

MAPAS DE RISCO DE INUNDAÇÃO EM ÁREAS URBANAS VULNERÁVEIS DO MUNICÍPIO DE CARUARU-PE NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IPOJUCA

FLOOD RISK MAPS FOR VULNERABLE URBAN AREAS IN THE MUNICIPALITY OF CARUARU, PERNAMBUCO, IN THE IPOJUCA RIVER BASIN

Marina Oliveira Leimig

Prof. Vicente de Paulo Silva

Prof. Thiago Cabral Nepomuceno

RESUMO

Este estudo teve como objetivo mapear as áreas susceptíveis à inundação de um trecho do Rio Ipojuca, localizado em Pernambuco. Inundações, enchentes e alagamentos são desastres hidrológicos, agravados por ações antrópicas e pelo aquecimento global, que intensificam chuvas torrenciais. O Brasil e a Bacia do Ipojuca, em particular seis municípios da bacia, enfrentam alta incidência desses eventos. A pesquisa caracterizou a Bacia do Rio Ipojuca, determinou a vazão de pico para tempos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos, e identificou as regiões de inundação correspondentes. A metodologia envolveu a delimitação da área de estudo e a coleta de dados geoespaciais (cartográficos, fluviométricos e modelos digitais de elevação e terreno) usando QGIS. Para a análise de vazões, utilizou-se o software SisCah com dados da estação de Caruaru, calculando os tempos de retorno. A modelagem hidráulica foi realizada no HEC-RAS, delimitando um trecho do rio em Caruaru. Embora as características morfométricas da bacia sugerissem baixa propensão a inundações, as simulações revelaram que vazões de menor tempo de retorno já causam extravasamento do rio, afetando áreas urbanas do trecho simulado. As manchas de inundação identificaram 29 áreas com edificações residenciais e comerciais vulneráveis. Conclui-se que, apesar das características naturais da bacia, a proximidade da urbanização às margens do rio torna as cidades mais suscetíveis a inundações. O estudo reforça a necessidade de medidas preventivas e o uso de zoneamento urbano, auxiliando autoridades na seleção de soluções estruturais e não estruturais para mitigar impactos.

PALAVRAS-CHAVE: Gestão de Recursos Hídricos, Vulnerabilidade Urbana, Pernambuco, HEC-RAS.

1. INTRODUÇÃO

Desastres naturais são fenômenos que atingem locais habitados, resultando em perturbações significativas e danos socioambientais e materiais. Dentro desse contexto, inundações, enchentes e alagamentos são considerados desastres hidrológicos ou hidrometeorológicos, frequentemente intensificados pela ação antrópica. A magnitude e frequência desses eventos hidrológicos estão intrinsecamente ligadas à intensidade e distribuição da precipitação, à taxa de infiltração da água no solo, ao grau de saturação do solo e às características morfométricas e morfológicas da bacia de drenagem (Ferraz, 2021). Outro fator que contribui para o agravamento desse cenário é o aquecimento global, potencializando chuvas torrenciais severas e frequentes, que ameaçam áreas urbanas e rurais (Defesa Civil, 2023).

O Brasil tem um histórico de alta incidência de enchentes (Tominaga et al., 2009) e a Bacia Hidrográfica do Ipojuca, em Pernambuco, que engloba 25 municípios (EMBRAPA, 2021), vêm sofrendo com alagamentos e inundações cada vez mais frequentes (SNIS, 2024). Uma forma para mitigar as perdas decorrentes da inundação através da gestão de riscos é o foco na fase de prevenção (ANA, 2017), onde podem ser utilizados modelos hidrológicos e hidráulicos para a criação de mapas de risco (SciSpace, 2021; UNDRR, 2015).

1.1. OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é mapear as áreas susceptíveis à inundação de um trecho do Rio Ipojuca, localizado em Pernambuco.

1.1.1. Objetivos específicos

- Caracterizar morfométrica da Bacia do Rio Ipojuca;
- Obter da vazão de pico para os tempos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos do trecho do rio escolhido; e
- Identificar as regiões susceptíveis à inundação para cada tempo de retorno.

2. REVISÃO TEÓRICA

2.1. INUNDAÇÕES

A Defesa Civil Nacional define desastres naturais como a sucessão de eventos adversos (naturais ou antrópicos) sobre um ecossistema vulnerável, cuja intensidade depende da interação entre a magnitude do evento e o grau de vulnerabilidade do sistema afetado (Tominaga et al., 2009).

Dentro desse contexto, inundações e alagamentos são desastres hidrológicos ou hidrometeorológicos, frequentemente intensificados pela ação humana. Assim, a Figura 1 mostra a diferença entre alguns inundações e enchentes, onde a enchente refere-se à elevação do nível da água de um canal sem que ocorra transbordamento, enquanto a inundação se configura pelo extravasamento das águas, que invadem a planície de inundação. Alagamentos diferem de enxurradas: o primeiro é o acúmulo de água em uma área, com ou sem relação com eventos fluviais, e o segundo diz respeito ao escoamento pluvial superficial concentrado em chuvas intensas. As inundações, embora ligadas a precipitações elevadas, são influenciadas tanto por condicionantes naturais quanto por aqueles induzidos pela ação humana (Ferraz, 2021).

Figura 1 - Inundação e enchentes



Fonte: Tominaga et al, 2009

2.1.1. Causas das inundações

A magnitude e frequência dos eventos hidrológicos dependem da intensidade e distribuição da precipitação, da taxa de infiltração, do grau de saturação do solo e das características morfológicas e morfológicas da bacia de drenagem. Em áreas urbanas, o aumento da impermeabilização do solo e o assoreamento dos rios reduzem a taxa de infiltração, potencializando a ocorrência de inundações e alagamentos (Ferraz, 2021). Os impactos de inundações e alagamentos são abrangentes e podem ser classificados em diretos e indiretos (ANA, 2017; UNDRR, 2015).

As inundações e enchentes representam um desafio persistente no Brasil, com sua frequência e intensidade agravadas pelos eventos climáticos extremos,

particularmente entre 2023 e 2024. O aquecimento global é um fator central nesse cenário, contribuindo para chuvas torrenciais mais severas e frequentes, que ameaçam áreas urbanas e rurais (Defesa Civil, 2023). Na Tabela 1, detalham-se os municípios da bacia do Rio Ipojuca e seus incidentes hidrológicos (enchentes, enxurradas, alagamentos e inundações).

Tabela 1 - Ocorrência de incidentes hidrológicos na bacia por município.

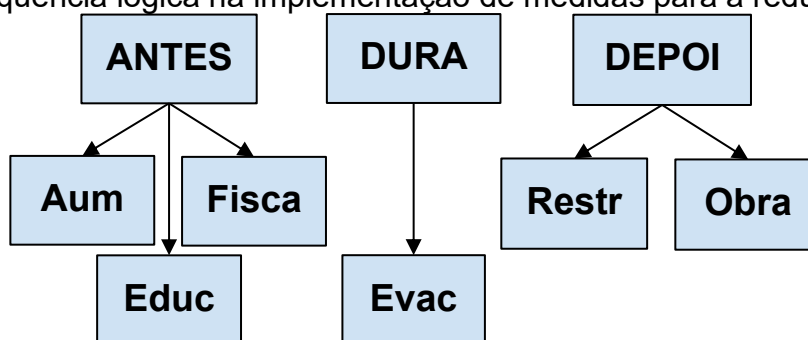
Ano de Referência	Nome do Município	Ocorrência de incidentes hidrológicos nos últimos 5 anos do ano de referência
2022	Belo Jardim	0
2022	Cachoeirinha	0
2022	Chã Grande	0
2022	Pombos	0
2022	Tacaimbó	0
2022	Venturosa	0
2022	Alagoinha	1
2022	Gravatá	1
2022	Poçoão	2
2019	São Bento do Una	2
2022	Pesqueira	3
2022	São Caitano	3
2020	Sanharó	3
2022	Agrestina	4
2022	Arcoverde	4
2022	Riacho das Almas	4
2022	Sairé	4
2022	Altinho	8
2022	Caruaru	14
2022	Vitória de Santo Antão	14
2022	Ipojuca	20
2022	Amaraji	22
2022	Bezerros	30
2024	Escada	-
2024	Primavera	-

Fonte de dados: SNIS (2024)

Desastres são primariamente determinados pela vulnerabilidade humana, que se refere à suscetibilidade de indivíduos e bens a ameaças. A extensão de um desastre está diretamente relacionada ao nível de vulnerabilidade da população, impactando de forma mais severa comunidades com menor poder aquisitivo. Fatores como pobreza, crescimento demográfico e a disparidade no acesso à terra impulsionam a ocupação de áreas de risco (como encostas e margens de rios), o que intensifica as consequências para aqueles com menos recursos e autonomia (Licco; Dowell, 2015).

A gestão contínua de riscos, abrangendo as fases de prevenção, preparação, resposta e recuperação, como é visto na Figura 2, é crucial para a mitigação de perdas decorrentes de inundações (ANA, 2017). A implementação de estratégias eficazes requer uma análise de riscos aprofundada, a alocação de recursos apropriados e uma colaboração intersetorial abrangente (SEDEC, 2013), priorizando a preservação da vida humana e o fortalecimento da resiliência social.

Figura 2 - Sequência lógica na implementação de medidas para a redução de perdas



Fonte: Autores

A adoção de uma abordagem integrada é vital para garantir a segurança das populações afetadas e a resiliência das comunidades frente a eventos futuros (Tucci, 2012). A realização de estudos climáticos é fundamental para informar as decisões sobre medidas estruturais a serem implementadas, para a definição de cotas de risco e para a análise do tempo de retorno, sendo este último aspecto crucial e necessitando de execução sistemática em municípios afetados por inundações (Porto et al., 2015).

2.2. CARACTERÍSTICAS DA REGIÃO

A Bacia Hidrográfica do Ipojuca, localizada em Pernambuco e estende-se de 08°09'50" a 08°40'20" S e 34°57'52" a 37°02'48" O, com 3.435,34 km², a bacia representa 3,49% da área do estado. Limita-se ao norte com o Capibaribe e bacias costeiras, ao sul com o Sirinhaém, a leste com o Atlântico e a oeste com Ipanema e

Moxotó, e a Paraíba (EMBRAPA, 2021). As porções superior, média e sub-média situam-se no Sertão (pequena parte) e Agreste (Medeiros, 2021).

O rio Ipojuca, principal curso d'água com 320 km, nasce na serra do Pau d'Arco e deságua no Atlântico, em Ipojuca. Predominantemente oeste-leste, seu alto curso é intermitente, enquanto o médio e inferior são perenes. Seus afluentes principais são os riachos do Liberal (o mais importante), Taquara e do Mel (margem direita), e Coutinho, Mocós, Muxoxo e Pata Choca (margem esquerda) (EMBRAPA, 2021 e Almeida et al., 2017).

A bacia engloba 25 municípios, com 14 sedes dentro dela (Arcoverde, Belo Jardim, Bezerros, Caruaru, Chã Grande, Escada, Gravatá, Ipojuca, Pombos, Poção, Primavera, Sanharó, São Caetano e Tacaimbó) e 10 apenas inseridos (Agrestina, Alagoinha, Altinho, Amaraji, Cachoeirinha, Pesqueira, Riacho das Almas, Sairé, São Bento do Una, Venturosa e Vitória de Santo Antão). Amaraji, Chã Grande, Escada e Primavera, na Mata Sul Pernambucana, são os principais (EMBRAPA, 2021).

2.2.1. Geomorfologia, clima e fluviometria

A Bacia do Rio Ipojuca é predominantemente cristalina (97%), com 3% de áreas sedimentares. O relevo varia: leste costeiro (altitudes até 100m), centro-leste com morros (perto de 300m), e oeste com superfícies planas (400-700m). As maiores altitudes (800-1.100m) estão em Belo Jardim, Sanharó, Pesqueira e Poção (Salgueiro, 2005).

A bacia apresenta uma transição climática complexa, do Sertão ao Atlântico, com chuvas diminuindo de Leste para Oeste e aumento da evaporação (Salgueiro, 2005). A classificação climática de Köppen para a BHRI indica predominantemente clima AS (tropical com estação seca de verão), seguido por Am (Monções) e BSh (estepes quentes), conforme Medeiros et al. (2021) e Alvares et al. (2014). O Litoral e Zona da Mata têm clima quente e úmido (1.000-2.000mm anuais, março-agosto), favorável à Mata Atlântica. O Agreste, transição climática, registra menos de 600mm de chuva, com vegetação de cactáceas e caatinga, influenciado pela ZCIT e sistemas de Leste. O Planalto da Borborema age como barreira à umidade, causando estiagem no Agreste e irregularidade pluviométrica (Salgueiro, 2005).

Os meses de maior precipitação são maio, junho e julho, contrastando com menor pluviosidade entre outubro e dezembro (Medeiros, 2021). Almeida et al. (2017) identificou um aumento da precipitação em direção ao litoral, com zonas

pluviométricas variando de 623,6 mm/ano (Agreste Ocidental) a 1.707,0 mm/ano (Zona Costeira). Análises fluviométricas de Almeida et al. (2017) no rio Ipojuca revelaram um regime intermitente em Sanharó e Caruaru, tornando-se perene a partir de Gravatá, com vazões de referência de Q90 de 0,45 m³/s e Q95 de 0,18 m³/s, Tabela 2, e confirmando perenidade em Engenho Tabocas (Pombos). Essa transição é atribuída aos maiores índices pluviométricos na Zona da Mata.

Tabela 2 - Vazões de referência das estações fluviométricas.

Código	Nome	Município	Q₅₀ (m³/s)	Q₉₀ (m³/s)	Q₉₅ (m³/s)	Q₇ (m³/s)	Q_{7,10} (m³/s)
39310000	Sanharó	Sanharó	0,439	0,017	0,008	0,071	0,000
39340000	Caruaru	Caruaru	0,418	0,019	0,010	0,029	0,000
39345000	Gravatá	Gravatá	1,184	0,452	0,177	0,337	0,000
39360000	Engenho Tabocas	Pombos	3,568	1,317	1,074	0,995	0,416
39370100	Engenho Maranhão	Ipojuca	10,435	4,226	2,986	3,203	1,421

Fonte: Almeida et al., 2017

2.2.2. Uso e ocupação do solo

A Bacia do Rio Ipojuca, com 666.894 habitantes, em 2000 segundo o IBGE, representa 1/12 da população de Pernambuco. Segundo a pesquisa de Salgueiro (2005), a bacia possui desenvolvimento humano médio (0,500-0,799), baseado em educação, longevidade e renda. A economia da Bacia do Rio Ipojuca é predominantemente agropecuária e industrial, com baixos rendimentos agrícolas sazonais devido a crises climáticas. A diversificação produtiva é influenciada pelo clima, moldando a ocupação do solo e níveis econômicos/sociais. O setor industrial concentra unidades em municípios como Pesqueira, Sanharó, Belo Jardim, Caruaru e no Complexo Portuário de Suape (Salgueiro, 2005).

No que tange à infraestrutura, a Bacia do Ipojuca é bem atendida em termos de energia elétrica, com acesso universal nos núcleos urbanos e significativa expansão na zona rural, o que justifica o aumento do consumo e do número de usuários (EMBRAPA, 2021). A bacia do Ipojuca desempenha um papel estratégico como via de comunicação entre o Litoral e o Sertão de Pernambuco, funcionando como eixo de conexão e transição com a Região Metropolitana do Recife (RMR) devido ao seu extenso comprimento. Essa característica explica o dinamismo econômico do corredor do Ipojuca em comparação com as bacias adjacentes (Salgueiro, 2005).

2.3. FERRAMENTAS HIDROLÓGICAS E GEOTECNOLOGIAS

Os modelos hidráulicos se baseiam em equações matemáticas que descrevem o movimento da água. Os fundamentos principais incluem a conservação da massa (equação da continuidade) e a conservação do momento (equações de Saint-Venant para fluxo unidimensional, ou Navier-Stokes simplificadas para fluxos 2D e 3D) (Tucci, 2012). A modelagem hidráulica pode ser classificada de acordo com a dimensionalidade do fluxo simulado, influenciando a precisão e a aplicação do modelo. Como exemplo, o HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System), desenvolvido pelo U.S. Army Corps of Engineers, é um dos softwares 1D mais amplamente utilizados para análise de rios e canais (FEMA, 2025).

Para a análise de inundações, a combinação de modelos hidrológicos com modelos hidráulicos é uma prática comum (SciSpace, 2021). A modelagem hidráulica é muito utilizada na criação de mapas de perigo e risco de inundação, ferramentas cartográficas para a gestão territorial e a prevenção de desastres (UNDRR, 2015). Eles são fundamentais para comunicar o risco a diferentes públicos, desde órgãos governamentais até a população, subsidiando a tomada de decisões e o planejamento para a mitigação de impactos (MDPI, 2022).

A elaboração desses mapas envolve a integração de informações de diversas fontes, incluindo dados topográficos, hidrológicos, pluviométricos e de uso do solo, frequentemente utilizando Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e modelagem hidráulica (ANA, 2017; CPRM, 2014). Essencialmente, o processo envolve a combinação do perigo (a ameaça da inundação) com a vulnerabilidade (a suscetibilidade dos elementos expostos) em um ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG) (CPRM, 2014; UNDRR, 2015).

3. METODOLOGIA

3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A modelagem hidráulica de uma bacia hidrográfica exige, primordialmente, o conhecimento aprofundado da região em que se insere. Tal abordagem viabiliza a identificação da influência dos fatores locais na suscetibilidade da área em estudo a inundações.

3.1.1. Bacia hidrográfica

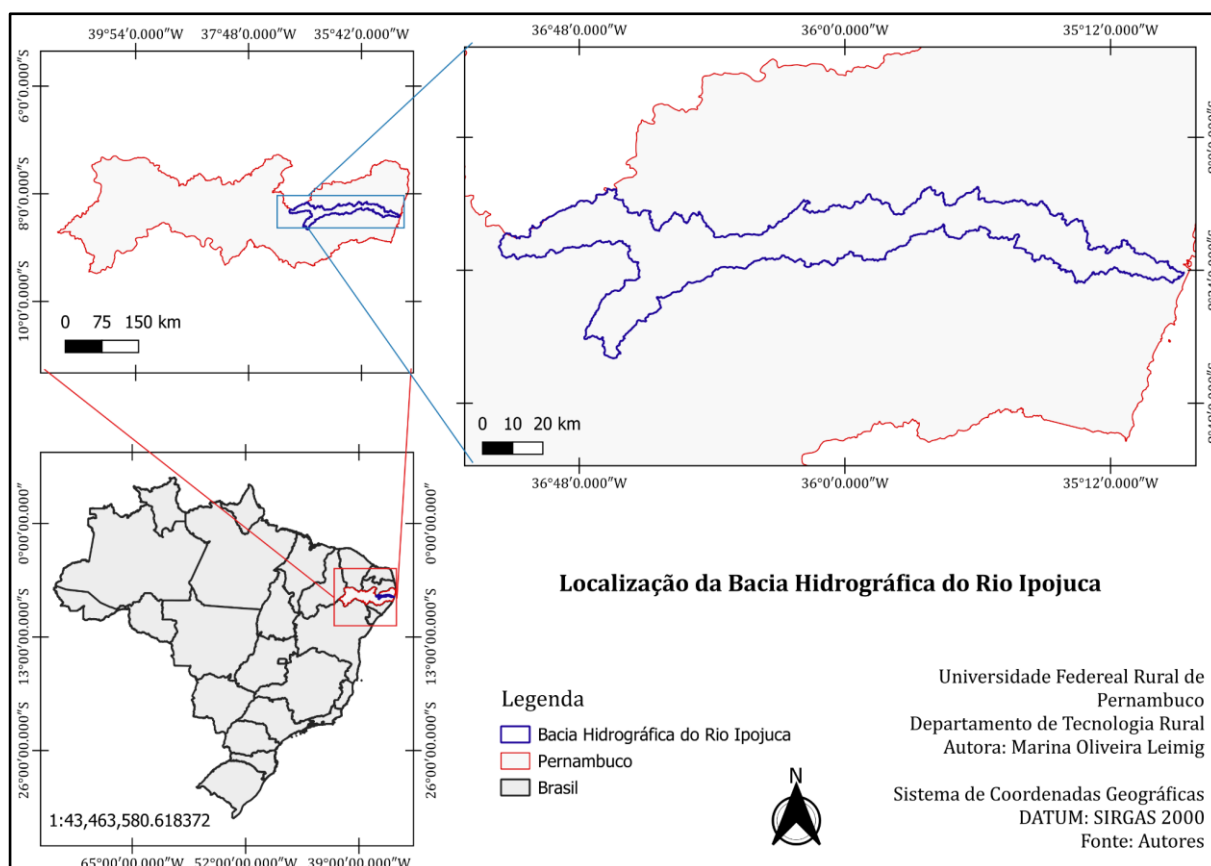
Nesta fase, foi realizada a caracterização detalhada da Bacia do Rio Ipojuca e das áreas urbanas foco do estudo, bem como a coleta e processamento dos dados geoespaciais necessários.

A delimitação da Bacia do Rio Ipojuca foi realizada em ambiente QGIS (versão 3.22). Foram levantados, organizados e processados os seguintes dados em ambiente QGIS:

- I. Bases Cartográficas: Dados de rede hidrográfica e uso e ocupação do solo foram obtidos de shapefiles de órgãos como IBGE e ANA.

O Mapa 1 oferece uma representação visual clara da localização da Bacia do Ipojuca, situando-a no território brasileiro. Nele é possível identificar que a bacia se encontra na região Nordeste do país, especificamente no estado de Pernambuco.

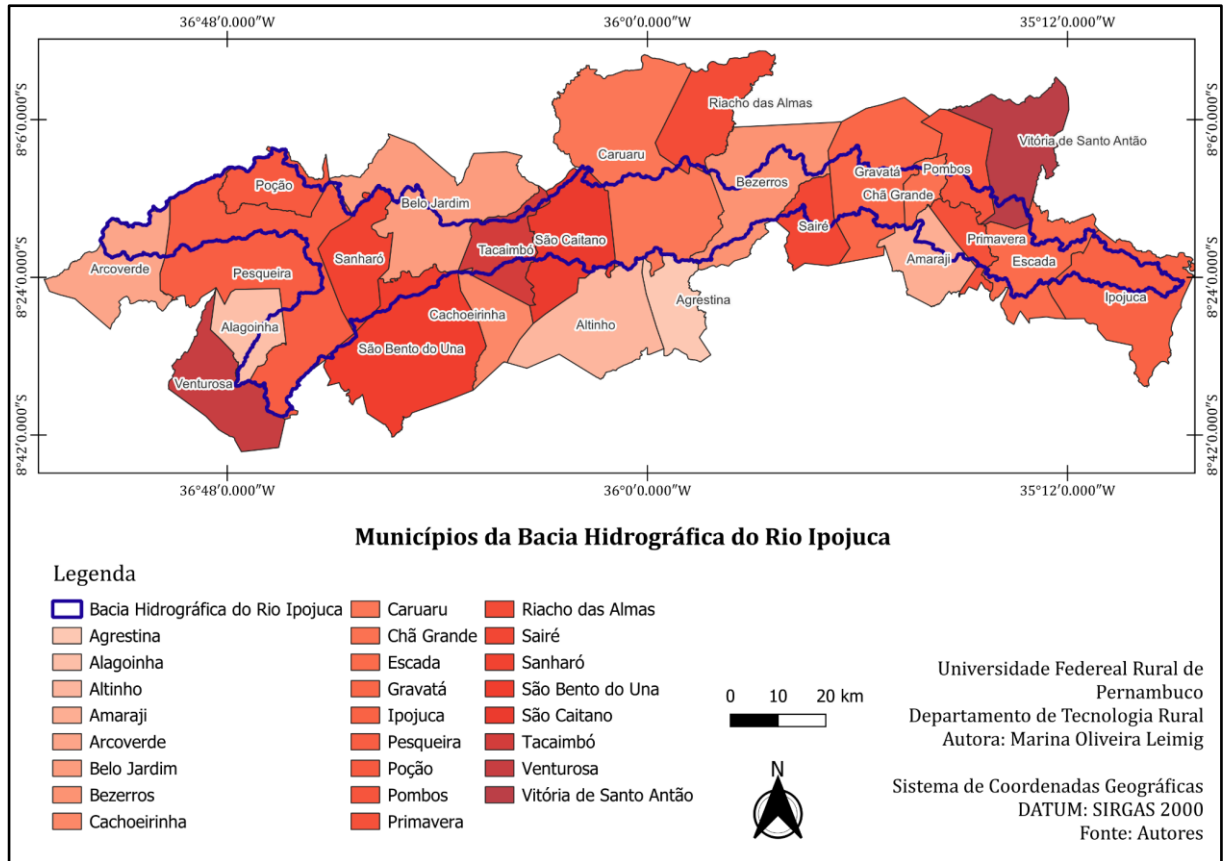
Mapa 1 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca



No Mapa 2, é possível identificar a localização e a extensão dos 25 municípios que compõem a bacia hidrográfica do rio Ipojuca. Também é possível verificar quais municípios possuem maior área inserida na bacia e,

consequentemente, quais terão maior influência no rio e no comportamento da bacia.

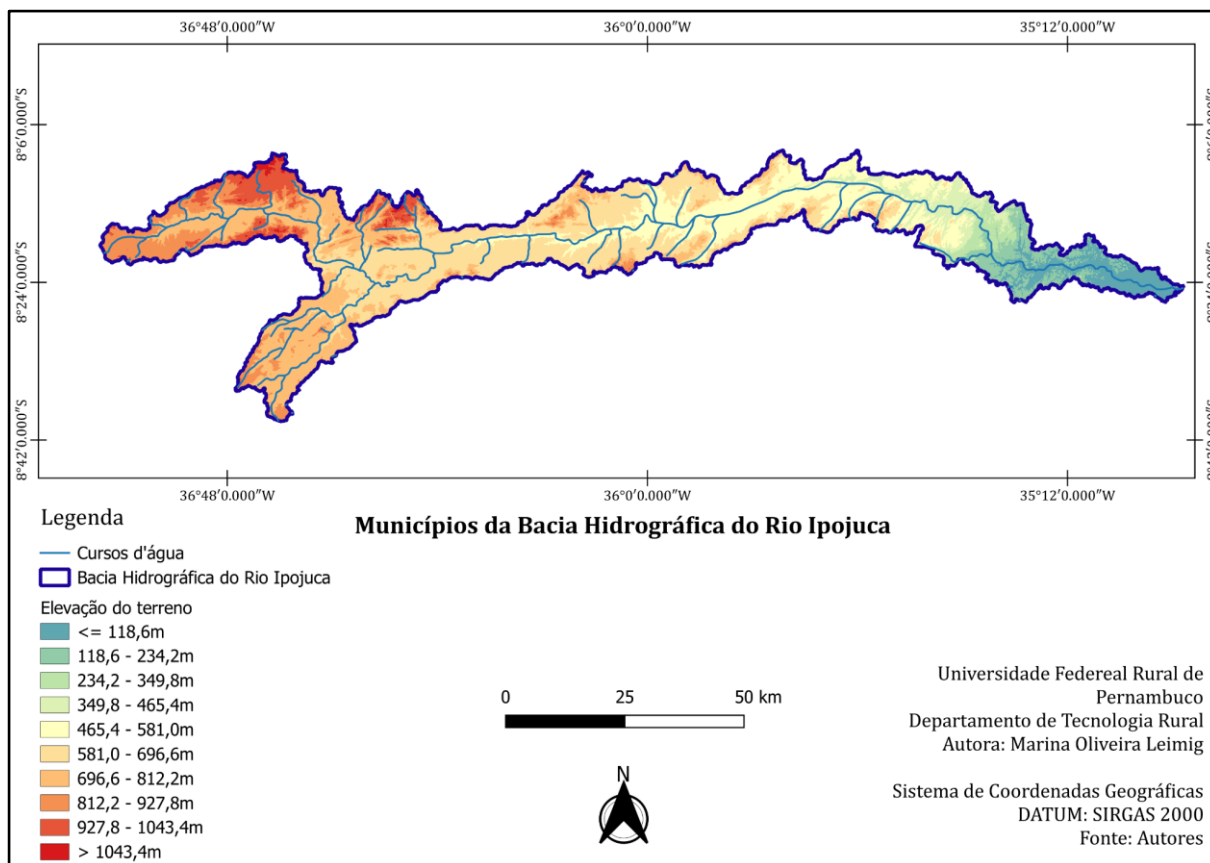
Mapa 2 - Municípios da Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca



II. Dados Fluviométricos e modelos de digital elevação e de terreno: Séries históricas de dados de vazão foram coletadas junto à HIDROWEB. Dados de elevação, como o MDE, foram obtidos da EMBRAPA e utilizado para a caracterização morfométrica da bacia. Já o MDT foi obtido no site do Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D) e utilizado no sistema HEC-RAS para as simulações.

O Mapa 3 demonstra que as áreas de coloração azul clara apresentam as menores elevações, enquanto as de tonalidade vermelha intensa indicam as maiores. Os rios (representados por linhas azuis) da bacia do Capibaribe originam-se nas regiões mais elevadas a oeste (continental) e fluem em direção leste (menores elevações), desembocando no oceano, em decorrência da força gravitacional.

Mapa 3 - Rios e MDE da bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca



A Caracterização Fisiográfica da Bacia foi realizada a partir dos dados geospaciais processados no QGIS e calculados os seguintes parâmetros morfométricos, segundo Negri e Fill (2023), para a Bacia do Rio Ipojuca, visando compreender suas características hidrológicas e geomorfológicas, como exposto na Tabela 3.

Tabela 3: equações das características morfométricas da bacia hidrográfica

Nome / Equação	Descrição
Área da Bacia (A)	Calculada diretamente a partir do polígono da bacia.
Densidade de drenagem $Dd = \frac{\sum LC}{A}$	É a relação entre o comprimento total dos canais e a área da bacia hidrográfica. Valores variam de 0,5 km/km ² (drenagem pobre) a 3,5 km/km ² ou mais (bem drenadas). Menor densidade de drenagem implica maior infiltração e recarga de águas subterrâneas.
Coefficiente de compacidade $Kc = \frac{0,28 P}{\sqrt{A}}$	É a relação entre o perímetro da bacia (P) e sua área (A). Seu valor é sempre superior a 1, e quanto menor for esse valor, menor será o tempo de concentração.

Fator de forma $Ff = \frac{A}{L^2}$	É a razão entre a largura média da bacia (A/L) e o comprimento do eixo da bacia ou comprimento axial (L). Quanto menor o valor, menos propensa a inundações será a bacia.
Declividade da bacia $I(\%) = \frac{D}{A} \left(\sum CNI \right) \times 100$	Onde D é a equidistância entre as curvas de nível, CN é o comprimento total das curvas de nível e A é a área da bacia hidrográfica. Ela representa a inclinação da superfície de drenagem, onde a velocidade do escoamento superficial aumenta com a declividade.
Declividade do Curso Principal $Lq = \frac{\Delta h}{L}$	Determinada pela relação entre a diferença máxima de altitude da bacia (Δh) e o comprimento do eixo da bacia ou comprimento axial (L).
Elevação Média da Bacia $E = \frac{\sum (ei \times ai)}{A}$	Obtida pela relação da Elevação média entre duas curvas de nível (ei), Área entre as duas curvas de nível (ai) e a Área da bacia hidrográfica (A).
Tempo de Concentração $t_c = 57 \left(\frac{L^2}{Ieq} \right)^{0,385}$	Estimado por meio da relação do comprimento do curso d'água e a declividade do curso principal da bacia.

Fonte: modificado de Negri e Fill (2023)

3.2. DADOS DE VAZÃO

O HidroWeb é um portal público no qual são disponibilizados dados das medições da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN) como vazões, chuvas, climatologia, níveis fluviais, qualidade da água e sedimentos. Nele é possível baixar as séries históricas de diversas estações pluviométricas e fluviométricas do Brasil. De forma a obter o maior número possível de dados, a coleta foi feita nas estações de interesse, dispostas ao longo do Rio Ipojuca e de seus afluentes. Apesar de localizadas 33 (trinta e três) estações de interesse, apenas 5 (cinco) dessas possuem dados referentes às vazões disponíveis, que são as de código 39310000, 39340000, 39345000, 39360000 e 39370100.

A primeira estação, situada em Sanharó, possui dados de 1970 a 2021, com poucas interrupções nesse período. A segunda estação, localizada em Caruaru, apresenta dados de 1973 a 2023, com aproximadamente cinco anos de dados ausentes. As estações 39345000 (Gravatá) e 39370100 (Engenho Maranhão) registraram os menores períodos de dados, de 1999 a 2023 e 2003 a 2023,

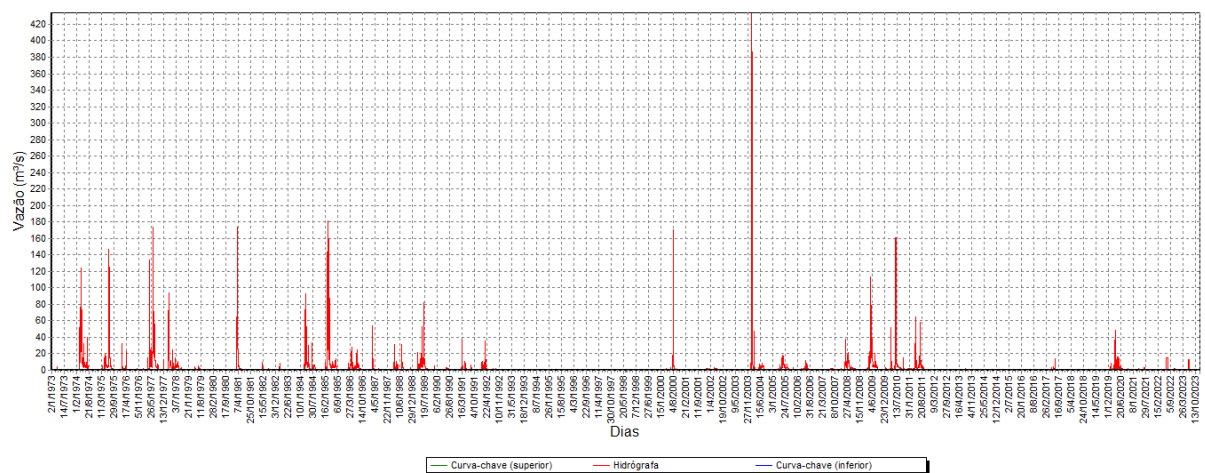
respectivamente. Por fim, a estação 39360000, referente ao Engenho Tabocas, dispunha de dados de 1967 a 2023.

Para a escolha de qual das estações seria escolhida para realizar as simulações, a localização das estações e proximidade com áreas urbanas também foi um fator considerado, Dessa forma, apenas duas estações, Caruaru e Gravatá, se apresentaram dentro do perímetro urbano, sendo assim onde as simulações seriam mais eficazes. A escolha entre as duas estações foi pautada na quantidade de dados disponíveis. Dessa forma, a estação 39340000, em Caruaru, com 50 anos de dados e uma área de drenagem de 1960 km², na Latitude -8,31 e Longitude -36,00, para a realização das simulações.

Para realizar a análise dos dados referentes à estação 39340000, foi utilizado o software SisCah, Sistema Computacional para Análises Hidrológicas, para o tratamento de séries históricas de dados hidrológicos utilizando como base de dados os arquivos no formato MDB, disponibilizados na Internet pela Agência Nacional de Águas, através do Sistema de Informações Hidrológicas (Hidroweb).

Foi realizada a importação de arquivos de séries históricas de vazão da estação escolhida e feito o pré-processamento desses dados, com a exclusão da meses com mais de 5% de falha das análises posteriores. Posteriormente, foi realizada a visualização do hidrograma de escoamento na seção de interesse, pelo módulo "Hidrógrafa" do menu "Vazões", que contempla as vazões ao longo de cada ano da série histórica.

Figura 3: Hidrografia completa da estação 39340000



Posteriormente foi realizado o cálculo dos tempos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos no módulo de estimativa de vazões máximas. Após os cálculos, foram apresentadas as vazões máximas estimadas para cada ano. Para estimar as vazões

máximas para diferentes períodos de retorno, é necessário gerar funções de distribuição de densidade de probabilidade, onde a estimativa da magnitude de um evento com determinado período de retorno é dada pela equação:

$$M = \mu + K\sigma$$

Onde M é a magnitude do evento para o período de retorno estabelecido; μ é a média dos eventos; K é o fator de frequência; e σ é o desvio padrão dos eventos. O valor do fator de frequência é obtido conforme distribuição de probabilidade: Gumbel, Log-normal II, Log-normal III, Pearson III, Log-Pearson III e Weibull.

Nas Tabelas 4 a 7 estão os tempos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos, calculados com os dados de vazão da estação de Caruaru.

Tabela 4: TR de 10 anos

Distribuição	Nº de eventos	Interv. conf. sup. (95%)	Evento (m³/s)	Interv. conf. inf. (95%)	Assimetria
Gumbel	42	239,89	182,55	125,21	2,38604
Pearson 3	42	242,04	150,88	59,72	3,08585
Logpearson 3	42	708,48	283,24	-142,01	1,16861
Lognormal 2	42	284,90	128,67	-27,56	2,38604
▶ Lognormal 3	42	231,62	158,92	86,22	2,38604

Tabela 5: TR de 25 anos

Distribuição	Nº de eventos	Interv. conf. sup. (95%)	Evento (m³/s)	Interv. conf. inf. (95%)	Assimetria
Gumbel	42	329,96	251,79	173,63	2,38604
Pearson 3	42	363,67	241,26	118,84	3,08585
Logpearson 3	42	4520,81	1441,35	-1638,11	1,16861
Lognormal 2	42	532,52	211,71	-109,09	2,38604
▶ Lognormal 3	42	346,92	234,41	121,89	2,38604

Tabela 6: TR de 50 anos

Distribuição	Nº de eventos	Interv. conf. sup. (95%)	Evento (m³/s)	Interv. conf. inf. (95%)	Assimetria
Gumbel	42	397,11	303,16	209,21	2,38604
Pearson 3	42	506,91	315,82	124,73	3,08585
Logpearson 3	42	17280,33	4690,39	-7899,55	1,16861
Lognormal 2	42	772,46	292,02	-188,42	2,38604
▶ Lognormal 3	42	497,71	296,27	94,82	2,38604

Tabela 7: TR de 100 anos

Distribuição	Nº de eventos	Interv. conf. sup. (95%)	Evento (m³/s)	Interv. conf. inf. (95%)	Assimetria
Gumbel	42	463,91	354,15	244,38	2,38604
Pearson 3	42	684,99	394,94	104,90	3,08585
Logpearson 3	42	63940,20	14846,75	-34246,70	1,16861
Lognormal 2	42	1065,23	389,96	-285,31	2,38604
▶ Lognormal 3	42	695,84	362,78	29,72	2,38604

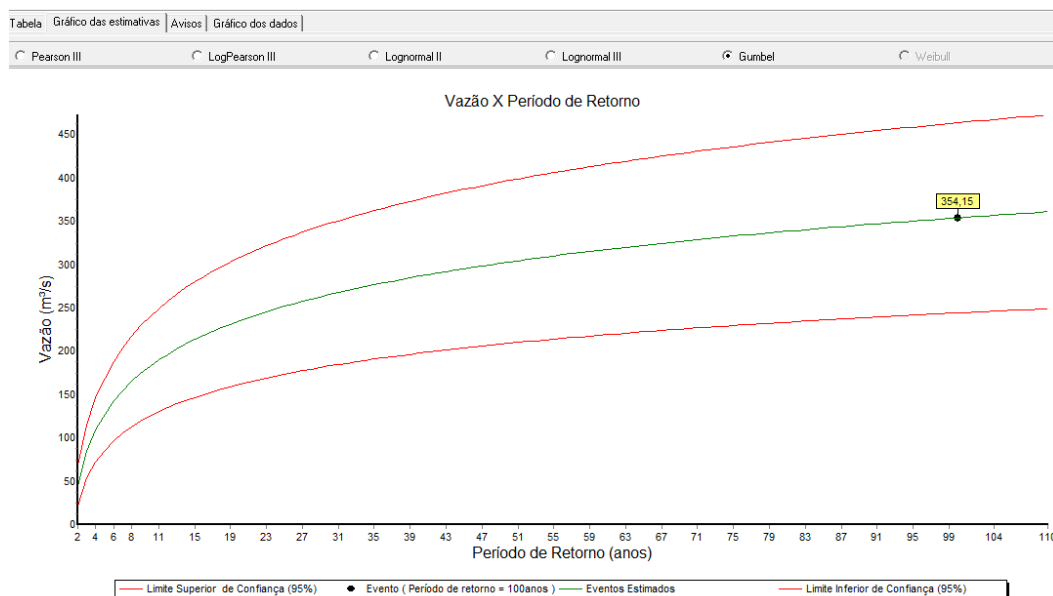
No TR de 100 anos foi gerado o aviso “O período de retorno atual equivale a 2,38 vezes ao número de eventos da série, enquanto o máximo recomendado é 2 vezes.”.

O sistema identificou que a distribuição mais adequada foi a Gumbel, dada por:

$$M = \mu + \frac{\sigma_X}{\sigma_n} (b - Y_n)$$

Sendo $b = -\ln(-\ln(1 - \frac{1}{T}))$, onde M = magnitude do evento; μ = média da amostra; σ = desvio padrão da amostra; σ = desvio padrão da variável reduzida; b = variável reduzida; Y = média da variável reduzida; e T = período de retorno. A Figura 4, mostra o gráfico gerado pelo sistema com a distribuição Gumbel.

Figura 4: Gráfico vazão x Período de Retorno

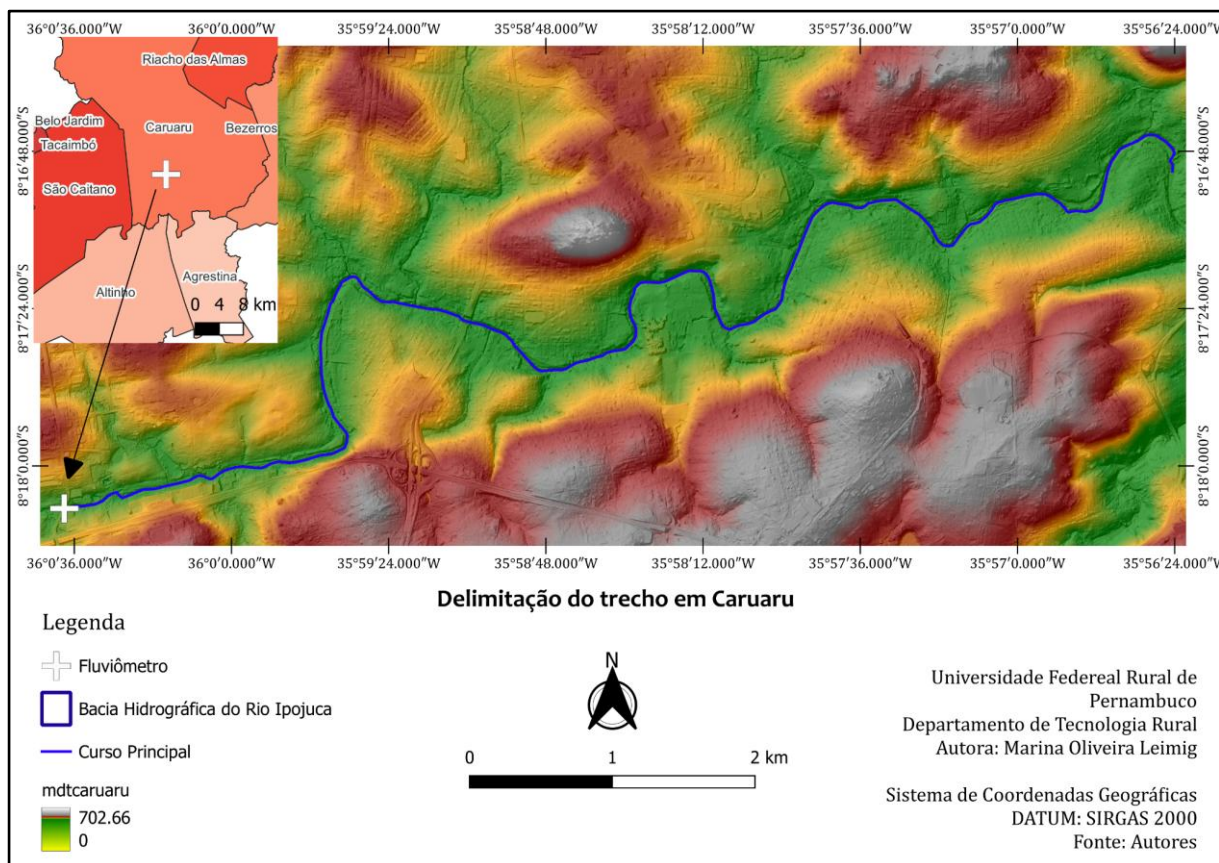


3.3. SIMULAÇÃO DO HEC-RAS

Utilizando o HEC-RAS 6.4.1, foi delimitado apenas um trecho de um curso d'água, em vez de toda a bacia. Os dados de base para efetuar essa delimitação foram retirados dos rasters do PE3D, a localização da estação escolhida como início do trecho e finalizando na parte urbana do município de Caruaru.

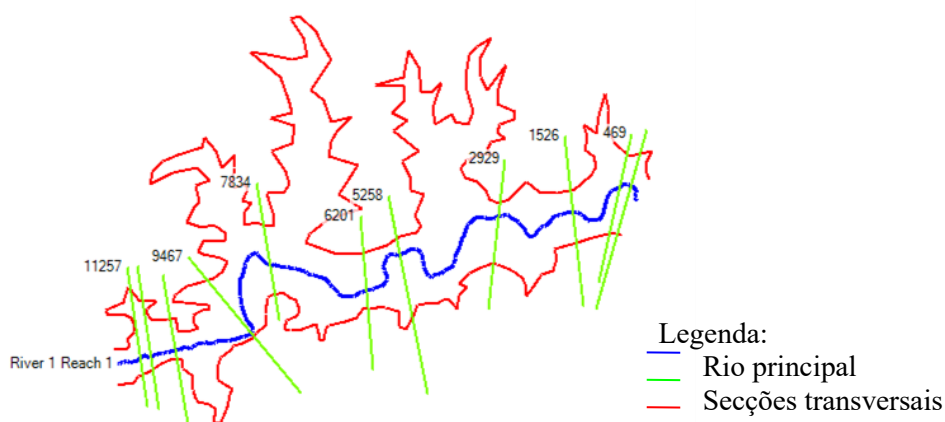
A simulação da mancha de inundação de um rio exige a definição espacial de sua geometria, processo realizado neste trabalho no HEC-RAS, via RAS Mapper. Inicialmente, definiu-se a projeção UTM 24S (datum SIRGAS 2000). Em seguida, carregou-se o MDT, gerado no QGIS a partir de dados do PE3D para delimitar a região do rio e sua topografia. Com o modelo, iniciou-se a criação da geometria e a marcação dos layers Rivers e Cross Sections. Primeiro, marca-se o eixo do rio com o primeiro layer (Mapa 4).

Mapa 4 - Delimitação do trecho em Caruaru



No subgrupo Bank Lines, as margens esquerda e direita do Rio Ipojuca foram demarcadas. Em todos os casos (eixo e margens), a atenção deve ser redobrada nas curvas, buscando o melhor contorno. Por fim, marcaram-se as seções do rio com o layer Cross Sections. Na geometria, na Figura 5, é possível observar o eixo do rio (azul escuro) e as seções transversais definidas (verde), sendo a seção 11257 a de montante e a 275 a de jusante.

Figura 5: Geometria do rio no Hec Ras



Fonte: Autores

Ao longo de 12 km de rio, foram feitas 11 seções de montante para jusante, enumeradas pela distância até o ponto final. Após a utilização do RAS Mapper, os

dados foram importados para a área "View/Edit geometric data". Nesse ambiente, as seções criadas são verificadas e suas características atribuídas, como o número de Manning. Para este, adotou-se o valor de 0,045, conforme a Tabela 2. Essa metodologia, também empregada por Assis (2024), corresponde à condição regular de rio "com meandros, bancos e pequenos poços pouco profundos, limpos", conforme destacado na Tabela 8.

Tabela 8: Coeficientes de manning

Arroios e rios	Condições			
	Muito boas	Boas	Regulares	Más
1. Limpos, retílineos e uniformes	0,025	0,028	0,030	0,033
2. Como em 1, porém com vegetação e pedras	0,030	0,033	0,035	0,040
3. Com meandros, bancos e poços pouco profundos, limpos	0,035	0,040	0,045	0,050
4. Como em 3, águas baixas, declividade fraca	0,040	0,045	0,050	0,055
5. Como em 3, com vegetação e pedras	0,033	0,035	0,040	0,045
6. Como em 4, com pedras	0,045	0,050	0,055	0,060
7. Com margens espraçadas, pouca vegetação	0,050	0,060	0,070	0,080
8. Com margens espraçadas, muita vegetação	0,075	0,100	0,125	0,150

Fonte: Assis (2024)

A simulação adotou regime de escoamento permanente, justificado pela disponibilidade de dados e majoração dos resultados para segurança. Os valores de vazão calculados anteriormente, em m^3/s , para os tempos de retorno definidos foram aplicados no HEC-RAS como parâmetros de entrada para a simulação, assim, houve 4 resultados para cada uma das seções indicadas. As condições de contorno e a seção transversal foram as mesmas para todos os trechos e tempos de retorno. A profundidade normal foi utilizada, com a declividade da linha d'água igual à do curso d'água. A declividade média do rio foi calculada em 0.0011, dividindo a diferença de elevação entre as seções de montante e jusante pelo comprimento do trecho. O modelo hidráulico foi aplicado aos cenários de cheia para simular as inundações. Essas simulações geraram "manchas de inundação", que são dados detalhados sobre a extensão da área inundada, a profundidade da água e a velocidade do fluxo em cada cenário. As manchas de inundação resultantes do HEC-RAS foram exportadas e convertidas em mapas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Caracterização morfométrica da Bacia Hidrográfica

Os dados subsequentes foram calculados pelo software QGis, com base na metodologia apresentada. Uma bacia hidrográfica é definida topograficamente como uma área onde a água converge para um único ponto de escoamento. A bacia em questão abrange uma área de 3441,49 km² e possui um perímetro de 821,28 km. As maiores elevações topográficas localizam-se a leste, onde o rio principal tem sua nascente, e sua foz situa-se a leste, no Oceano Atlântico. O comprimento do rio principal dentro da bacia é de 286.876 m, e a extensão total da rede de drenagem, incluindo o rio principal e seus afluentes, é de 705.241 m. A morfologia da bacia, influenciada por fatores geológicos, climáticos e pela contribuição dos afluentes, exerce impacto direto sobre o regime de escoamento e a susceptibilidade a eventos de inundação, podendo ser categorizada como alongada ou radial. A Bacia do Rio Ipojuca, caracterizada por um formato alongado, exhibe um risco reduzido de inundações em virtude de seu comprimento, que facilita o escoamento. A rede de drenagem apresenta um padrão dendrítico, comum em regiões com uniformidade rochosa, onde os cursos d'água se ramificam de maneira similar aos galhos de árvores.

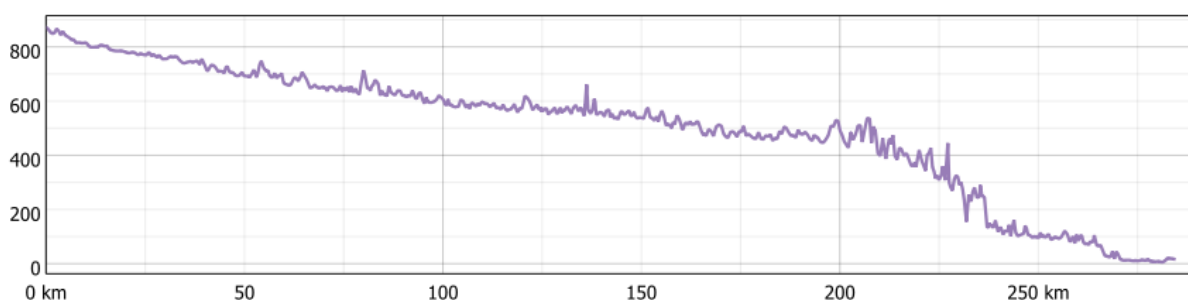
O coeficiente de compacidade serve como indicador do potencial de ocorrência de inundações. A propensão a enchentes de uma bacia é classificada pelo Coeficiente de Compacidade (Kc): alta (1-1,25), média (1,25-1,50) ou baixa (acima de 1,50). Com Kc de 3,92, a Bacia do Rio Ipojuca possui baixa propensão a grandes enchentes. Já o Fator de Forma, que indica a propensão a enchentes, classifica bacias hidrográficas pela sua circularidade. Quanto mais próximo de 1, mais circular e sujeita a enchentes. A classificação é: 1-0,75 (sujeita a enchentes), 0,75-0,50 (tendência mediana), <0,50 (pouca tendência). Com Ff = 0,044, a bacia do Rio Ipojuca tem pouca tendência a enchentes.

A densidade de drenagem indica o comportamento hidrológico de uma bacia, influenciada por topografia, litologia, pedologia e vegetação. Ela afeta a propensão a inundações e o tempo de escoamento. As classificações são: pobre (< 0,5 km/km²), regular (0,5 - 1,5 km/km²), boa (1,5 - 2,5 km/km²), muito boa (2,5 - 3,5 km/km²) e excepcionalmente boa (> 3,5 km/km²). A bacia do Rio Ipojuca, com 0,21 km/km², é classificada como de drenagem pobre.

A declividade da bacia hidrográfica impacta a infiltração e o escoamento. Declividades acima de 15% indicam risco de erosão, exigindo medidas conservacionistas. A bacia foi classificada como "Ondulada", que segundo a EMBRAPA tem a declividade entre 8 - 20%, já que a bacia apresentou declividade média de 9,88%. Apesar de a declividade influir na relação entre a precipitação e o deflúvio, aumentando a velocidade de escoamento superficial que reduz a possibilidade de infiltração da água no solo, não se deve desprezar a influência secundária da direção geral da declividade, ou seja, da orientação da bacia. Isso afeta as perdas por evapotranspiração, devido a sua influência sobre a quantidade de radiação solar recebida pela bacia.

A elevação média influencia a precipitação, as perdas de água por evaporação e transpiração e, conseqüentemente, o deflúvio médio. O valor de I_q é de 0,00304 m/m, e o perfil longitudinal do rio principal pode ser observado na Figura 5.

Figura 6 - Perfil Longitudinal do Rio Ipojuca



O Tempo de Concentração (T_c) é o período que toda a bacia hidrográfica leva para contribuir para o escoamento superficial. Na bacia estudada, com declividade de 3,04 m/km e comprimento de 282,175 km, o T_c calculado foi de 2863,3062 minutos, ou seja, aproximadamente 47,7 horas (1,99 dias) para que uma gota de água do ponto mais distante alcance a foz.

Os dados calculados na análise morfométrica deste estudo indicaram que a bacia não apresentaria um risco elevado de inundações. Essa informação, no entanto, contrasta com o histórico dos municípios abrangidos pela bacia, os quais, ao longo do tempo, têm enfrentado problemas hidrológicos.

4.2. Vazões de Retorno para o trecho de Caruaru

As Figuras 8 a 11 retratam os resultados obtidos para a seção 11257, traçada imediatamente antes de uma ponte, nos tempos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos considerados. Nelas é possível ver em preto o traçado da seção transversal do rio, o

limite normal da calha do rio de água em vermelho e a extrapolação da água preenchida em azul.

Figura 8: Resultados da secção 11257 para o TR10

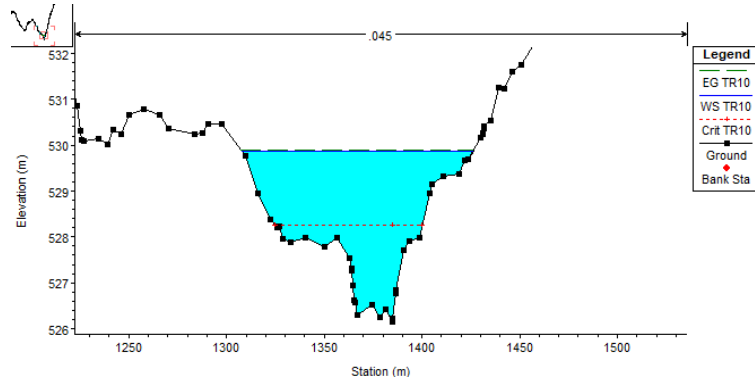


Figura 9: Resultados da secção 11257 para o TR 25

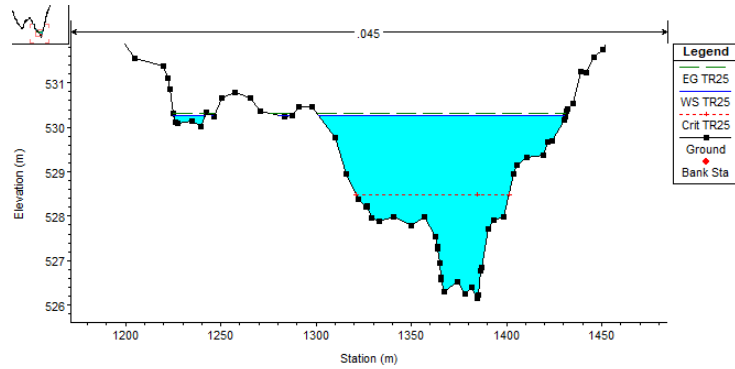


Figura 10: Resultados da secção 11257 para o TR 50

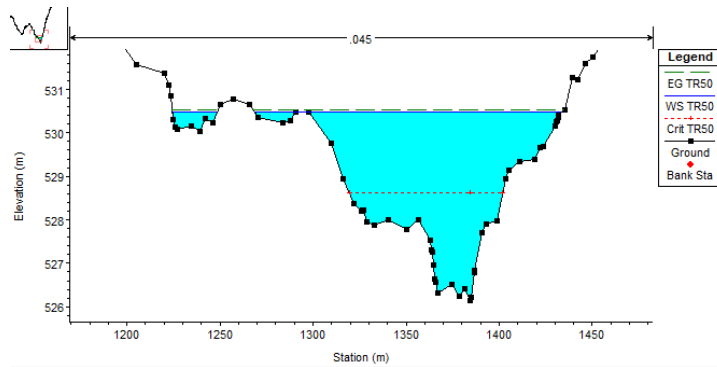
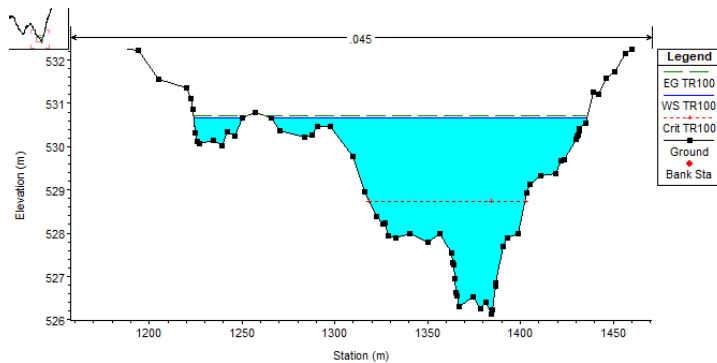


Figura 11: Resultados da secção 11257 para o TR 100

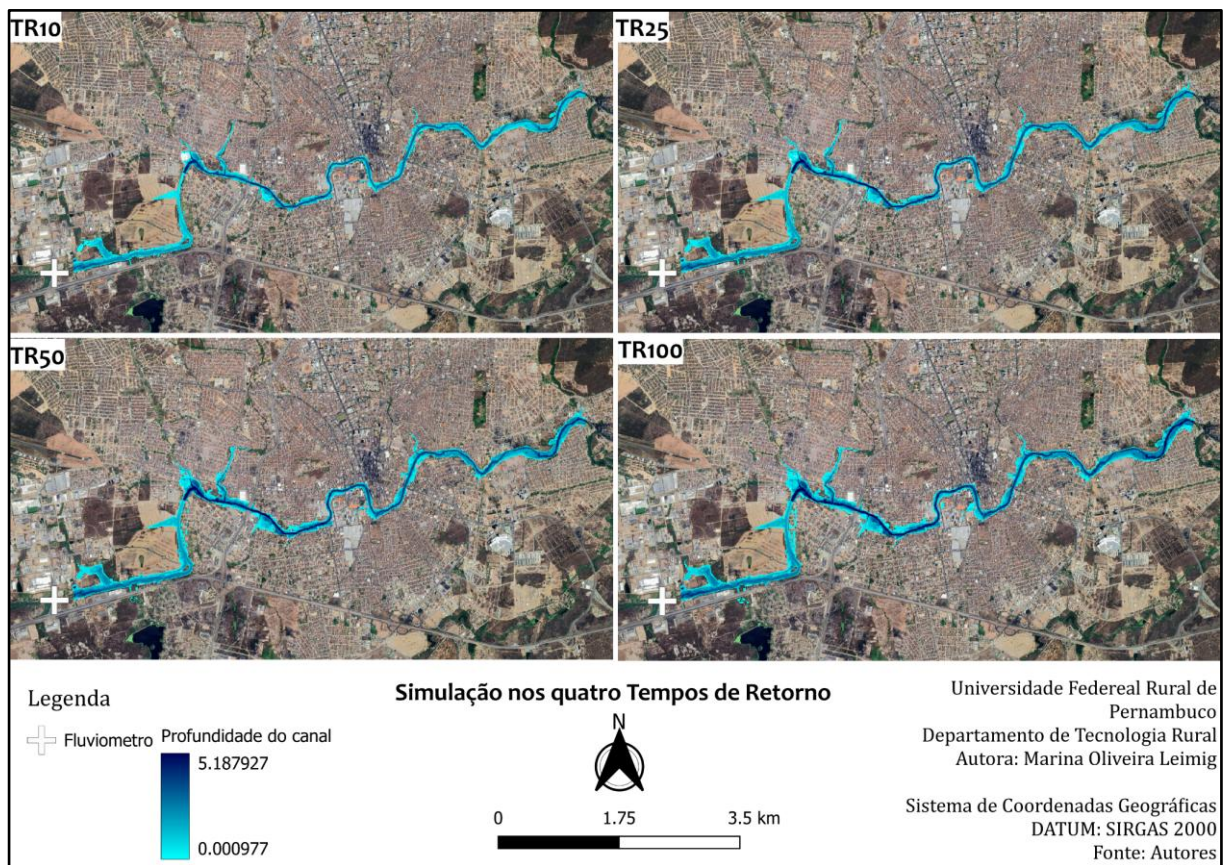


Constatou-se que um tempo de retorno de dez anos é suficiente para ocasionar a extrapolação da calha do rio. Isso denota que até mesmo vazões de menor magnitude geram impactos na região, na seção e em toda a extensão da mancha de inundação, conforme ilustrado na imagem abaixo, e que tais impactos se intensificam com o aumento do tempo de retorno.

4.3. Regiões suscetíveis a inundação no trecho de Caruaru

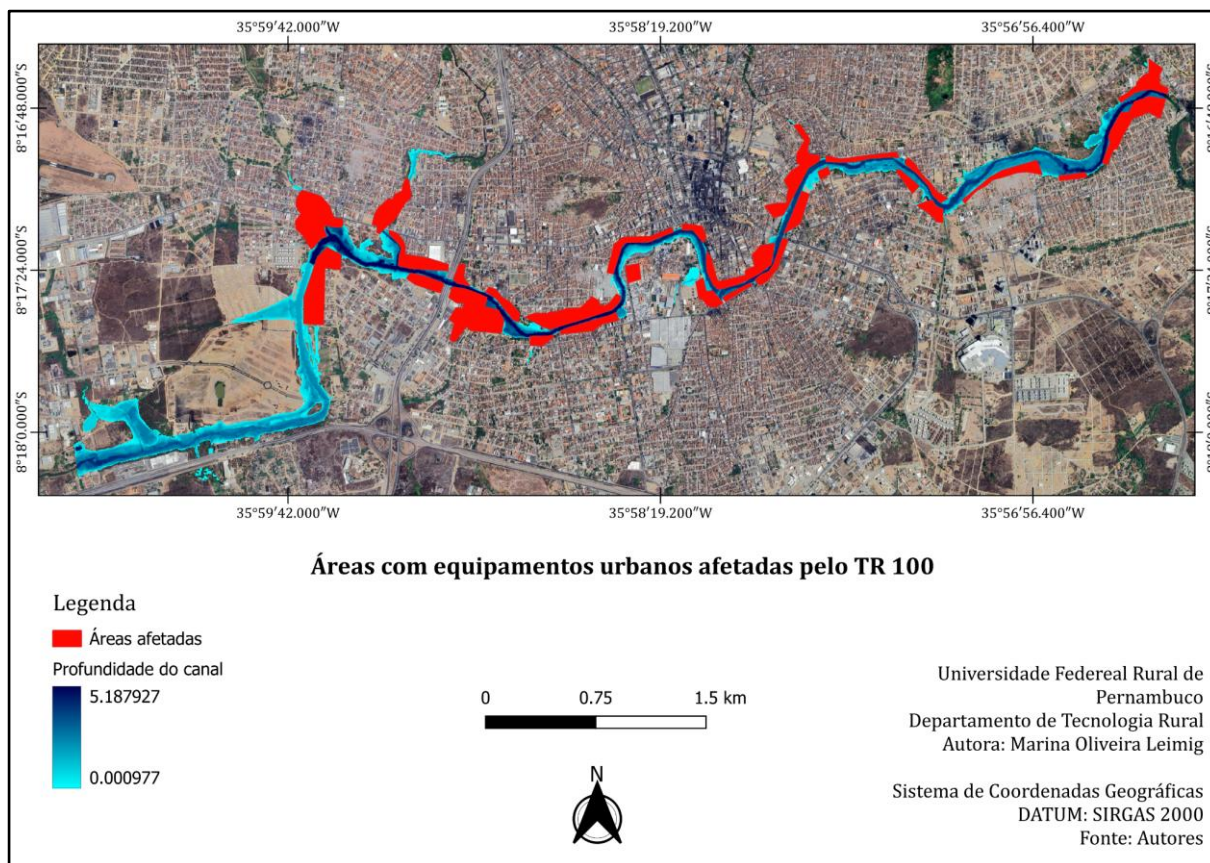
No Mapa 5 é possível ver a inundação simulada e a área urbana de Caruaru sobrepostas.

Mapa 5: Simulação nos quatro Tempos de Retorno



Verifica-se a persistência da mancha de inundação ao longo do trecho em questão, com uma constância na largura da área impactada em relação ao eixo principal do rio. Tais resultados são aptos a identificar as áreas com edificações residenciais e comerciais que seriam mais afetadas ao longo do percurso. Em suma, foram identificadas 29 áreas contendo esses equipamentos urbanos, como residências, estabelecimentos comerciais e quadras, expostas no Mapa 6.

Mapa 6: Áreas com equipamentos urbanos afetadas pelo TR 100



Regiões previamente identificadas como suscetíveis a inundações, como os bairros do Salgado e Maurício de Nassau, foram mapeadas (Silva et al., 2020). Adicionalmente, Pereira et al. (2024) conduziram uma simulação de rompimento de barragem na mesma área, cujos resultados se assemelham às áreas delineadas neste estudo. Isso indica que o modelo demonstrou precisão na identificação de localidades consideradas críticas.

5. CONCLUSÕES

O presente estudo aprofundou a caracterização morfométrica da bacia do Rio Ipojuca, empregando a ferramenta QGIS para analisar detalhadamente suas características físicas. Os resultados iniciais sugeriram que a bacia, em si, não estaria intrinsecamente sujeita a riscos elevados de inundações. No entanto, essa conclusão contrasta com a realidade observada, onde a bacia tem sido palco de diversos desastres hidrológicos, com particular intensidade em áreas urbanizadas dos municípios que a compõem. Essa dissonância aponta para uma forte correlação entre a ocorrência desses eventos extremos e o uso e ocupação inadequados do solo ao longo da bacia, evidenciando a necessidade de uma gestão territorial mais eficaz e sustentável.

Para complementar a análise morfométrica e compreender melhor a dinâmica hidrológica da bacia, foram utilizados dados de vazão provenientes do Hidroweb. Esses dados foram processados com a ferramenta SisCah, que permitiu a determinação das vazões de pico para diferentes tempos de retorno, especificamente 10, 25, 50 e 100 anos, em um trecho selecionado da bacia para uma análise mais aprofundada. Com base nesses dados de vazão, a ferramenta HEC-RAS foi empregada para simular a propagação dessas vazões no trecho estudado. A eficácia do HEC-RAS na simulação demonstrou ser fundamental para a identificação precisa das áreas de maior risco, que seriam as mais afetadas pelos eventos hidrológicos simulados. Essa abordagem integrada, combinando a análise morfométrica com a simulação hidrológica, permitiu uma compreensão mais completa da vulnerabilidade da bacia a eventos extremos e forneceu subsídios importantes para o planejamento de medidas de mitigação e prevenção de desastres.

Uma dificuldade do trabalho se deu pela extensão do Rio Ipojuca, que requer uma análise mais profunda, considerando as diversas áreas urbanas que se encontram transpassadas pelo curso de água. É imprescindível a utilização de técnicas compensatórias, com a colaboração das autoridades locais, para definir as soluções de controle de inundações mais adequadas, sejam elas estruturais ou não estruturais. Contudo, é possível aplicar tais técnicas a montante dos limites municipais, bem como promover a recomposição da cobertura vegetal e a restauração de calhas, as quais apresentam impacto nulo ou mínimo no município (Assis, 2024). Para estudos futuros, o modelo desenvolvido pode ser adaptado para aplicação em outras regiões da bacia do Rio Ipojuca, visando uma análise mais abrangente.

6. REFERÊNCIAS

Agência Nacional De Águas E Saneamento Básico (**Ana**). 2017 Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br>. Acesso Em: 8 Jun. 2025.

Almeida, Thiago Franklin Santos De; Ferraz, Gadadhara De Figueiredo; Alcoforado, Roberta De Melo Guedes. **Zoneamento Pluviométrico Na Bacia Hidrográfica Do Rio Ipojuca (Pe) E Sua Relação Com O Escoamento Dos Cursos Hídricos**. Associação Brasileira De Recursos Hídricos. Xxii Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos. 2017. Disponível em: <https://files.abrhidro.org.br/eventos/trabalhos/60/pap022723.pdf>. Acesso Em: 8 Jun. 2025.

Assis, Marina Da Silva Reis. **Modelagem De Escoamento Permanente E Uniforme Do Rio Itabirito Usando O Hec-Ras**. Monografia (Graduação Em Engenharia Civil) -

Escola De Minas, Universidade Federal De Ouro Preto, Ouro Preto, 2024. Disponível em: <https://monografias.ufop.br/handle/35400000/7414>. Acesso Em: 8 Jun. 2025.

Cprm (Serviço Geológico Do Brasil). **Mapeamento De Áreas De Risco Geológico E De Inundações**. Brasília: Cprm, 2014.

Defesa Civil. **Boletim De Desastres Naturais No Brasil: Balanço De 2023**. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2023.

Embrapa. **Bacia Do Rio Ipojuca**. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/territorios/territorio-mata-sul-pernambucana/caracteristicas-do-territorio/recursos-naturais/recursos-hidricos/bacia-do-rio-ipojuca>. Acesso Em: 8 Jun. 2025.

Ferraz, Caio Mário Leal. **Inundações E Alagamentos Em Meio Urbano: Uma Perspectiva Teórico-Conceitual, Em Abordagem Geomorfológica**. Revista Vozes dos Vales: Publicações Acadêmicas. ISSN: 2238-6424. 2021. Disponível em: <http://site.ufvjm.edu.br/revistamultidisciplinar/files/2021/10/ferraz.pdf>. Acesso Em: 8 Jun. 2025.

Fema (Federal Emergency Management Agency). **Software For Flood Mapping**. 2025. Disponível em: <https://www.fema.gov/flood-maps/software>. Acesso em: 8 Jun. 2025.

Licco, Eduardo Antonio; Dowell, Silvia Ferreira Mac. **Alagamentos, Enchentes Enxurradas E Inundações: Digressões Sobre Seus Impactos Sócio Econômicos E Governança**. Iniciação - Revista De Iniciação Científica, Tecnológica E Artística Edição Temática Em Sustentabilidade Vol. 5 Nº. 3 – Dezembro De 2015, São Paulo: Centro Universitário Senac Issn 2179-474x. Disponível em: https://www1.sp.senac.br/hotsites/blogs/revistainiciacao/wp-content/uploads/2015/12/110_ic_artigo-.pdf. Acesso Em: 8 Jun. 2025.

Medeiros, Raimundo Mainar; Luciano Marcelo Fallé Saboya; Romildo Morant De Holanda; Manoel Vieira De França; Wagner Rodolfo De Araújo. **Bacia Hidrográfica Do Rio Ipojuca-Pe, Brasil E Suas Análises Pluviométricas**. Recima21 - Revista Científica Multidisciplinar - Issn 2675-6218, 2(5), E25384. (2021). Disponível em: <https://recima21.com.br/index.php/recima21/article/view/384>. Acesso Em: 8 Jun. 2025.

Mdpi. **Flood Hazard And Risk Mapping By Applying An Explainable Machine Learning Framework Using Satellite Imagery And Gis Data**. 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/6/3251>. Acesso Em: 8 Jun. 2025.

NEGRI, R.; FILL, H.. **Caracterização física de 14 bacias hidrográficas brasileiras: proposição do indicador da declividade média dos rios e do coeficiente de suscetibilidade de enchentes**. Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 28, p. e20220194, 2023. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/y6pbxh8PM7Nfrch3VSDQPwj/>. Acesso Em: 8 Jun. 2025.

Pereira, A. M.; Silva, S. R.; Pedrosa, H.T.S.; Alves, I.S.;Oliveira, J.T.; Andrade Junior, J.J. **Análise Da Propagação De Cheias Resultante De Rompimentos Em Cascata Hipotéticos De Barragens Localizadas No Município De Caruaru-Pe**. Revista 24

Brasileira De Geografia Física V.17, N.1, (2024), 529-546. Disponível em: <https://Periodicos.Ufpe.Br/Revistas/Index.Php/Rbgfe/Article/View/257700/45695>. Acesso Em: 8 Jun. 2025.

Porto, R. L. L.; Pereira, D. O.; Tucci, C. E. M. **Modelagem De Enchentes Urbanas**. Porto Alegre: Abrh, 2015.

Salgueiro, João Hipólito Paiva De Britto. **Avaliação De Rede Pluviométrica E Análise De Variabilidade Espacial Da Precipitação: Estudo De Caso Na Bacia Do Rio Ipojuca Em Pernambuco** / João Hipólito Paiva De Britto Salgueiro. – Recife: O Autor, 2005. Xvi, 122 Folhas : Il., Fig., Tab. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal De Pernambuco. Ctg. Engenharia Civil, 2005. Disponível em: https://Rigeo.Sgb.Gov.Br/Bitstream/Doc/187/1/Diss_salgueiro.Pdf. Acesso Em: 8 Jun. 2025.

Scispace. **Hydrological And Hydraulic Modeling For Flood Analysis: A Case Study For Modi Catchment**. 2021. Disponível em: <https://Scispace.Com/Pdf/Hydrological-And-Hydraulic-Modeling-For-Flood-Analysis-A-3gj8qt1008.Pdf>. Acesso Em: 8 Jun. 2025.

Sedec (Secretaria Nacional De Proteção E Defesa Civil). **Plano De Contingência: Guia Para Elaboração**. Brasília: Sedec, 2013.

Silva, João Pedro Do Nascimento E; Farias, Mirelly De Oliveira; Junior, Edmilton Queiroz De Sousa; Coutinho, Artur Paiva; Cirilo José Almir. **Análise De Área De Inundação Às Margens Do Riacho Salgado No Município De Caruaru Utilizando Geotecnologias**. Xv Srhne - Simpósio De Recursos Hídricos Do Nordeste. 2020. Disponível em: <https://Anais.Abrhidro.Org.Br/Job.Php?Job=6853>. Acesso Em: 8 Jun. 2025.

Snis (Sistema Nacional De Informações Sobre Saneamento). Série Histórica. Secretaria Nacional De Saneamento Ambiental [Snsa]. Disponível em: <https://App4.Cidades.Gov.Br/Seriehistorica/>. Acesso Em: 8 Jun. 2025.

Tominaga, L. K.; Santos, M. C. N.; Cavalcante, P. M. B. (Org.). **Desastres Naturais: Conhecer Para Prevenir**. Brasília, Df: Ibama, 2009.

Tucci, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: Ciência E Aplicação**. 4. Ed. Porto Alegre: Abrh, 2012. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/520179125/Hidrologia-Ciencia-e-Applicacao-4%C2%AA-Ed-Tucci>. Acesso Em: 8 Jun. 2025.

Undrr (United Nations Office For Disaster Risk Reduction). **Sendai Framework For Disaster Risk Reduction 2015-2030**. Genebra: Undrr, 2015. Disponível em: <https://Www.Undrr.Org/Publication/Sendai-Framework-Disaster-Risk-Reduction-2015-2030>. Acesso Em: 8 Jun. 2025.