

CENTRO UNIVERSITÁRIO BRASILEIRO - UNIBRA
CURSO DE GRADUAÇÃO BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

**CARLA GABRIELA REIS CABRAL
ELIZIO MANOEL DA SILVA MELLO
MATHEUS HENRIQUE OLIVEIRA DE LIMA**

**MODELAGEM HIDRODINÂMICA E MAPEAMENTO DE ÁREAS DE RISCO DE
INUNDAÇÃO LOCALIZADA NO MUNICÍPIO DE JAQUEIRA-PE**

RECIFE
2023

**CARLA GABRIELA REIS CABRAL
ELIZIO MANOEL DA SILVA MELLO
MATHEUS HENRIQUE OLIVEIRA DE LIMA**

**MODELAGEM HIDRODINÂMICA E MAPEAMENTO DE ÁREAS DE RISCO
INUNDAÇÃO LOCALIZADA NO MUNICÍPIO DE JAQUEIRA-PE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Universitário Brasileiro – UNIBRA, como requisito parcial para obtenção do título de bacharelado em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Janilson Alves Ferreira
Coorientador: Prof Me. Edinilson de Castro Ferreira

RECIFE
2023

Ficha catalográfica elaborada pela
bibliotecária: Dayane Apolinário, CRB4- 2338/ O.

C117i Cabral, Carla Gabriela Reis.
Modelagem hidrodinâmica e mapeamento de áreas de risco de
inundação localizada no município de Jaqueira-PE / Carla Gabriela Reis
Cabral; Elizio Manoel da Silva Mello; Matheus Henrique Oliveira de Lima. -
Recife: O Autor, 2023.
41 p.

Orientador(a): Dr. Janilson Alves Ferreira.
Coorientador(a): Me. Edinilson de Castro Ferreira.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Centro Universitário
Brasileiro - UNIBRA. Bacharelado em Engenharia Civil, 2023.

Inclui Referências.

1. Mapeamento. 2. Inundação. 3. Riscos. 4. Gerenciamento. I. Mello,
Elizio Manoel da Silva. II. Lima, Matheus Henrique Oliveira de. III. Centro
Universitário Brasileiro. - UNIBRA. IV. Título.

CDU: 624

Dedicamos este trabalho a um amigo querido que, infelizmente, não está mais entre nós. Zezionito Bento era mais do que um colega de curso; era um amigo, sempre disposto a ajudar e compartilhar alegrias e sorrisos. Sua ausência é profundamente sentida, mas este trabalho é uma homenagem à sua memória. Que ele continue a inspirar-nos, mesmo ausente fisicamente.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, queremos expressar nossa gratidão a Deus, cuja graça nos guiou e sustentou ao longo dessa jornada desafiadora. Nesta etapa final celebramos mais do que a conclusão de um curso; celebramos a realização de um sonho que, por vezes, parecia inatingível.

A nossa família merece um agradecimento especial. Foram nossos alicerces, nosso porto seguro. Seu apoio e amor constante foram eles quem nos impulsionou a persistir, mesmo diante dos obstáculos.

Aos nossos respeitados professores, em especial ao orientador Janilson Ferreira e o coorientador Edinilson de Castro, dedicamos nossas sinceras palavras de apreço. Seus conhecimentos, orientações e paciência foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Queremos também agradecer à Engenheira Civil Michelle Kiemle, cuja sabedoria e experiência foram uma fonte inestimável de aprendizado. Seus conselhos e incentivos contribuíram significativamente para a realização deste projeto, transformando desafios em oportunidades de crescimento.

“Quando as águas se elevam, a solidariedade deve se elevar ainda mais para reconstruir o que foi perdido”

(Ban Ki-moon)

RESUMO

A pesquisa apresenta uma ferramenta crucial para o controle de desastres causados por inundações ribeirinhas, abordando os impactos nos âmbitos ambiental, material e econômico. O foco deste trabalho reside no mapeamento das áreas suscetíveis a eventos de inundação ao longo do Rio Pirangi, no Município de Jaqueira-PE e seus riscos associados.

Para alcançar resultados precisos, empregamos softwares especializados em simulações hidrológicas e hidráulicas, considerando dados de fontes precisas. Além disso, utilizamos um Sistema de Informações Geográficas (SIG), especificamente o ArcGIS® para desenvolver os mapas presentes no estudo. A integração dessas tecnologias proporciona uma compreensão aprofundada das áreas de risco, oferecendo embasamento técnico para o planejamento urbano e a gestão de desastres.

Os resultados, como já previsto, evidenciam que quanto maior o Tempo de Retorno (TR), maiores são as áreas suscetíveis a riscos significativamente mais elevados. Isso ressalta a importância do gerenciamento dos Recursos Hídricos por parte dos gestores públicos, proporcionando uma base sólida para a tomada de decisões.

Palavras-chave: mapeamento; inundação; riscos; gerenciamento.

Abstract

The research presents a crucial tool for controlling disasters caused by riverine flooding, addressing environmental, material and economic impacts. The focus of this work lies in mapping the areas susceptible to flooding events along the Pirangi River, in the Municipality of Jaqueira-PE and their associated risks.

To achieve accurate results, we employ specialized software in hydrological and hydraulic simulations, considering data from precise sources. Furthermore, we used a Geographic Information System (GIS), specifically ArcGIS® to develop the maps present in the study. The integration of these technologies provides an in-depth understanding of risk areas, offering a technical basis for urban planning and disaster management.

The results, as already predicted, show that the longer the Return Time (TR), the larger the areas are susceptible to significantly higher risks. This highlights the importance of water resources management by public managers, providing a solid basis for decision-making.

Keywords: mapping; inundation; scratches; management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Caracterização dos leitos no escoamento.....	16
Figura 2 - Curva geral de Risco Hidrodinâmico.....	22
Figura 3 - Mecanismos de falhas de estabilidade do veículo	24
Figura 4 – Área de estudo: Rio Pirangi, localizado no Município de Jaqueira-PE.....	26
Figura 5 – Hidrografia da Região	27
Figura 6 – Localização de Postos Pluviométricos encontrados próximos a área de interesse.....	28
Figura 7 – Esquema do Modelo Hidrológico no simulado no software HEC-HMS 4.10	31
Figura 8 - Malha de cálculo do CN (Curve Number)	33
Figura 9 – Modelo Digital de Elevação da área em estudo	35
Figura 10 – Região da malha computacional	36
Figura 11 - Malha de cálculo da rugosidade de Manning da geometria do modelo ..	37
Figura 12 - Ponte Existente no percurso do Rio Pirangi.....	38
Figura 13 - Input de dados de condições de contorno	38
Figura 14 - Área inundável - TR 2 anos - Rio Pirangi.....	48
Figura 15 - Área inundável - TR 25 anos - Rio Pirangi.....	48
Figura 16 - Área inundável - TR 50 anos - Rio Pirangi.....	49
Figura 17 – Classificação do Risco Hidrodinâmico – TR 2 anos – Rio Pirangi	51
Figura 18 – Classificação do Risco Hidrodinâmico – TR 25 anos – Rio Pirangi	51
Figura 19 – Classificação do Risco Hidrodinâmico – TR 50 anos – Rio Pirangi	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características fisiográficas das Sub-bacias S-1 a S-5.....	32
Tabela 2 - Características fisiográficas dos rios R-1 e R-2	32
Tabela 3 - CN das Sub-bacias	34
Tabela 4 - Tempo de Concentração e tempo de Pico dos rios do modelo	39
Tabela 5 - Tempo de Concentração e tempo de Pico das Sub-bacias do modelo....	39
Tabela 6 – Cálculos de Infiltração Potencial e abstração Inicial.....	45
Tabela 7 - Áreas das Manchas de Inundações	49

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Valores de coeficientes de rugosidade de Manning	37
Quadro 2 - Classificação quanto ao Risco Hidrodinâmico	50
Quadro 3 – Legenda do Risco Hidrodinâmico.....	50
Quadro 4 - Áreas de classificação do Risco Hidrodinâmico	52

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Resumo dos anos com dados pluviométricos coletados com falhas e consistidos nos postos localizados próximos a área de estudo	29
Gráfico 2 - Precipitações máximas dos anos com dados consistidos do Posto Pluviométrico - Código 316 (Maraial)	30
Gráfico 3 – Curvas IDF para os Tempos Retornos de 2, 25 e 50 anos.....	39
Gráfico 4 - Chuva de projeto para S-1 (TR 2 anos).....	40
Gráfico 5 - Chuva de projeto para S-1 (TR 25 anos).....	40
Gráfico 6 - Chuva de projeto para S-1 (TR 50 anos).....	41
Gráfico 7 - Chuva de projeto para S-2 (TR 2 anos).....	41
Gráfico 8 - Chuva de projeto para S-2 (TR 25 anos).....	41
Gráfico 9 - Chuva de projeto para S-2 (TR 50 anos).....	42
Gráfico 10 - Chuva de projeto para S-3 (TR 2 anos).....	42
Gráfico 11 - Chuva de projeto para S-3 (TR 25 anos).....	42
Gráfico 12 - Chuva de projeto para S-3 (TR 50 anos).....	43
Gráfico 13 - Chuva de projeto para S-4 (TR 2 anos).....	43
Gráfico 14 - Chuva de projeto para S-4 (TR 25 anos).....	43
Gráfico 15 - Chuva de projeto para S-4 (TR 50 anos).....	44
Gráfico 16 - Chuva de projeto para S-5 (TR 2 anos).....	44
Gráfico 17 - Chuva de projeto para S-5 (TR 25 anos).....	44
Gráfico 18 - Chuva de projeto para S-5 (TR 50 anos).....	45
Gráfico 19 - Hidrograma Unitário Triangular, Tempo de Retorno de 2 anos	46
Gráfico 20 - Hidrograma Unitário Triangular, Tempo de Retorno de 25 anos	46
Gráfico 21 - Hidrograma Unitário Triangular, Tempo de Retorno de 50 anos	47

LISTA DE SÍMBOLOS

APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
CN	Curve Number
GAM IDF	Genetic Algorithm Methodology for IDF
HEC-HMS	<i>Hydrologic Modeling System</i>
HEC-RAS	<i>Hydrologic Engineers Corps – River Analysis System</i>
IDF	Intensidade-Duração-Frequência
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
SIG	Sistema de Informações Geográficas
TR	Tempo de Retorno

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	18
2.1. Objetivo geral	18
2.2. Objetivos específicos	18
2.3. Justificativa.....	18
3. REFERENCIAL TEÓRICO	19
3.1. Inundações Urbanas	19
3.1.1. <i>Medidas Estruturais e não estruturais</i>	19
3.2. Risco Hidrodinâmico e vulnerabilidade	20
3.3. Classificação do Escoamento	24
3.4. Modelagem hidrológica e hidráulica (HEC-HMS e HEC-RAS).....	24
4. METODOLOGIA.....	26
4.1. Local de Estudo	26
4.1.1. <i>Hidrografia da Região em estudo</i>	27
4.2. Equação da IDF (Intensidade – Duração – Frequência)	28
4.2.1. <i>Posto pluviométrico</i>	28
4.2.2. <i>Ferramenta GAM IDF (Genetic Algorithm Methodology for IDF)</i>	30
4.3. Modelagem Hidrológica no HEC-HMS	31
4.3.1. <i>Determinação do CN (Curve Number) e parametrização de infiltração.</i>	33
4.4. Modelo Digital de Elevação (MDE).....	34
4.5. Modelagem Hidrodinâmica no HEC-RAS.....	35
4.5.1. <i>Malha computacional</i>	35
4.5.2. <i>Coeficiente de Manning</i>	36
4.5.3. <i>Ponte Existente sobre o Rio Pirangi</i>	37
4.5.4. <i>Condições de Contorno do modelo</i>	38
5. RESULTADOS	38
5.1. Curva IDF	38
5.2. Tempos de Concentração	39
5.3. Chuva de Projeto	40
5.4. Parâmetros de Infiltração Potencial e Abstração Inicial do solo	45
5.5. Vazões calculadas pelo modelo Hidrológico	45
5.6. Mapeamento das áreas de inundação	47

5.7. Risco Hidrodinâmico	49
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
REFERÊNCIAS.....	55

1. INTRODUÇÃO

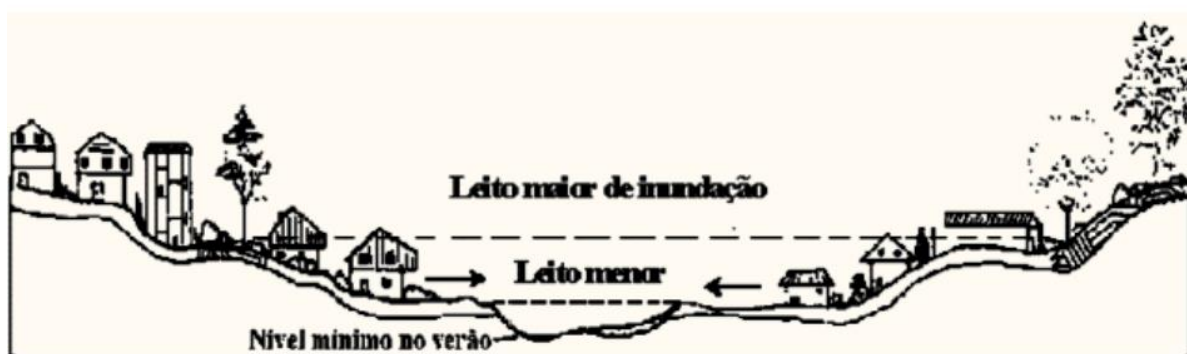
Para Tucci (2004) a problemática das inundações urbanas remonta aos primórdios das cidades. Essa ocorrência se materializa quando as águas de rios, córregos e sistemas pluviais extrapolam seus limites de escoamento devido à incapacidade de transporte de um desses sistemas, invadindo áreas destinadas à habitação, infraestrutura de transporte (ruas, rodovias e calçadas), espaços de lazer, comércio, indústria, entre outros. Até pouco tempo atrás, as inundações eram encaradas como eventos naturais, uma vez que, ao transbordar as margens dos rios, a intervenção humana era mínima, e as comunidades apenas sofriam os impactos por ocuparem regiões de risco.

Neste contexto, Tucci (1997) oferece uma abordagem abrangente, destacando dois principais contribuintes: inundações relacionadas à urbanização e inundações em áreas ribeirinhas.

Inundações devido à Urbanização: A primeira categoria abrange as inundações exacerbadas pela expansão urbana desordenada. Este fenômeno é caracterizado pelo aumento na frequência e intensidade das enchentes, resultante da ocupação do solo por superfícies impermeáveis e pela implementação de sistemas de drenagem. Além disso, fatores como a construção de aterros, pontes, drenagem inadequada e obstruções em condutos desempenham papéis significativos nesse processo.

Inundações em Áreas Ribeirinhas: A segunda categoria concentra-se nas inundações naturais que afetam comunidades nas proximidades dos rios. Esse fenômeno ocorre quando os rios extravasam para seus leitos maiores, principalmente em resposta a eventos climáticos extremos, com uma média de retorno de aproximadamente dois anos. A vulnerabilidade das áreas ribeirinhas a tais eventos destaca a importância de estratégias de gestão integrada. A Figura 1 abaixo mostra os diferentes níveis d'água que o rio pode sofrer ao longo do tempo.

Figura 1 – Caracterização dos leitos no escoamento



Fonte: TUCCI e BERTONI (2003).

Para Oliveira et al. (2010), o refinamento dos sistemas de previsão de inundações e a elaboração de mapas das áreas afetadas por esses eventos despontam como medidas não-estruturais fundamentais para o planejamento de municípios que se desenvolvem nas proximidades de corpos d'água. Essas ações desempenham um papel significativo na mitigação dos impactos causados pelas inundações.

Oliveira et al. (2010) também afirma que os mapas de inundação têm o potencial de subsidiar a reorganização do espaço urbano, visto que são instrumentais para estabelecer novas diretrizes de ocupação em um contexto urbano. Essas iniciativas não apenas contribuem para uma gestão mais eficaz dos riscos de inundação, mas também oferecem subsídios valiosos para a tomada de decisões relacionadas ao planejamento urbano. Ao antecipar áreas vulneráveis, os sistemas de previsão e mapeamento proporcionam informações cruciais que podem informar estratégias proativas na redefinição e ordenamento do espaço urbano, visando a minimização dos impactos decorrentes de eventos inundativos.

O Decreto Federal Nº 11.219 de 2022, que aborda o Sistema Nacional de Defesa Civil e o Conselho Nacional de Defesa Civil, orienta sobre a necessidade de identificar e incorporar as zonas de risco no plano diretor dos municípios. Em localidades que estão em processo de crescimento urbano, o levantamento de áreas propensas a fenômenos naturais é fundamental, assegurando que tais regiões não sejam ocupadas durante o desenvolvimento urbano.

Assim, este trabalho visa estudo de caso de aplicação integrada dos programas HEC-HMS para modelagem hidrológica e HEC-RAS para modelagem hidrodinâmica para obter mancha de inundação das áreas propícias a alagamentos da Bacia

Hidrográfica do Rio Pirangi no município de Jaqueira em Pernambuco, para os cenários de tempos de retornos de 2 anos, 25 anos e 50 anos com utilização de Modelo digital de Terreno (MDT) de alta resolução espacial.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa consiste em mapear as áreas mais vulneráveis a inundações na cidade de Jaqueira-PE podendo assim calcular o Risco Hidrodinâmico.

2.2. Objetivos específicos

- Elaborar modelo hidrológico para delimitar bacia hidrográfica;
- Calcular vazão de projeto;
- Delimitar mancha de inundação de cheia em diferentes Tempos de Recorrências.
- Mapear os Riscos Hidrodinâmicos

2.3. Justificativa

A escolha da cidade de Jaqueira, localizada no estado de Pernambuco, para o estudo sobre eventos de inundações é justificada por diversos fatores, sendo o mais significativo a presença de um rio margeando uma área urbana.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Inundações Urbanas

Segundo Tucci (2004), as inundações se desencadeiam quando as águas provenientes de rios, riachos e sistemas pluviais extravasam devido à insuficiência na capacidade de escoamento desses sistemas, impactando bairros residenciais, vias de locomoção, áreas de recreação, estabelecimentos comerciais e instalações industriais frequentados pela população. Embora em eras anteriores fossem interpretadas como fenômenos naturais, na contemporaneidade, reconhecemos que a ocupação humana em zonas vulneráveis desempenha um papel significativo no agravamento dessas situações.

Tucci (2004) também afirma que durante períodos de precipitação intensa, quando o solo enfrenta dificuldades em absorver eficazmente a água, uma parcela considerável desse volume direciona-se para o sistema de drenagem, excedendo sua capacidade natural de escoamento. O excedente hídrico, incapaz de ser devidamente drenado, acaba ocupando as áreas contíguas aos rios, acompanhando a topografia local. Esses eventos imprevistos são referidos como inundações ribeirinhas e são influenciados pelos padrões climáticos específicos da área, tanto em termos locais quanto regionais.

3.1.1. Medidas Estruturais e não estruturais

Conforme analisado por Barbosa (2006), a gestão das inundações é abordada por meio de duas categorias principais de medidas: as estruturais, que envolvem alterações físicas nos cursos d'água, e as não estruturais, que se concentram na coexistência sustentável com os rios. As intervenções estruturais compreendem modificações hidráulicas, como a construção de barragens, diques e canalizações, enquanto as medidas não estruturais têm uma natureza mais preventiva, incluindo a delimitação de zonas de inundação e a implementação de sistemas de alerta coordenados pela Defesa Civil. É crucial destacar que o objetivo primário dessas

medidas é atenuar as consequências das inundações, embora seja reconhecido que não é possível eliminar totalmente esse fenômeno natural.

A abordagem mais eficiente envolve a integração equilibrada de medidas estruturais e não estruturais, visando assegurar a segurança da população e promover uma convivência harmônica com os rios, sobretudo nas comunidades ribeirinhas. Esse método abrangente busca não apenas reduzir os impactos adversos das inundações, mas também incentivar práticas sustentáveis e resilientes nas áreas propensas a esse tipo de evento.

Conforme enfatizado por Decina et al. (2016), uma abordagem valiosa para avaliar a eficácia das medidas de controle antes de sua implementação envolve a utilização de modelos hidrológicos e hidráulicos. A aplicação de softwares especializados em modelagem possibilita a criação de cenários e a simulação de eventos hidrológicos, permitindo uma análise mais profunda dos potenciais consequências associadas à adoção das medidas de controle. O uso de modelagem hidráulica e hidrológica proporciona uma visão preditiva, permitindo a visualização dos resultados esperados em diferentes contextos. Essa ferramenta torna-se crucial na avaliação da viabilidade e eficiência das estratégias propostas, contribuindo para embasar decisões no âmbito do poder público.

Nesse sentido, abordagens específicas podem ser desenvolvidas para apoiar o processo de tomada de decisão, proporcionando uma análise mais robusta e fundamentada. Dessa maneira, a utilização de modelos e simulações não apenas possibilita a antecipação de possíveis impactos, mas também oferece uma base técnica sólida para o desenvolvimento e aprimoramento contínuo de medidas de controle, otimizando a gestão de riscos associados a eventos hidrológicos.

3.2. Risco Hidrodinâmico e vulnerabilidade

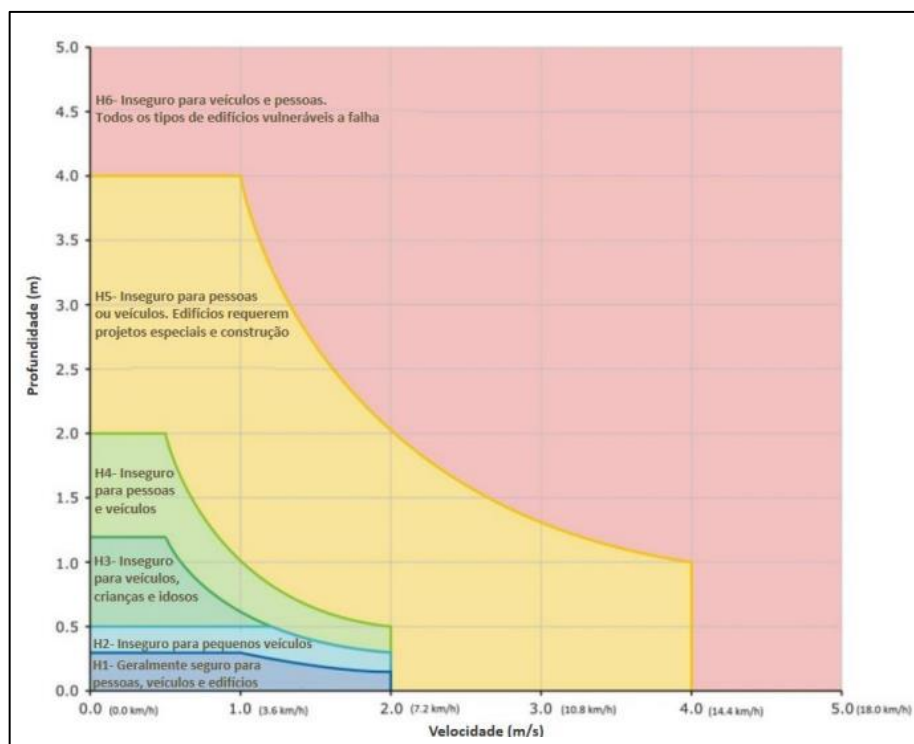
Para Smith et al. (2014), um grande indicador na avaliação dos impactos causados por uma inundação que se caracterize como ameaça representada pelo fenômeno de propagação das cheias é o risco hidrodinâmico. Esse parâmetro caracteriza a probabilidade de pessoas, edificações, veículos ou outras estruturas localizadas na área de inundação serem deslocados ou arrastados pela correnteza. A análise do risco hidrodinâmico desempenha um papel fundamental na identificação e

na mitigação de potenciais danos durante eventos de inundação. Compreender a susceptibilidade de elementos expostos à força da água é essencial para o desenvolvimento de estratégias de gestão de riscos eficazes. Essa abordagem não apenas auxilia na avaliação da vulnerabilidade de comunidades e infraestruturas, mas também fornece insights valiosos para o planejamento urbano e o design de estruturas mais resilientes.

A partir deste estudo, Feliciano (2022) empreendeu uma investigação focada na identificação das características durante um episódio de inundação que colocam pessoas, veículos e construções em situação de vulnerabilidade e susceptíveis a danos, considerando a análise de Smith et al. (2014). Foram construídas curvas de vulnerabilidade específicas para cada categoria de elemento exposto, com o objetivo de realizar uma classificação espacial relacionada ao risco hidrodinâmico.

O estudo de Feliciano (2022) não apenas oferece uma compilação de pesquisas relevantes, mas também define parâmetros e critérios para a avaliação de riscos durante eventos de inundação. A delimitação de curvas de vulnerabilidade específicas para diferentes objetos, como pessoas, veículos e estruturas, representa uma contribuição significativa para a compreensão mais precisa das ameaças associadas a inundações. Ao combinar uma série de curvas de vulnerabilidade com informações sobre perigos específicos, os pesquisadores puderam realizar uma avaliação abrangente, resultando na classificação geral de risco de inundação. Essa metodologia integrada fornece uma base sólida para estratégias de gestão de riscos mais eficientes, não apenas identificando áreas de potencial perigo, mas também permitindo o desenvolvimento de medidas preventivas e mitigadoras mais direcionadas. Esses avanços são essenciais para promover a resiliência e a segurança em áreas suscetíveis a eventos de inundação. A seguir, a Figura 2 apresenta as curvas combinadas de risco expostas pelo estudo.

Figura 2 - Curva geral de Risco Hidrodinâmico



Fonte: Adaptado de SMITH, G. P. et al., (2014).

Ao analisar as curvas ilustradas na Figura 2, conforme observado por Feliciano (2022), é salientado que tanto a gravidade do perigo quanto a probabilidade de danos estão intimamente vinculadas à taxa de elevação do nível de inundação e ao aumento da velocidade do escoamento. Dentro desse contexto, a pesquisa leva em consideração a subdivisão de seis zonas de risco, que englobam os seguintes aspectos:

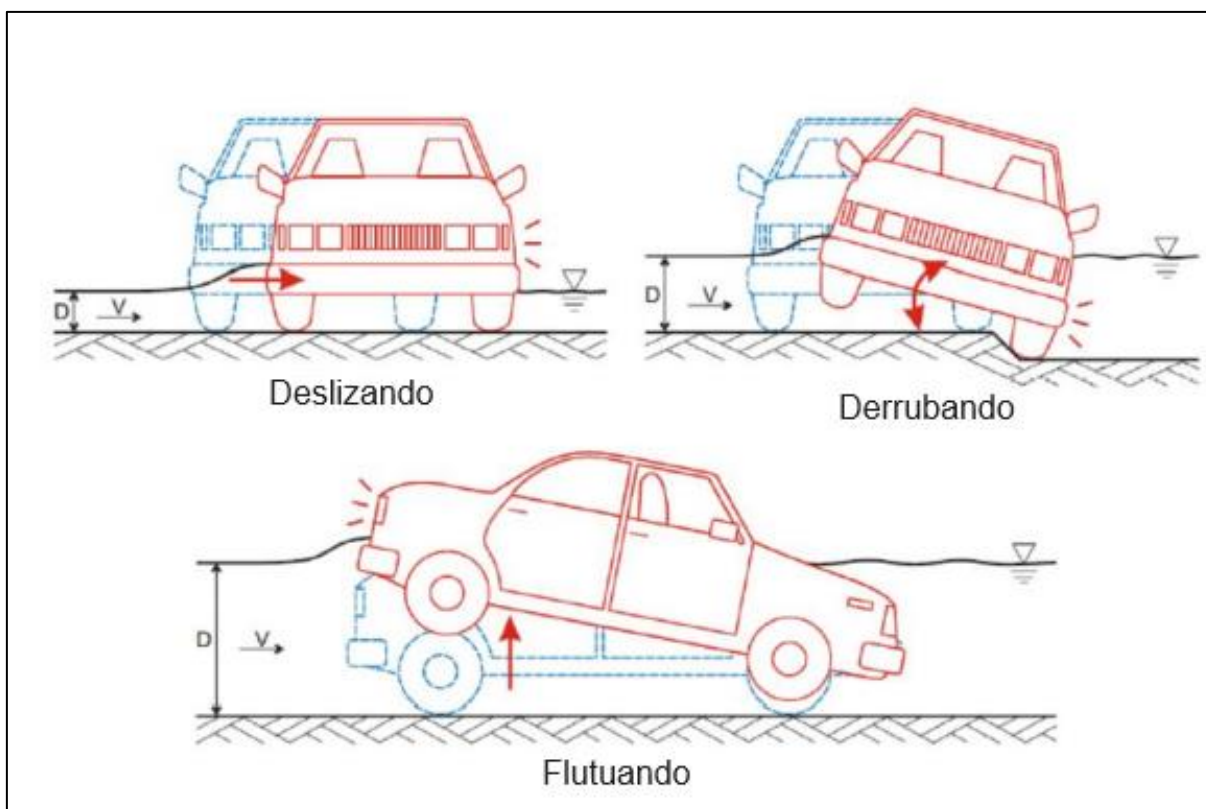
- H1 - Pessoas, veículos e edifícios geralmente estão seguros, mas podem eventualmente adquirir instabilidade em escoamentos com profundidades até 0,30 m e velocidades até 2,00 m/s;
- H2 - No que tange a escoamentos caracterizados com baixas velocidades (até 2 m/s), pequenos carros podem sobrenadar em profundidades superiores a 0,30 m;
- H3 - Em escoamentos de baixa velocidade, até 2,00 m/s, veículos, crianças e idosos podem ficar instáveis quando as profundidades são maiores que 0,50 m;
- H4 - Ainda considerando baixas velocidades, até 2 m/s, adultos expostos a inundação podem ficar instáveis quando as profundidades ultrapassarem 1,20 m;

- H5 - Edifícios projetados sem particularidades estruturais estão em risco de falha quando expostos as profundidades maiores que 2,00 m e com velocidades acima de 2,00 m/s;
- H6 - Veículos, pessoas e todos os tipos de edifícios, estão propensos à falha quando as profundidades são maiores que 4,00 m e as velocidades de escoamento estão acima de 4,00 m/s.

Para e Shand et al. (2011) e Haynes et al. (2016), a preservação da segurança das pessoas durante eventos de inundação pode ser comprometida quando os veículos em que estão viajando se deparam com fluxos de inundação que os tornam instáveis, resultando em perda de tração (instabilidade friccional por deslizamento), tombamento devido a superfícies irregulares ou até mesmo flutuação. Esses mecanismos podem culminar na perda total de controle sobre o veículo, levando a situações em que o veículo é arrastado pela correnteza rio abaixo.

A instabilidade friccional por deslizamento ocorre quando a força de atrito entre os pneus e a superfície da estrada é insuficiente para superar a força da água em movimento, resultando na perda de aderência e controle. Já o tombamento, frequentemente associado a terrenos irregulares, pode ser provocado pelo desequilíbrio causado pela inundação. Além disso, a flutuação do veículo se refere à capacidade do mesmo de ser levado pela água, o que pode ocorrer em áreas com grande volume de água. É imperativo destacar que esses cenários, conforme discutido por Shand et al. (2011) e Haynes et al. (2016), representam riscos substanciais durante eventos de inundação, demandando atenção especial na formulação de estratégias de gestão de riscos. Os mecanismos de falhas são ilustrados na Figura 3.

Figura 3 - Mecanismos de falhas de estabilidade do veículo



Fonte: Adaptada de SMITH, et al., (2014)

3.3. Classificação do Escoamento

Para os fluxos em canais a céu aberto que são aqueles sujeitos à interação direta com a atmosfera, ou seja, são influenciados pelas condições de precipitações maiores em períodos de chuvas e com isso alterações em seu comportamento de fluxo.

Considerando a análise dos fluxos em canais abertos, pode-se basicamente dividi-los em dois conjuntos. O primeiro sendo para os canais naturais, englobando rios e córregos, já o segundo refere-se aos fluxos em canais artificiais, construídos pelo ser humano, como canais de irrigação e aquedutos. Dessa maneira, ao identificar o fluxo em canais a céu aberto, é possível classificá-los em relação aos parâmetros que os governam.

3.4. Modelagem hidrológica e hidráulica (HEC-HMS e HEC-RAS)

A modelagem e simulação por meio de métodos numéricos são ferramentas essenciais na engenharia contemporânea. Os modelos numéricos possibilitam, por meio da capacidade computacional, a reprodução e garantia da previsão de situações

com diversos graus de complexidade e amplitude. As representações computacionais viabilizam a análise de diferentes cenários de maneira segura, substituindo ou complementando a construção de modelos físicos que demandam investimentos financeiros e tempo para sua elaboração (Feliciano, 2022).

O Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) é uma ferramenta de modelagem hidrológica desenvolvida pela US Army Corps of Engineers (USACE) dos Estados Unidos da América que permite simular os processos de evaporação, precipitação e escoamento em bacias.

Com a utilização do *software* HEC-RAS (Hydrologic Engineers Corps – River Analysis System), é possível realizar os cálculos dos perfis da superfície da água em fluxos permanentes e não permanentes, em canais com superfície livre. Esses perfis podem ser calculados em regimes subcrítico, supercrítico e misto, com a possibilidade de ocorrência de transições entre esses regimes durante o escoamento.

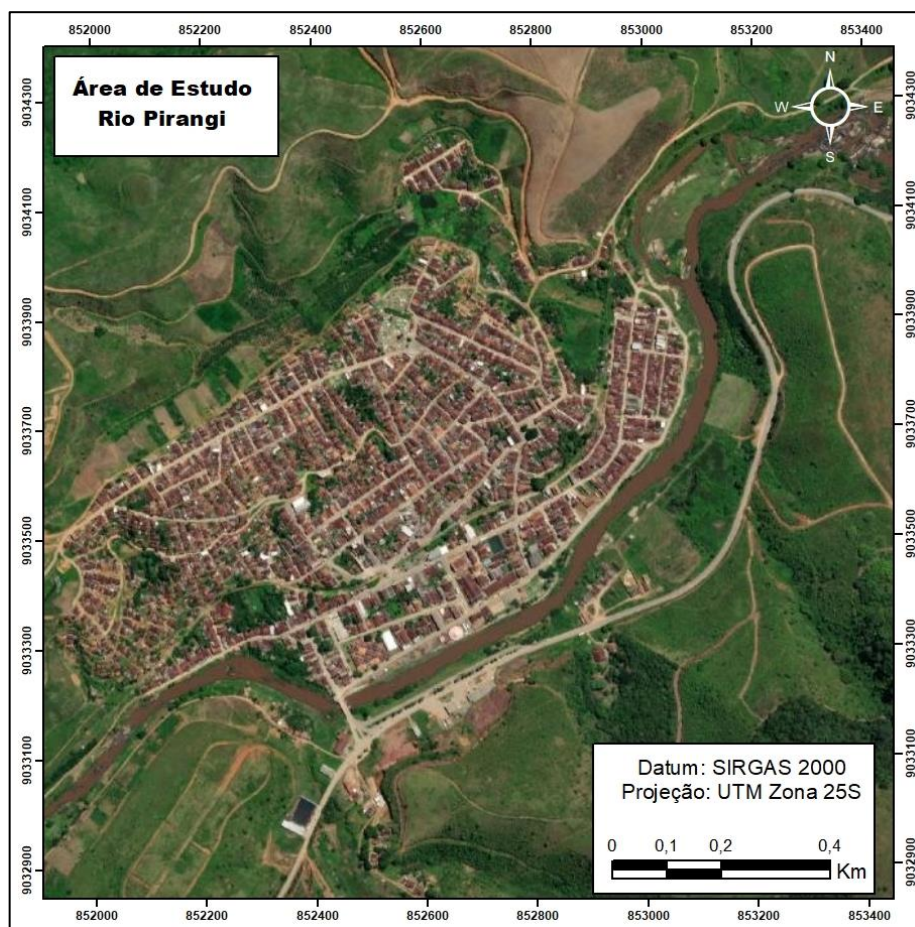
4. METODOLOGIA

O presente estudo, teve como objetivo mapear as áreas suscetíveis a inundação nas margens do Rio Pirangi, localizado no município de Jaqueira-PE por meio de simulações hidrológicas e hidráulicas realizadas com o uso dos *softwares* HEC-HMS e HEC-RAS. Esta pesquisa é de extrema importância para identificar, compreender e calcular o risco hidrodinâmico das cheias na região.

4.1. Local de Estudo

A área em estudo localiza-se nos limites geográficos do município de Jaqueira, no interior do estado de Pernambuco, situada há cerca de 125 km da Capital Recife, com altitude média de 176m. Jaqueira-PE está localizada em coordenadas de Datum SIRGAS 2000 na zona 25S, que correspondem a uma posição geográfica específica no sistema de coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator). A Figura 4 abaixo, representa o local de estudo, para as simulações realizadas.

Figura 4 – Área de estudo: Rio Pirangi, localizado no Município de Jaqueira-PE

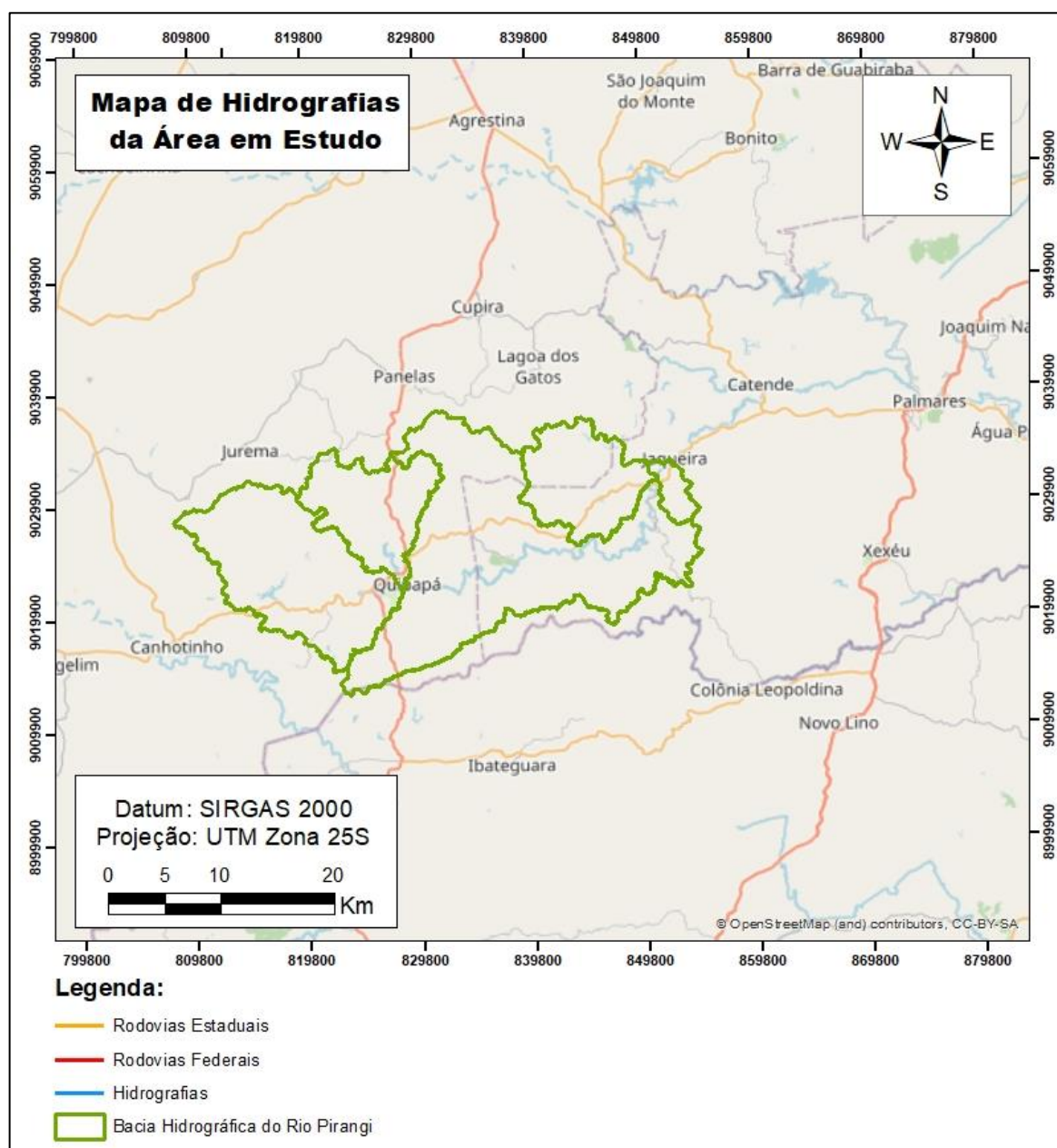


Fonte: Autores (2023).

4.1.1. Hidrografia da Região em estudo

O Rio Pirangi é um curso d'água de médio porte que atravessa o município de Jaqueira, situado no estado de Pernambuco. Sua nascente tem origem na Serra dos Cavalos e percorre uma extensão de aproximadamente 35 quilômetros. Esse Rio desagua sobre o Rio Panelas pertence a bacia hidrográfica do Rio Una, conforme esquema na Figura 5, desempenhando um papel fundamental no fornecimento de água para a região, além de ser um recurso essencial para as atividades agrícolas locais.

Figura 5 – Hidrografia da Região



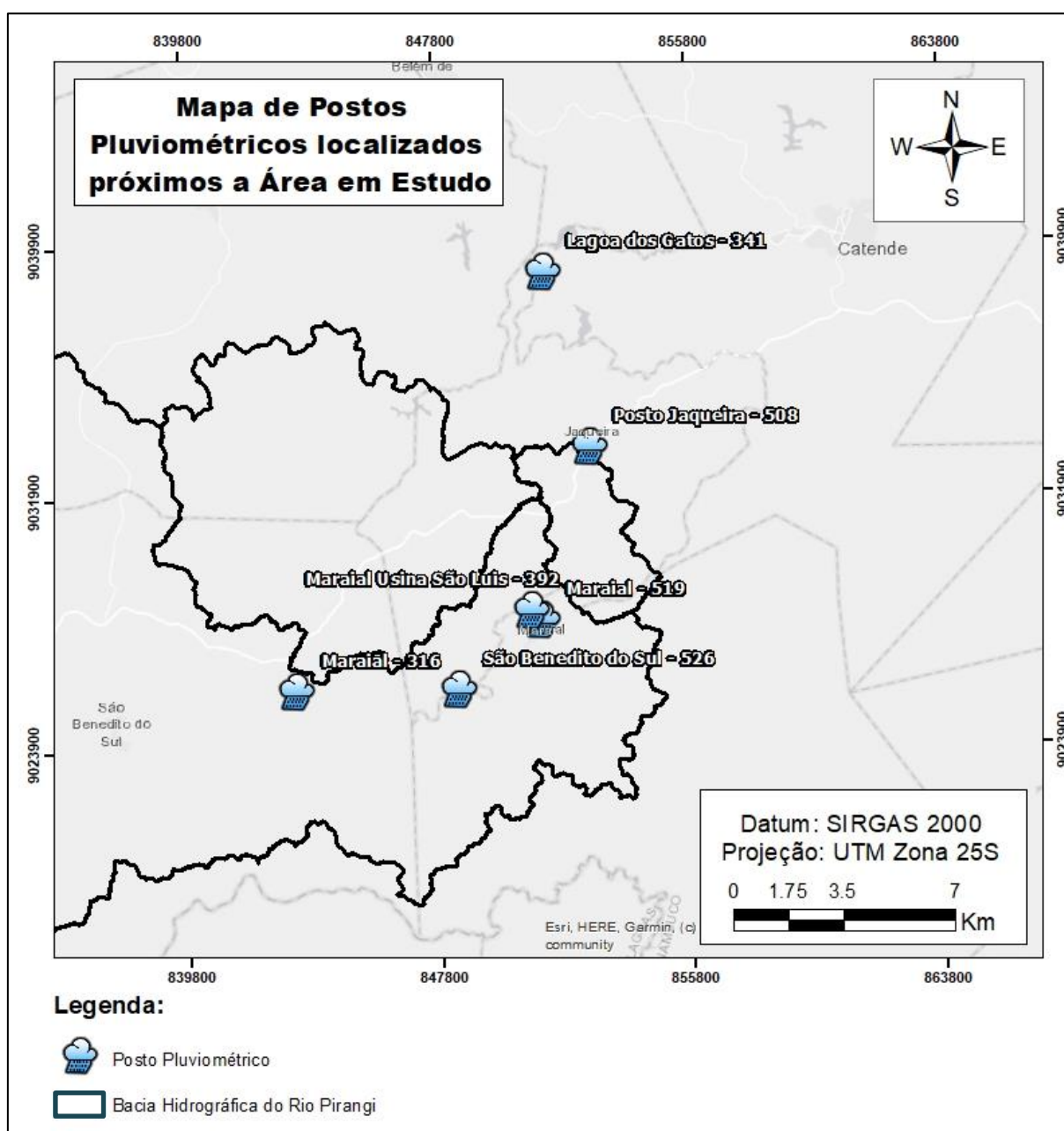
Fonte: Autores (2023).

4.2. Equação da IDF (Intensidade – Duração – Frequência)

4.2.1. Posto pluviométrico

Para a coleta de dados de chuvas na região do estudo foram consultados os órgãos oficiais do governo de históricos dos registros de pluviômetros disponibilizados por downloads através de sites na internet. Os dados pesquisados foram de seis estações pluviométricas da Agência Pernambucana de Águas e Clima - (APAC), apresentados na Figura 6 a seguir:

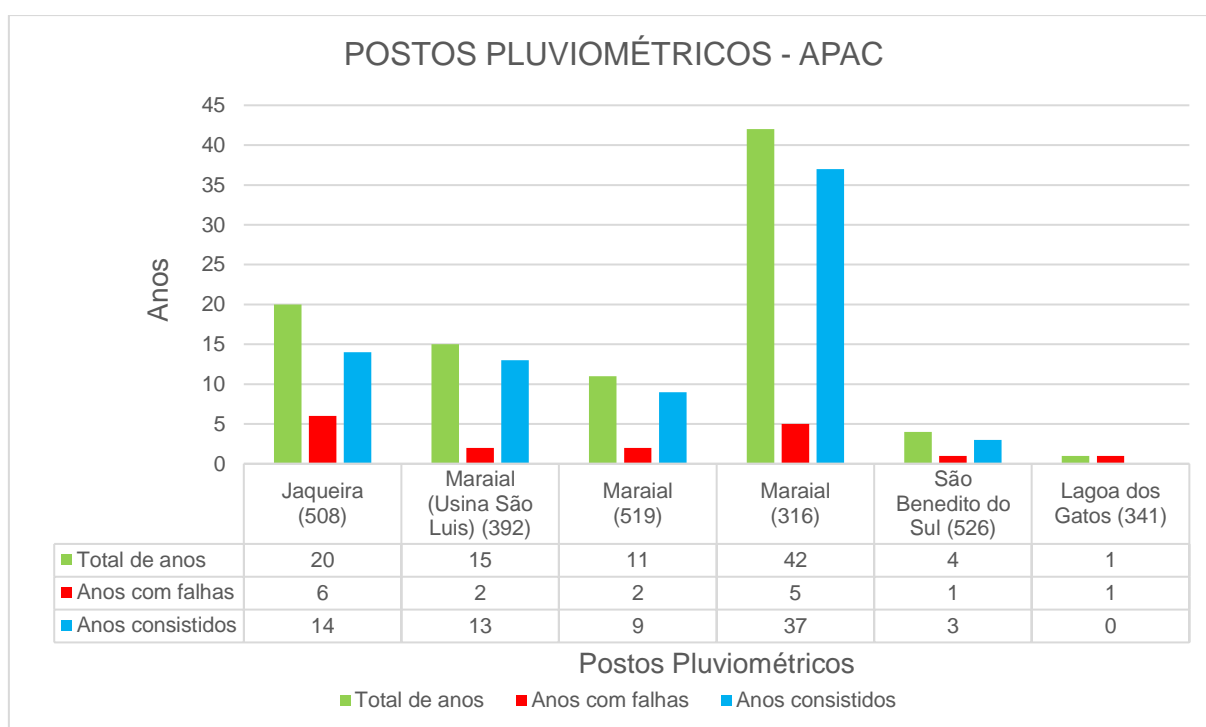
Figura 6 – Localização de Postos Pluviométricos encontrados próximos a área de interesse



Fonte: Autores (2023).

Depois de localizados os postos pluviométricos, deu-se início a análise dos dados coletados e registrados pela APAC - (Agência Pernambucana de Águas e Clima). Após uma criteriosa análise das séries históricas de todos os postos encontrados, optou-se por adotar os dados da estação pluviométrica de código 316 da APAC, localizada no município de Maraial-PE. No Gráfico 1 abaixo, mostra o resumo dos anos com dados coletados com falhas e consistidos pela APAC - (Agência Pernambucana de Águas e Clima).

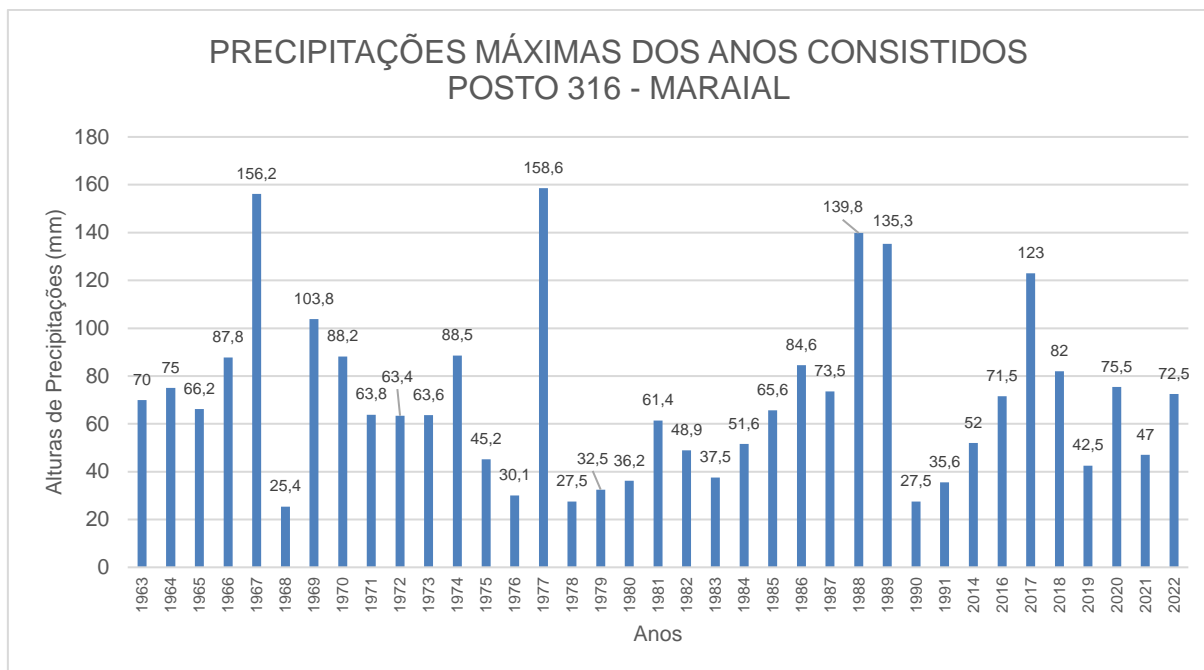
Gráfico 1 - Resumo dos anos com dados pluviométricos coletados com falhas e consistidos nos postos localizados próximos a área de estudo



Fonte: Autores (2023).

A estação de código 316 (Maraial) apresentou dados de observações do período de janeiro de 1963 à dezembro de 2022, com uma certa interrupção de dados consistidos entre os anos de 1992 e 2013 e no ano de 2015, mesmo com essa interrupção, apresentou ter a maior quantidade de dados registrados e consistidos para o estudo. A soma de anos dos dados de pluviometria consistidos do posto 316 (Maraial), foram de 37 anos e também está situado em uma posição privilegiada dentro da Bacia Hidrográfica satisfazendo assim o interesse do presente estudo. O Gráfico 2 abaixo, mostra o resumo das precipitações máximas dos anos com dados consistidos do posto pluviométrico de código 316 (Maraial).

Gráfico 2 - Precipitações máximas dos anos com dados consistidos do Posto Pluviométrico - Código 316 (Maraial)



Fonte: Autores (2023).

4.2.2. Ferramenta GAM IDF (Genetic Algorithm Methodology for IDF)

A curva IDF do estudo foi obtida através da ferramenta Genetic Algorithm Methodology for IDF (GAM-IDF), que foi desenvolvida pelos integrantes Marcelle Vargas, Maíra Moura, Zandra Cunha, João Pedro Silveira, Samuel Beskow e Tamara Beskow. A ferramenta consiste na separação dos totais máximos anuais das alturas de Precipitação do posto pluviométrico escolhido, com base nisso, a equação geral da IDF expressa na equação (1), obteve os parâmetros a, b, c e d abaixo:

$$a = 611,503;$$

$$b = 0,236;$$

$$c = 9,220;$$

$$d = 0,707.$$

$$I = \frac{a \cdot TR^b}{(c+t)^d} \quad (1)$$

Substituindo os parâmetros a, b, c e d, obtidos pelo *GAM IDF* obtém-se a equação (2) abaixo:

$$I = \frac{611,503 * TR^{0,236}}{(9,220 + t)^{0,707}} \quad (2)$$

Onde:

I = Intensidade de precipitação, em mm/h;

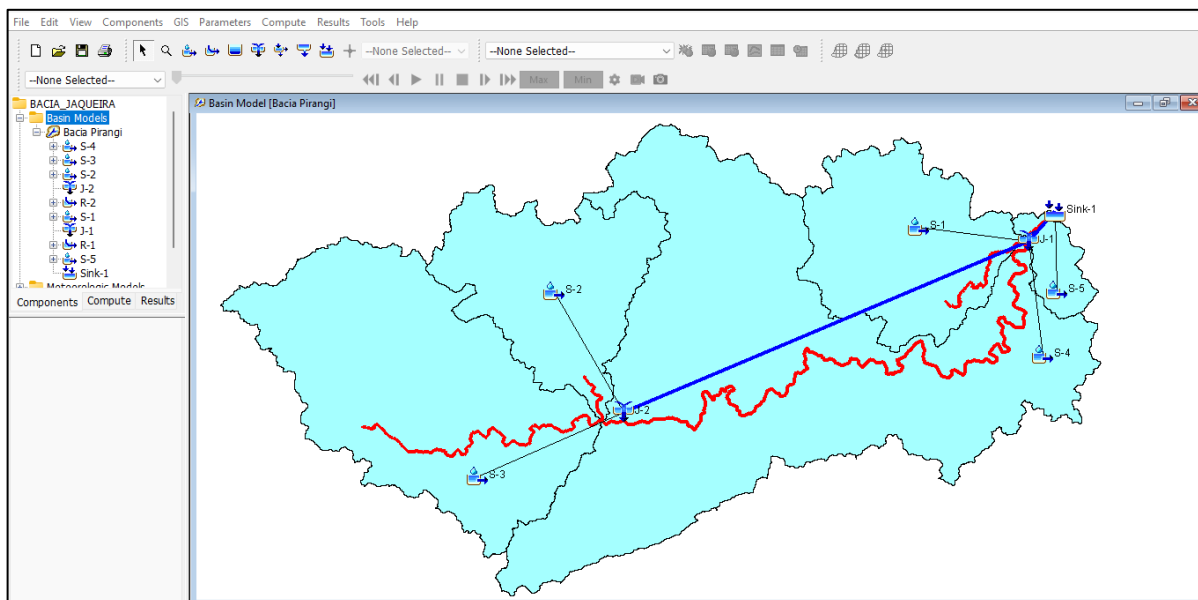
TR = Tempo de Retorno, em anos;

t = Duração da precipitação, em minutos.

4.3. Modelagem Hidrológica no HEC-HMS

Neste estudo foi utilizado a versão 4.10 do *software* HEC-HMS por apresentar compatibilidade com o sistema do computador utilizado para realizar as simulações. O modelo foi realizado seguindo o manual do próprio *software*, as sub-bacias foram nomeadas com o prefixo “S”, sendo elas S-1 a S-5, os rios foram nomeados com o prefixo “R”, sendo eles R-1 e R-2, as junções foram nomeadas com o prefixo “J”, sendo elas J-1 e J-2, já o exutório, foi nomeado como Sink-1. A Figura 7 abaixo mostra o modelo hidrológico realizado neste estudo:

Figura 7 – Esquema do Modelo Hidrológico no simulado no software HEC-HMS 4.10



Fonte: Autores (2023).

As Características fisiográficas das Sub-bacias inseridas na modelagem hidrológica, conforme Tabela 1 apresentada abaixo:

Tabela 1 - Características fisiográficas das Sub-bacias S-1 a S-5

Sub-bacia	Comprimento do talvegue (km)	Desnível do talvegue (m)	Declividade do talvegue (m/m)
S1	30,34	625,00	0,0204
S2	22,26	439,00	0,01901
S3	41,09	463,00	0,0109
S4	69,12	688,00	0,00668
S5	9,09	286,00	0,0258

Fonte: Autores (2023).

Características fisiográficas dos rios inseridos na modelagem hidrológica, conforme Tabela 2 abaixo:

Tabela 2 - Características fisiográficas dos rios R-1 e R-2

Rios	Comprimento do talvegue (km)	Desnível do talvegue (m)	Declividade do talvegue (m/m)
R1	2,41	5,00	0,0021
R2	55,03	239,00	0,0043

Fonte: Autores (2023).

Para ser calculado o Tempo de concentração e o tempo de pico de cada Sub-bacia e dos rios do modelo hidrológico, foram levadas em consideração a equação de Kirprich modificada, expressa pela equação 3 seguir:

$$T_c = 1,42 * \left(\frac{L^3}{\Delta h}\right)^{0,385} \quad (3)$$

Onde:

Tc = Tempo de concentração, em hrs;

L = Comprimento do talvegue, em km;

Δh = Desnível do talvegue principal, em m.

A condição de transformação do modelo hidrológico deu-se pelo método do SCS (Soil Conservation Service) para o hidrograma unitário. A equação (4) abaixo para determinação do cálculo do tempo de Pico (*Lag Time*).

$$Tp = 0,60 * Tc \quad (4)$$

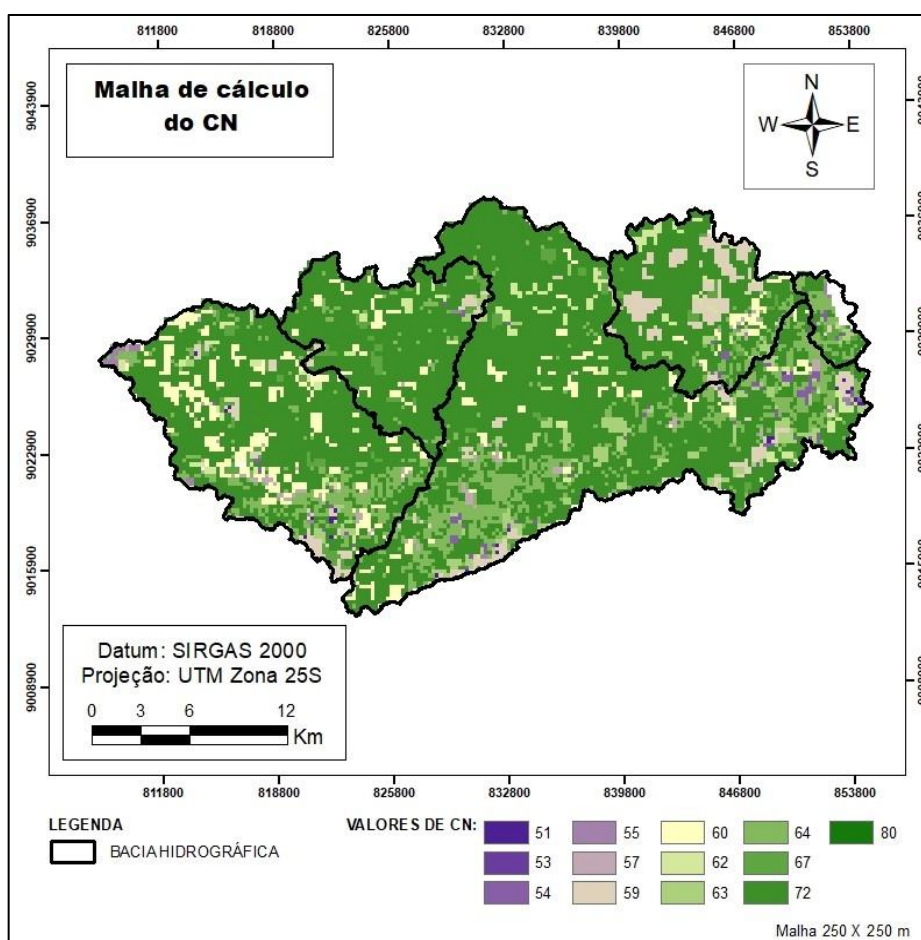
Tp = Tempo de pico, em minutos;

Tc = Tempo de concentração, em minutos;

4.3.1. Determinação do CN (Curve Number) e parametrização de infiltração

De acordo com (LEAL, 2017) a relação funcional mais utilizada para estimar o escoamento superficial em bacias hidrográficas é o método *Curve Number* (Número de curva), criado pelo SCS (Soil Conservation Service). Esse número é um índice que une três fatores importantes: grupo do solo, cobertura e condições de umidade. Nesse estudo os valores de CN foram extraídos através de dados globais em formato Geotiff. Na Figura 8 abaixo é apresentada a malha de coeficientes para a Bacia Hidrográfica em estudo.

Figura 8 - Malha de cálculo do CN (Curve Number)



Fonte: Autores (2023).

Os valores de média ponderada obtidas pela malha de cálculo de CN (Curve Number) calculados por *software* tipo SIG (Sistema de Informações Geográficas), especificamente o ArcGIS®, estão apresentados abaixo na Tabela 3.

Tabela 3 - CN das Sub-bacias

Sub-bacia	CN
S1	68
S2	70
S3	68
S4	68
S5	65

Fonte: Autores (2023).

Abaixo estão as equações (5) e (6) para o cálculo de Infiltração potencial máxima e Abstração inicial

$$S = 25,4 * \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (5)$$

Onde:

S = Infiltração Potencial máxima, em mm;

CN = Número de Curva.

$$Ia = 0,2 * S \quad (6)$$

Onde:

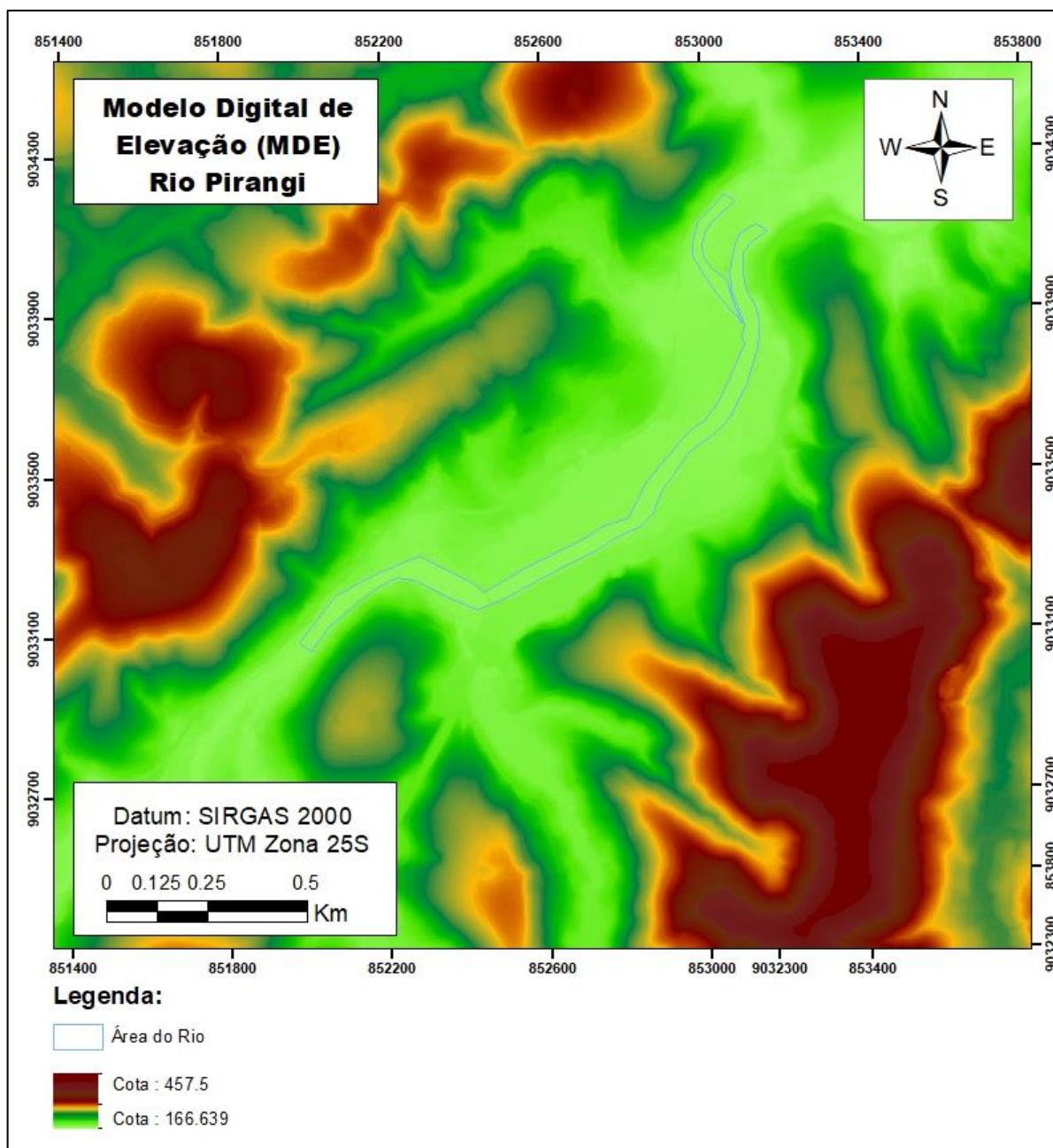
Ia = mm Abstração Inicial, em mm;

S = Infiltração Potencial máxima, em mm;

4.4. Modelo Digital de Elevação (MDE)

Para elaboração de um modelo hidrodinâmico é preciso a inserção de um modelo digital de terreno que é a representação de elementos presentes na superfície terrestre para representação da topografia local. Desse modo, neste estudo foi considerado o Modelo digital de elevações (MDE) do município de Jaqueira, disponibilizado pelo programa Pernambuco Tridimensional (PE3D), apresentado na Figura 9, obtido por meio de mapeamento aerofotogramétrico de todo território do estado de Pernambuco, no formato GEOTIFF (32 bits) e resolução espacial de 1,00m. Realizado por meio da Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos (SRHE).

Figura 9 – Modelo Digital de Elevação da área em estudo



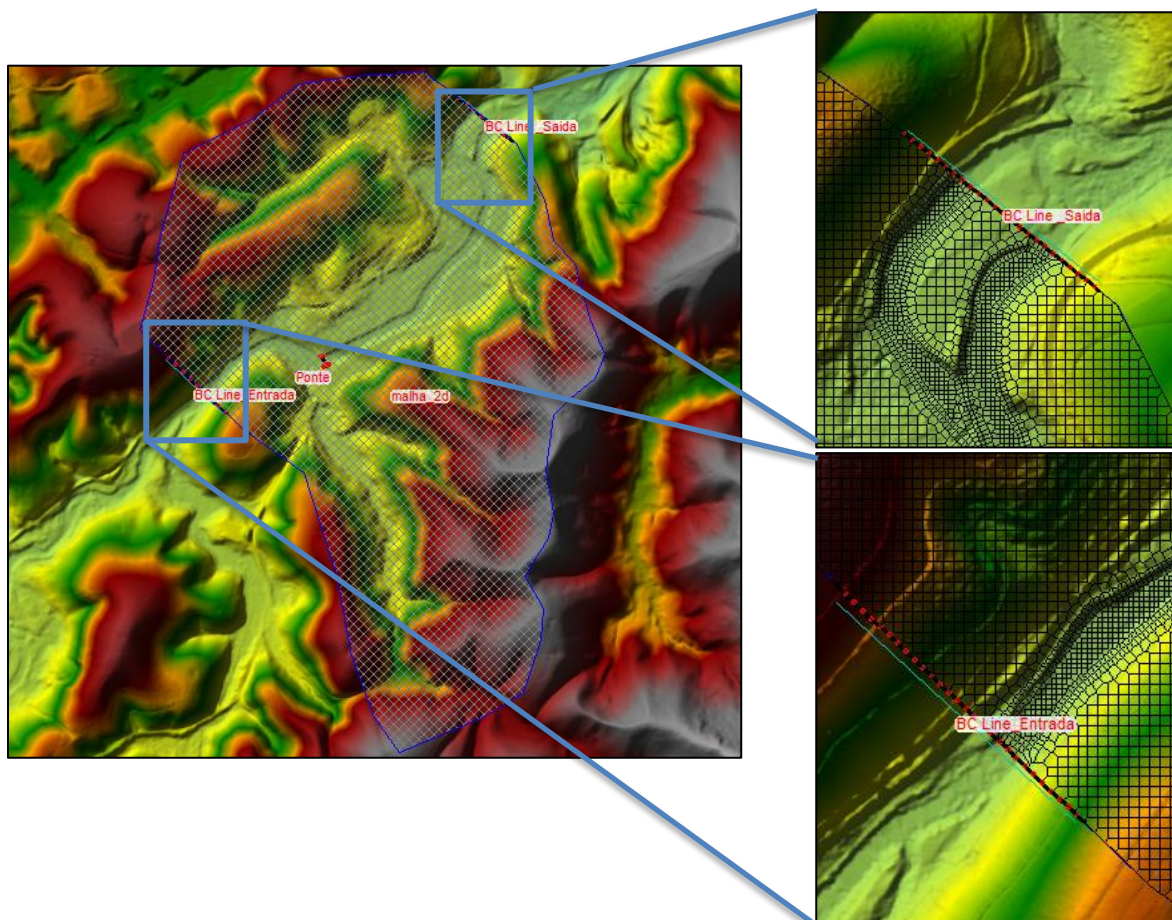
Fonte: Autores (2023).

4.5. Modelagem Hidrodinâmica no HEC-RAS

4.5.1. Malha computacional

Neste estudo, a malha computacional adotada foi de 10x10 metros para a área de simulação e na região da calha do Rio Pirangi, foi realizado um refinamento desta malha para 5x5 metros, que resultou num total de 32964 células. A Figura 10 apresenta as malhas da região de propagação e as condições de contorno inseridas de entrada e saída do modelo.

Figura 10 – Região da malha computacional



Fonte: Autores (2023).

4.5.2. Coeficiente de Manning

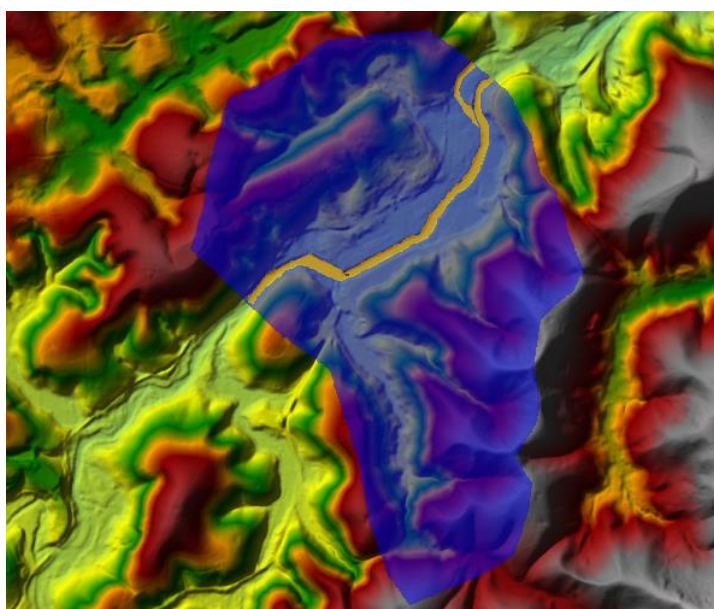
O valor de coeficiente de rugosidade de Manning reflete as perdas de carga no escoamento do fluxo, para estas condições o valor da rugosidade foi obtido pela definição do Manual de Drenagem de Rodovias (2006), enquadrado na tabela de “Valores dos coeficientes de rugosidade “n” para cursos d’água naturais, arroios maiores e largura à superfície no estágio de inundação maior que 30,00m”. Esse grupo é dividido em dois subgrupos, conforme Quadro 1 abaixo.

Quadro 1 – Valores de coeficientes de rugosidade de Manning

Seção regular sem matacões ou arbustos	0,025	0,060
Seção irregular e não trabalhada	0,035	0,100

Fonte: Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT, 2006)

Definiu-se então o valor do número da rugosidade de Manning, 0,035 para a área da calha do Rio e 0,04 para as demais áreas de propagação de cheia. Na Figura 11 abaixo, está representada em cor amarela a calha do rio, com valores de rugosidade de Manning 0,035 e em azul as demais áreas da simulação, com valores de rugosidade 0,04.

Figura 11 - Malha de cálculo da rugosidade de Manning da geometria do modelo

Fonte: Autores (2023).

4.5.3. Ponte Existente sobre o Rio Pirangi

É possível destacar que existe uma ponte que atravessa o Rio Pirangi, apresentada anteriormente na Figura 4, essa estrutura é capaz de influenciar consideravelmente nas velocidades do fluxo do rio, provocando assim, o aumento do risco hidrodinâmico. Para a geometria da modelagem hidráulica, foi inserida a ponte de forma a representar fielmente as dimensões da mesma, conforme Figura 12 abaixo:

Figura 12 - Ponte Existente no percurso do Rio Pirangi



Fonte: Autores (2023).

4.5.4. Condições de Contorno do modelo

Por se tratar de um canal natural e ser influenciado pelas condições de precipitações maiores em períodos de chuvas e com isso alterações em seu comportamento de fluxo, o modelo foi calculado sob as premissas de regime de escoamento não permanente. Dois dados de condições de contorno para esse regime foram inseridos, conforme Figura 10 e Figura 13, nomeados como “*BC Line_Entrada*” e “*BC Line_Saída*”. A “*BC Line_Entrada*” foi inserida a condição “*Flow Hydrograph*”, para a entrada das vazões do hidrograma calculado por meio do software HEC-HMS. Para a condição de jusante “*BC Line_Saida*”, foi utilizada a condição de profundidade normal “*Normal Depth*”, assim para input do software, foi adotada a declividade média obtida para o trecho final da calha do rio simulada, com valor de 0,001m/m.

Figura 13 - Input de dados de condições de contorno

Storage/2D Flow Areas		Boundary Condition
1	malha_2d BCLine: BC Line_Entrada	Flow Hydrograph
2	malha_2d BCLine: BC Line _Saida	Normal Depth

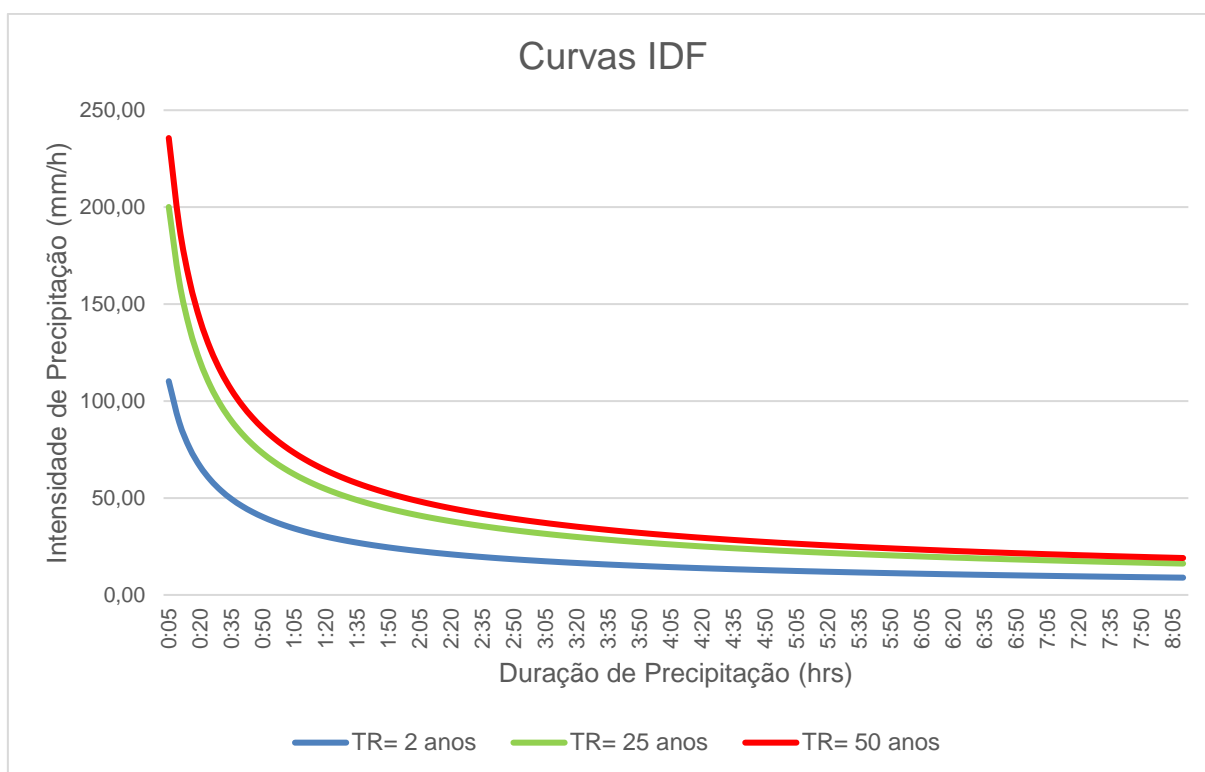
Fonte: Autores (2023).

5. RESULTADOS

5.1. Curva IDF

A partir das metodologias apresentadas no item 4.2, obteve-se três curvas exponenciais da curva para os Tempos de Retornos de 2, 25 e 50 anos, conforme o Gráfico 3 abaixo:

Gráfico 3 – Curvas IDF para os Tempos Retornos de 2, 25 e 50 anos



Fonte: Autores (2023).

5.2. Tempos de Concentração

A partir das equações expressas pela metodologia no item 4.3 para os cálculos de tempo de concentração e tempo de pico são apresentados na Tabela 4 e na Tabela 5 abaixo os resultados para cada Sub-bacia.

Tabela 4 - Tempo de Concentração e tempo de Pico dos rios do modelo

Rios	Tc (hrs)	Tc (min)	Tp (min)
R-1	2,11	126,34	75,80
R-2	17,66	1059,68	635,81

Fonte: Autores (2023).

Tabela 5 - Tempo de Concentração e tempo de Pico das Sub-bacias do modelo

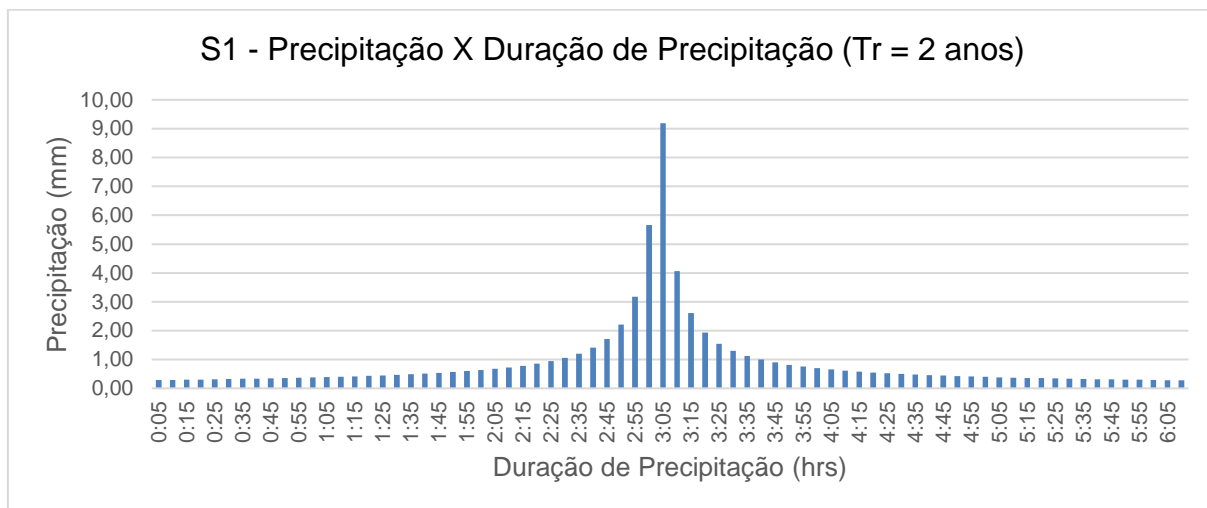
Sub-bacia	Tc (hrs)	Tc (min)	Tp (min)
S-1	6,13	367,90	220,74
S-2	4,91	294,70	176,82
S-3	9,77	586,24	351,74
S-4	15,30	917,75	550,65
S-5	2,06	123,54	74,13

Fonte: Autores (2023).

5.3. Chuva de Projeto

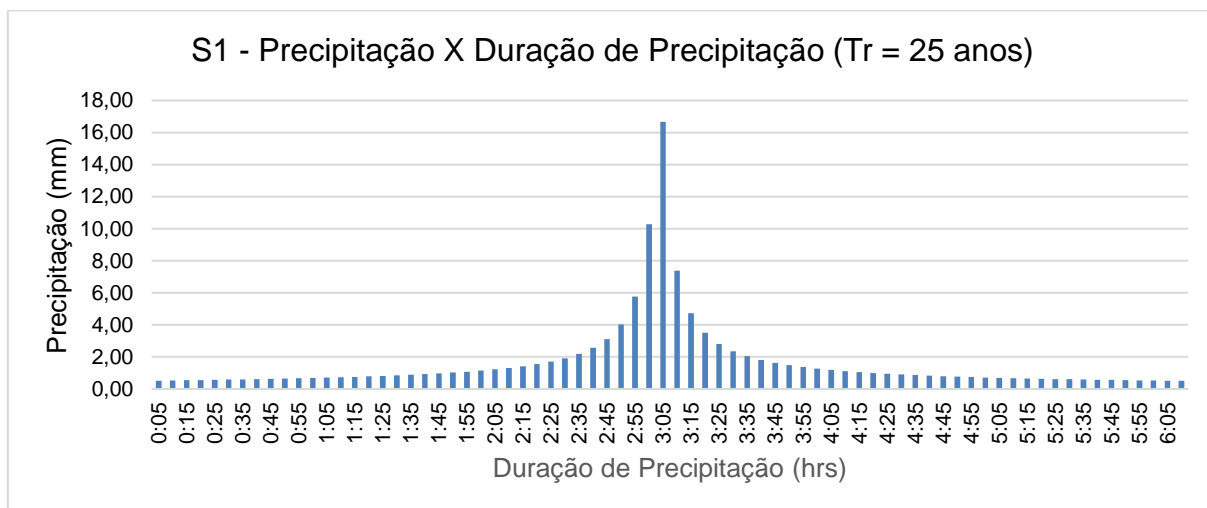
A partir da equação da IDF, e dos cálculos de tempos de concentração, foi possível realizar a desagregação da chuva de projeto pelo método dos blocos alternados, apresentados nos gráficos abaixo para os tempos de retorno de 2 anos, 25 anos e 50 anos para cada sub-bacia.

Gráfico 4 - Chuva de projeto para S-1 (TR 2 anos)



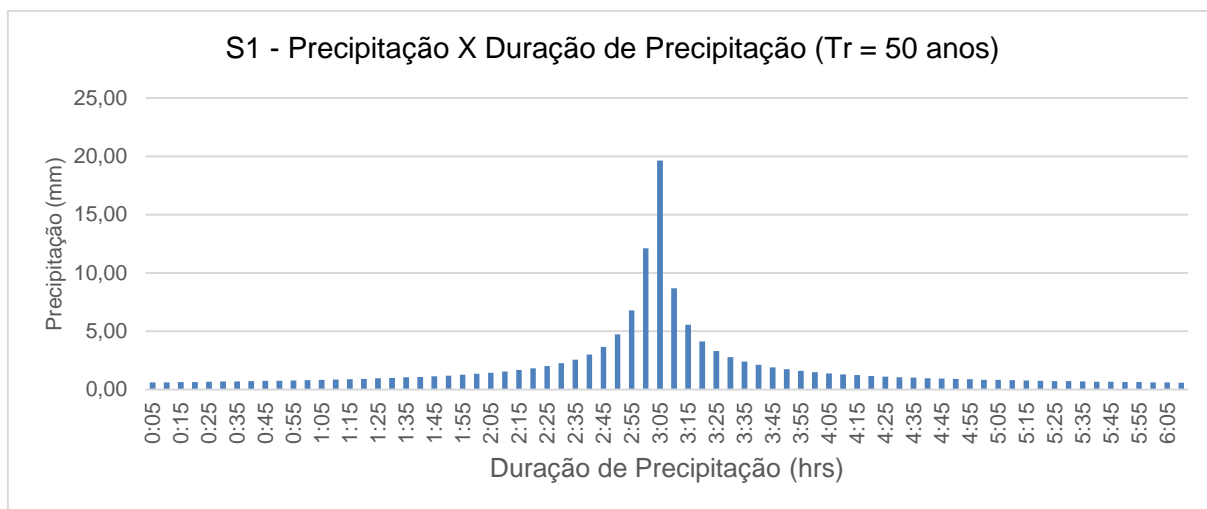
Fonte: Autores (2023).

Gráfico 5 - Chuva de projeto para S-1 (TR 25 anos)



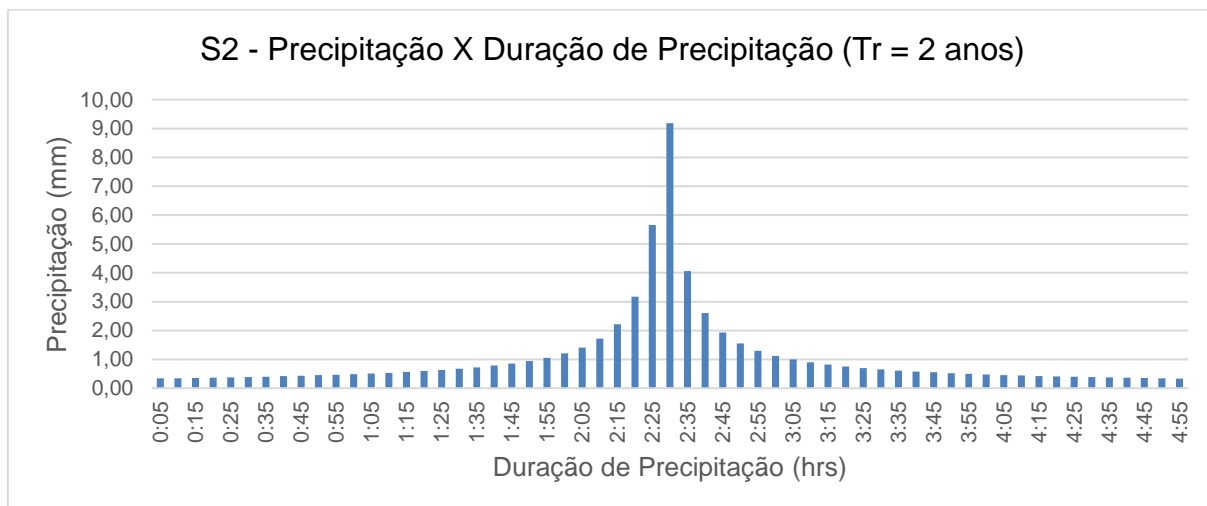
Fonte: Autores (2023).

Gráfico 6 - Chuva de projeto para S-1 (TR 50 anos)



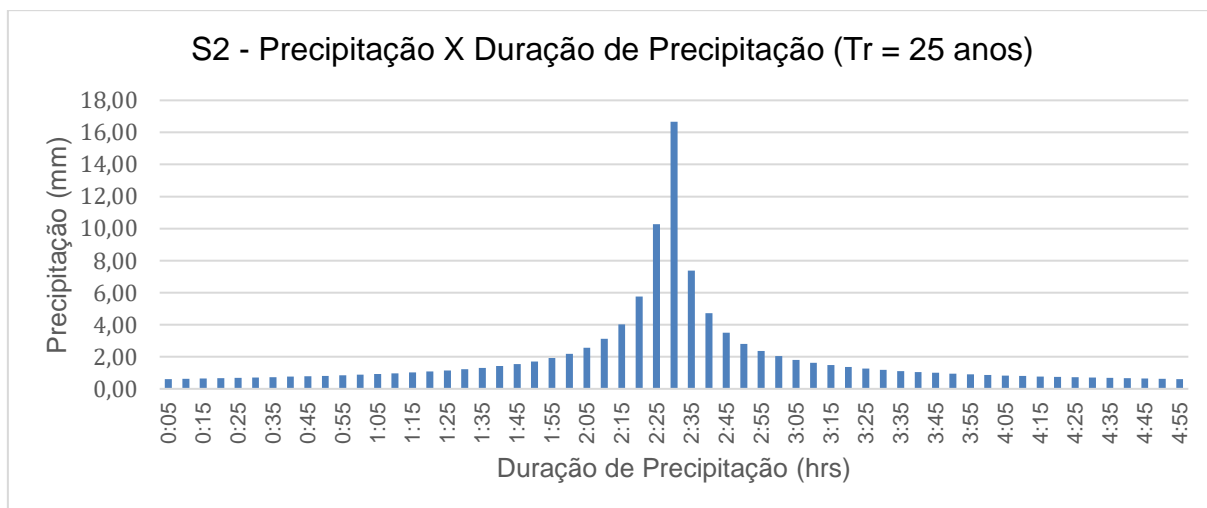
Fonte: Autores (2023).

Gráfico 7 - Chuva de projeto para S-2 (TR 2 anos)

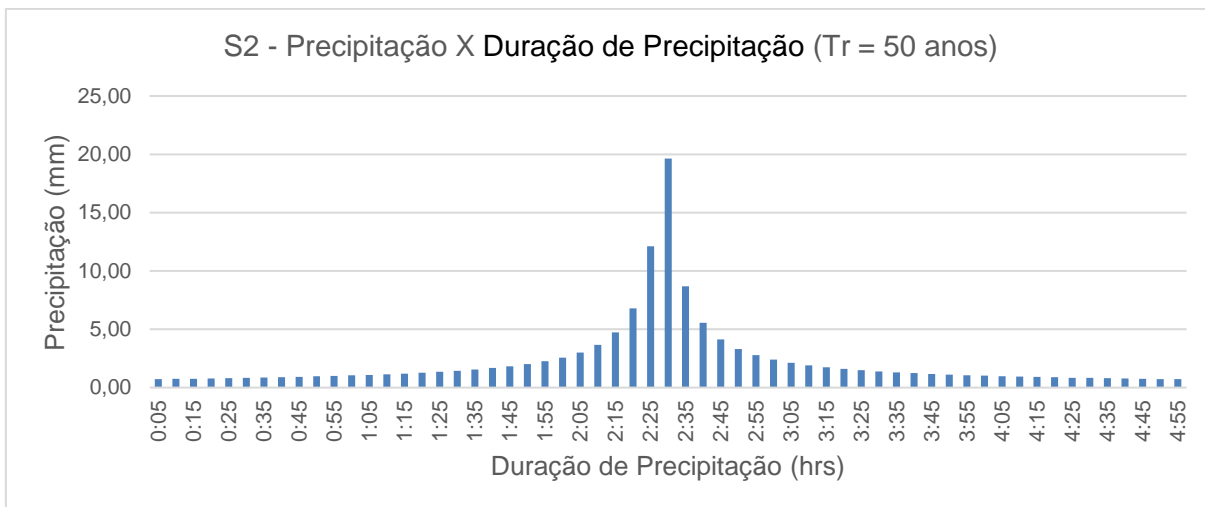


Fonte: Autores (2023).

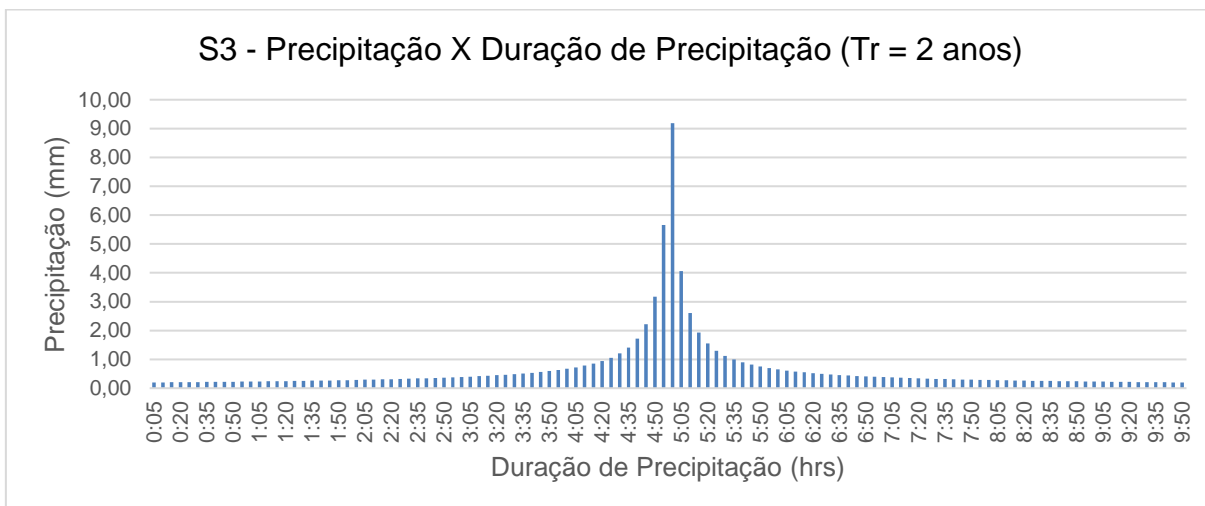
Gráfico 8 - Chuva de projeto para S-2 (TR 25 anos)



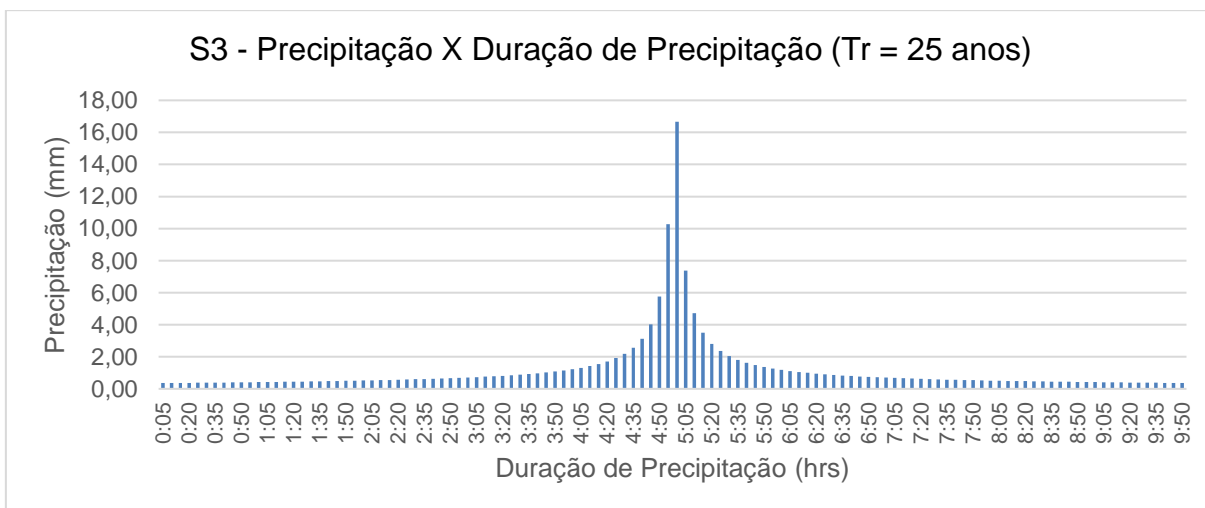
Fonte: Autores (2023).

Gráfico 9 - Chuva de projeto para S-2 (TR 50 anos)

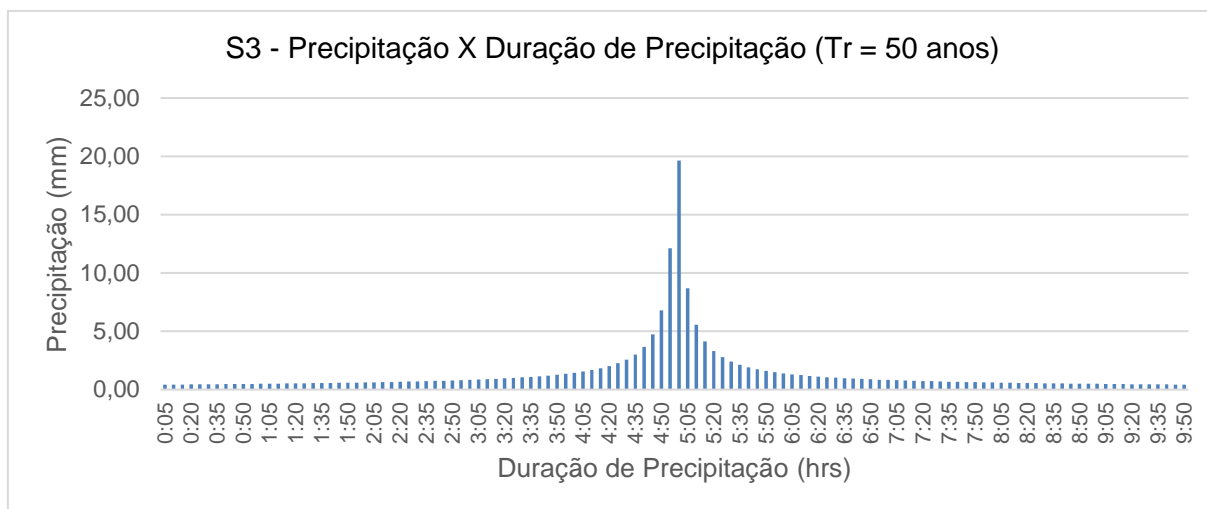
Fonte: Autores (2023).

Gráfico 10 - Chuva de projeto para S-3 (TR 2 anos)

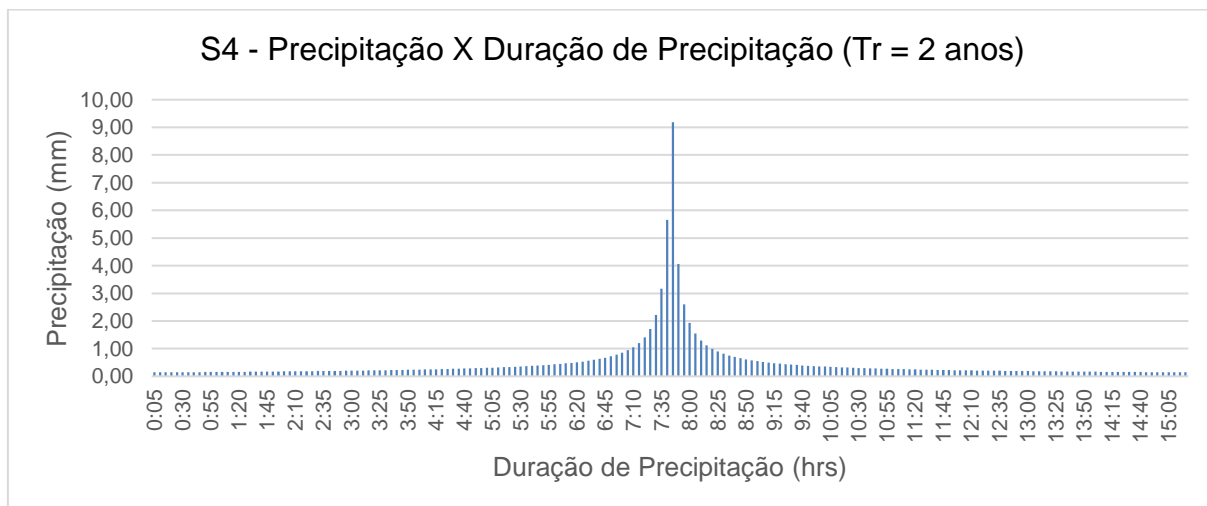
Fonte: Autores (2023).

Gráfico 11 - Chuva de projeto para S-3 (TR 25 anos)

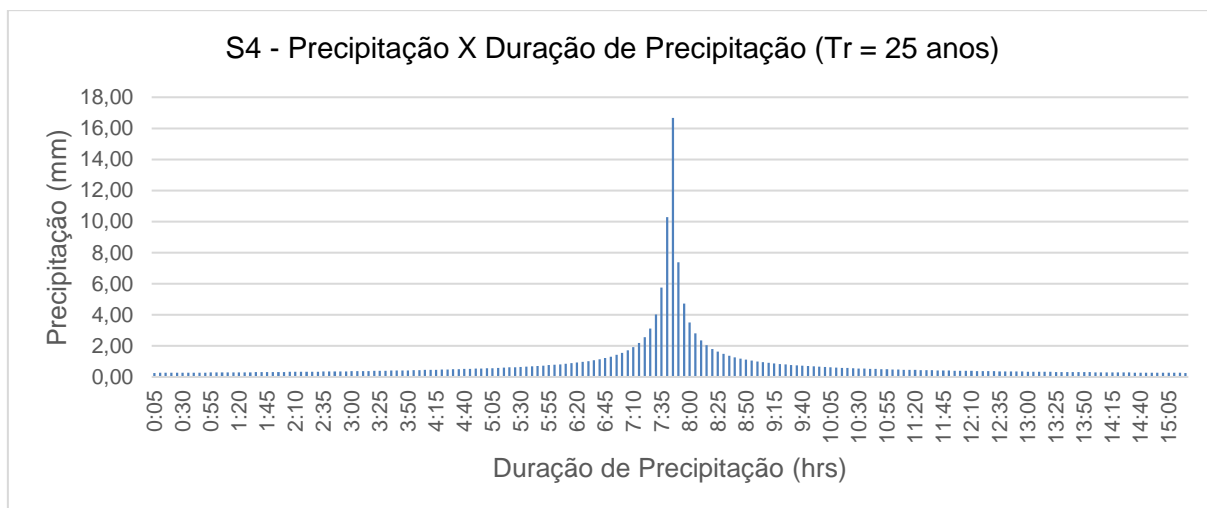
Fonte: Autores (2023).

Gráfico 12 - Chuva de projeto para S-3 (TR 50 anos)

Fonte: Autores (2023).

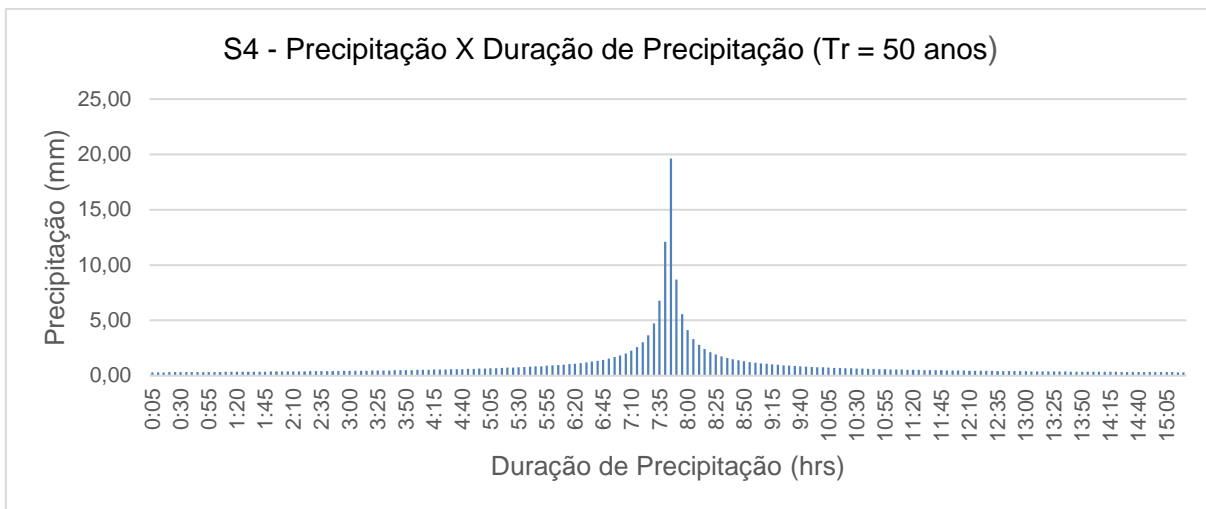
Gráfico 13 - Chuva de projeto para S-4 (TR 2 anos)

Fonte: Autores (2023).

Gráfico 14 - Chuva de projeto para S-4 (TR 25 anos)

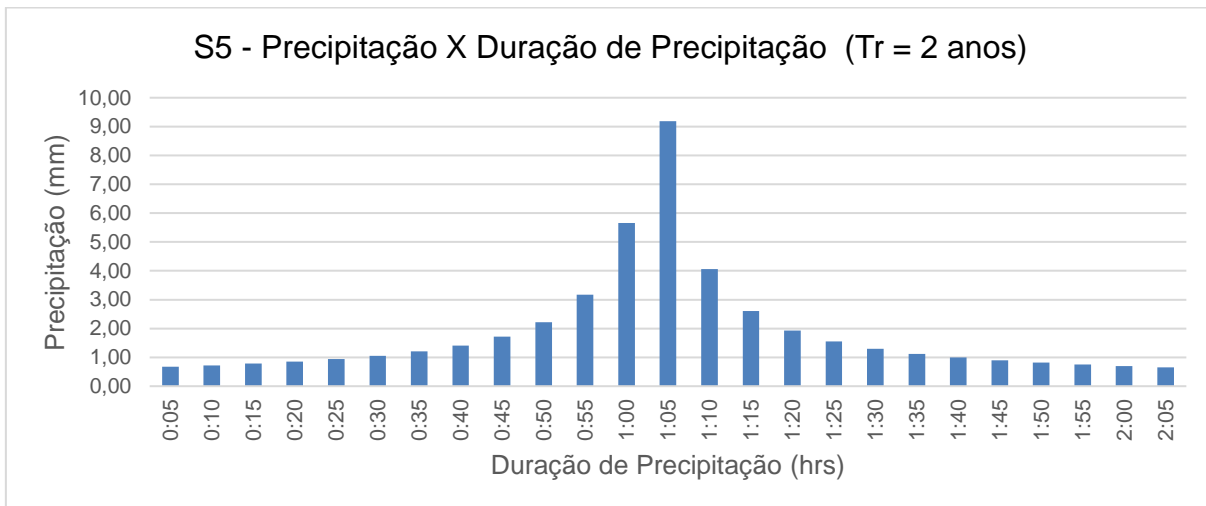
Fonte: Autores (2023).

Gráfico 15 - Chuva de projeto para S-4 (TR 50 anos)



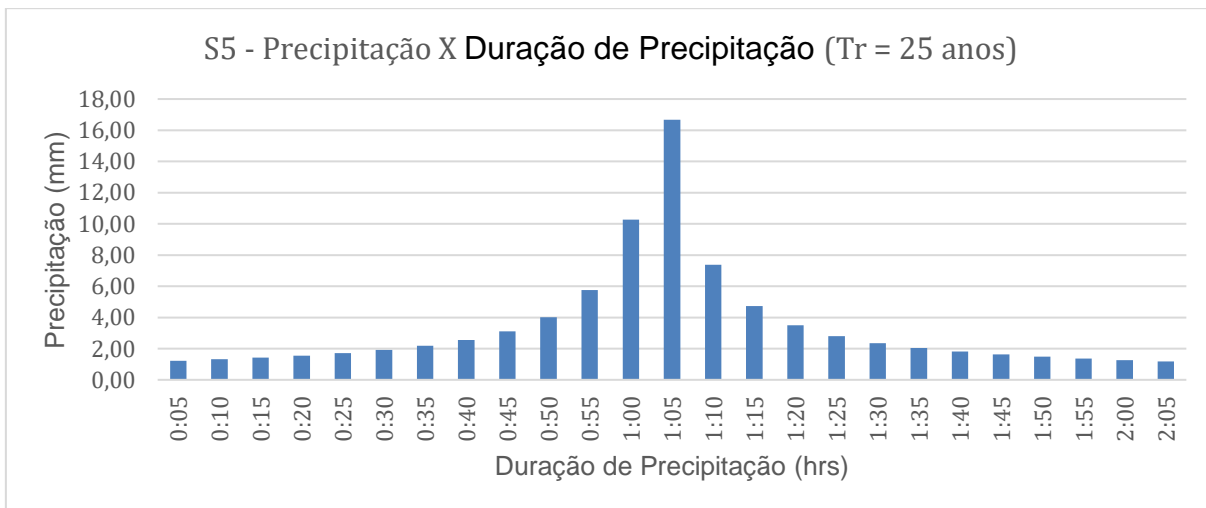
Fonte: Autores (2023).

Gráfico 16 - Chuva de projeto para S-5 (TR 2 anos)

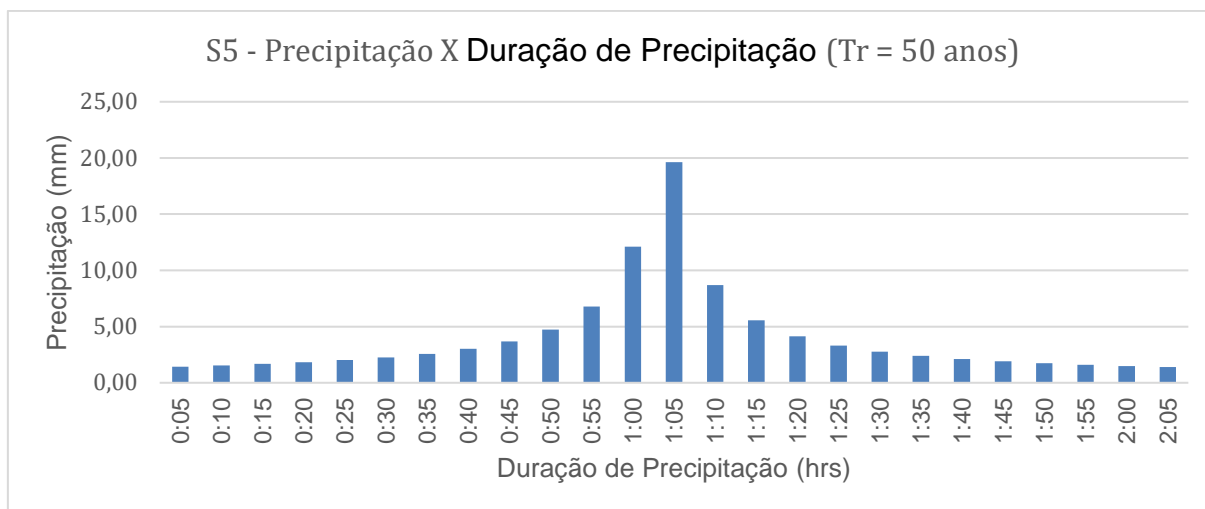


Fonte: Autores (2023).

Gráfico 17 - Chuva de projeto para S-5 (TR 25 anos)



Fonte: Autores (2023).

Gráfico 18 - Chuva de projeto para S-5 (TR 50 anos)

Fonte: Autores (2023).

5.4. Parâmetros de Infiltração Potencial e Abstração Inicial do solo

Como foram apresentadas na metodologia no item 4.3.1, os parâmetros de cálculo para cada Sub-bacia, na Tabela 6 abaixo estão os resultados obtidos.

Tabela 6 – Cálculos de Infiltração Potencial e abstração Inicial

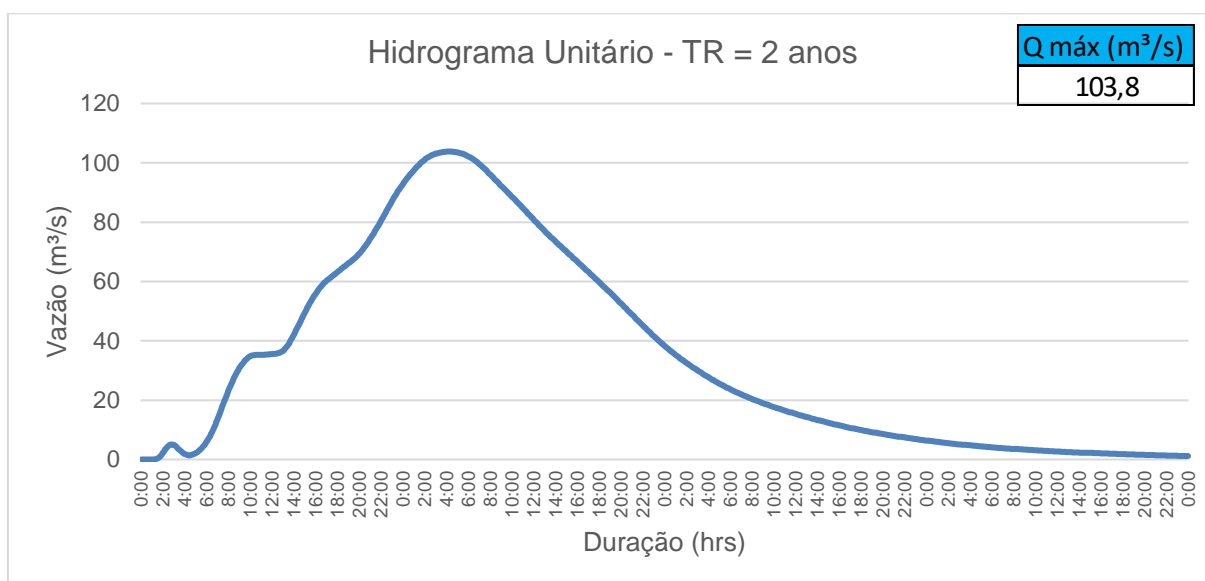
Sub-bacia	CN	S (mm)	Ia (mm)
S-1	68	119,529	23,906
S-2	70	108,857	21,771
S-3	68	119,529	23,906
S-4	68	119,529	23,906
S-5	65	136,769	27,354

Fonte: Autores (2023).

5.5. Vazões calculadas pelo modelo Hidrológico

O resultado das vazões obtidas pelo modelo hidrológico no HEC-HMS apresentou bom desempenho e estão apresentados abaixo os hidrogramas para os Tempos de Retorno de 2, 25 e 50 anos nos Gráficos 19, 20 e 21.

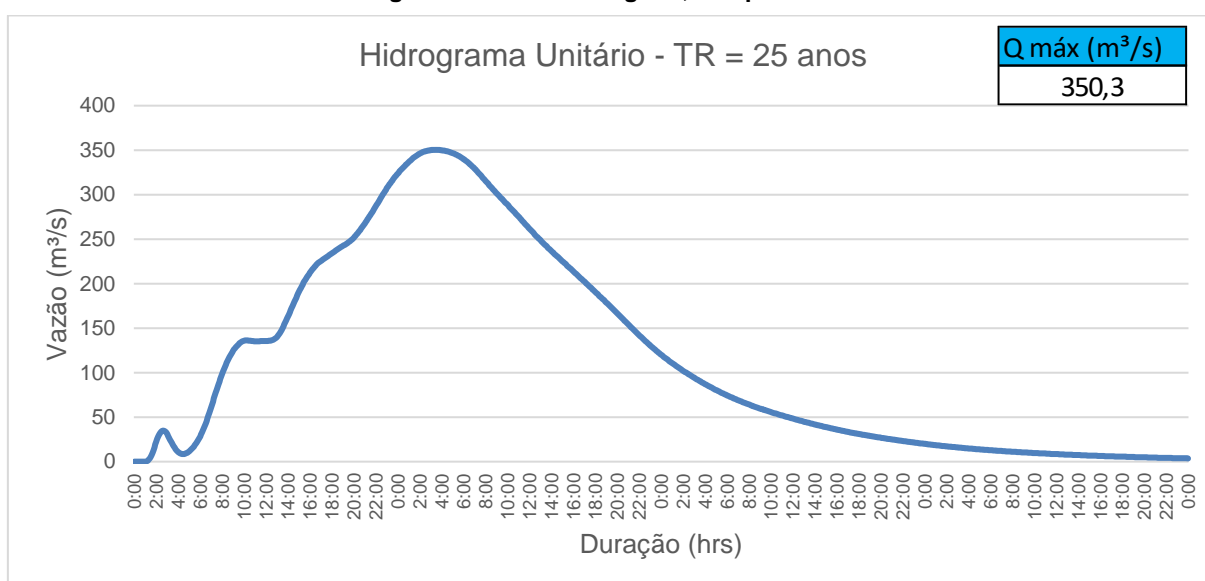
Gráfico 19 - Hidrograma Unitário Triangular, Tempo de Retorno de 2 anos



Fonte: Autores (2023).

Observa-se que a vazão máxima obtida para o Tempo de Retorno de 2 anos foi de 103,80 m³/s.

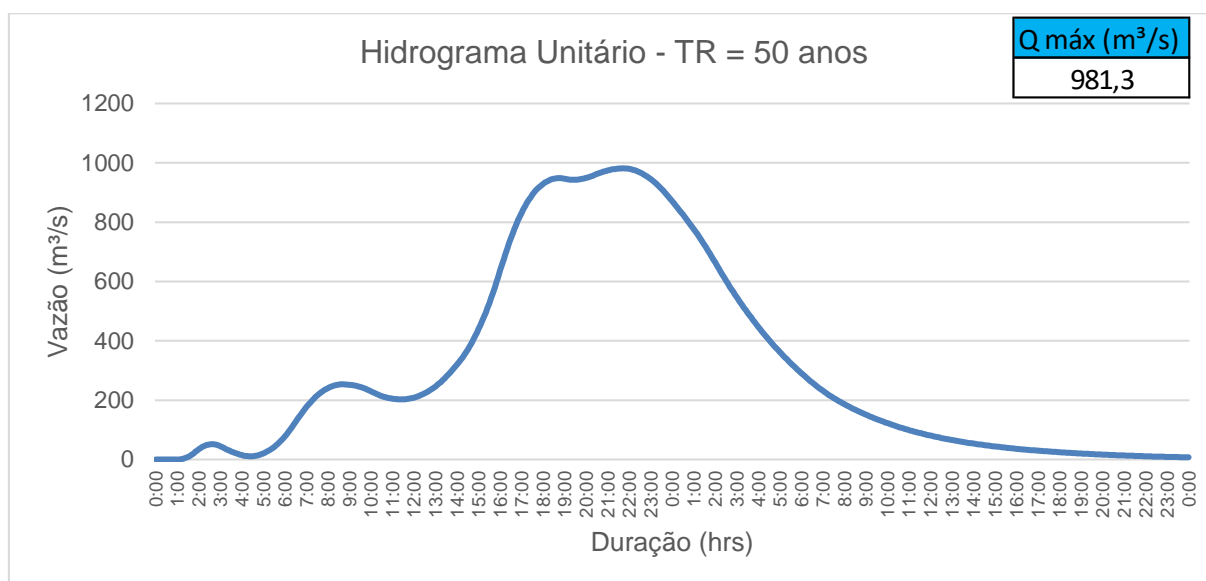
Gráfico 20 - Hidrograma Unitário Triangular, Tempo de Retorno de 25 anos



Fonte: Autores (2023).

Nota-se que a vazão máxima obtida para o Tempo de Retorno de 25 anos resultou em 350,30 m³/s.

Gráfico 21 - Hidrograma Unitário Triangular, Tempo de Retorno de 50 anos



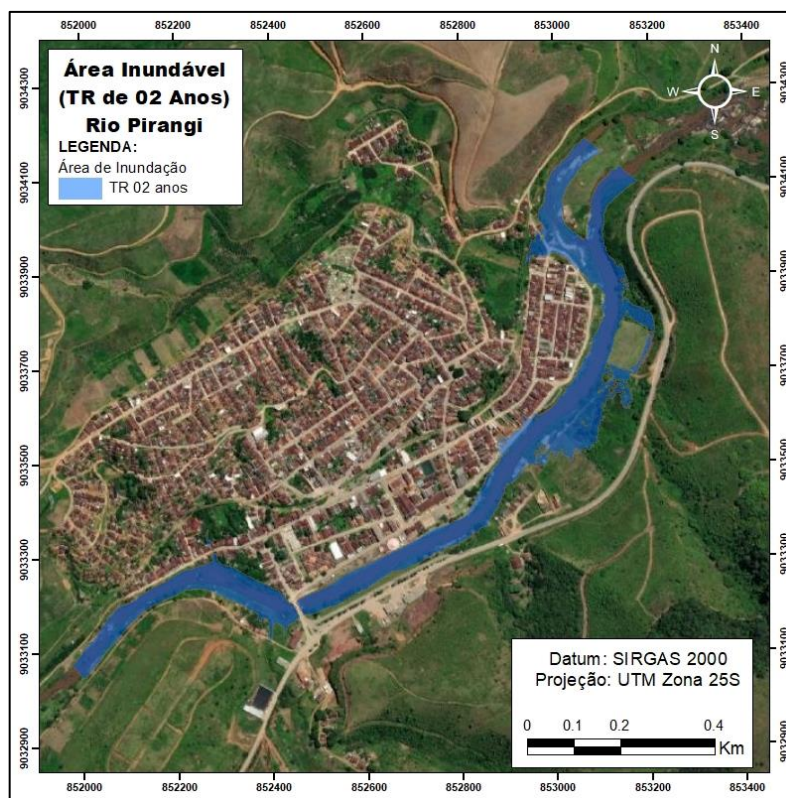
Fonte: Autores (2023).

A vazão máxima obtida para o Tempo de Retorno de 50 anos resultou em 981,30 m³/s.

5.6. Mapeamento das áreas de inundação

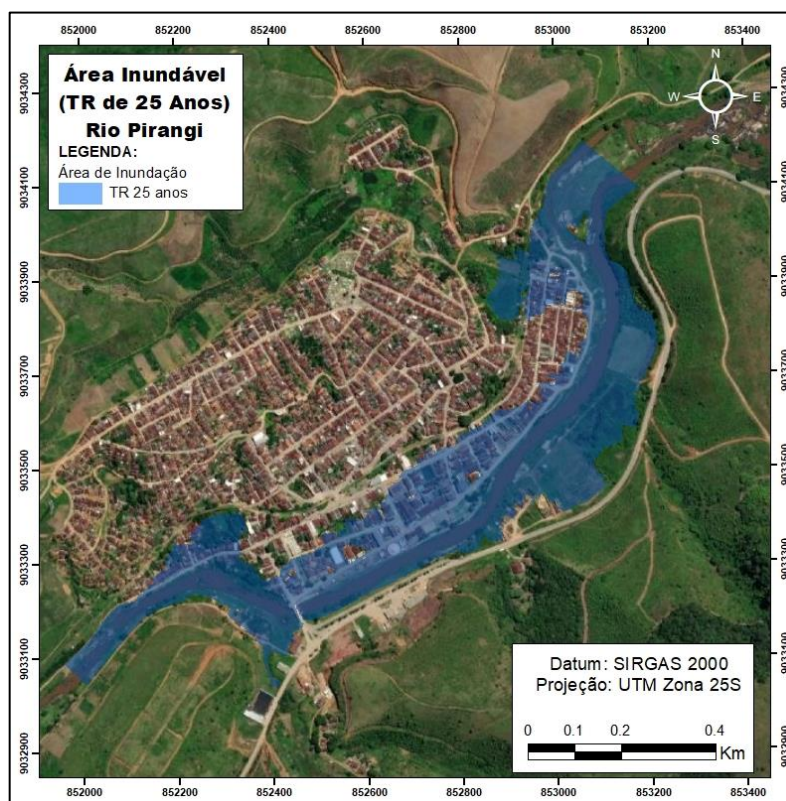
A partir do modelo hidráulico foram obtidas as áreas inundáveis do município de Jaqueira-PE, pelas vazões geradas pelos eventos associados aos tempos de retornos de 2, 25 e 50 anos. Da Figura 14 a Figura 16 são apresentadas as manchas de inundação resultantes do estudo.

Figura 14 - Área inundável - TR 2 anos - Rio Pirangi



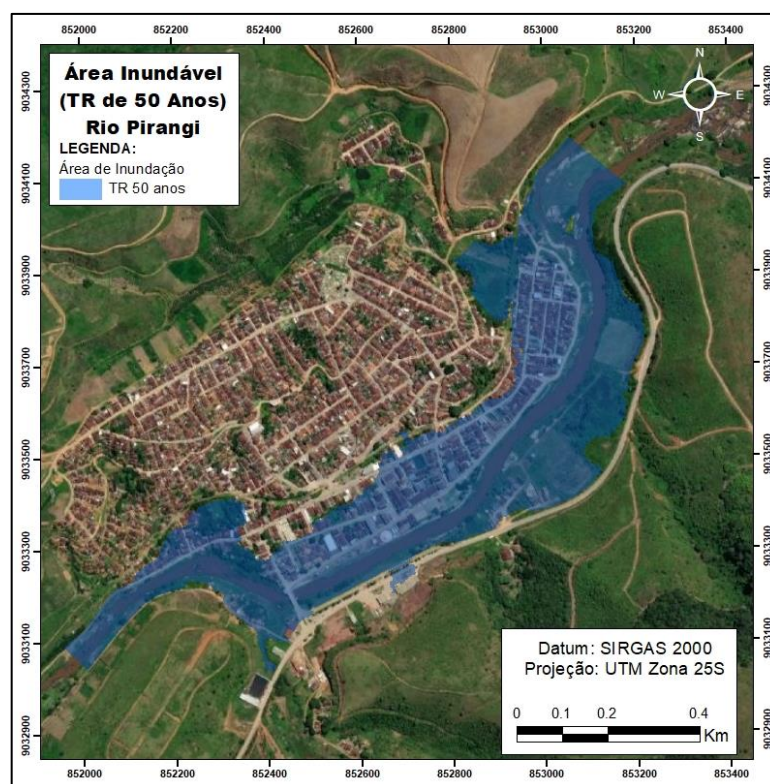
Fonte: Autores (2023).

Figura 15 - Área inundável - TR 25 anos - Rio Pirangi



Fonte: Autores (2023).

Figura 16 - Área inundável - TR 50 anos - Rio Pirangi



Fonte: Autores (2023).

A Tabela 7 apresenta, em resumo, as áreas de abrangência das manchas de inundação obtidas para os cenários considerados pelo estudo.

Tabela 7 - Áreas das Manchas de Inundações

Cenário	Área (m²)	Área (km²)
1 (TR-2 anos)	121620,00	0,12
2 (TR-25 anos)	292675,00	0,29
3 (TR-50 anos)	356114,00	0,36

Fonte: Autores (2023).

5.7. Risco Hidrodinâmico






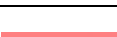
A seguir, na Figura 17 a Figura 19 são apresentados os mapas de risco hidrodinâmico para os três cenários considerados pelo estudo. Vale ressaltar que a classificação quanto ao risco hidrodinâmico segue a mesma nomenclatura adotada por Smith, Davey e Cox (2014) e é apresentada no Quadro 2; a legenda de cores é apresentada no Quadro 3.

Quadro 2 - Classificação quanto ao Risco Hidrodinâmico

Classificação	Descrição
H1	Geralmente seguro para veículos, pessoas ou edifícios.
H2	Inseguro para veículos pequenos.
H3	Inseguro para veículos, crianças e idosos.
H4	Inseguro para veículos e pessoas.
H5	Inseguro para veículos e pessoas. Todos os edifícios vulneráveis a danos estruturais. Alguns edifícios menos robustos sujeitos à falha.
H6	Inseguro para veículos e pessoas. Todos os tipos de edifícios considerados vulneráveis à falha.

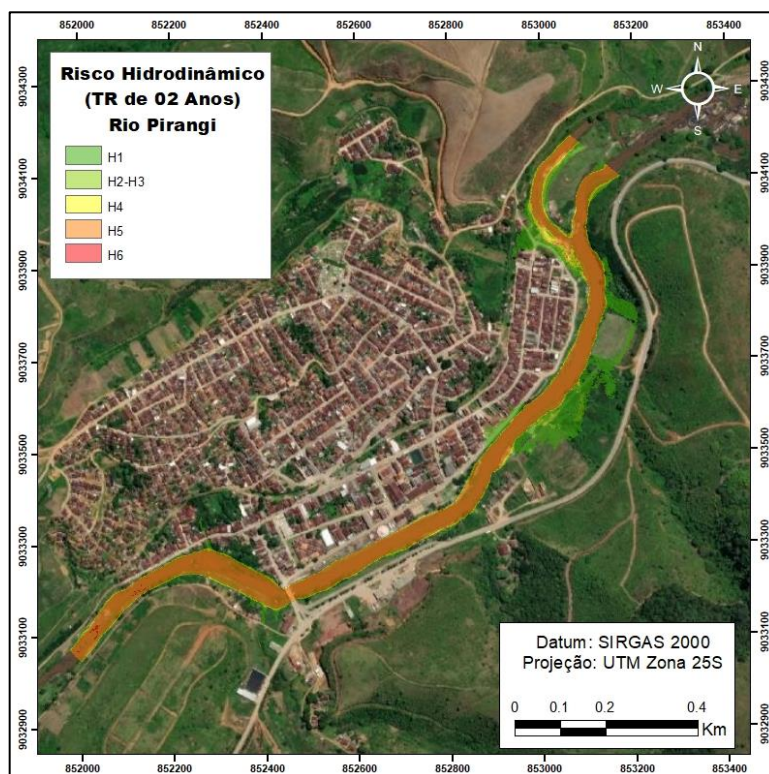
Fonte: Adaptado de SMITH, DAVEY e COX, 2014

Quadro 3 – Legenda do Risco Hidrodinâmico

Risco Hidrodinâmico				
Legenda	Risco	Classe	Velocidade (m/s)	Profundidade limite (m)
	H1	$P \times V \leq 0,3$	0,30	2,00
	H2	$P \times V \leq 0,6$	0,50	2,00
	H3	$P \times V \leq 0,6$	1,20	2,00
	H4	$P \times V \leq 1,0$	2,00	2,00
	H5	$P \times V \leq 4,0$	4,00	4,00
	H6	$P \times V > 4,0$	-	-

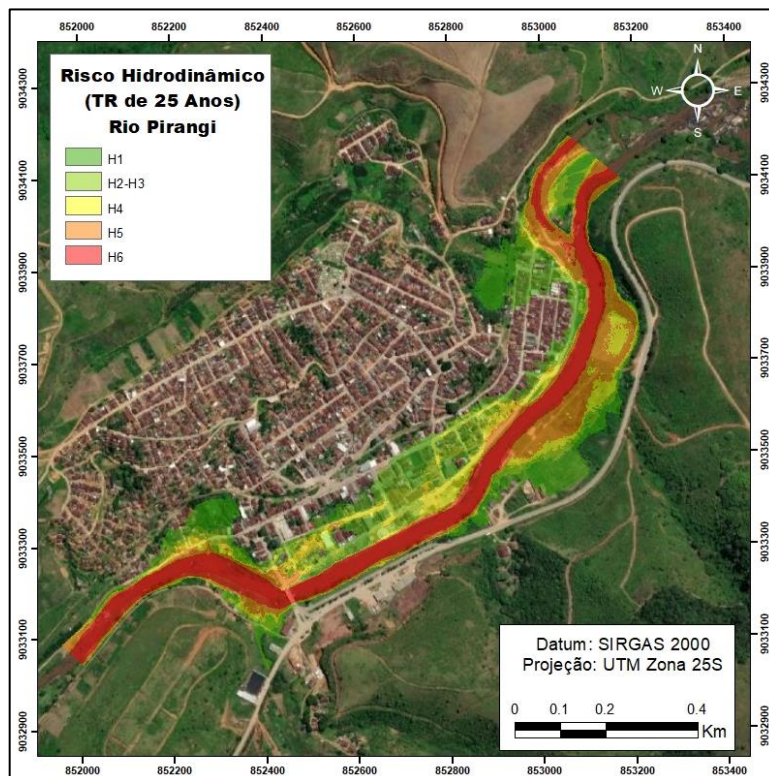
Fonte: Adaptado de SMITH, DAVEY e COX, 2014

Figura 17 – Classificação do Risco Hidrodinâmico – TR 2 anos – Rio Pirangi



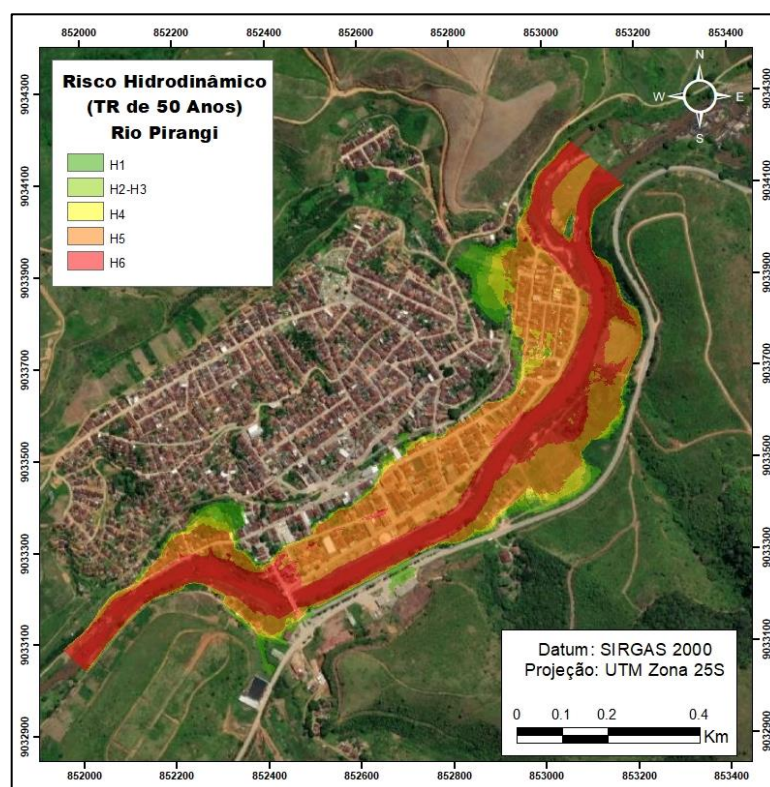
Fonte: Autores (2023).

Figura 18 – Classificação do Risco Hidrodinâmico – TR 25 anos – Rio Pirangi



Fonte: Autores (2023).

Figura 19 – Classificação do Risco Hidrodinâmico – TR 50 anos – Rio Pirangi



Fonte: Autores (2023).

O Quadro 4 abaixo, mostra as áreas obtidas em km², para os cenários simulados no estudo.

Quadro 4 - Áreas de classificação do Risco Hidrodinâmico

Área (km ²)			
Classificação	Tempo de Retorno		
	TR-02	TR-25	TR-50
H1	0,03	0,08	0,02
H2-H3	0,01	0,04	0,01
H4	0,01	0,03	0,02
H5	0,08	0,05	0,17
H6	0,00	0,08	0,13
Total	0,12	0,29	0,36

Fonte: Autores (2023).

A partir das manchas obtidas pela multiplicação dos rasters de profundidade e velocidade, são percebidas as categorias das áreas. Os resultados estão em harmonia com as previsões, uma vez que, com o aumento do Tempo de Retorno (TR),

antecipa-se a elevação tanto da profundidade quanto da velocidade do escoamento, resultando em uma extensão maior da mancha classificada em uma classe de risco superior.

Observa-se que, no contexto do TR de 2 anos, é possível visualizar apenas a porção do leito d'água classificada como H5 ou superior. Entretanto, no cenário com um TR de 50 anos, a mancha é predominantemente classificada como H5 (Inseguro para veículos e pessoas. Todos os edifícios vulneráveis a danos estruturais. Alguns edifícios menos robustos sujeitos à falha) e H6 (perigosa para veículos e pessoas, com todos os tipos de construções consideradas suscetíveis a falhas).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em síntese, a pesquisa sobre as inundações ribeirinhas ao longo do Rio Pirangi, no Município de Jaqueira-PE, destaca-se como um estudo fundamental para o controle de desastres e a gestão sustentável dessas áreas. A abordagem integrada, que incorpora simulações hidrológicas, hidráulicas e a utilização de um Sistema de Informações Geográficas (SIG), emerge como uma ferramenta de importante valor para mapear e compreender as regiões suscetíveis a inundações.

Os resultados obtidos reafirmam a relevância do Tempo de Retorno (TR) na avaliação dos riscos, evidenciando que, à medida que esse tempo se estende, as áreas de risco significativo também se expandem. Essa constatação sublinha a urgência de uma gestão eficaz dos Recursos Hídricos por parte das autoridades públicas, proporcionando uma base técnica sólida para embasar decisões estratégicas.

A análise das manchas resultantes da multiplicação dos rasters de profundidade e velocidade proporciona uma visão nítida da distribuição espacial e da magnitude dos riscos. A consistência desses resultados com as previsões reforça a confiabilidade da metodologia adotada. Em particular, a diferenciação entre os cenários de TR, evidenciando as categorias de risco H5 e H6 em horizontes temporais mais longos, destaca a importância de considerar não apenas a probabilidade de inundação, mas também a gravidade do impacto.

Diante dessas conclusões, torna-se claro que o estudo oferece uma base sólida para o planejamento urbano e a gestão de desastres, capacitando os gestores públicos a adotarem medidas proativas na mitigação de riscos e na proteção das comunidades vulneráveis. O trabalho ressalta a necessidade contínua de monitoramento, atualização de dados e implementação de medidas preventivas para assegurar a resiliência das áreas ribeirinhas frente às crescentes ameaças de eventos extremos, consolidando-se como uma contribuição valiosa para a gestão integrada desses cenários.

REFERÊNCIAS

- APAC – Agência Pernambucana de Águas e Clima. **Monitoramento Pluviométrico**. Disponível em: <http://old.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php>. Acesso em: 01 nov. 2023.
- BARBOSA, Francisco de Assis dos Reis. **Medidas de proteção e controle de inundações urbanas na bacia do rio Mamanguape, PB**. 2006. Tese de Doutorado.
- BRASIL. Decreto nº 11.219, de 5 de outubro de 2022. Regulamenta o art. 1º-A, o art. 3º, o art. 4º, o art. 5º e o art. 5º-A da Lei nº 12.340, de 1º de dezembro de 2010, para dispor sobre as transferências obrigatórias de recursos financeiros da União aos Estados, ao Distrito Federal e aos Municípios para a execução de ações de prevenção em áreas de risco de desastres e de resposta e recuperação em áreas atingidas por desastres. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 6 out. 2022. Seção 1, p. 1.
- DE OLIVEIRA, Guilherme Garcia; SALDANHA, Dejanira Luderitz; GUASSELLI, Laurindo Antônio. Espacialização e análise das inundações na bacia hidrográfica do rio Caí/RS. **Geosciences= Geociências**, v. 29, n. 3, p. 413-427, 2010.
- DECINA, Thiago Galvão Tiradentes; BRANDÃO, João Luiz Boccia. Análise de desempenho de medidas estruturais e não estruturais de controle de inundações em uma bacia urbana. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, p. 207-217, 2016.
- FELICIANO, Fernando César Soares. **Modelagem hidrodinâmica e mapeamento de áreas de inundação urbana do município de Rio Piracicaba/MG**. 2022.
- GAM-IDF. **Genetic Algorithm Methodology for IDF**. Versão 1.0 (Beta). Pelotas: Grupo de Pesquisa em Hidrologia e Modelagem Hidrológica em Bacias Hidrográficas / UFPel, 2020. Disponível em: <https://gphidro.shinyapps.io/gam-idf/>. Acesso em: 01 nov. 2023.
- GISSING, Andrew; HAYNES, Katharine; COATES, Lucinda. Motorist behaviour during the 2015 Shoalhaven floods. **Australian Journal of Emergency Management**, v. 31, n. 2, p. 25-30, 2016.

LEAL, Darione Alves et al. Determinação da precipitação efetiva em uma bacia hidrográfica experimental. **Uberlândia: UFU-Universidade Federal de Uberlândia**, 2017.

SMITH, G. P. et al. Vehicle stability testing for flood flows. **LABORATORY, UONSWWR (ed.)**, 2017.

SMITH, Kirk R.; SAGAR, Ambuj. Making the clean available: escaping India's Chulha Trap. **Energy Policy**, v. 75, p. 410-414, 2014.

TUCCI, Carlos EM. Água no meio urbano. **Águas Doces do Brasil: capital ecológico, uso e conservação**, v. 2, p. 475-508, 1997.

TUCCI, Carlos EM. Gerenciamento integrado das inundações urbanas no Brasil. **Rega/Global Water Partnership South América**, v. 1, n. 1, p. 59-73, 2004.

TUCCI, Carlos EM; BERTONI, Juan Carlos. **Inundações urbanas na América do Sul**. Ed. dos Autores, 2003.