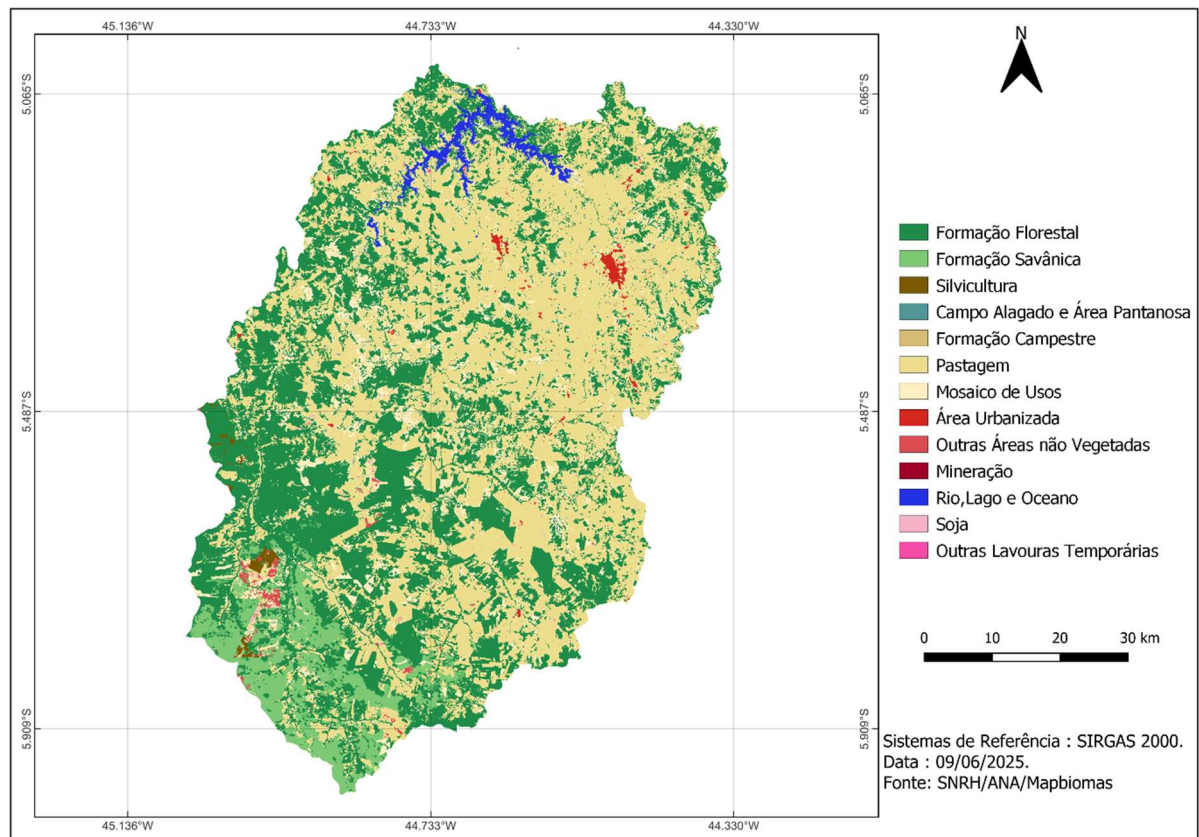
Campo Alagado e Área Pantanosa	10	0,18
Outras Áreas não vegetadas	2	0,04
Área Urbanizada	18	0,33

Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Em 2023, as atividades de pastagem, juntamente com outras práticas de uso antrópico, passaram a predominar nas áreas no entorno da barragem da BHRF. O mapa apresentado na Figura 4 ilustra o padrão de distribuição das classes de uso e cobertura da terra na bacia no ano de 2023, evidenciando uma transformação significativa na paisagem. É possível observar uma redução acentuada das áreas originalmente ocupadas por formações Florestais e Savânicas, que foram progressivamente substituídas pela expansão das pastagens e pelo avanço das atividades agrícolas.

O cultivo de soja, a silvicultura e outras lavouras temporárias tiveram um papel fundamental nesse processo, refletindo a crescente pressão por espaços agrícolas na região. Além disso, o aumento da ocupação urbana também contribuiu para a diminuição das áreas naturais. Esse cenário demonstra uma mudança clara no uso da terra, com a substituição das coberturas nativas por atividades agropecuárias, um reflexo das transformações econômicas e sociais que moldam a região. As consequências dessa transição incluem impactos negativos sobre a biodiversidade, a qualidade da água e a manutenção dos serviços ecossistêmicos essenciais, como o controle da erosão e a regulação do ciclo hidrológico.

Figura 4 – Uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do rio Flores no Maranhão em 2023.



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

As recentes modificações nos padrões de uso da terra, a BHRF se encontra bastante alterada. A Figura 4 mostra a variação interanual das classes de uso e cobertura da terra ao longo de 39 anos (1985 a 2023). Verifica-se, ainda em 2023, uma predominância das classes Pastagem e Formação Florestal, abrangendo 45,6% e 37,75% da área total da bacia, respectivamente. A Formação Savânica estende-se por 5,6% da área, enquanto Mosaico de Usos ocorrem em 8,86% da área da bacia. Soja e demais classes (campestre, rios, infraestrutura urbana, cana de açúcar, silvicultura, mineração) somam 1,8% da área.

Os dados foram obtidos a partir do Projeto MapBiomas, que disponibiliza áreas em km² de diferentes tipos de formação florestal, compreendendo os anos de 1985 a

2023, para visualizar a variação interanual de uso e cobertura do solo na BHRF, foi traçado um gráfico em uma planilha Excel (Figura 5). As formações de campo alagado e área pantanosa, além da silvicultura abrangem 0,28% da área da bacia, soja possui cerca de 0,06 % da área da bacia e outras lavouras temporárias correspondendo a 0,04% da área da bacia, áreas como formação campestre (0,81Km²) e mineração (0,14 Km²) tiveram valores percentuais mínimos ou nulos.

O quadro 05 representa os valores absolutos em metros quadrados das formações vegetais na BHRF em 2023, bem como os respectivos valores relativos em percentuais.

Quadro 05 – Valores absolutos e percentuais das formações vegetais na BHRF em 2023.

Formação	Valor absoluto(km ²)	Valor relativo (%)
Formação Florestal	2.055	37,75
Mosaico de Usos	482	8,86
Formação Savânica	305	5,60
Rio, Lago e Oceano	60	1,10
Pastagem	2.482	45,60
Silvicultura	15	0,28
Campo Alagado e Área Pantanosa	15	0,28
Outras Áreas não vegetadas	2	0,04
Área Urbanizada	22	0,40
Soja	3	0,06
Outras Lavouras Temporárias	2	0,04
Formação Campestre	0,81	0,01
Mineração	0,14	0,00

Fonte: elaborado pelo autor (2025).

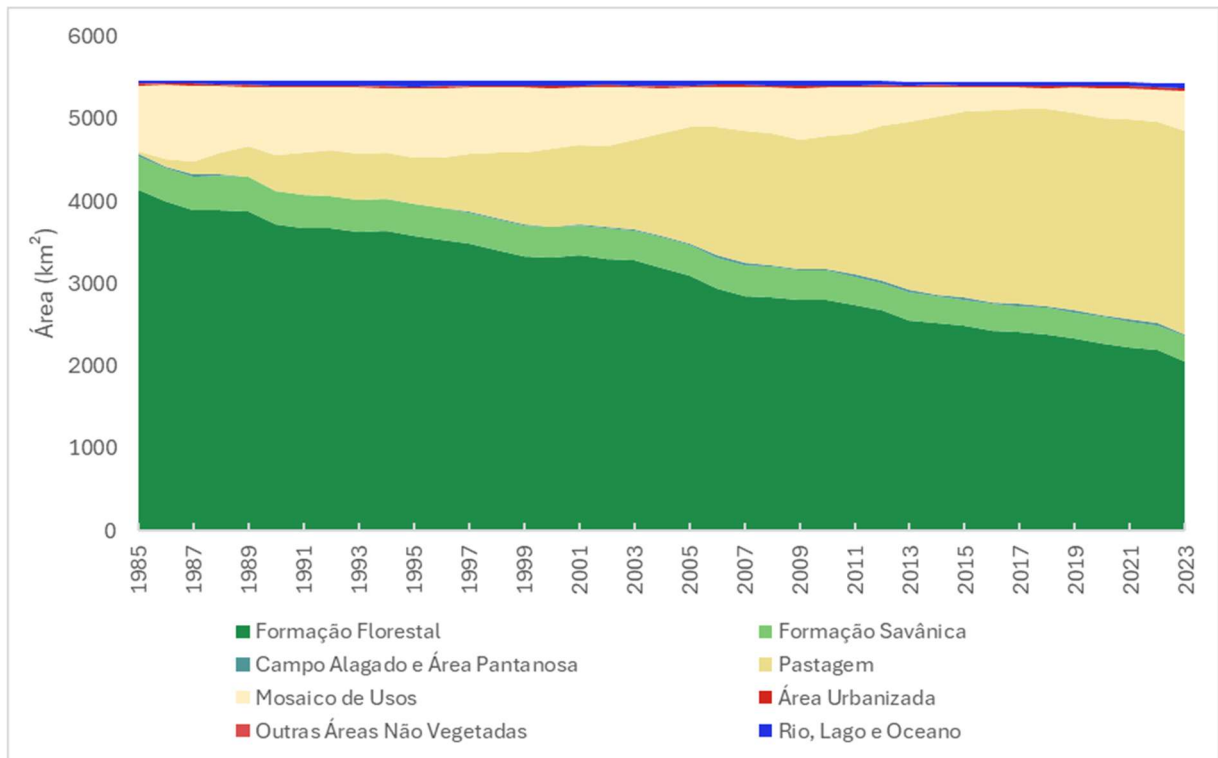
Segundo Pereira e Moraes, 2022, em 1985 a BHRI apresentava um nível muito baixo de ocupação, com apenas 1% de sua área coberta por pastagens. Esse cenário permaneceu praticamente inalterado até o ano 2000, quando se observou uma leve expansão das áreas de pastagem, especialmente na região centro-norte da bacia. A

partir dos anos 2000, começaram a ocorrer transformações mais significativas na bacia. Houve uma redução nas áreas de formações Florestais e Savânicas, principalmente em decorrência da expansão das pastagens na porção centro-norte, e da introdução de atividades agrícolas, como o cultivo de soja no extremo sul da bacia. Apesar dessas recentes mudanças nos padrões de uso da terra, a BHRI ainda se encontra em bom estado de conservação. Em 2019, as Formações Savânicas e Florestais ainda predominavam, ocupando 56,7% e 21% da área total da bacia, respectivamente. Já a Formação Campestre cobria 7,4% da área, enquanto as áreas de pastagem representavam 11,8% da bacia. As culturas de soja, juntamente com outras classes como rios, infraestrutura urbana e cana de açúcar, somavam 3,3% da área total.

Segundo Pessoa, 2016, ao estudar a Bacia Hidrográfica do Rio Parnaíba (BHRP), bacia hidrográfica é atualmente reconhecida como uma unidade territorial fundamental para o planejamento, pois integra dinâmicas sociais, processos ambientais e estratégias de gestão do território. No entanto, é essencial compreender que seus limites naturais nem sempre coincidem com as divisões político – administrativas, o que frequentemente dificulta a articulação e implementação de políticas públicas e ações eficazes em sua área de abrangência.

Segundo Cabacinha, Castro e Gonçalves, 2010, a fragmentação da paisagem na área da Bacia Hidrográfica do Rio Araguaia (BHRA) foi intensa e está diretamente associada ao processo de uso e ocupação da terra. Os resultados indicaram uma expressiva taxa de conversão das fitofisionomias nativas em áreas destinadas à pecuária e lavouras temporárias, especialmente entre os anos de 1977 e 1989. As métricas de área revelaram que a formação de fragmentos isolados está ligada à substituição de uma matriz natural composta por savanas e campos, por uma matriz antrópica dominada por pastagens e cultivos agrícolas. Embora as formações florestais não tenham apresentado grande redução em termos de área ao longo do período analisado, elas permanecem restritas ao centro da bacia, cercadas por áreas agrícolas e pastagens, com baixa conectividade ecológica. A criação de corredores de biodiversidade que conectem fisicamente a área de estudo ao Parque Nacional das Emas e ao Parque Estadual Nascentes do Taquari – unidades de conservação adjacentes – representa uma estratégia crucial para garantir a preservação dessa vegetação remanescente.

Figura 5 – Variação interanual de uso e cobertura do solo em km² na bacia hidrográfica do rio Flores no Maranhão.



Fonte: elaborado pelo autor (2024). Base de dados: Mapbiomas (2024).

As mudanças no uso da terra têm impactado significativamente o ciclo hidrológico da barragem do rio Flores. O aumento do escoamento superficial, decorrente da redução da vegetação nativa, tem intensificado o processo de assoreamento no leito do rio Flores, elevando a quantidade de sedimentos depositados no fundo da barragem. Esse acúmulo de sedimentos reduz a cota inicial da lâmina d'água e altera o perfil hidrológico da barragem. Em períodos chuvosos mais intensos, essa condição pode agravar os riscos de enchentes e causar prejuízos expressivos nas áreas no entorno da barragem.

Os impactos do uso da terra são indicadores diretos de alterações no comportamento hidrológico da bacia do Rio Flores. Eles afetam desde a quantidade e distribuição das águas até a frequência de eventos extremos, além da qualidade da água e da estabilidade dos ecossistemas aquáticos.

A forma como o solo é utilizado tem efeitos diretos sobre o comportamento do ciclo hidrológico. A substituição da vegetação natural por superfícies impermeáveis reduz a infiltração da água da chuva. Isso aumenta o volume e a velocidade do escoamento superficial, e favorece enchentes e a erosão. Com menos cobertura vegetal e mais uso intensivo do solo, a infiltração da água diminui, o que significa

menos água infiltrada para alimentar o lençol freático, afeta a recarga dos aquíferos e reduz a vazão de base do rio Flores durante períodos secos. As alterações no balanço entre o escoamento superficial e infiltração alterou o regime hidrológico do rio, causando uma frequência maior de cheias e secas.

A retirada da vegetação expõe o solo à erosão, e o material erodido é transportado para o rio, assoreando o seu leito, como também a barragem homônima. O uso intensivo da terra para agricultura contribui para a poluição do rio, prejudicando a qualidade da água superficial.

(Pereira; Moraes, 2022) observaram que, a partir da década de 1980, ocorreram diversas transformações no cenário socioeconômico de vários municípios do Maranhão, impulsionadas principalmente pela instalação de grandes empresas como a VALE, ALUMAR e SUZANO Papel e Celulose, além da expansão de monoculturas como a soja. Essas mudanças impactaram diretamente a cobertura vegetal da região, resultando no declínio das formações Campestre e Savânica. A análise do uso e cobertura da terra em 1985 indicava que a BHRI ainda preservava áreas de vegetação nativa, em sua grande maioria composta por cerrado. No entanto, em 2019, o avanço das atividades do agronegócio e agropecuárias, provocaram alterações significativas nas classes de uso e cobertura da terra, afetando diretamente a vegetação primária, e consequentemente a qualidade da água. Foi evidenciado uma forte correlação entre as mudanças no uso e cobertura da terra e os impactos sobre os recursos hídricos. A redução da cobertura vegetal, aliada ao aumento do assoreamento, contribuiu para o acréscimo de sedimentos em suspensão, comprometendo os cursos d'água e o leito fluvial da bacia.

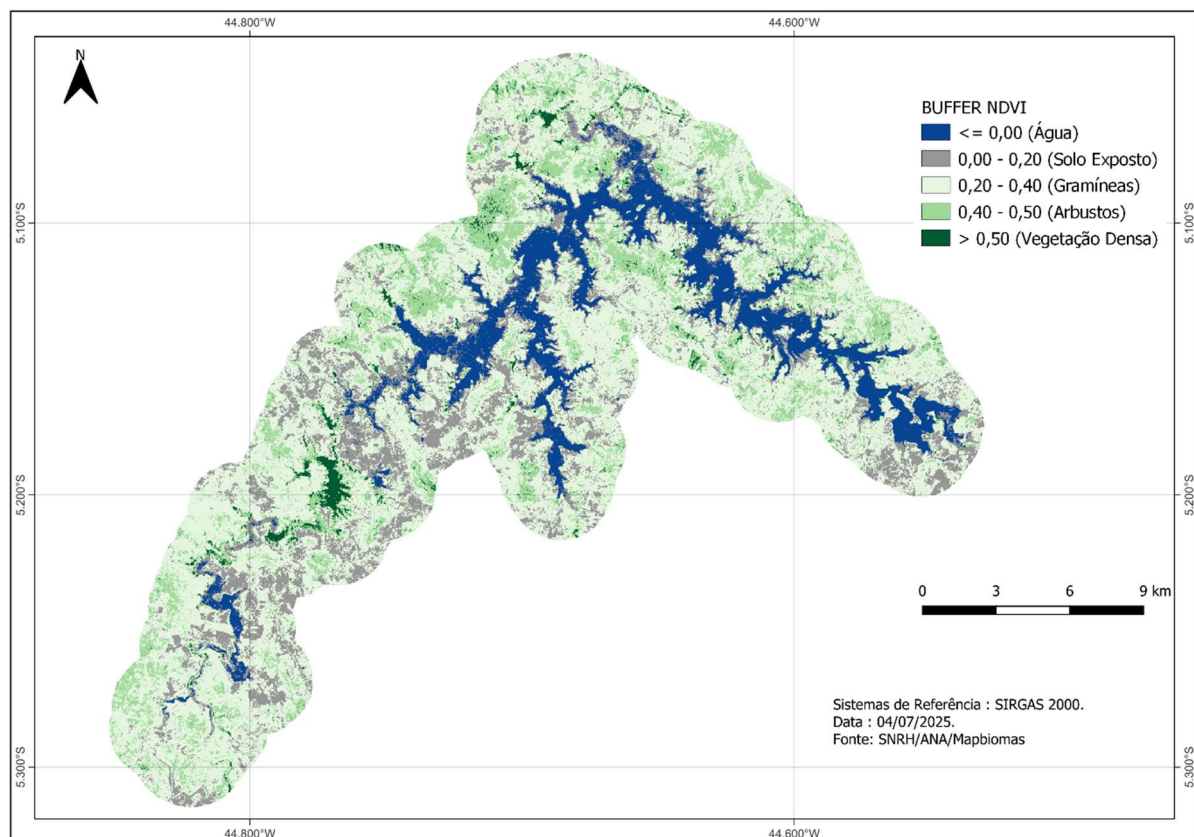
Dessa forma, o desmatamento das classes de cobertura da terra, tende a provocar modificações significativas na área da bacia. As transformações observadas, aliadas aos riscos resultantes de uma ocupação desordenada do meio ambiente, evidenciam a necessidade de ações e medidas voltadas para o manejo adequado da terra. Nesse contexto, o estudo teve como objetivo de contribuir para a gestão sustentável da área, ressaltando a importância de conter a remoção da vegetação primária e mitigar outros impactos negativos. Destaca – se, ainda, a necessidade de planejamento ambiental integrado, bem como a implementação de ações educativas voltadas à promoção da educação ambiental (Pereira; Moraes, 2022).

Pessoa, 2016 o planejamento de uma bacia hidrográfica, considerada como unidade territorial para a gestão dos recursos hídricos, deve ser orientado por uma

abordagem sistêmica. Isso significa reconhecer que a água não pode ser gerida isoladamente, sem levar em conta suas inter-relações com outros componentes do meio, como o solo, a vegetação, o relevo e, sobretudo, a ação antrópica. As intervenções humanas alteram o funcionamento dos sistemas naturais, provocando mudanças que impactam diretamente tanto a qualidade quanto a quantidade de água disponível na bacia.

Segundo (Cabacinha; Castro; Gonçalves, 2010), as alterações nas métricas de área, núcleo, forma e isolamento das classes naturais indicam que os remanescentes da BHRA, em termos de integridade, estão sob forte ameaça. Contudo, a implementação de medidas voltadas à redução do isolamento e dos efeitos de borda, à melhoria da forma, ao aumento do tamanho e da diversidade biológica, bem como à eliminação dos agentes de degradação, pode favorecer a recuperação ambiental desses fragmentos.

Figura 6 – NDVI no entorno da barragem do rio Flores no Maranhão.



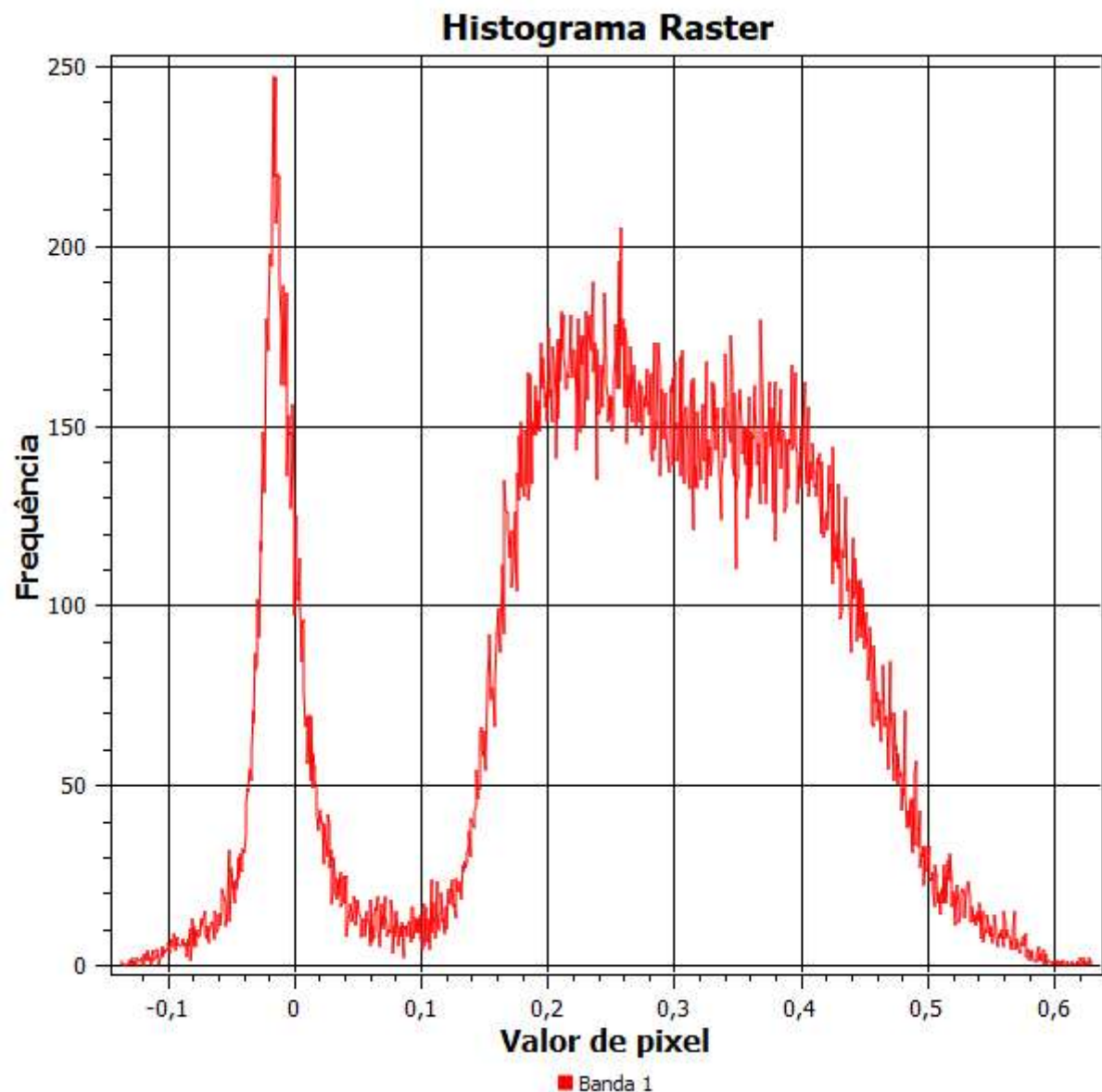
Fonte: elaborado pelo autor (2025). Base de dados: Google Earth Engine (2025).

A ocupação das margens no entorno da barragem afeta profundamente o seu ciclo hidrológico, pois a permeabilidade do solo diminui e reduz a infiltração da água

da chuva, acelera o escoamento superficial direto para a barragem, alterando o regime de vazões do rio. A remoção da vegetação nativa e a interferência no solo causam erosão nas margens, aumenta o transporte de sedimentos para a barragem, provoca o seu assoreamento, e diminui a sua capacidade útil.

A Figura 6 demonstra o Índice da Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) no entorno da barragem do rio Flores, com imagens analisadas no período entre 1 de julho de 2023 a 30 de outubro de 2023, observando que há um aumento significativo de solo exposto, em detrimento as áreas com vegetação, e nessas áreas percebe – se uma maior concentração de gramíneas, seguida por áreas com pequenos arbustos, e uma posterior concentração de vegetação densa.

Figura 7 – Histograma com os valores do NDVI por classes.



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

A Figura 7 nos mostra o histograma onde foram obtidos os valores do Índice da Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) no entorno da barragem do rio Flores, em torno de 0,63, observando que índices com valores menores do que zero correspondem a água, índices menores do que 0,20 configuram solo exposto, índices maiores do que 0,20 e menores do que 0,40 correspondem as gramíneas, índices entre 0,40 e 0,50 indicam pequenos arbustos, e índices superiores a 0,50 remete a vegetação densa. Foi utilizada a técnica do slice, para obtenção de tais índices.

A ocupação desordenada e próxima das margens da barragem intensifica a severidade e frequência de cheias súbitas, causadas pelo aumento do escoamento superficial rápido e volumoso, isso expõe a comunidade a maiores riscos de danos materiais e até a perda de vidas em eventos extremos. Mudanças no comportamento do escoamento exige a revisão dos limiares utilizados para emitir alertas de enchentes e outros eventos críticos, já que os volumes e velocidades das águas podem superar os valores esperados.

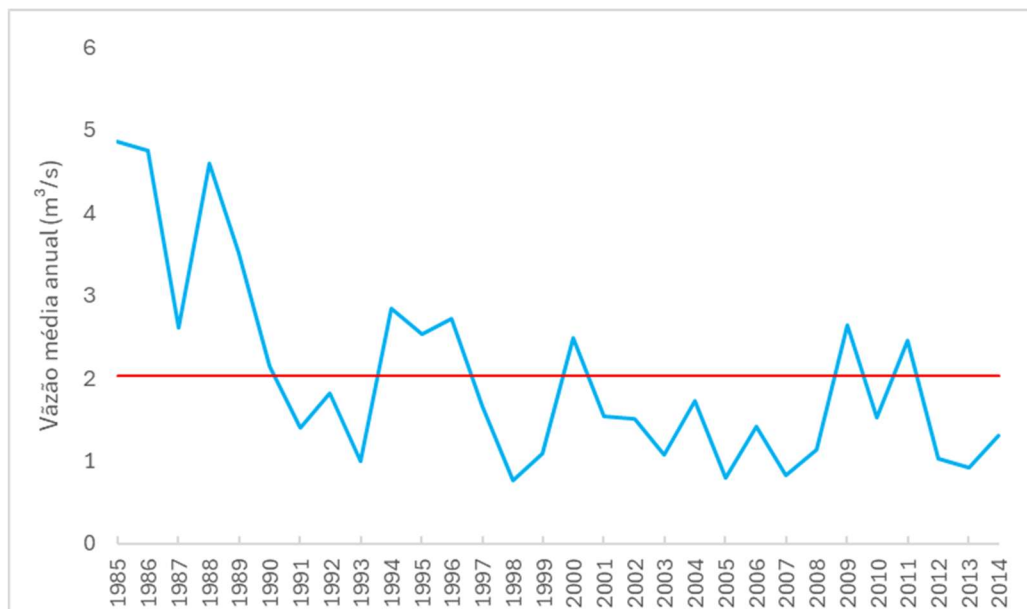
Para os dados de pluviometria, foi realizado o teste de Shapiro – Wilk sendo obtido um $W_{\text{calc}}(\text{statistic})$ de 0,4050 e um p-valor igual a $2,137 \times 10^{-11}$, menor que o nível de significância 0,05, nos levando a concluir que não há uma distribuição normal para os dados de pluviometria. Para os dados de vazão, foi aplicado o mesmo teste e um $W_{\text{calc}}(\text{statistic})$ de 0,8564 e encontrado um p-valor de 0,008 que é muito menor do que o nível de significância de 0,05, o que nos leva a concluir que para os dados de vazão não temos uma curva de distribuição normal.

Foi realizado teste Mann – Kendall, utilizando planilhas Excel. Para os dados de pluviometria, foi obtido um valor para Z igual a -2,5284 para um nível de significância 0,005, portanto a hipótese H_0 é verdadeira, e os dados para pluviometria têm tendência ao decréscimo. De maneira análoga, o teste Mann – Kendall foi realizado para os dados de vazão, sendo obtido um valor Z igual a -3,3898 para um nível de significância 0,005, portanto a hipótese H_0 é aceita, e dizemos que os dados para vazão têm tendência significativa ao decréscimo.

Com a modificação do padrão natural da drenagem, modelos hidrológicos calibrados para condições naturais tornam – se menos precisos, dificultando a identificação antecipada de eventos extremos. A Figura 9 mostra a variação interanual da vazão do rio Flores medida em uma estação fluviométrica, onde é possível observar uma sutil tendência de redução ao longo da série histórica. Foi traçado o gráfico das vazões médias anuais da BHRF utilizando uma planilha modelo Excel

(Figura 8). Também foi obtida a média histórica de 2,026 m³/s, considerando a variação em relação a essa média.

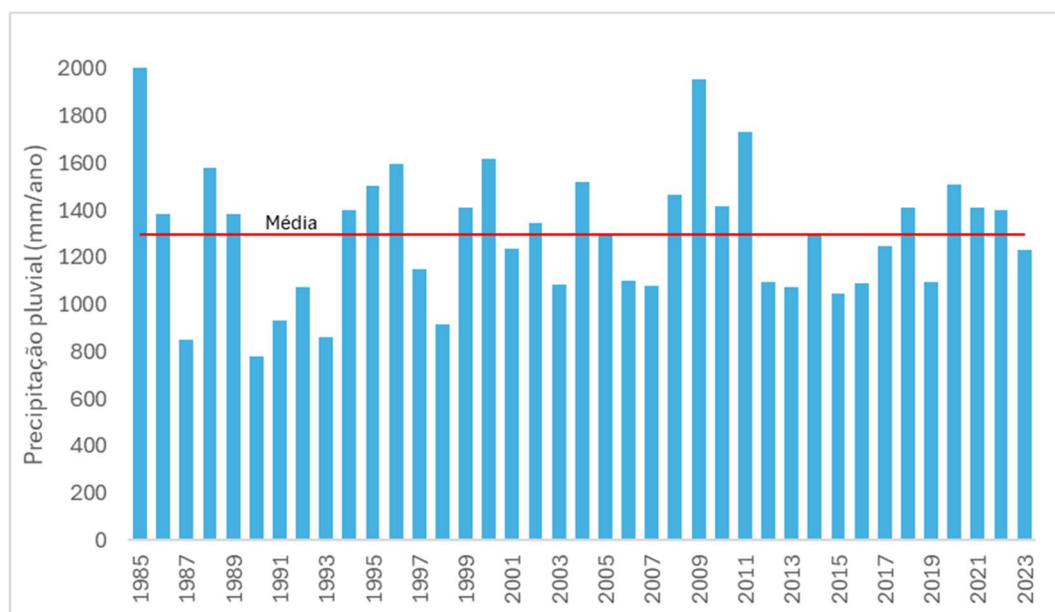
Figura 8 – Variação interanual das vazões médias anuais na bacia hidrográfica do rio Flores no Maranhão (1985 – 2014).



Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Conforme o exposto, verifica-se que a ampliação das áreas de pastagem e agricultura na BHRF pode já ter provocado impactos nas condições hidrológicas do rio. No entanto, a vazão dos rios é diretamente afetada pelo regime pluviométrico, a Figura 9 representa a variação interanual dos dados pluviométricos, o gráfico interanual da precipitação na BHRF (Figura 9) foi traçado utilizando uma planilha modelo no Excel. A partir das médias interanuais, foi determinada a média histórica de 1295,86 mm/ano.

Figura 9 – Variação interanual da precipitação na bacia hidrográfica do rio Flores no Maranhão.



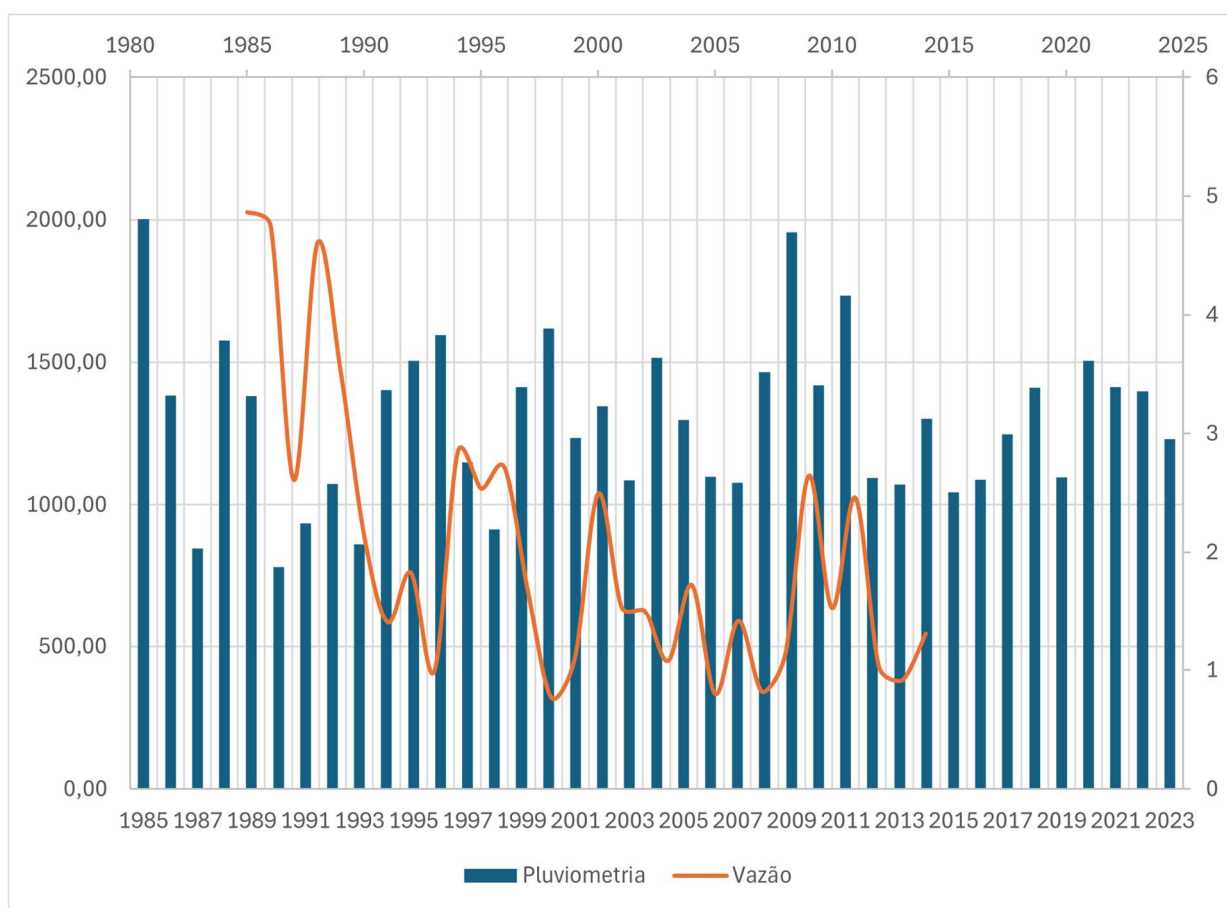
Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Pereira e Moraes, 2022 identificaram uma correlação positiva significativa entre as áreas ocupadas pelas classes de Formação Florestal, Savânica e Campestre e as vazões registradas nas estações, ou seja, quanto maiores essas áreas, maior a vazão do rio Itapecuru. Em contrapartida, observaram uma correlação negativa significativa entre o aumento das áreas de pastagem e ao cultivo de soja e a redução das vazões registradas em todas as estações analisadas. A partir da análise da correlação entre os dados de cobertura da terra e vazão média, constatou-se uma tendência a diminuição das vazões ao longo dos anos. Essa redução está associada aos impactos sobre a vegetação nativa, como o desmatamento, que favorece o acúmulo de sedimentos e pode levar à obstrução parcial do fluxo hídrico.

Com os dados das estações pluviométricas consideradas na BHRF para o cálculo da variação interanual da precipitação, foi calculada também a média para cada mês do ano, durante o período de 1985 a 2023, em cada uma das quatro estações consideradas anteriormente. Em seguida, obteve-se as médias mensais combinadas entre as quatro estações. Por fim, foi elaborado o gráfico mensal histórico de precipitação na BHRF utilizando uma planilha modelo no Excel (Figura 11).

A figura 10 representa o gráfico dos dados pluviométricos em forma de barras, no período de 1985 a 2014 contrapondo com a curva da dispersão da vazão no período de 1985 até o ano de 2014.

Figura 10 – Gráfico da Precipitação x Vazão na bacia hidrográfica do rio Flores no Maranhão.



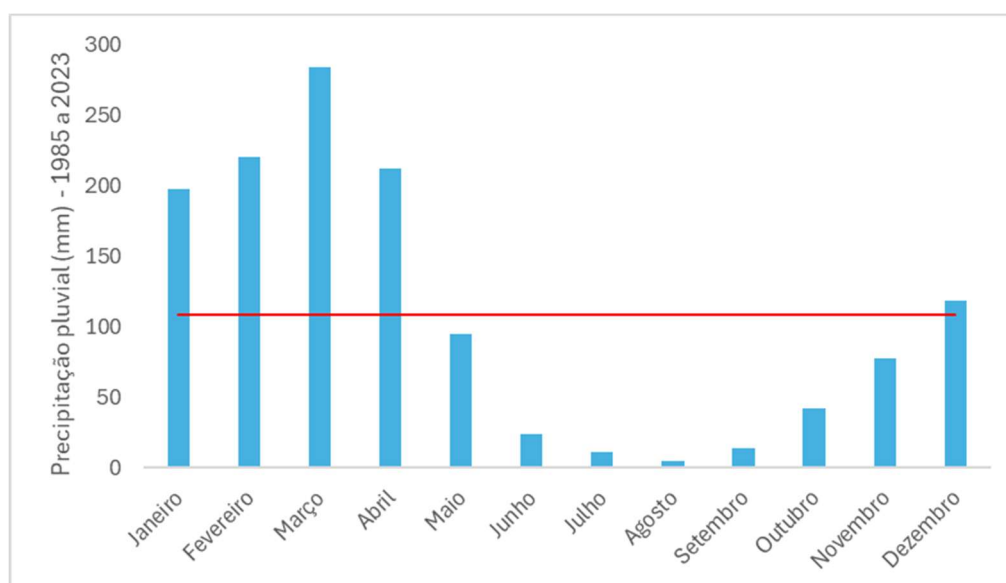
Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Morais e Abreu, 2021, a utilização de dados pluviométricos estimados por sensoriamento remoto permitiu compreender a distribuição espacial das precipitações extremas e médias, bem como suas variações ao longo da BHRP. O emprego de informações provenientes de satélites meteorológicos demonstrou – se uma ferramenta promissora para a análise das condições climáticas da região, especialmente diante da limitada rede de monitoramento convencional e automática disponível na BHRP.

Foi verificado os dados de condição de precipitação na BHRF, segundo o método dos quantis, e o mês de agosto foi considerado extremamente seco por estar abaixo do p_5 que é igual a 8,48 mm, os meses de julho e setembro são considerados

secos por estarem abaixo do p_{25} que é igual a 21,81 mm. Os meses de janeiro, maio, junho, outubro, novembro e dezembro são considerados normais por estarem abaixo do p_{75} que é igual a 200,68 mm. Os meses de fevereiro e abril são considerados úmidos por estarem abaixo do p_{95} que é igual a 248,98 mm. O mês de março foi considerado extremamente úmido por estar acima do p_{95} . A Figura 10 representa a variação mensal dos dados pluviométricos, obtido através de planilhas modelo Excel.

Figura 11 – Variação mensal histórica de precipitação na bacia hidrográfica do rio Flores no Maranhão.



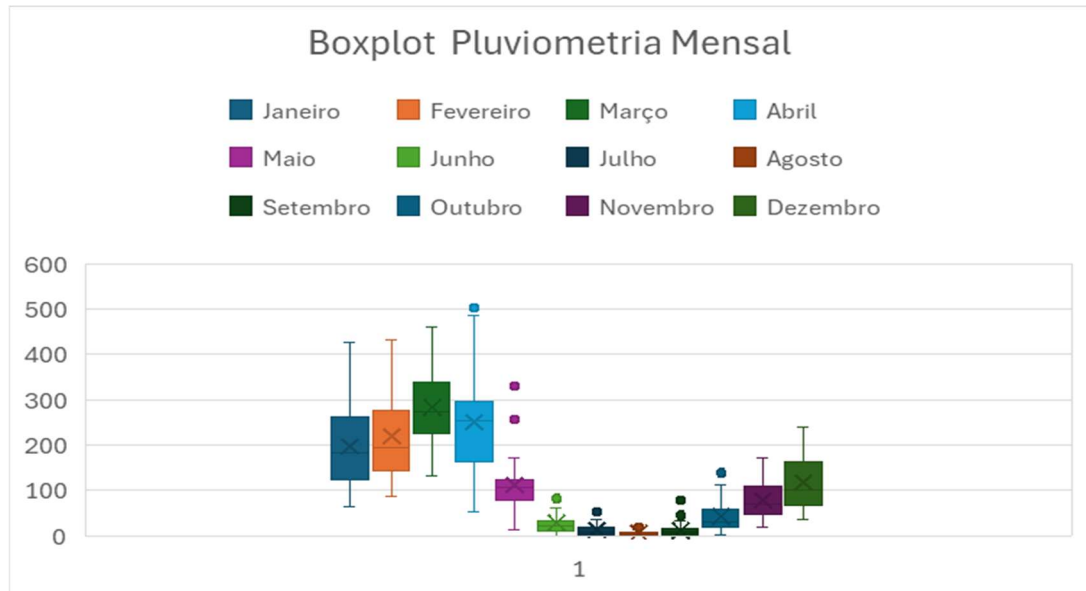
Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Pereira e Moraes, 2022, os dados de precipitação forneceram subsídios para o entendimento da variação da vazão e a relação com o uso e cobertura da terra na BHRI. Concluindo que, os baixos níveis de precipitação, atingem, os corpos hídricos, fazendo com que a vazão sofra diminuição.

Segundo Moraes e Abreu, 2021 a aplicação técnica dos quantis permitiu identificar os anos em que as diferentes áreas no interior da BHRP foram submetidas a condições variadas de precipitação. Secas extremas foram registradas em distintas regiões nos anos de 1998, 2007, 2012, 2015 e 2016, enquanto 2000, 2008, 2009 e 2011 se destacaram por serem anos extremamente chuvosos em algumas partes da BHRP. A ausência de um padrão espacial definido na distribuição das condições pluviométricas ao longo da série histórica reforça a necessidade de um monitoramento contínuo da precipitação na BHRP, fundamental para apoiar programas de mitigação de eventos extremos e ações eficazes de gerenciamento dos recursos hídricos.

A figura 12 representa o gráfico boxplot da pluviometria para identificação dos meses úmidos ou extremamente úmidos (acima do nível superior da caixa – 3º quartil), normais (no intervalo da caixa ou intervalo interquartil) e meses secos ou extremamente secos (abaixo do nível inferior da caixa – 1º quartil).

Figura 12 – Gráfico boxplot para pluviometria ao longo dos meses.



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

No dia 30 de junho de 2025, foi realizada uma visita na barragem do rio Flores para verificar a situação atual da barragem utilizando drone, onde foram capturadas diversas imagens e vídeos do local.

Figura 13 – Fotografia da parede da barragem Flores.



A Figura 13 mostra a situação do talude a montante da parede da barragem, verificamos a presença de vegetação, além de material rochoso no pé do talude, destacando a presença de enrocamento, fatores muito importantes para manutenção da parede estrutural da barragem. Do lado jusante, observou – se também uma forte presença de vegetação, o que prejudicou a obtenção de imagens das comportas e da galeria para passagem de água do lado montante para o lado jusante, quando as comportas estão abertas.

Figura 14 – Fotografia da ocupação das margens da barragem Flores.



A Figura 14 apresenta a ocupação desordenada das margens da barragem, o que representa uma situação de iminente perigo para comunidade local. Foi verificada a presença de casas e restaurantes muito próximas a água, pois a barragem Flores é bastante utilizada para piscicultura e o lazer, principalmente durante os finais de semana. Verificou – se ainda a ocorrência de residências e chácaras no interior da barragem, em locais que a população denomina de “ilhas”, o que causa uma situação de alerta iminente quando o período chuvoso é mais rigoroso. Além da situação de perigo, essa ocupação desordenada das margens provoca desmatamento, e consequente carreamento dos sedimentos para o fundo da barragem, alterando a cota do nível da lâmina d’água. Observamos também ao chegar na barragem, a construção de um platô de contenção paliativo, que serve como barreira para a água quando o seu nível elevar, e que ficará sem função se esse nível ultrapassar o nível do platô, além de provocar erosões de materiais para dentro da barragem.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na pesquisa exploratória, foram analisados relatórios técnicos do Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS), juntamente com os dados coletados nos sites da Agência Nacional de Águas e Abastecimento (ANA), do Sistema Nacional de Recursos Hídricos (SNRH) e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Os impactos das mudanças na cobertura e uso da terra sobre a barragem Flores foram avaliados a partir da análise quantitativa dos dados gerados pelo Projeto MapBiomass. Foi realizada uma análise da série histórica (1985 a 2023) das classes de cobertura e uso da terra que apresentaram maior representatividade em termos de extensão espacial, foi constatado que ao longo da série histórica a vegetação nativa na BHRF da barragem Flores foi substituída principalmente por pastagens e mosaico de usos.

Ao mesmo tempo, foram coletados dados sobre eventos pluviais e inundações extremas ocorridos na área da bacia de contribuição da barragem Flores, no período de 1985 a 2023, onde os anos de 1985 e 2023 foram considerados os mais chuvosos, e os meses de fevereiro e abril historicamente são os meses em que mais ocorrem precipitações. Essa etapa contou com o uso de dados pluviométricos, estimados por satélites, bem como dados fluviométricos provenientes das estações presentes na bacia.

Em seguida, foram realizados voos na área da parede da barragem e em suas áreas adjacentes para um mapeamento detalhado, utilizando drone, levando em consideração as características específicas do local, as quais foram avaliadas durante a inspeção de campo.

Para identificar visualmente possíveis patologias estruturais, foi realizado o uso de imagens das estruturas verticais do vertedouro e da parede da barragem, como também dos taludes e das margens. Não foram observados problemas na estrutura da barragem, o que nos leva a perceber que os principais problemas na área estudada estão relacionados ao mau uso e cobertura da terra, onde a ocupação das margens no entorno da barragem, afeta profundamente o seu ciclo hidrológico.

As técnicas de processamento digital de imagens desempenham um papel fundamental na detecção de feições sutis ou imperceptíveis a olho nu, permitindo uma identificação mais precisa de possíveis problemas estruturais na barragem. Essa

abordagem aprimora a capacidade de análise e contribui para a detecção precoce de patologias, garantindo uma melhor gestão e segurança da barragem.

A sistematização dos resultados foi realizada através de mapas elaborados a partir de softwares de Sistema de Informação Geográfica (SIG) e relatórios situacionais, que podem ser utilizadas pela sociedade, assim como em novos estudos futuros relacionados ao tema de segurança de barragens, de acordo com os aspectos vegetacionais, hidrológicos e socioambientais.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. [s. l.], v. 20, n. 1, 2017.
- ANDERÁOS, A.; ARAUJO, L. M. N. de; NUNES, C. M. Classificação de barragem quanto à Categoria de Risco e ao Dano Potencial Associado - um exercício. [s. l.], 2013.
- ARAUJO, A. A. de; RUAS, M. D.; LISBOA, I. A. C. Plano Nacional de Segurança de Barragens : uma análise sobre a aplicabilidade da Política Nacional de Segurança nas Barragens de contenção de rejeitos no Brasil. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES*, 2020. >**Congresso Brasileiro de Patologia das Construções**. [S. l.]: Associação Brasileira de Patologia das Construções, 2020. p. 2037–2047. Disponível em: <http://doi.editoracubo.com.br/10.4322/CBPAT.2020.198>. Acesso em: 31 mar. 2025.
- AZEVEDO, D. C. B. de *et al.* Desastre de Brumadinho: contribuições para políticas públicas e gestão do saneamento em períodos emergenciais. **Saúde em Debate**, [s. l.], v. 44, n. 124, p. 221–233, 2020.
- BARBINO, G. C. *et al.* Os eventos extremos como instrumentos de informação na gestão dos recursos hídricos. **Revista Brasileira de Climatologia**, [s. l.], v. 34, p. 224–241, 2024.
- BARBOSA, J. M. C.; PINTO, M. R.; CASTRO, M. A. H. de. Erosão e assoreamento em reservatórios. [s. l.], 2014.
- BIAS, E. de S. *et al.* Análise da eficiência da vegetação no controle do escoamento superficial : uma aplicação na bacia hidrográfica do rio São Bartolomeu, DF. **São Paulo**, [s. l.], v. 31, n. 3, 2012.
- BISPO, T. C.; LEVINO, N. de A. Impactos ambientais decorrentes do uso e ocupação desordenada do solo : um estudo da região da periferia de Maceió/AL. [s. l.], 2011.
- BORGES, L. A. C. *et al.* Áreas de preservação permanente na legislação ambiental brasileira. **Ciência Rural**, [s. l.], v. 41, n. 7, p. 1202–1210, 2011.
- BRITO, L. T. de L. *et al.* **Barreiros de salvação**. [S. l.], 2019. Disponível em: [https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1111293/1/Barreirosde salvacao2019.pdf](https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1111293/1/Barreirosde%20salvacao2019.pdf). Acesso em: 21 mar. 2025.
- CABACINHA, C. D.; CASTRO, S. S.; GONÇALVES, D. A. Análise da estrutura da paisagem da alta bacia do rio Araguaia na savana brasileira. **FLORESTA**, [s. l.], v. 40, n. 4, 2010. Disponível em: <http://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/20318>. Acesso em: 2 set. 2024.
- CAMPAGNOLO, K. *et al.* A influência da vegetação na estabilidade de encostas com ênfase em margem de rio. [s. l.], 2018.

CAMPOLINA, D.; GIANASI, L. Rompimento de barragens : ensino em ciências e análise de riscos. [s. l.], 2020.

CAMPOS, S. J. A. M. *et al.* Mapeamento de áreas sujeitas à inundação para planejamento e gestão territorial : cartas de suscetibilidade, perigo e risco. [s. l.], 2014.

CANARIM, O. H. D. A.; PISANI, M. A. J. Uso de Veículos Aéreos Não Tripulados na Arquitetura e Construção. *In: V JORNADA DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO - FAU MACKENZIE*, 2021. **Jornada Discente Pós/FAU-Mackenzie**. [S. l.]: Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2021. Disponível em: <https://www.mackenzie.br/pos-graduacao/mestrado-doutorado/sao-paulo-higienopolis/arquitetura-e-urbanismo/noticias-e-eventos/arquivo/n/a/i/v-jornada-discente-do-programa-de-pos-graduacao-em-arquitetura-e-urbanismo>. Acesso em: 9 set. 2025.

CARVALHO, C. S.; GALVÃO, T. Prevenção de riscos de deslizamentos em encostas em áreas urbanas. [s. l.], 2015.

DELGADO, R. C.; SANTOS, E. O. **Apostila de Meteorologia Básica_Capitulo_9_Precipitação.pdf**. [S. l.: s. n.], 2013.

DIAS, R.; MATOS, F. Impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos : desafios e implicações para a humanidade. **Revista Sociedade Científica**, [s. l.], v. 6, n. 1, 2023. Disponível em: <http://revista.scientificsociety.net/wp-content/uploads/2023/09/Art00172-2023.pdf>. Acesso em: 2 set. 2024.

DIDONET, D. L.; SOUZA, J. P. de ; SOUZA, T. do A. e. Práticas da educação ambiental : uma proposta de educação para o desenvolvimento sustentável. **Itinerarius Reflectionis**, [s. l.], v. 11, n. 1, 2015. Disponível em: <https://www.revistas.ufg.br/rir/article/view/33989>. Acesso em: 5 set. 2024.

FERNANDES, M. R. R.; SOUZA, L. M. M. de. Parâmetros básicos de bacias hidrográficas - inferências. [s. l.], 2013.

FERREIRA, K. F. Análise hidrológica da bacia hidrográfica do rio Cascavel – uma determinação da vazão de projeto para uma estação de tratamento de água. [s. l.], 2018.

FERREIRA, L. M.; FERREIRA, A. G. Aplicação de um modelo de erosão hídrica do solo à escala da unidade de intervenção florestal com a utilização de um Sistema de Informação Geográfica. **Revista de Ciências Agrárias**, [s. l.], p. 587-598 Páginas, 2019.

FIGUEIREDO, L. M. M. O papel do Plano Nacional de Segurança Hídrica : a universalização do acesso a água no país, principalmente no nordeste e Ceará. [s. l.], 2020.

GANDOUR, C. **Políticas públicas para proteção da floresta amazônica : o que funciona e como melhorar**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://amazonia2030.org.br/wp-content/uploads/2021/07/REL-AMZ2030-Protecao-Florestal-3.pdf>. Acesso em: 4 set. 2024.

GAROFOLO, L.; RODRIGUEZ, D. A. Impacto observado das mudanças no uso e cobertura da terra na hidrologia de bacias com ênfase em regiões tropicais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, [s. l.], v. 42, p. 1–15, 2022.

GOMES, W. de B. *et al.* Avaliação dos impactos das mudanças na cobertura da terra e cenário de emissões (RCP 8.5) no balanço de água na bacia do rio Madeira. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 35, n. 4, p. 689–702, 2020.

GORKOS, P. Potencial de uso de drones em inspeções de barragens : estudo de caso da barragem dos rios Vacacaí e Vacacaí - Mirim e barragem Rodolfo da Costa e Silva. [s. l.], 2022.

GUIDICINI, G.; JARDIM, W. D. Evolução da seção de barragens em açudes no nordeste, dos primórdios até Orós. [s. l.], 2021.

GUIMARÃES, R. C. **Capítulo 5_Escoamento**. [S. l.], 2012. Disponível em: https://rdpc.uevora.pt/bitstream/10174/8045/1/Capitulo_5_Escoamento.pdf. Acesso em: 25 mar. 2025.

GUIMARÃES, D. P.; LANDAU, E. C. Características naturais e uso da terra. [s. l.], 2022.

GUIMARÃES, C. J. de P.; NETO, M. I. de M. Aspectos da drenagem de barragens de rejeito com alteamento a montante : caso da barragem I, da Mina de Córrego do Feijão, em Brumadinho – MG. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 213–241, 2022.

HENRIQUE, P.; SANTANA, D. C. G. Métodos de investigações aplicados em obras de construções de barragens: Investigações geológico-geotécnicas para barragens. [s. l.], 2018.

HENRIQUES, M. J.; ROQUE, D. Unmanned Aerial Vehicles (UAV) as a support to visual inspections of concrete dams. [s. l.], 2015.

JANSEN, G. R.; VIEIRA, R. Análise da integração da gestão de risco de desastres à política de desenvolvimento territorial local. **Interações (Campo Grande)**, [s. l.], p. 555–574, 2022.

JANUARIO, I. R. IDENTIFICAÇÃO DE EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO PARA O GERENCIAMENTO DE RISCOS NO ESTADO DO MARANHÃO. [s. l.], 2021.

JUNIOR, A. R. B. **Precipitação - Hidrologia Aplicada, CIV 226**. [S. l.], 2022. Disponível em: https://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/17403/material/11Precipitacao_UFOP.pdf. Acesso em: 22 ago. 2025.

KLEIN, C.; KLEIN, V. A. Influência do manejo do solo na infiltração de água. **Revista Monografias Ambientais**, [s. l.], v. 13, n. 5, p. 3915–3925, 2014.

LASCHEFSKI, K. A. Rompimento de barragens em Mariana e Brumadinho (MG): desastres como meio de acumulação por despossessão. **AMBIENTES: Revista de Geografia e Ecologia Política**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 98, 2020.

LEÃO, S. R.; SANTIAGO, A. M. dos S. Cenário das barragens de rejeito: conhecer para evitar novas catástrofes. **Ambiente & Sociedade**, [s. l.], v. 25, p. e00661, 2022.

LIMA, A. do N.; SILVA, I. M. Análise de estabilidade da barragem de Orós - CE : um comparativo entre métodos rigorosos e não rigorosos. [s. l.], 2020. Disponível em: https://editorarealize.com.br/editora/anais/conapesc/2020/TRABALHO_EV138_MD1_SA23_ID1048_28102020174537.pdf. Acesso em: 4 nov. 2024.

MARENGO, J. A. Água e mudanças climáticas. **estudos avançados**, [s. l.], 2008.

MARIANO, N.; AQUINO, M. D. H. de; JUNIOR, E. F. A importância da recuperação de áreas degradadas: uma forma de conservação ambiental. **Revista Interface Tecnológica**, [s. l.], v. 19, n. 1, p. 185–197, 2022.

MARTINS, C. dos S. R. *et al.* **Influência da vegetação na erosão hídrica em ambiente semiárido: uma revisão de literatura**. [S. l.], 2017. Disponível em: https://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2017/anais/arquivos/RE_0718_0367_01.pdf. Acesso em: 26 mar. 2025.

MARTINS, A. P.; GALVANI, E. Relação entre uso e cobertura da terra e parâmetros biofísicos no cerrado brasileiro. **Revista do Departamento de Geografia**, [s. l.], v. 40, p. 148–162, 2020.

MATOS, M. F. P. Medidas mitigadoras e compensatórias no processo de licenciamento ambiental de refinarias de Petróleo no Brasil : análise comparativa de 3 casos (MA, CE e RJ). [s. l.], 2015.

MONTEVECCHI, F.; TEIGA, P.; MAIA, R. Proposta metodológica de avaliação da estabilização das margens em processos de reabilitação fluvial : o caso da Ribeira da Granja, Porto. [s. l.], 2009.

MORAIS, R. C. de S.; ABREU, L. P. ANÁLISE ESPACIAL DA VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARNAÍBA, NORDESTE DE BRASIL. **Revista da Academia de Ciências do PiauÍ**, [s. l.], v. 2, n. 2, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufpi.br/index.php/acipi/article/view/902/811>. Acesso em: 28 abr. 2025.

NASCIMENTO, J. P. S. do. **Eventos extremos : o impacto da crise climática nas migrações no Brasil**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/42168/1/EventosExtremosImpacto.pdf>. Acesso em: 19 ago. 2025.

NETO, B. M. *et al.* A barragem Camará sob os impactos da destruição e reconstrução: um estudo espaço-tempo entre 2004/2014. **Revista de Geografia**, [s. l.], v. 34, n. 2, 2017. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/revistageografia/article/view/229226>. Acesso em: 4 nov. 2024.

NEVES, L. P. *et al.* **Descaracterização de barragens a montante**. [S. l.], 2023. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/boletim-de-barragens-de-mineracao/report_trimestral_set_2023. Acesso em: 3 abr. 2025.

OLIVEIRA, L. S. de. MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SEGURO AGRÍCOLA: Impactos dos eventos extremos para os seguros no Brasil e no Mato Grosso do Sul. [s. l.], 2022.

OLIVEIRA, A. S. de; GUIMARÃES, M. M. Monitoramento geotécnico da barragem de Terra de uma Pequena Central Hidrelétrica - PCH no estado de Minas Gerais. [s. l.], 2019.

PEDRON, F. de A. *et al.* Solos urbanos. **Ciência Rural**, [s. l.], v. 34, p. 1647–1653, 2004.

PEREIRA, J. M. L. Análise sobre a Política Nacional de Segurança de Barragens com ênfase nos critérios de monitoramento/instrumentação. [s. l.], 2021.

PEREIRA, L. F. s s. **Segurança de barragens no território brasileiro : um breve comparativo com a legislação internacional e análise da influência da cobertura do solo de APPs sobre manchas de inundação**. [S. l.: s. n.], 2019.

PEREIRA, P. B.; MORAIS, R. C. de S. Impactos das mudanças de uso e cobertura das terras sobre parâmetros hidrológicos do alto e médio curso do rio Itapecuru, nordeste do Brasil. **REVISTA EQUADOR**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 55–71, 2022.

PESSOA, F. D. S. A Bacia Hidrográfica como unidade geossistêmica e territorial: em questão a Bacia do Parnaíba. **Revista de Geociências do Nordeste**, [s. l.], v. 2, p. 735–744, 2016.

PNSB. Estabelece a política nacional de segurança de barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais e altera a redação do art. 4º da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. [s. l.], 2000.

RAMOS, J. A. S.; FERREIRA, C. E. G. **Proposta de simplificação do cálculo do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)**. [S. l.], 2015. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p1466.pdf>. Acesso em: 19 ago. 2025.

RIBEIRO, P. H.; LEONCINI, J. W.; SANTOS, E. B. **Nanotecnologia em materiais de construção civil : nanomateriais, propriedades e aplicações**. 1. ed. [S. l.]: Stricto Sensu Editora, 2022. Disponível em: <https://sseditora.com.br/ebooks/engenharias-ciencias-exatas-e-da-terra-pesquisas-basicas-e-aplicadas-2/>. Acesso em: 3 abr. 2025.

RODRIGUES, A. G. S. *et al.* Drones : guia básico de mapeamento aéreo. [s. l.], 2020.

SALIBA, A. P. M. Uma nova abordagem para análise de ruptura por galgamento de barragens homogêneas de solo compactado. [s. l.], 2009.

SANTOS, E. O. dos. **Capítulo 9_Precipitação**. [S. l.: s. n.], 2013.

SANTOS, J. de B. G. dos; HACON, S. de S.; NEVES, S. M. A. da S. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e seu uso no estudo da saúde humana: uma revisão de escopo. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s. l.], v. 16, n. 3, p. 1115–1144, 2023.

SENA, A. C.; SILVA, D. R. da; FERREIRA, I. L. Gestão de riscos em barragens : um estudo de caso frente as principais medidas de segurança aos riscos de rompimento da barragem Mina Santa Rita. [s. l.], 2022.

SILVA, A. L. C. *et al.* ANALISE DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA (NDVI) NA BACIA DO RIO PAJEÚ, PE. [s. l.], 2016.

SILVA, D. S. *et al.* Avaliação de probabilidade e mitigação dos riscos do processo de erosão interna em barragens. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2020. **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**. [S. l.]: ABMS, 2020. p. 6820–6827. Disponível em: <http://doi.editoracubo.com.br/10.4322/cobramseg.2022.0857.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2025.

SILVA, F. L. D. *et al.* Qualidade da água em reservatórios e a provisão de serviços ecossistêmicos: uma abordagem qualitativa. **Brazilian Journal of Development**, [s. l.], v. 8, n. 2, p. 13895–13911, 2022.

SILVA, D. C. da C. e. Segurança de barragens: as pequenas barragens no Brasil e no mundo. [s. l.], 2019.

SILVA, S. B. B. da. **Valoração econômica dos danos à vegetação natural decorrentes do rompimento da barragem de rejeitos Mina Córrego do Feijão em Brumadinho, Minas Gerais**. [S. l.], 2020. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/27983/1/2020_ShishnaraBryeskaBarrosDaSilva_tc.pdf. Acesso em: 28 mar. 2025.

SILVA, R. L. da; PASSOS, C. J. S. **Controle de sedimentos em rios e reservatórios**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/188/XV-ENES0008-1-0-20220928-174635.pdf>. Acesso em: 2 set. 2024.

SILVA, E. L. e; SILVA, M. A. da. Segurança de barragens e os riscos potenciais à saúde pública. **Saúde em Debate**, [s. l.], v. 44, n. spe2, p. 242–261, 2020.

SIQUEIRA, P. C. Cenários de uso do solo baseados na cobertura de Áreas de Preservação Permanente(APP) e simulação hidrológica na bacia do rio Sapucaí. [s. l.], 2017.

SOARES, L. L.; VIANA, M. R. A luta depois da “catástrofe”: mobilização dos atingidos pelo rompimento da barragem Algodões no Piauí. **Emancipacao**, [s. l.], v. 17, n. 2, p. 233–245, 2017.

SOUZA, E. N. de *et al.* Estudo de caso da ruptura da barragem de Fundão (Mariana-MG). **Revista Mackenzie de Engenharia e Computação**, [s. l.], v. 21, n. 1, 2021. Disponível em: <https://editorarevistas.mackenzie.br/index.php/rmec/article/view/14708>. Acesso em: 28 mar. 2025.

SOUZA, N. *et al.* Gestão do monitoramento geotécnico de barragens de mineração. [s. l.], 2023.

TABORDA, L. A.; DETZEL, D. H. M.; ANDRADE, S. B. de. AVALIAÇÃO DO FATOR DE RECORRÊNCIA DO MÉTODO ESTATÍSTICO PARA O CÁLCULO DA PRECIPITAÇÃO MÁXIMA PROVÁVEL. [s. l.], 2024.

TAGATA, M. Y. Avaliação de estudos hidrológicos na segurança de barragens – estudo de caso na barragem Apertado - BA. [s. l.], 2024.

TARLLER, F. F. S. Delimitação de áreas inundadas por rompimento hipotético de barragem no município de Parauapebas/PA. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2022. **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**. [S. l.]: ABMS, 2022. p. 8077–8084. Disponível em: <http://doi.editoracubo.com.br/10.4322/cobramseg.2022.1017.pdf>. Acesso em: 4 nov. 2024.

TAVARES, L. F. da S.; REIS, L. G. C. dos. **Influência da forma de uso e ocupação do solo na ocorrência de processos erosivos laminares na sub - bacia do Ribeirão Riacho Fundo, no Distrito Federal**. [S. l.], 2017. Disponível em: <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/60/PAP022762.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2025.

TERCINI, O. T. *et al.* Medidas gerais para precaução de desastres em barragens. *In*: COSTA, L. R. F. D. **Geociências: A história da terra**. 1. ed. [S. l.]: Atena Editora, 2021. p. 151–156. Disponível em: <https://www.atenaeditora.com.br/post-ebook/4115>. Acesso em: 28 mar. 2025.

THOMÉ, R.; LAGO, T. M. O. Barragens de rejeitos da mineração: o princípio da prevenção e a implementação de novas alternativas. [s. l.], 2017.

TIECHER, T.; MINELLA, J. P. G. Erosão do solo - um problema mundial agravando-se num contexto de agricultura conservacionista no sul do Brasil. [s. l.], 2015.

TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, A. Gerenciamento da drenagem urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 5–27, 2002.

TURETTA, A. P. D. Mudanças de uso da terra em bacias hidrográficas. [s. l.], 2011.

VALAVANIS, K. P.; VACHTSEVANOS, G. J. Handbook of Unmanned Aerial Vehicles. [s. l.], 2015.

VALENCIO, N. F. L. da S.; GONÇALVES, J. C. A convivência com os riscos relacionados às barragens no semi-árido nordestino: conflitos entre representações e práticas sociais. **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 79, 2006.

VARGAS, S. R. M.; PIGA, T. R.; NOGUEIRA, E. de F. Crise ambiental e sociedade de risco: um estudo sobre Mariana e Brumadinho na perspectiva de Ulrich Beck. **Organizações e Sustentabilidade**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 56–74, 2022.

VIDALETTI, V. F. *et al.* Implicações da cobertura vegetal e da declividade do terreno nas perdas de água e solo por erosão. [s. l.], 2020.

WATZKO, A. Barragens de enrocamento com face de concreto no Brasil. [s. l.], 2007.

ZHAO, S. *et al.* Structural health monitoring and inspection of dams based on UAV photogrammetry with image 3D reconstruction. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 130, p. 103832, 2021.

ZUFFO, M. S. R.; GENOVEZ, A. I. B. A segurança de barragens sob a ótica de algumas legislações internacionais. [s. l.], 2009.

Governo confirma rompimento de barragem em cidade na Bahia, **O Globo**, 12 jul. 2019. G1 Notícias da Bahia. Disponível em: <https://g1.globo.com/ba/bahia/noticia/2019/07/12/governo-confirma-rompimento-de-barragem-em-cidade-na-bahia.ghtml>. Acesso em: 12 jul. 2019.

Chuvas no Maranhão: 13 cidades já decretaram emergência, **O Globo**, 5 abr. 2019. G1 Notícias do Maranhão. Disponível em: <https://g1.globo.com/ma/maranhao/noticia/2019/04/05/chuvas-no-maranhao-13-cidades-ja-decretaram-situacao-de-emergencia.ghtml>. Acesso em: 5 abr. 2019.

Filho, Carlinhos. Barragem do Rio Flores corre risco de sangrar e provocar mais inundações no Médio Mearim, **Blog do Carlinhos**, 20 abr. 2023. Disponível em: <https://www.carlinhosfilho.com.br/2023/04/barragem-do-rio-flores-corre-risco-de.html>. Acesso em: 20 abr. 2023.

Leal, Arthur. Barragem se rompe no Rio Grande do Sul e ameaça municípios vizinhos, **O Globo**, 2 mai. 2024. G1 Notícias do Rio Grande do Sul. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/brasil/noticia/2024/05/02/barragem-se-rompe-em-bento-goncalves-no-rio-grande-do-sul-e-ameaca-municipios-vizinhos.ghtml>. Acesso em: 2 mai. 2024.