v7.n10.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

OPERAÇÃO DA USINA HIDRELÉTRICA DE ESTREITO E RISCOS DE INUNDAÇÃO EM IMPERATRIZ–MA: INFLUÊNCIA DA VAZÃO DEFLUENTE SOBRE O NÍVEL DO RIO TOCANTINS

OPERATION OF THE ESTREITO HYDROELECTRIC POWER PLANT AND FLOOD RISK IN IMPERATRIZ, MARANHÃO, BRAZIL: INFLUENCE OF OUTFLOW DISCHARGE ON THE TOCANTINS RIVER WATER LEVEL

OPERACIÓN DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE ESTREITO Y RIESGO DE INUNDACIÓN EN IMPERATRIZ, MARANHÃO, BRASIL: INFLUENCIA DEL CAUDAL EFLUENTE SOBRE EL NIVEL DEL RÍO TOCANTINS

Laécio Gil Coelho Santos[1], Angélica Christina Pinto Ferreira Veiga[2], Victor Matos Martins[3], Wanderson Braga dos Santos[4], Carlos Gustavo Martins Silva[5], Scarlett O'Hara da Conceição Silva[5], José Henrique Medeiros Nascimento[6], Carlos David Veiga França[7], Cleyton Cruz do Espírito Santo[8], Hiana Cristina Silva de Carvalho[9], Aderian dos Santos Rodrigues[1], Marcelo Rassy Teixeira[10]

e7109239
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i10.9239

PUBLICADO: 10/2026

RESUMO

Os desastres hidrológicos por inundação constituem um dos principais problemas socioambientais do município de Imperatriz–MA, ocasionando danos humanos, patrimoniais e ambientais. Neste contexto, o presente estudo analisou a relação entre a vazão defluente da Usina Hidrelétrica de Estreito e o nível do rio Tocantins durante evento de inundação no município. A pesquisa caracteriza-se como aplicada, de abordagem quantitativa, com objetivos descritivos e explicativos, fundamentada em levantamento bibliográfico, documental e na análise de dados secundários obtidos nas plataformas do Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2iD), Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e Serviço Geológico do Brasil (CPRM). Para a análise estatística, aplicaram-se o coeficiente de correlação de Pearson e o modelo de Regressão Linear Simples. Os resultados evidenciaram correlação muito forte entre a vazão defluente da Usina Hidrelétrica de Estreito e o nível do rio Tocantins (r = 0,96), com coeficiente de determinação de 93,91%, indicando elevada correspondência entre as variáveis no modelo linear ajustado para o período analisado. A precipitação pluviométrica local, por sua vez, apresentou associação moderada com o nível do rio. Conclui-se que o planejamento integrado da operação hidrelétrica com os órgãos de Proteção e Defesa Civil constitui estratégia essencial para a prevenção e mitigação dos riscos de inundação em Imperatriz–MA.

PALAVRAS-CHAVE: Inundação. Usina Hidrelétrica de Estreito. Vazão defluente. Rio Tocantins. Gestão de riscos.

[1] Universidade Federal do Pará (UFPA), mestrando(a) em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético.
[2] Universidade CEUMA, mestranda em Biociências Aplicadas à Saúde.
[3] Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), graduado em Geografia.
[4] Universidade de São Paulo (USP), especialista em Estruturas.
[5] Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), pós-graduado(a) em Engenharia de Segurança do Trabalho.
[6] Faculdade Pitágoras de São Luís, bacharel em Engenharia Civil.
[7] Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), doutorando em Geografia.
[8] Universidade Federal Fluminense (UFF), mestre em Defesa e Segurança Civil.
[9] Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), pós-graduada em Engenharia de Segurança do Trabalho.
[10] Universidade de São Paulo (USP), doutor em Engenharia Civil.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

ABSTRACT
Hydrological disasters caused by flooding are a major socio-environmental issue in the municipality of Imperatriz, Maranhão (MA), resulting in human, property, and environmental damage. In this context, this study analyzed the relationship between the outflow from the Estreito Hydroelectric Power Plant and the water level of the Tocantins River during a flood event in the municipality. The research is characterized as applied and quantitative, with descriptive and explanatory objectives; it is based on a literature and document review and the analysis of secondary data obtained from the platforms of the Integrated Disaster Information System (S2iD), the National Water and Basic Sanitation Agency (ANA), the National Institute for Space Research (INPE), and the Geological Survey of Brazil (CPRM). Statistical analysis involved the use of Pearson's correlation coefficient and a simple linear regression model. The results showed a very strong correlation between the outflow discharge of the Estreito Hydroelectric Power Plant and the Tocantins River water level (r = 0.96), with a coefficient of determination of 93.91%, indicating a strong correspondence between the variables in the linear model fitted for the analyzed period. Local rainfall, in turn, showed a moderate association with river water level. The study concludes that integrated planning between hydroelectric operations and Civil Protection and Defense agencies is an essential strategy for preventing and mitigating flood risks in Imperatriz, MA.

KEYWORDS: *Flooding. Estreito Hydroelectric Power Plant. Outflow Discharge. Tocantins River. Risk Management.*

RESUMEN
Los desastres hidrológicos causados por inundaciones constituyen uno de los principales problemas socioambientales en el municipio de Imperatriz, Maranhão, provocando daños humanos, materiales y ambientales. En este contexto, el presente estudio analizó la relación entre el caudal efluente de la Central Hidroeléctrica de Estreito y el nivel del río Tocantins durante un evento de inundación en el municipio. La investigación se caracteriza por ser aplicada, con un enfoque cuantitativo, objetivos descriptivos y explicativos, basada en investigación bibliográfica y documental y en el análisis de datos secundarios obtenidos de las plataformas del Sistema Integrado de Información sobre Desastres (S2iD), la Agencia Nacional de Agua y Saneamiento Básico (ANA), el Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (INPE) y el Servicio Geológico de Brasil (CPRM). Para el análisis estadístico, se aplicaron el coeficiente de correlación de Pearson y el modelo de regresión lineal simple. Los resultados mostraron una correlación muy fuerte entre el caudal efluente de la Central Hidroeléctrica de Estreito y el nivel del río Tocantins (r = 0,96), con un coeficiente de determinación del 93,91%, lo que indica una elevada correspondencia entre las variables en el modelo lineal ajustado para el período analizado. Las precipitaciones locales, a su vez, presentaron una asociación moderada con el nivel del río. Se concluye que la planificación integrada de la operación hidroeléctrica con los organismos de Protección y Defensa Civil constituye una estrategia esencial para la prevención y mitigación de los riesgos de inundación en Imperatriz, Maranhão.

PALABRAS CLAVE*: Inundación. Central Hidroeléctrica de Estreito. Caudal Efluente. Río Tocantins. Gestión del Riesgo.*

INTRODUÇÃO

As inundações figuram entre os desastres hidrológicos mais recorrentes e de maior impacto socioeconômico no Brasil, ocasionando perdas humanas, danos patrimoniais, interrupção de serviços essenciais e expressivos prejuízos ambientais. A ocorrência desses

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

eventos resulta da interação entre fatores naturais e antrópicos, destacando-se as precipitações intensas, as características hidrológicas das bacias, a ocupação de áreas suscetíveis à inundação e, em determinadas regiões, a operação de reservatórios hidrelétricos situados a montante dos centros urbanos.

No estado do Maranhão, o município de Imperatriz destaca-se pela recorrência de eventos de inundação associados ao rio Tocantins. A série histórica de registros evidencia a ocorrência de sucessivos episódios que culminaram na decretação de Situação de Emergência, especialmente nos anos de 2004, 2019, 2020 e 2022, provocando impactos significativos sobre a população, a infraestrutura urbana e as atividades econômicas locais. Em 2022, por exemplo, aproximadamente 348 famílias foram diretamente atingidas pelas inundações decorrentes da elevação do nível do rio Tocantins.

Entre os fatores potencialmente associados à dinâmica dessas inundações destaca-se a operação da Usina Hidrelétrica de Estreito, localizada a montante de Imperatriz. A vazão defluente liberada pelo reservatório constitui uma das variáveis potencialmente associadas ao regime hidrológico do rio Tocantins e às variações de nível observadas ao longo do trecho urbano do município. Entretanto, embora a relação entre precipitação e inundação seja amplamente reconhecida, ainda são escassos os estudos que quantificam, de forma estatística, a relação entre variáveis operacionais da usina, o nível do rio e os riscos de inundação na região. Nesse contexto, o problema de pesquisa consiste em responder à seguinte questão: qual é a relação entre a vazão defluente da Usina Hidrelétrica de Estreito e o nível do rio Tocantins durante o evento de inundação analisado no município de Imperatriz–MA?

A justificativa desta pesquisa fundamenta-se na necessidade de produzir evidências científicas que contribuam para o entendimento da dinâmica hidrológica do rio Tocantins em sua interação com a operação do reservatório da Usina Hidrelétrica de Estreito. Além de ampliar o conhecimento sobre os fatores condicionantes das inundações em Imperatriz, os resultados podem subsidiar o planejamento integrado entre os gestores de recursos hídricos, a concessionária responsável pela operação da usina e os órgãos de Proteção e Defesa Civil, fortalecendo ações de prevenção, mitigação e resposta aos desastres hidrológicos. No contexto maranhense, Rocha *et al.* (2023) destacam a importância da atuação da Defesa Civil orientada à gestão do risco, considerando as condições de vulnerabilidade e suscetibilidade das populações expostas aos eventos hidrometeorológicos. Apesar da relevância do tema para a gestão dos recursos hídricos e para a Proteção e Defesa Civil, permanecem limitadas as investigações quantitativas voltadas à análise da relação entre variáveis operacionais da UHE Estreito e o comportamento hidrológico do rio Tocantins em Imperatriz.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

O objetivo geral consiste em analisar a relação entre a vazão defluente da Usina Hidrelétrica de Estreito e o nível do rio Tocantins durante o evento de inundação ocorrido em Imperatriz–MA. Para alcançar esse propósito, estabeleceram-se os seguintes objetivos específicos:

I – identificar os eventos de inundação registrados no município de Imperatriz–MA e caracterizar sua recorrência histórica;

II – reconhecer as principais vulnerabilidades da área urbana sujeita às inundações;

III – analisar a relação entre a vazão defluente da Usina Hidrelétrica de Estreito e o nível do rio Tocantins por meio de técnicas estatísticas;

IV – avaliar a contribuição relativa da precipitação pluviométrica local sobre o comportamento hidrológico do rio durante o período analisado; e

V – discutir as contribuições dos resultados para o planejamento das ações de gestão de riscos e de Proteção e Defesa Civil.

Por fim, este estudo parte da hipótese de que existe associação estatisticamente relevante entre a vazão defluente liberada pela Usina Hidrelétrica de Estreito e o nível do rio Tocantins em Imperatriz durante o período analisado. Diferentemente dos estudos anteriores, esta pesquisa integra registros históricos de desastres, dados hidrológicos operacionais da UHE Estreito, informações pluviométricas e análise estatística para avaliar a relação entre a vazão defluente e o nível do rio Tocantins em Imperatriz.

1. REFERENCIAL TEÓRICO

1.1. Operação de reservatórios hidrelétricos e controle de vazões

Os reservatórios hidrelétricos constituem componentes estratégicos da infraestrutura hídrica, desempenhando funções relacionadas à geração de energia elétrica, abastecimento público, irrigação, navegação, manutenção de vazões ecológicas e controle de cheias. Em sistemas multipropósito, a operação desses empreendimentos exige a conciliação de objetivos frequentemente conflitantes, sobretudo durante o período chuvoso, quando decisões relacionadas à liberação de vazões influenciam simultaneamente a segurança da barragem, a eficiência energética e os riscos hidrológicos a jusante. Nesse contexto, a operação dos reservatórios deixou de ser compreendida apenas como uma atividade voltada à maximização da produção de energia, passando a incorporar critérios de gestão integrada dos recursos hídricos e redução do risco de desastres.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A literatura recente demonstra que a operação de reservatórios durante eventos hidrológicos extremos constitui um dos principais desafios da engenharia de recursos hídricos. Segundo a revisão sistemática desenvolvida por Jain *et al.* (2023), a tomada de decisão durante períodos de cheia deve equilibrar demandas concorrentes, como a preservação da capacidade de amortecimento de cheias, a manutenção da segurança estrutural da barragem e a otimização da geração hidrelétrica. Os autores ressaltam que modelos operacionais baseados exclusivamente em regras fixas tendem a apresentar menor eficiência quando comparados a estratégias dinâmicas apoiadas por previsões hidrológicas em tempo real e análise de incertezas, especialmente em reservatórios multipropósito.

Nesse cenário, o conceito de controle operacional de vazões refere-se ao conjunto de procedimentos empregados para regular as descargas liberadas pelo reservatório em função das condições hidrológicas observadas e previstas. A intensidade das vazões defluentes influencia diretamente a propagação da onda de cheia ao longo do curso d'água, modificando o comportamento hidrodinâmico do rio e podendo intensificar ou atenuar processos de inundação em áreas situadas a jusante. Dessa forma, a definição da vazão a ser liberada representa uma variável operacional de elevada relevância para o gerenciamento do risco hidrológico.

Os avanços recentes indicam uma transição dos modelos tradicionais de operação para estratégias adaptativas fundamentadas em previsões hidrológicas em tempo real, atualização contínua das condições de entrada e análise das incertezas. Estudos demonstram que essas abordagens aumentam simultaneamente a eficiência operacional, a segurança hidráulica e a capacidade de amortecimento de cheias, especialmente em reservatórios multipropósito e sistemas em cascata (Wang *et al.*, 2021; Zhu *et al.*, 2025).

Embora grande parte dessas pesquisas esteja concentrada em grandes sistemas hidrológicos internacionais, seus fundamentos são aplicáveis às bacias hidrográficas brasileiras. No rio Tocantins, a presença de empreendimentos hidrelétricos modifica parcialmente o regime natural de vazões, de modo que a dinâmica hidrológica a jusante resulta da interação entre processos naturais e a operação dos reservatórios. Nesse contexto, a relação entre a vazão defluente da UHE Estreito e a variação do nível do rio em Imperatriz constitui elemento relevante para a análise hidrológica desenvolvida neste estudo.

1.2. Dinâmica das inundações em rios regulados por barragens

A dinâmica das inundações em rios regulados difere daquela observada em cursos d'água submetidos exclusivamente ao regime hidrológico natural. Em condições não reguladas, a formação da onda de cheia decorre principalmente da distribuição espacial e temporal das

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

precipitações, da contribuição dos tributários, das características geomorfológicas da bacia e da capacidade de armazenamento do canal e das planícies fluviais. Quando há barragens, acrescenta-se a esse sistema a operação do reservatório, capaz de modificar a magnitude, a duração e o momento de ocorrência das vazões transportadas para os trechos a jusante.

A onda de cheia corresponde à propagação, ao longo do rio, de uma elevação temporária da vazão e do nível da água. Durante seu deslocamento, o hidrograma pode sofrer translação, caracterizada pelo tempo necessário para que o pico alcance as seções a jusante, e amortecimento, representado pela redução progressiva da magnitude do pico. Esses processos dependem da geometria do canal, da rugosidade, da declividade, do armazenamento nas margens e planícies de inundação, da contribuição dos afluentes e das condições hidráulicas existentes antes do evento. Em rios regulados, porém, a forma do hidrograma também passa a refletir as decisões relativas ao armazenamento, à abertura dos dispositivos de descarga e à liberação da vazão defluente.

A presença de um reservatório não implica, necessariamente, aumento do risco de inundação. Quando existe capacidade de armazenamento disponível e a operação é orientada para o controle de cheias, parte do volume afluente pode ser retida, reduzindo o pico descarregado para jusante. Em estudo baseado em modelagem hidrológica e hidrodinâmica acoplada, Yang *et al.* (2022) verificaram que a operação da Barragem das Três Gargantas reduziu em aproximadamente 20% os maiores picos de cheia na estação mais próxima do empreendimento. Entretanto, o efeito diminuiu progressivamente ao longo do rio, em razão das contribuições intermediárias dos tributários, demonstrando que o comportamento da cheia a jusante não depende apenas da descarga da barragem.

Esse resultado evidencia que a influência operacional deve ser analisada em conjunto com os aportes gerados entre a barragem e o ponto de interesse. Mesmo quando o reservatório amortece o pico inicialmente liberado, precipitações intensas e vazões provenientes de sub-bacias intermediárias podem reconstruir ou ampliar a onda de cheia. Por essa razão, a simples associação temporal entre a abertura de comportas e a elevação do nível do rio não é suficiente para estabelecer causalidade. A análise deve considerar, sempre que os dados estiverem disponíveis, a vazão afluente ao reservatório, a defluência, a precipitação a montante e local, as contribuições tributárias e o tempo de propagação até a seção monitorada. A intensidade dos impactos a jusante depende da interação entre as vazões liberadas pelo reservatório, a cheia natural, as contribuições intermediárias e as condições de armazenamento existentes durante o evento.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Brigandì, Candela e Aronica (2023) demonstraram, por meio da combinação de modelagem estocástica e simulação hidráulica bidimensional, que diferentes cenários de operação de um reservatório produzem alterações relevantes nas áreas inundadas e nos danos potenciais a jusante. O estudo reforça que o risco não é determinado exclusivamente pela vazão máxima, mas pelo hidrograma completo, incluindo volume, duração, tempo do pico e interação com as condições do vale fluvial. Desse modo, regras operacionais distintas podem gerar resultados territoriais diferentes, ainda que estejam associadas a eventos hidrológicos de probabilidade semelhante.

Estudos posteriores corroboram que os efeitos da operação de barragens variam espacialmente ao longo do curso fluvial e dependem das contribuições dos tributários, das condições hidráulicas do canal, das incertezas hidrológicas e das decisões operacionais adotadas. Em geral, verificou-se que a propagação da onda de cheia sofre amortecimento progressivo, embora esse comportamento varie conforme a configuração do sistema fluvial e das condições hidrológicas existentes (Guo *et al.*, 2021; Elenius; Lindström, 2022; Ding *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2021).

Essas evidências indicam que a análise de inundações em rios regulados deve considerar conjuntamente as condições hidrometeorológicas, a operação do reservatório e as características hidráulicas e territoriais do trecho a jusante. No caso de Imperatriz, essa abordagem é particularmente relevante em razão de sua localização a jusante da UHE Estreito, devendo a associação entre vazão defluente e nível do rio ser interpretada em conjunto com as precipitações, as contribuições intermediárias e o tempo de resposta do sistema.

Estudos desenvolvidos na Amazônia reforçam que os impactos das inundações não decorrem exclusivamente da magnitude dos eventos pluviométricos, mas da interação entre as condições hidrometeorológicas, a ocupação do território, a infraestrutura e a vulnerabilidade das populações expostas (Pinto *et al.*, 2025; Batista *et al.*, 2025; Batista *et al.*, 2026).

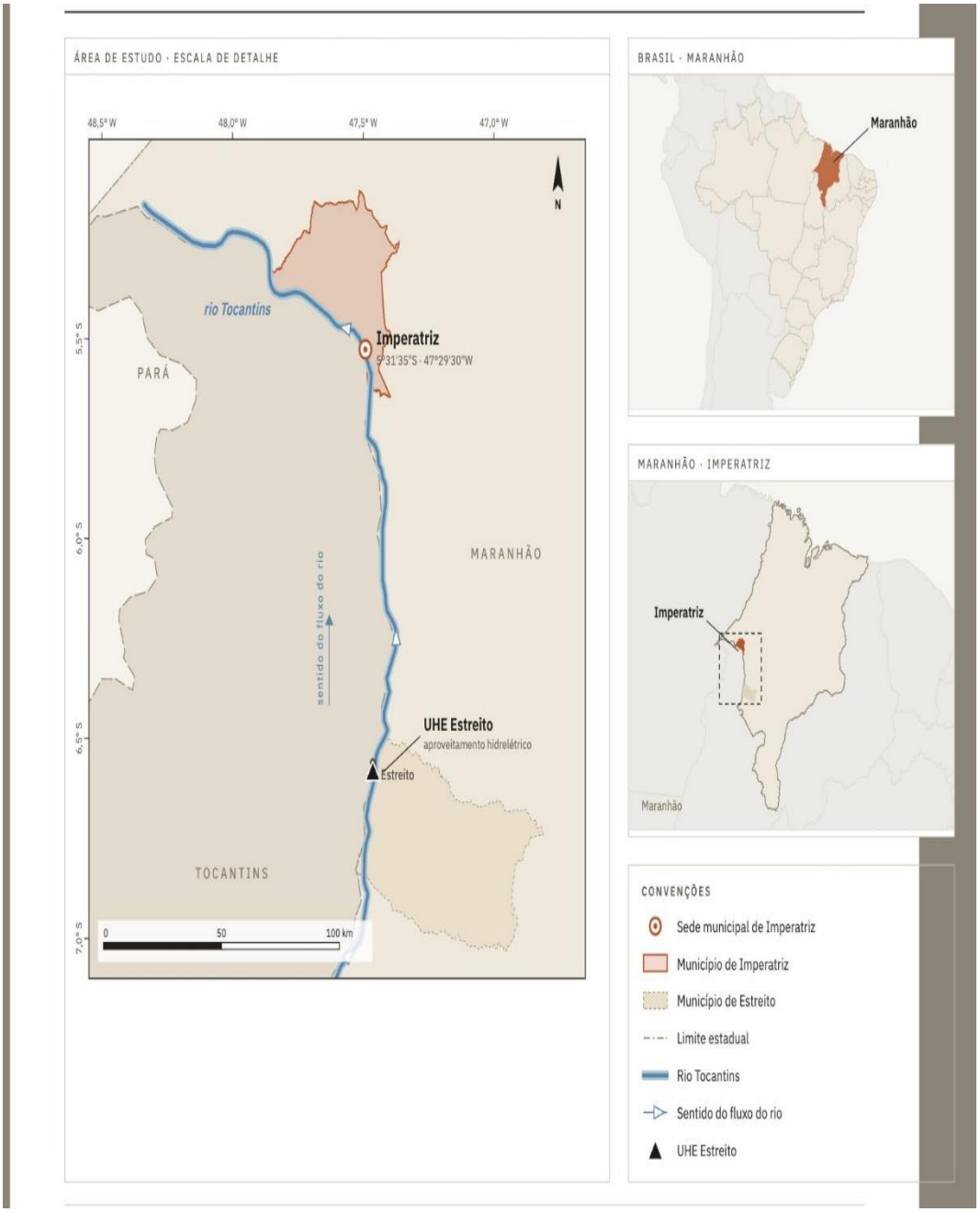
1.3. A Usina Hidrelétrica de Estreito e o contexto hidrológico do rio Tocantins

A bacia hidrográfica do rio Tocantins constitui um dos principais sistemas hidroenergéticos do Brasil, reunindo diversos aproveitamentos hidrelétricos em cascata. Entre eles destaca-se a Usina Hidrelétrica de Estreito, localizada na divisa entre Maranhão e Tocantins, cuja operação integra o conjunto de fatores associados ao regime hidrológico observado nos municípios situados a jusante, incluindo Imperatriz.

A Figura 1 apresenta a localização do município de Imperatriz–MA na bacia hidrográfica do rio Tocantins e sua posição a jusante da UHE Estreito.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 1. Localização do município de Imperatriz–MA e da Usina Hidrelétrica de Estreito na bacia hidrográfica do rio Tocantins



Fonte: Elaborado pelos autores com base em IBGE (2023), Natural Earth (2024) e ANEEL (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Embora a finalidade principal da UHE Estreito seja a produção de energia elétrica, a literatura demonstra que sua implantação promoveu alterações na dinâmica hidrogeomorfológica do rio Tocantins. Machado e Santos (2021), ao analisarem a região do reservatório, verificaram modificações na configuração das planícies de inundação, reativação de paleocanais, formação de novas ilhas e redistribuição de sedimentos, evidenciando que a presença do reservatório alterou processos naturais anteriormente condicionados apenas pelo regime hidrológico do rio.

No trecho localizado a jusante da barragem encontra-se o município de **Imperatriz**, segunda maior cidade do estado do Maranhão e principal centro urbano da região tocantina maranhense. A ocupação histórica das margens do rio Tocantins, associada à expansão urbana em áreas naturalmente suscetíveis às inundações, aumenta a exposição da população aos eventos hidrológicos extremos. Durante o período chuvoso, a elevação do nível do rio resulta da combinação entre a propagação das vazões provenientes da bacia contribuinte, os aportes dos afluentes intermediários, as precipitações locais e o regime operacional da usina hidrelétrica.

Para compreender essa dinâmica, é importante distinguir dois processos hidrológicos frequentemente tratados de forma conjunta. O primeiro corresponde às vazões afluentes, determinadas predominantemente pelas condições meteorológicas e hidrológicas da bacia hidrográfica. O segundo refere-se às vazões defluentes, definidas operacionalmente em função das necessidades de geração de energia, da segurança da barragem, das restrições regulatórias e das condições hidrológicas observadas no reservatório. Embora a vazão defluente esteja condicionada à vazão afluente, sua magnitude e seu momento de liberação podem modificar a propagação da onda de cheia para os municípios localizados a jusante.

No caso de Imperatriz, sua localização a jusante da UHE Estreito torna particularmente relevante a investigação da relação entre a vazão defluente e o nível do rio Tocantins. Embora existam estudos sobre os impactos socioambientais e hidrogeomorfológicos associados ao empreendimento, permanecem limitadas as investigações que quantificam essa relação por meio de técnicas estatísticas aplicadas a séries hidrológicas, lacuna que fundamenta a presente pesquisa.

1.4. Gestão do risco de inundação e Proteção e Defesa Civil

A gestão do risco de desastres compreende ações integradas de prevenção, mitigação, preparação, resposta e recuperação. Nas últimas décadas, essa abordagem evoluiu de um modelo predominantemente reativo para uma perspectiva prospectiva, baseada na redução das vulnerabilidades e na integração entre monitoramento hidrológico, planejamento territorial e Proteção e Defesa Civil (Rocha *et al.*, 2023). Nesse contexto, o Global Assessment Report on

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Disaster Risk Reduction (GAR 2022), publicado pelo Escritório das Nações Unidas para a Redução do Risco de Desastres (UNDRR), destaca que o gerenciamento do risco deve considerar a crescente complexidade dos sistemas socioambientais e incorporar processos decisórios fundamentados em evidências científicas, dados em tempo real e governança integrada. O relatório enfatiza que eventos hidrológicos extremos tendem a apresentar maior frequência e intensidade em decorrência das mudanças climáticas e da expansão urbana desordenada, reforçando a necessidade de estratégias preventivas em múltiplas escalas.

No contexto da gestão de riscos, a compreensão das inundações exige que a análise da ameaça hidrológica seja articulada às condições de vulnerabilidade e exposição da população. Rocha *et al.* (2023), ao analisarem as inundações associadas às cheias do rio Mearim no Maranhão, demonstram que a magnitude do evento desencadeador constitui fator relevante, mas que as consequências são intensificadas pelas condições de vulnerabilidade das comunidades e pelas limitações do planejamento urbano. Essa perspectiva reforça a necessidade de atuação preventiva dos órgãos de Proteção e Defesa Civil, mediante monitoramento, identificação de áreas suscetíveis, preparação institucional e integração de informações para subsidiar a tomada de decisão.

No Brasil, a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil, instituída pela Lei nº 12.608/2012, consolidou a gestão do risco como eixo das ações governamentais relacionadas aos desastres (Brasil, 2012). No Maranhão, França *et al.* (2023) evidenciam a atuação da Defesa Civil estadual em ações de prevenção, mitigação e acompanhamento de áreas em situação de risco. Em rios regulados por barragens, a integração entre órgãos gestores, instituições de pesquisa, concessionárias e sistemas de Proteção e Defesa Civil permite incorporar informações sobre vazões afluentes, volumes armazenados e vazões defluentes aos processos de monitoramento e alerta, ampliando a capacidade de antecipação de eventos críticos (Jain *et al.*, 2023).

Nesse contexto, informações sobre a relação entre vazão defluente e nível do rio podem subsidiar o monitoramento hidrológico e o planejamento de ações preventivas em áreas expostas às inundações. Rocha *et al.* (2023) destacam a capacitação de agentes municipais e o fortalecimento das estruturas locais de Proteção e Defesa Civil como estratégias de redução de riscos, enquanto Silva *et al.* (2025) ressaltam a contribuição de dados espaciais e geotecnologias para a identificação de áreas suscetíveis e o diagnóstico de cenários de risco.

1.5. Aplicação de técnicas estatísticas na análise da relação entre vazão defluente e nível do rio

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A disponibilidade de séries hidrológicas tem ampliado a aplicação de métodos estatísticos na investigação das relações entre variáveis ambientais. Entre esses métodos, destacam-se as análises de correlação e regressão, empregadas para identificar padrões de associação e modelar quantitativamente relações entre precipitação, vazão, nível dos rios e variáveis associadas à operação de reservatórios.

A análise de correlação tem como finalidade quantificar a intensidade e a direção da associação existente entre duas variáveis quantitativas. Na hidrologia, sua aplicação é recorrente na avaliação das relações entre precipitação e vazão, vazão e nível fluviométrico, operação de reservatórios e propagação de ondas de cheia, além da validação de modelos hidrológicos. O coeficiente de correlação de Pearson permanece como uma das medidas mais utilizadas para esse propósito, especialmente quando as variáveis apresentam comportamento aproximadamente linear e distribuição compatível com os pressupostos do método.

Embora a correlação permita mensurar o grau de associação entre variáveis, sua interpretação deve ser realizada com cautela. A existência de elevada correlação estatística não implica, por si só, relação de causalidade, uma vez que diferentes fatores podem influenciar simultaneamente o comportamento das variáveis analisadas. No caso de rios regulados por barragens, por exemplo, a elevação do nível do rio pode resultar da interação entre precipitações locais, contribuições dos tributários, vazões naturais provenientes da bacia contribuinte e decisões operacionais relacionadas à liberação de vazões pelo reservatório. Assim, a análise estatística deve ser interpretada à luz do conhecimento hidrológico da área de estudo e das características operacionais do sistema.

Complementarmente à análise de correlação, a regressão linear constitui uma das técnicas mais empregadas para modelar relações entre variáveis hidrológicas. Esse método permite modelar quantitativamente a relação entre uma variável independente e uma variável dependente, fornecendo parâmetros que descrevem a tendência média observada nos dados. Na engenharia de recursos hídricos, modelos de regressão são amplamente utilizados para estimar vazões, prever níveis de rios, calibrar modelos hidrológicos e investigar relações entre variáveis ambientais. A regressão linear constitui uma ferramenta estatística de interpretação direta, particularmente útil em análises exploratórias destinadas à avaliação da relação entre duas variáveis quantitativas.

Outra medida associada à regressão linear é o coeficiente de determinação (R^2), que expressa a proporção da variabilidade observada na variável dependente representada pelo modelo ajustado. Em estudos hidrológicos, valores elevados de R^2 indicam maior aderência do modelo aos dados observados, sem que esse indicador, isoladamente, permita estabelecer

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

relação causal entre as variáveis. O coeficiente de determinação complementa, portanto, a interpretação da correlação e auxilia na avaliação do ajuste do modelo.

No contexto da presente pesquisa, a adoção do coeficiente de correlação de Pearson e da regressão linear simples mostra-se adequada ao objetivo de investigar a relação entre a vazão defluente da Usina Hidrelétrica de Estreito e o nível do rio Tocantins no município de Imperatriz. A combinação dessas técnicas possibilita avaliar a intensidade da associação entre as variáveis e a proporção da variabilidade do nível fluviométrico representada pelo modelo linear ajustado em função da vazão defluente durante o período analisado. Assim, a fundamentação estatística apresentada nesta seção sustenta a metodologia adotada e fornece base científica para a interpretação dos resultados discutidos nas seções subsequentes.

2. METODOLOGIA

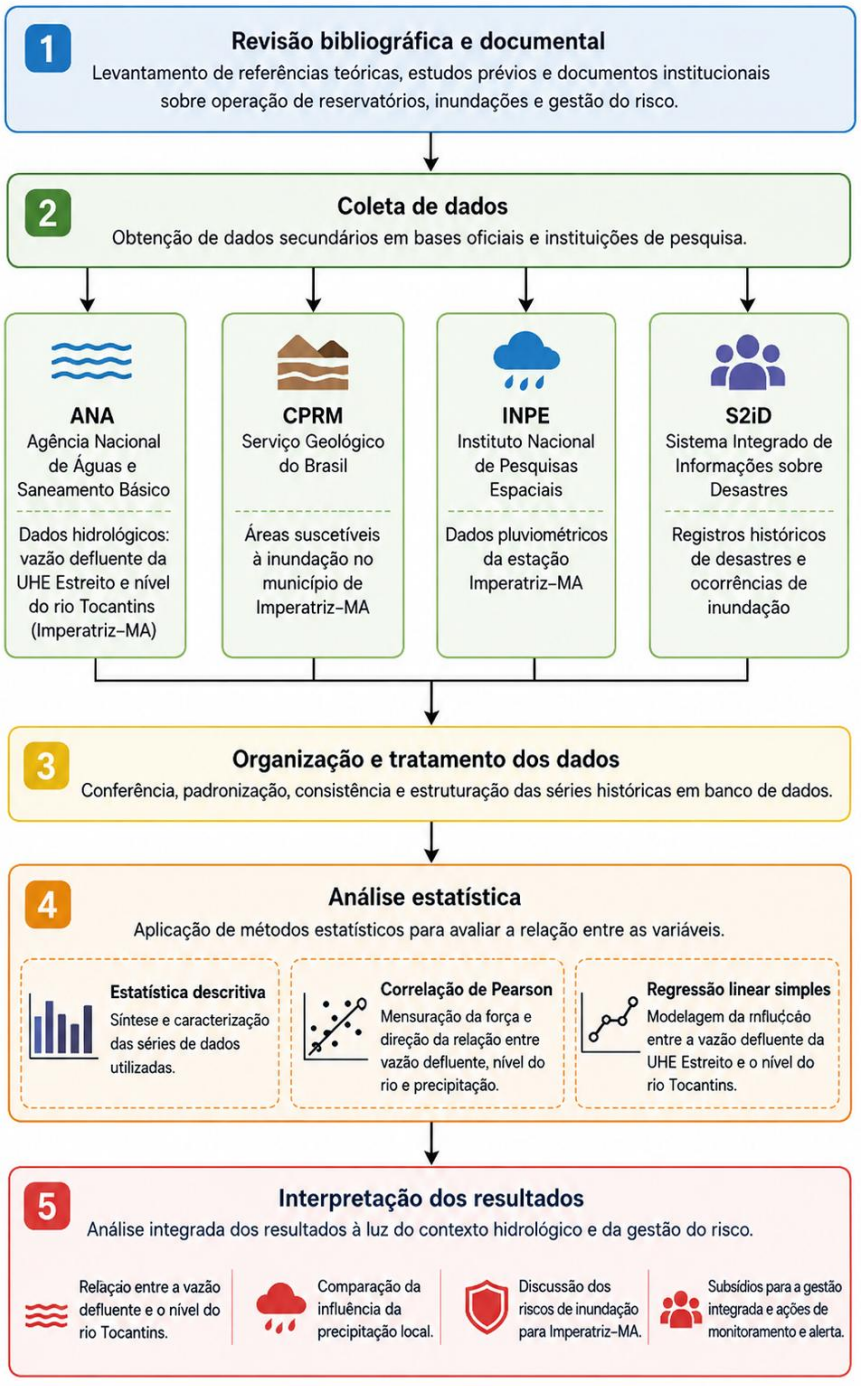
A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo aplicado, de abordagem quantitativa, com objetivos descritivos e explicativos, desenvolvido por meio de estudo de caso no trecho do rio Tocantins correspondente ao município de Imperatriz, Maranhão. O delineamento metodológico foi estruturado para investigar a relação entre a vazão defluente da Usina Hidrelétrica de Estreito e a variação do nível do rio Tocantins durante o evento hidrológico ocorrido entre dezembro de 2021 e janeiro de 2022, período marcado por inundações que culminaram na decretação de Situação de Emergência pelo município.

A estratégia metodológica foi organizada em cinco etapas sequenciais: (i) levantamento bibliográfico e documental; (ii) obtenção e organização das bases de dados hidrológicas e pluviométricas; (iii) tratamento estatístico das informações; (iv) aplicação das técnicas de correlação e regressão linear; e (v) interpretação dos resultados à luz da literatura especializada e da gestão do risco de inundação.

A sequência dos procedimentos metodológicos adotados nesta pesquisa é apresentada na Figura 2. O fluxograma sintetiza as etapas desenvolvidas desde o levantamento bibliográfico e a obtenção das bases de dados até a aplicação das técnicas estatísticas e a interpretação dos resultados, permitindo uma visão integrada do delineamento metodológico empregado.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 2. Etapas metodológicas da pesquisa



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

2.1. Área de estudo

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A área de estudo compreende o município de Imperatriz, localizado no sudoeste do estado do Maranhão, às margens do rio Tocantins, imediatamente a jusante da Usina Hidrelétrica de Estreito. A escolha da área fundamenta-se na recorrência de eventos de inundação registrados nas últimas décadas, bem como na importância regional do município, que concentra elevada população urbana e áreas historicamente suscetíveis à ocupação de planícies de inundação.

A proximidade entre a área urbana de Imperatriz e o reservatório da UHE Estreito torna o município particularmente adequado para investigar possíveis relações entre a operação do empreendimento hidrelétrico e as oscilações do nível fluviométrico observadas durante eventos hidrológicos extremos. Essa configuração espacial justifica a escolha de Imperatriz como unidade de análise para investigar a relação entre a operação da UHE Estreito e o comportamento hidrológico do rio Tocantins.

2.2. Levantamento e organização dos dados

Foram utilizados exclusivamente dados secundários provenientes de instituições oficiais, garantindo confiabilidade, rastreabilidade e reprodutibilidade da pesquisa.

Os registros de desastres foram obtidos no Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2iD), permitindo caracterizar a série histórica de eventos hidrológicos registrados em Imperatriz. Complementarmente, utilizaram-se informações do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) para identificação das áreas suscetíveis às inundações.

Os dados hidrológicos referentes à vazão defluente da Usina Hidrelétrica de Estreito foram obtidos junto ao Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR) da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), enquanto os registros do nível do rio Tocantins foram obtidos a partir da estação fluviométrica localizada em Imperatriz, integrante da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN). Os dados pluviométricos utilizados na análise foram extraídos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), considerando tanto as precipitações registradas no município quanto aquelas incidentes na cabeceira da bacia hidrográfica do rio Tocantins.

O período de análise compreendeu os meses de dezembro de 2021 e janeiro de 2022, totalizando 62 observações diárias. Esse recorte temporal foi definido por abranger o episódio de inundação analisado, permitindo acompanhar simultaneamente a evolução da vazão defluente da usina, do nível do rio Tocantins e da precipitação registrada na bacia hidrográfica.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Para sistematizar as informações empregadas na pesquisa, o Quadro 1 apresenta as principais variáveis analisadas, suas respectivas fontes, unidades de medida, recorte temporal e finalidade no procedimento metodológico.

Quadro 1. Síntese das variáveis e bases de dados utilizadas na pesquisa

Informação/variável	**Fonte**	**Unidade**	**Recorte temporal**	**Utilização**
Vazão defluente da UHE Estreito	ANA	m³/s	dez./2021–jan./2022	Variável independente principal
Nível do rio Tocantins em Imperatriz	ANA/RHN	m	dez./2021–jan./2022	Variável dependente
Precipitação em Imperatriz	INPE	mm	dez./2021–jan./2022	Variável complementar
Precipitação na cabeceira da bacia	INPE	mm	dez./2021–jan./2022	Contextualização hidrológica
Registros históricos de desastres	S2iD	ocorrência	série histórica analisada	Caracterização dos eventos
Suscetibilidade a inundações	CPRM	espacial	—	Caracterização territorial

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Após a coleta, todas as informações foram organizadas cronologicamente em banco de dados eletrônico, sendo realizada conferência de consistência, padronização das unidades de medida e eliminação de inconsistências antes da etapa de análise estatística.

2.3. Análise estatística

A investigação da relação entre a operação da Usina Hidrelétrica de Estreito e a variação do nível do rio Tocantins foi realizada mediante técnicas de estatística descritiva, análise de correlação e regressão linear simples.

Inicialmente, efetuou-se a caracterização descritiva das variáveis hidrológicas, permitindo identificar tendências gerais, amplitudes e comportamento temporal das séries analisadas.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Em seguida, aplicou-se o coeficiente de correlação linear de Pearson (r), com o objetivo de quantificar a intensidade e a direção da associação linear entre a vazão defluente da usina e o nível do rio Tocantins. A interpretação dos coeficientes seguiu a classificação proposta por Devore (2006), considerando valores próximos de +1 como indicativos de forte associação positiva entre as variáveis.

Tabela 1. Classificação da intensidade do coeficiente de correlação de Pearson

Intervalo de r	Intensidade da correlação
0,00 a 0,19	Muito fraca
0,20 a 0,39	Fraca
0,40 a 0,69	Moderada
0,70 a 0,89	Forte
0,90 a 1,00	Muito forte

Fonte: Adaptado de Devore (2006).

Uma vez identificada a associação linear, procedeu-se ao ajuste de um modelo de regressão linear simples, adotando-se como variável independente (X) a vazão defluente liberada pela Usina Hidrelétrica de Estreito e como variável dependente (Y) o nível fluviométrico observado em Imperatriz.

A adequação do modelo foi verificada por meio da inspeção visual do diagrama de dispersão e da linha de tendência ajustada, permitindo avaliar a linearidade da relação entre as variáveis e a ausência de padrões gráficos que indicassem inadequação evidente do modelo para os dados analisados.

O desempenho do modelo foi avaliado por meio do coeficiente de determinação (R^2), utilizado para estimar a proporção da variabilidade observada no nível do rio representada pelo modelo linear ajustado em função da vazão defluente. Complementarmente, foi realizada análise gráfica mediante diagramas de dispersão e linha de tendência, permitindo verificar visualmente o comportamento da relação entre as variáveis.

Em razão do caráter temporal das 62 observações diárias consecutivas, a interpretação do modelo de regressão levou em conta os pressupostos de independência dos resíduos, homocedasticidade e normalidade. A independência assume particular relevância neste estudo, uma vez que séries hidrológicas sucessivas podem apresentar autocorrelação temporal. Esses pressupostos podem ser avaliados, respectivamente, por procedimentos como o teste de Durbin–Watson, para detecção de autocorrelação serial, o teste de Breusch–Pagan, para avaliação da homocedasticidade, e o teste de Shapiro–Wilk, para análise da normalidade dos resíduos. Contudo, diante da indisponibilidade da base analítica original utilizada no

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

processamento estatístico, não foi possível realizar retrospectivamente esses testes formais. Dessa forma, os resultados da regressão foram interpretados predominantemente como medidas da associação observada entre as variáveis no período analisado, evitando-se atribuir caráter causal à relação identificada.

Embora a precipitação não constitua a variável principal deste estudo, sua análise foi empregada como variável complementar, possibilitando comparar a associação das chuvas locais e das precipitações ocorridas na cabeceira da bacia com o comportamento observado da vazão defluente e do nível do rio durante o período investigado.

2.4. Procedimentos computacionais

O processamento dos dados foi realizado em ambiente Microsoft Excel®, utilizando rotinas específicas para organização, tratamento estatístico, cálculo do coeficiente de correlação de Pearson, ajuste do modelo de regressão linear simples e elaboração dos gráficos utilizados na análise dos resultados. As representações cartográficas da área de estudo foram elaboradas a partir das bases vetoriais disponibilizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

2.5. Síntese metodológica

A estrutura metodológica adotada permitiu integrar informações hidrológicas, pluviométricas e operacionais da Usina Hidrelétrica de Estreito, possibilitando avaliar quantitativamente a associação entre a vazão defluente e o comportamento do nível do rio Tocantins em Imperatriz. A combinação entre análise estatística e interpretação hidrológica forneceu os elementos necessários para avaliar a hipótese de associação proposta e discutir suas implicações para a prevenção dos riscos de inundação em Imperatriz.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos permitiram caracterizar o comportamento hidrológico do rio Tocantins durante o evento de inundação ocorrido entre dezembro de 2021 e janeiro de 2022, bem como avaliar quantitativamente a associação entre a vazão defluente da Usina Hidrelétrica de Estreito e a variação do nível fluviométrico em Imperatriz.

Inicialmente, a análise da série histórica de registros do Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2iD) evidenciou que as inundações constituem o principal tipo de desastre natural registrado no município ao longo das últimas quatro décadas. Entre os

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

eventos catalogados, predominam ocorrências classificadas como inundações e enxurradas, responsáveis pela maior parte dos reconhecimentos oficiais de Emergência, indicando elevada recorrência de eventos hidrológicos extremos na região. A caracterização histórica dos desastres hidrológicos registrados em Imperatriz encontra-se sintetizada no Quadro 2. A sistematização dessas ocorrências permite identificar a recorrência dos eventos extremos e fundamenta a escolha do município como área de estudo desta pesquisa.

Quadro 2. Registros históricos de desastres no município de Imperatriz–MA

Tipo de desastre	Data de ocorrência	Situação do registro
Inundações	08/01/2022	Reconhecido
Inundações	19/03/2020	Não reconhecido
Inundações	09/04/2019	Reconhecido
Inundações	08/04/2019	Registro
Tempestade Local	06/03/2014	Registro
Enxurradas	07/12/2012	Registro
Inundações	02/03/2011	Registro
Inundações	13/04/2010	Registro
Inundações	02/05/2009	Reconhecido
Enxurradas	13/04/2008	Registro
Inundações	31/01/2004	Reconhecido
Inundações	11/01/2002	Registro
Incêndio Florestal	22/09/1998	Registro
Enxurradas	14/03/1996	Registro
Enxurradas	27/12/1989	Registro
Enxurradas	02/04/1985	Registro
Estiagem	03/03/1983	Registro
Seca	18/03/1981	Registro

Fonte: Elaborado pelos autores com base em dados do S2iD (2022).

A recorrência histórica dos eventos observada em Imperatriz está em consonância com o cenário descrito pelo UNDRR (2022), segundo o qual os desastres hidrológicos tendem a apresentar maior frequência e impactos crescentes em decorrência da combinação entre mudanças no regime hidrológico, expansão urbana e aumento da exposição das populações vulneráveis. No caso de Imperatriz, a ocupação consolidada das planícies de inundação potencializa esses efeitos, reforçando a necessidade de estratégias permanentes de monitoramento hidrológico e planejamento territorial integrado.

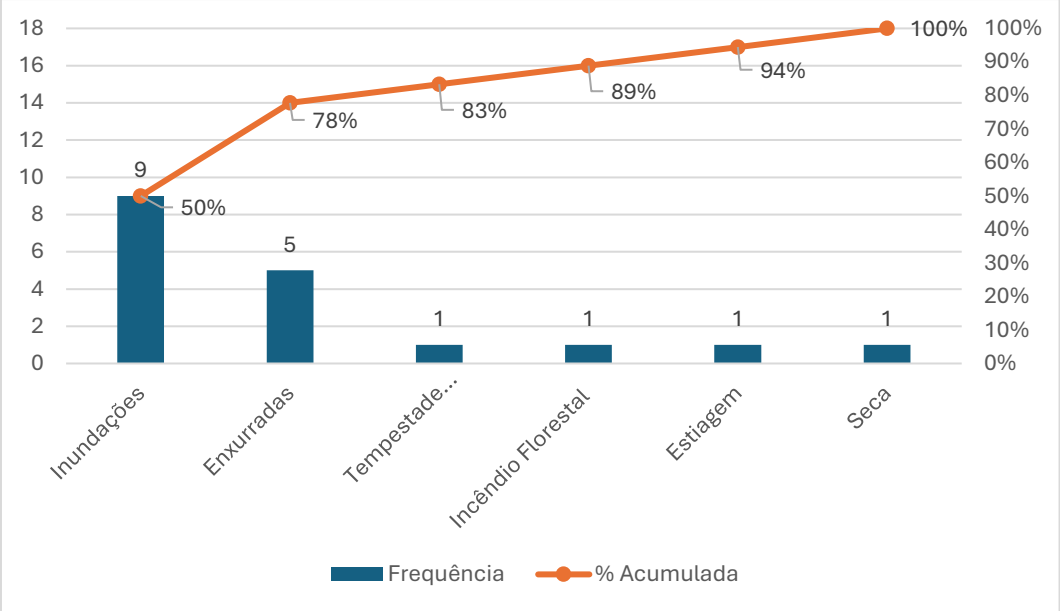
Esse comportamento demonstra que as inundações em Imperatriz não representam episódios isolados, mas fenômenos recorrentes associados às características hidrológicas da

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

bacia do rio Tocantins e às condições de ocupação urbana existentes na planície de inundação. Tal recorrência justifica o aprofundamento da análise histórica e espacial desses eventos no município.

Embora o Quadro 2 apresente a cronologia das ocorrências, torna-se importante visualizar a representatividade de cada tipologia de desastre registrada no município. Para esse fim, elaborou-se um diagrama de Pareto, apresentado na Figura 3, que evidencia a predominância relativa dos diferentes tipos de desastres hidrológicos registrados na série histórica.

Figura 3. Frequência e percentual acumulado das tipologias de desastres registradas em Imperatriz–MA

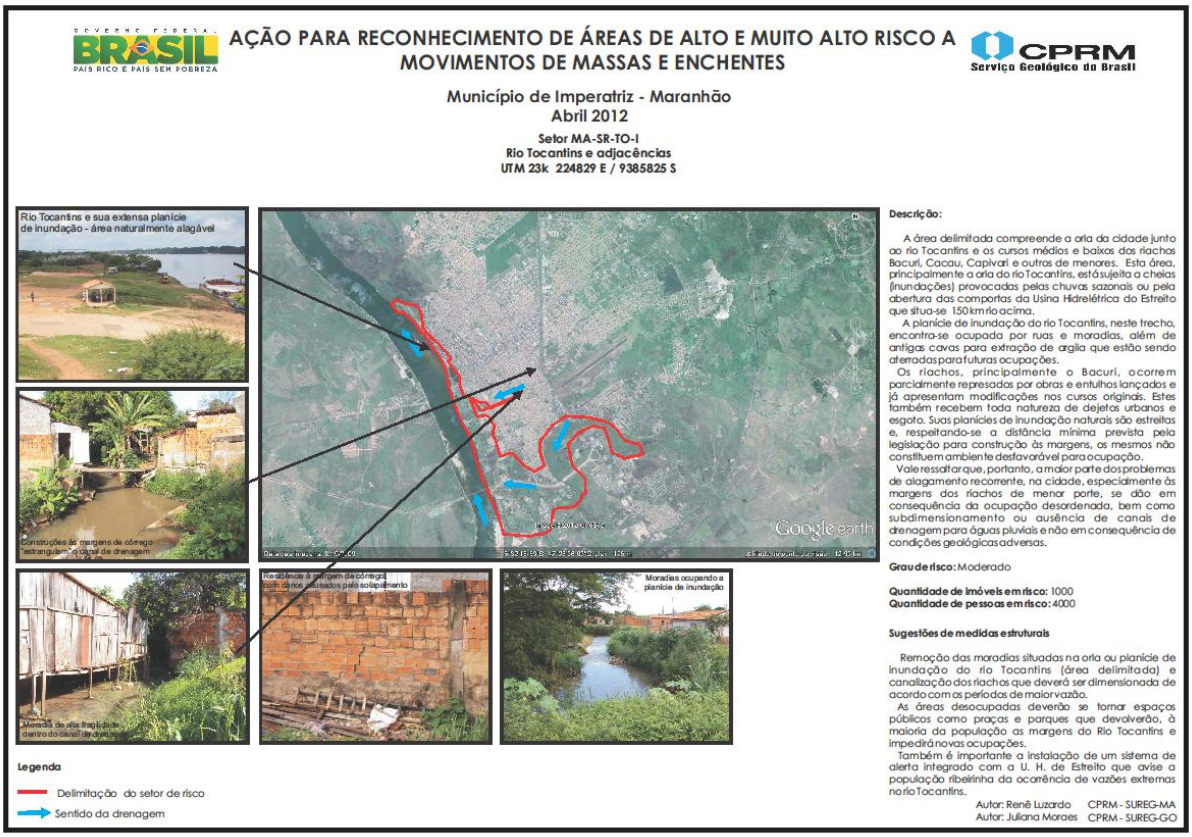


Fonte: Elaborado pelos autores com base em dados do S2iD (2022).

Observa-se que as inundações representam a maior parcela dos registros históricos do município, confirmando sua predominância entre os desastres naturais oficialmente reconhecidos. Esse comportamento reforça a necessidade de direcionar as análises subsequentes para os fatores hidrológicos associados à ocorrência desse tipo de evento. Além da frequência dos eventos, torna-se necessário compreender sua distribuição espacial. Nesse sentido, a Figura 4 apresenta o mapeamento das áreas suscetíveis à inundação elaborado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), permitindo identificar os setores urbanos potencialmente mais expostos à elevação do nível do rio Tocantins

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 4. Setores suscetíveis a inundações na área urbana de Imperatriz–MA



Fonte: Adaptado de CPRM (2015).

A análise espacial das áreas suscetíveis revelou que os setores urbanos localizados próximos ao rio Tocantins e aos principais cursos d'água afluentes apresentam maior vulnerabilidade às inundações. Conforme o mapeamento elaborado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), parte significativa da expansão urbana ocorreu sobre áreas naturalmente inundáveis, condição agravada pela ocupação desordenada, redução da capacidade hidráulica dos canais urbanos e limitações dos sistemas de drenagem existentes.

Esses resultados evidenciam que a ocorrência do desastre decorre da interação entre condicionantes naturais e fatores antrópicos. A suscetibilidade geomorfológica da planície fluvial favorece a expansão lateral das águas durante períodos de maior descarga hidráulica, enquanto a ocupação dessas áreas aumenta significativamente a exposição da população aos efeitos das inundações.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Uma vez caracterizado o contexto histórico e espacial das inundações em Imperatriz, procedeu-se à análise hidrológica do evento ocorrido entre dezembro de 2021 e janeiro de 2022, investigando a evolução temporal da vazão defluente liberada pela Usina Hidrelétrica de Estreito e sua relação com o comportamento do nível do rio Tocantins.

Para analisar a relação entre a operação da Usina Hidrelétrica de Estreito e esse comportamento hidrológico, foram analisadas as séries temporais referentes ao nível do rio Tocantins e à vazão defluente liberada pela usina entre dezembro de 2021 e janeiro de 2022. O conjunto de dados compreendeu 62 observações diárias, permitindo comparar a evolução simultânea das duas variáveis durante o evento hidrológico investigado.

A aplicação do coeficiente de correlação de Pearson resultou em r = 0,96, caracterizando associação linear positiva muito forte entre a vazão defluente da Usina Hidrelétrica de Estreito e o nível observado do rio Tocantins em Imperatriz durante o período analisado. O modelo de regressão linear simples apresentou coeficiente de determinação R^2 = 0,9391, indicando que 93,91% da variabilidade observada no nível do rio foi representada pelo modelo linear ajustado em função da vazão defluente. Esses resultados evidenciam elevada associação estatística entre as variáveis no recorte temporal estudado, sem que, isoladamente, permitam estabelecer relação causal entre a operação da usina e a elevação do nível fluviométrico.

Ressalta-se que as 62 observações analisadas correspondem a registros diários consecutivos, condição que pode introduzir dependência temporal entre as observações e, consequentemente, entre os resíduos do modelo. A indisponibilidade da base analítica original impossibilitou a aplicação retrospectiva de testes formais de autocorrelação, homocedasticidade e normalidade dos resíduos. Essa condição constitui uma limitação da análise estatística e recomenda cautela na interpretação inferencial do modelo, razão pela qual os coeficientes obtidos são empregados neste estudo principalmente para caracterizar a intensidade da associação observada entre as variáveis no período analisado.

A elevada associação observada entre a vazão defluente e o nível fluviométrico apresenta comportamento compatível com estudos internacionais sobre rios regulados, nos quais as vazões liberadas pelos reservatórios estão associadas às oscilações hidrológicas observadas a jusante (Guo *et al.*, 2021; Elenius; Lindström, 2022; Ding *et al.*, 2023). Entretanto, conforme destacado por Brigandì, Candela e Aronica (2023), a magnitude da inundação não depende apenas da vazão máxima liberada, mas também do formato do hidrograma, da duração do evento, das contribuições dos tributários e das características hidráulicas do vale fluvial. Dessa forma, os resultados deste estudo evidenciam forte associação estatística entre a vazão

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

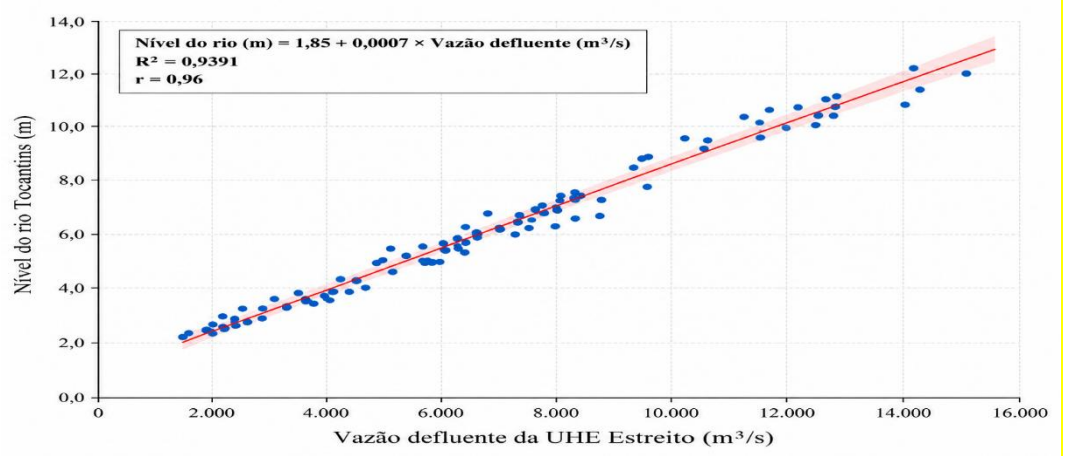
defluente e o nível do rio Tocantins durante o período analisado, sem desconsiderar a participação dos demais processos hidrológicos atuantes na bacia.

Sob o ponto de vista estatístico, o elevado coeficiente de determinação evidencia forte correspondência entre a variação da vazão defluente e a variação do nível fluviométrico durante o período analisado, devendo essa relação ser interpretada no âmbito associativo e considerando as limitações inerentes à estrutura temporal dos dados. Embora a dinâmica fluvial dependa de diversos processos naturais, como precipitação, infiltração, escoamento superficial e contribuição dos afluentes, os resultados indicam que, no episódio investigado, a vazão defluente da UHE Estreito apresentou a associação estatística mais elevada entre as variáveis analisadas no recorte estudado.

A análise das precipitações reforça essa interpretação. Os registros do INPE demonstraram que o volume pluviométrico acumulado no município permaneceu relativamente baixo durante o período crítico das inundações, enquanto na cabeceira da bacia do rio Tocantins foram registrados acumulados significativamente superiores. Durante o intervalo de 5 a 14 de janeiro de 2022, por exemplo, Imperatriz acumulou aproximadamente 30 mm de precipitação, ao passo que a região de cabeceira registrou cerca de 100 mm no mesmo período.

A relação entre a vazão defluente da UHE Estreito e o nível do rio Tocantins em Imperatriz é apresentada na Figura 5, permitindo visualizar graficamente a associação linear entre as variáveis durante o período analisado.

Figura 5. Relação entre a vazão defluente da UHE Estreito e o nível do rio Tocantins no período de dezembro de 2021 a janeiro de 2022 (n = 62)



Fonte: Elaborado pelos autores com base em dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), provenientes do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR) e da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Embora a precipitação constitua o principal mecanismo gerador das vazões naturais na bacia, os resultados indicam que a resposta hidrológica observada em Imperatriz apresenta associação mais estreita com a vazão defluente liberada pela UHE Estreito durante o período analisado. Esse comportamento converge com Yang *et al.* (2022), que demonstraram que, em rios regulados, a propagação da onda de cheia resulta da interação entre as condições hidrometeorológicas e as decisões operacionais adotadas no reservatório. Assim, os resultados obtidos não atribuem a inundação exclusivamente à operação da usina, mas evidenciam elevada associação entre a vazão defluente e o comportamento hidrológico observado a jusante durante o período analisado.

A diferença observada sugere que o comportamento da vazão defluente não esteve associado exclusivamente às chuvas registradas localmente em Imperatriz, podendo também refletir as condições hidrológicas verificadas na porção superior da bacia e as decisões operacionais do reservatório. Essa interpretação deve ser considerada como hipótese explicativa, uma vez que o estudo não incorporou diretamente as séries de vazão afluente nem as regras operacionais adotadas durante o evento. A precipitação registrada em Imperatriz, por sua vez, contribuiu para as condições hidrológicas locais, mas não apresentou associação suficiente para explicar isoladamente a magnitude da elevação observada no nível do rio.

Essa diferença torna-se ainda mais clara quando se compara o comportamento hidrológico entre os períodos de 5 a 14 de janeiro e de 15 a 30 de janeiro de 2022. Embora ambos tenham registrado precipitação acumulada semelhante em Imperatriz (30 mm), observou-se redução expressiva da média do nível do rio Tocantins, passando de aproximadamente 10,36 m para 7,38 m. Paralelamente, verificou-se redução da vazão média defluente liberada pela usina, de aproximadamente 16.212 m³/s para 10.679,59 m³/s.

Essa comparação evidencia que diferenças expressivas no comportamento do rio ocorreram mesmo sob condições pluviométricas locais semelhantes, reforçando a elevada associação observada entre a vazão defluente e o nível fluviométrico durante o evento analisado.

Complementarmente, a correlação entre o nível do rio Tocantins e a precipitação local apresentou coeficiente de Pearson igual a **0,64**, caracterizando associação moderada entre as variáveis. Esse resultado demonstra associação moderada entre as chuvas incidentes diretamente sobre o município e o nível do rio, inferior à associação observada entre o nível fluviométrico e a vazão defluente da usina durante o período investigado.

Os resultados obtidos corroboram estudos hidrológicos que apontam que reservatórios hidrelétricos localizados em grandes bacias exercem importante papel na propagação das ondas de cheia a jusante, sobretudo quando a necessidade operacional impõe aumentos significativos

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

da descarga hidráulica. Entretanto, tais resultados não permitem atribuir às operações da usina a origem exclusiva das inundações, uma vez que eventos dessa natureza resultam da interação entre precipitação regional, contribuição dos afluentes, características geomorfológicas da bacia, ocupação urbana das planícies fluviais e regras operacionais do reservatório.

Diante da elevada associação estatística observada entre a vazão defluente e o nível fluviométrico, o monitoramento integrado entre dados hidrológicos, previsões meteorológicas e operação dos reservatórios constitui ferramenta estratégica para o planejamento preventivo de eventos extremos. A incorporação dessas informações em sistemas de alerta hidrológico pode ampliar a capacidade de antecipação dos órgãos gestores, permitindo maior eficiência na preparação das ações de resposta e na redução dos impactos decorrentes das inundações em municípios situados a jusante de grandes barramentos.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo analisou a dinâmica hidrológica das inundações ocorridas no município de Imperatriz–MA durante o evento extremo registrado entre dezembro de 2021 e janeiro de 2022, investigando a relação entre a vazão defluente da Usina Hidrelétrica de Estreito, a precipitação pluviométrica e o nível do rio Tocantins. No período analisado, a vazão defluente apresentou associação estatística muito forte com o nível fluviométrico ($r = 0,96$). O modelo de regressão linear simples apresentou $R^2 = 0,9391$, indicando que 93,91% da variabilidade observada no nível do rio foi representada pelo ajuste linear em função da vazão defluente. Esses resultados sustentam, para o recorte temporal analisado, a existência de forte associação estatística entre a vazão defluente da UHE Estreito e o nível do rio Tocantins, sem que essa relação permita isolar causalmente o efeito da operação hidrelétrica dos demais condicionantes hidrológicos.

Entretanto, os resultados também demonstram que a ocorrência das inundações não pode ser atribuída exclusivamente à operação do empreendimento hidrelétrico. A dinâmica observada decorre da interação entre diferentes processos hidrológicos, incluindo as precipitações incidentes na cabeceira da bacia do rio Tocantins, os aportes dos tributários, a propagação das ondas de cheia, as características geomorfológicas da planície fluvial e a ocupação urbana de áreas naturalmente inundáveis. Diante dessa multiplicidade de fatores, a operação do reservatório constitui uma variável relevante dentro de um sistema hidrológico complexo, cuja compreensão exige análises integradas em escala de bacia hidrográfica.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Sob essa perspectiva, o trabalho apresenta uma contribuição científica importante ao integrar dados hidrológicos, meteorológicos e operacionais de um grande reservatório por meio de uma abordagem quantitativa baseada em regressão linear simples. Diferentemente de estudos que analisam isoladamente aspectos geomorfológicos ou sociais das inundações, esta pesquisa evidencia o potencial da utilização de dados operacionais de usinas hidrelétricas como informações complementares à análise do comportamento hidrológico em municípios localizados a jusante de grandes barramentos.

Os resultados também ampliam as discussões apresentadas por Coelho *et al.* (2020), que identificaram diversos impactos ambientais decorrentes da implantação da Usina Hidrelétrica de Estreito, sobretudo relacionados às alterações na dinâmica dos ecossistemas e às transformações socioambientais observadas na região de Carolina–MA. Enquanto aquele estudo enfatiza os efeitos ambientais associados ao empreendimento, a presente pesquisa avança ao quantificar estatisticamente a associação entre a vazão defluente da UHE Estreito e o comportamento do nível do rio Tocantins durante um evento extremo, fornecendo evidências quantitativas que podem contribuir para estudos de previsão e planejamento operacional.

De forma semelhante, os resultados complementam as análises desenvolvidas por Oliveira, Machado e Sieben (2021) acerca dos impactos territoriais provocados pela Usina Hidrelétrica de Estreito sobre comunidades ribeirinhas. Embora esses autores concentrem suas discussões nos processos sociais, econômicos e territoriais decorrentes da implantação do empreendimento, o presente estudo incorpora uma abordagem hidrológica baseada em dados observacionais, permitindo analisar a associação entre variáveis operacionais do reservatório e a resposta hidrológica do rio em áreas urbanas situadas a jusante. Dessa maneira, os resultados estabelecem uma ponte entre os estudos socioambientais existentes e a modelagem quantitativa aplicada aos eventos hidrológicos extremos.

Do ponto de vista metodológico, a utilização integrada de informações provenientes do Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2iD), da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) demonstra a viabilidade da construção de modelos analíticos relativamente simples, capazes de fornecer informações complementares ao gerenciamento de riscos hidrológicos. Essa integração de bases públicas representa uma contribuição relevante para estudos desenvolvidos em regiões onde ainda há escassez de monitoramento hidrometeorológico de alta resolução.

Como limitações da pesquisa, destaca-se que a modelagem foi desenvolvida a partir de um único evento hidrológico extremo, utilizando regressão linear simples e considerando apenas

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

uma variável operacional como principal variável associada ao nível do rio. Adicionalmente, o caráter consecutivo das 62 observações diárias pode introduzir dependência temporal entre os dados, e a indisponibilidade da base analítica original impossibilitou a aplicação retrospectiva de testes formais de autocorrelação, homocedasticidade e normalidade dos resíduos. Dessa forma, recomenda-se que investigações futuras incorporem séries históricas mais extensas, análise da estrutura temporal dos resíduos, defasagens temporais, vazões afluentes, contribuições dos tributários, modelos multivariados e, quando pertinente, modelos hidrológicos capazes de representar com maior detalhe a complexidade da bacia do rio Tocantins.

Os resultados demonstram que informações operacionais provenientes de usinas hidrelétricas podem constituir importantes variáveis de apoio aos sistemas de monitoramento hidrológico e emissão de alertas, reforçando a necessidade de integração entre concessionárias do setor elétrico, órgãos gestores de recursos hídricos e instituições de Proteção e Defesa Civil.

Por fim, conclui-se que o conhecimento produzido ultrapassa a compreensão específica do evento ocorrido em Imperatriz. A metodologia proposta pode ser adaptada para outros municípios localizados a jusante de grandes reservatórios hidrelétricos brasileiros, contribuindo para o aperfeiçoamento de sistemas de monitoramento hidrológico, previsão de cheias, operação integrada de reservatórios e planejamento territorial baseado em evidências. Essa abordagem territorial encontra respaldo em França *et al.* (2023), que demonstraram a aplicabilidade da espacialização das ocorrências e da produção de informações técnicas como suporte ao planejamento e às decisões institucionais de Proteção e Defesa Civil no Maranhão. Nesse sentido, o estudo reforça a importância da integração entre engenharia de recursos hídricos, hidrologia aplicada, gestão de barragens e planejamento urbano como elementos essenciais para aumentar a resiliência das cidades frente à intensificação dos eventos hidrológicos extremos decorrentes das mudanças climáticas e das transformações antrópicas nas bacias hidrográficas.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). *Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR)*. Brasília, DF: ANA, 2022. Disponível em: https://www.ana.gov.br/sar/. Acesso em: 6 out. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). *SIGA – Sistema de Informações de Geração da ANEEL*. Brasília, DF: ANEEL, 2026. Disponível em: https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/siga-sistema-de-informacoes-de-geracao-da-aneel. Acesso em: 6 out. 2026.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

BATISTA, B. M. *et al.* Análise espaço-temporal dos impactos pluviométricos e socioambientais no oeste do Pará (2022–2024). *Revista de Gestão Social e Ambiental*, Miami, v. 19, n. 12, p. 1–25, e22000, 2025. DOI: 10.24857/rgsa.v19n12-01.

BATISTA, B. M. *et al.* Avaliação espacial e pericial dos impactos socioambientais decorrentes de eventos pluviométricos extremos no estado do Pará (2025). *Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro*, v. 13, n. 15, p. 1–30, 2026. DOI: 10.66104/gyvfyw83.

BRASIL. Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC). *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 11 abr. 2012.

BRIGANDÌ, G.; CANDELA, A.; ARONICA, G. T. Analysis of the effects of reservoir operating scenarios on downstream flood damage risk using an integrated Monte Carlo modelling approach. *Water*, v. 15, n. 3, 550, 2023. DOI: 10.3390/w15030550.

COELHO, L. G. *et al.* Impactos ambientais decorrentes da implantação da Usina Hidrelétrica de Estreito no Maranhão. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 13, n. 6, p. 2867–2885, 2020.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. *Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação*: município de Imperatriz - MA. Rio de Janeiro: CPRM, 2015. 1 mapa, color. Escala 1:100.000.

DEVORE, J. L. *Probabilidade e estatística para engenharia e ciências*. 6. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2006.

DING, W.; WEI, G.; ZHOU, H. Improving flood resilience through optimal reservoir operation. *Journal of Hydrology*, v. 620, 129494, 2023. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129494.

ELENIUS, M. T.; LINDSTRÖM, G. Introduced flow variability and its propagation downstream of hydropower stations in Sweden. *Hydrology Research*, v. 53, n. 11, p. 1321–1339, 2022. DOI: 10.2166/nh.2022.138.

FRANÇA, C. D. V. *et al.* Proteção e defesa civil: sob a perspectiva de atendimentos no território maranhense. *Observatorio de la Economía Latinoamericana*, Curitiba, v. 21, n. 12, p. 25171–25188, 2023. DOI: 10.55905/oelv21n12-094.

GUO, S.; XIONG, L.; ZHA, X.; ZENG, L.; CHENG, L. Impacts of the Three Gorges Dam on the streamflow fluctuations in the downstream region. *Journal of Hydrology*, v. 598, 126480, 2021. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126480.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Malha Municipal Digital 2023*. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15774-malhas.html?edicao=42093. Acesso em: 6 out. 2026.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). *Banco de Dados Meteorológicos*. São José dos Campos, SP: INPE, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/pt-br/servicos/obter-dados-meteorologicos-espacializados-observacoes-e-estimativas?id=11395&origem=servico. Acesso em: 6 out. 2026.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

JAIN, S. K.; SHILPA, L. S.; RANI, D.; SUDHEER, K. P. State-of-the-art review: operation of multi-purpose reservoirs during flood season. *Journal of Hydrology*, v. 618, 129165, 2023. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129165.

MACHADO, A. R.; SANTOS, E. R. Alterações hidrogeomorfológicas decorrentes da implantação da Usina Hidrelétrica de Estreito no rio Tocantins. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 22, n. 3, p. 545–562, 2021.

NATURAL EARTH. *Natural Earth Vector*: cultural vectors. [S. l.]: Natural Earth, 2024. Disponível em: https://www.naturalearthdata.com/downloads/10m-cultural-vectors/. Acesso em: 6 out. 2026.

OLIVEIRA, A. P.; MACHADO, A. R.; SIEBEN, A. Territorial impacts of the Estreito Hydroelectric Power Plant on riverside communities. *Revista NERA*, v. 24, n. 60, p. 247–270, 2021.

PINTO, M. G. P. *et al.* Chuvas extremas e desastres ambientais no Pará: uma análise espacial dos danos socioambientais recentes (2022–2024). *Revista de Gestão Social e Ambiental*, Miami, v. 19, n. 11, e013751, 2025. DOI: 10.24857/rgsa.v19n11-022.

ROCHA, I. P. *et al.* Rio Mearim e os riscos de desastres urbanos e ambientais: atuação da Defesa Civil estadual em um município do Nordeste brasileiro. *Peer Review*, v. 5, n. 8, p. 270–289, 2023. DOI: 10.53660/426.prw1112.

SILVA, V. B. *et al.* Geotecnologias em perícias ambientais: análise de aplicação de ferramentas que fornecem embasamento em casos de desastres meteorológicos no Pará. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, Miami, v. 19, n. 12, p. 1–17, e013700, 2025. DOI: 10.24857/rgsa.v19n12-012.

SISTEMA INTEGRADO DE INFORMAÇÕES SOBRE DESASTRES (S2iD). *Base de dados de desastres*. Brasília, DF: Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/protecao-e-defesa-civil/sistema-integrado-de-informacoes-sobre-desastres. Acesso em: 6 out. 2026.

UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION (UNDRR). *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2022*: Our World at Risk. Geneva: United Nations, 2022.

WANG, J.; ZHAO, T.; ZHAO, J.; WANG, H.; LEI, X. Improving real-time reservoir operation during flood season by making the most of streamflow forecasts. *Journal of Hydrology*, v. 595, 126017, 2021. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126017.

YANG, L.; ZENG, S.; XIA, J.; WANG, Y.; HUANG, R.; CHEN, M. Effects of the Three Gorges Dam on the downstream streamflow based on a large-scale hydrological and hydrodynamics coupled model. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 40, 101039, 2022. DOI: 10.1016/j.ejrh.2022.101039.

ZHANG, J.; CAI, X.; LEI, X.; LIU, P.; WANG, H. Real-time reservoir flood control operation enhanced by data assimilation. *Journal of Hydrology*, v. 598, 126426, 2021. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126426.

ZHU, F.; ZENG, Y.; WANG, Y.; LIU, W.; HAN, M.; FAN, Y.; BEN, M.; ZHONG, P. A stochastic decision-making framework for optimal multi-objective reservoir operation accounting for the

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

tracking of uncertainty propagation and evolution from multiple sources. *Journal of Hydrology*, v. 654, 132811, 2025. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2025.132811.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.