



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO (UFPE)
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS (CTG)
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL (DECIV)
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL (PPGEC)

ARIVÂNIA BANDEIRA RODRIGUES

**MANEJO SUSTENTÁVEL DAS ÁGUAS URBANAS E RESILIÊNCIA EM CIDADE
LITORÂNEA SOB A INFLUÊNCIA DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS**

Recife - PE

2025

ARIVÂNIA BANDEIRA RODRIGUES

**MANEJO SUSTENTÁVEL DAS ÁGUAS URBANAS E RESILIÊNCIA EM CIDADE
LITORÂNEA SOB A INFLUÊNCIA DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil, Área de Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral

Recife - PE

2025

Catálogo de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Rodrigues, Arivania Bandeira.

Manejo sustentável das águas urbanas e resiliência em cidade litorânea sob a influência das alterações climáticas / Arivania Bandeira Rodrigues. - Recife, 2025.

178f.: il.

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

Orientação: Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral.

Inclui referências e apêndices.

1. Resiliência urbana; 2. IDF futura; 3. CMIP6; 4. Uso do solo futuro; 5. Adaptação. I. Cabral, Jaime Joaquim da Silva Pereira. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

ARIVÂNIA BANDEIRA RODRIGUES

MANEJO SUSTENTÁVEL DAS ÁGUAS URBANAS E RESILIÊNCIA EM CIDADE LITORÂNEA SOB A INFLUÊNCIA DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

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

Aprovada em 06/05/2025

Orientador: Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral, UPE

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Leidjane Maria Maciel de Oliveira (examinadora interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Willames de Albuquerque Soares (examinador externo)
Universidade de Pernambuco

participação por videoconferência
Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra (examinador externo)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência
Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo (examinador externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto (examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

A Deus por sua bondade eterna e fortaleza para mais um desafio.

Aos meus pais, pelo exemplo de luta, força, incentivo e pelo amor incondicional durante mais uma jornada.

À minha irmã, avós, tios, primos pelo apoio, orações e o conforto quando precisei e demais familiares que formam um suporte fundamental para mim.

Ao meu noivo, por todo amor, acolhimento e apoio.

Aos amigos do GRH pelo companheirismo, dúvidas compartilhadas, conhecimento adquirido e também os momentos de descontração, em especial à Vanine e Diego, ao Grupo de Drenagem Urbana e os Varzeanos.

Aos professores do Galpão de Recursos Hídricos por todo apoio, amizade e conhecimentos transmitidos.

Ao meu orientador Jaime Cabral, pelo imensurável conhecimento transmitido, dedicação, suporte e incentivo na busca por sempre melhorar.

Aos funcionários do GRH e Pós-Graduação em Engenharia Civil, por toda colaboração e contribuição para a execução desse trabalho.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte de mais uma conquista em minha formação, o meu muito obrigada.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

Recife, capital do estado de Pernambuco e uma das principais cidades costeiras do Brasil, apresenta alta vulnerabilidade aos impactos das mudanças climáticas em razão de sua baixa altitude, elevada densidade populacional, intensa impermeabilização do solo e ocupação em áreas de planície. Esses fatores, associados à intensificação de eventos extremos de precipitação, têm agravado o risco de inundações urbanas, exigindo abordagens integradas que articulem variáveis climáticas, territoriais e socioambientais. Diante desse contexto, esta pesquisa propõe uma avaliação abrangente da resiliência urbana frente às inundações, com foco na bacia do rio Jiquiá, situada integralmente em Recife e representativa dos desafios urbanos e hídricos enfrentados pela cidade. A metodologia adotada combina revisão das estratégias institucionais de adaptação climática com modelagens preditivas de uso do solo, atualização de curvas intensidade–duração–frequência (IDF) a partir de projeções do modelo climático MIROC6 (CMIP6) para diferentes cenários de emissões, simulações hidrodinâmicas com auxílio do HEC-RAS 2D e aplicação de um índice especializado de resiliência urbana (UFRI). Os resultados indicam tendência de intensificação de eventos extremos de curta duração, mesmo diante da redução nas precipitações acumuladas anuais, o que eleva a pressão sobre a infraestrutura de drenagem urbana. Simultaneamente, a expansão da urbanização projetada até 2080 revela ocupação crescente sobre áreas ambientalmente sensíveis, com substituição significativa de vegetação por cobertura construída. As simulações hidrodinâmicas demonstram que, embora a área total inundada apresente variações pouco expressivas entre os diferentes cenários combinados de uso do solo e precipitação, a criticidade das lâminas d'água aumenta substancialmente, com destaque para os tempos de retorno de 50 e 100 anos, em que se observa ampliação de até 159% nas áreas classificadas como críticas ($>1,5$ m). A aplicação do índice de resiliência (UFRI) à bacia do rio Jiquiá evidencia predominância de níveis baixos e muito baixos, especialmente em setores com elevada densidade populacional e limitada capacidade institucional de enfrentamento, apontando para a necessidade de intervenções territoriais direcionadas. A integração entre projeções climáticas, análise das transformações do uso do solo, modelagem hidrodinâmica e avaliação multicritério da resiliência demonstra-se uma abordagem eficaz para antecipar cenários de risco e subsidiar o planejamento urbano adaptativo. A pesquisa reforça a importância de políticas públicas que incorporem soluções baseadas na natureza, infraestrutura verde, restrição de ocupação em zonas críticas e fortalecimento da governança participativa, como caminhos fundamentais para promover a resiliência urbana em cidades costeiras tropicais frente às mudanças climáticas.

Palavras-chave: Resiliência Urbana; IDF futura; CMIP6; Uso do solo futuro; Adaptação.

ABSTRACT

Recife, the capital of Pernambuco and one of Brazil's main coastal cities, is highly vulnerable to the impacts of climate change because of its low elevation, high population density, extensive land-surface sealing, and occupation of floodplain areas. These factors, combined with the intensification of extreme precipitation events, have heightened the risk of urban flooding, demanding integrated approaches that link climatic, territorial, and socio-environmental variables. In this context, the present study offers a comprehensive assessment of urban flood resilience, focusing on the Jiquiá River basin—which lies entirely within Recife and epitomizes the city's urban and hydrological challenges. The methodology integrates a review of institutional climate-adaptation strategies with predictive land-use modelling, updates intensity–duration–frequency (IDF) curves using MIROC6 (CMIP6) projections for various emission scenarios, conducts hydrodynamic simulations in HEC-RAS 2D, and applies a spatially explicit Urban Flood Resilience Index (UFRI). Results indicate a tendency toward more frequent short-duration extremes even as annual rainfall totals decline, increasing pressure on the drainage infrastructure. Simultaneously, urban expansion projected through 2080 shows growing encroachment on environmentally sensitive areas, with significant replacement of vegetation by built cover. Hydrodynamic simulations reveal that, while total inundated area changes little among combined land-use and rainfall scenarios, water-depth severity rises markedly; for 50- and 100-year return periods, areas classified as critical (> 1.5 m) expand by up to 159 %. Applying the UFRI to the Jiquiá basin shows a predominance of low and very low resilience levels, especially in sectors with high population density and limited institutional capacity, underscoring the need for targeted territorial interventions. The integration of climate projections, land-use change analysis, hydrodynamic modelling, and multicriteria resilience evaluation proves effective for anticipating risk scenarios and supporting adaptive urban planning. The study reinforces the importance of public policies that embed nature-based solutions, green infrastructure, restrictions on development in critical zones, and stronger participatory governance as fundamental pathways to foster urban resilience in tropical coastal cities under climate change.

Keywords: Urban Resilience; Future IDF; CMIP6; Future Land Use; Adaptation.

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO 1: ESTRATÉGIAS DE RESILIÊNCIA URBANA NO CONTEXTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS: A EXPERIÊNCIA DE UMA CIDADE COSTEIRA ALTAMENTE URBANIZADANO BRASIL.

Figura 1 -	Etapas Metodológicas para Análise Integrada da Resiliência Urbana.	27
Figura 2 -	Bacias hidrográficas e rede de rios na cidade de Recife-PE.	30
Figura 3 -	Modelo do Ecocesto em PEAD (A) e Fibra (B) com material proveniente de descarte irregular; Ecobarreira em funcionamento com remoção dos resíduos (C) e finalização da limpeza (D) no Canal do Vasco da Gama (bairro Arruda) e Implantação da Barragem Móvel (E) no Canal Derby Tacaruna na Avenida Agamenon Magalhães em Recife.	36
Figura 4 -	Barragens de contenção de cheias na Bacia do Rio Capibaribe.	37
Figura 5 -	Temáticas estratégicas relacionadas à resiliência urbana.	43

ARTIGO 2: ATUALIZAÇÃO DAS CURVAS DE INTENSIDADE-DURAÇÃO-FREQUÊNCIA DE RECIFE-PE EM DIFERENTES CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS.

Figura 1 -	Fluxograma das etapas metodológicas.	56
Figura 2 -	Localização da área de estudo, Recife-PE.	57
Figura 3 -	Anomalias de precipitação para Recife-PE até o final do século, com base no modelo MIROC6 para os cenários SSP 2-4.5 e SSP 5-8.5. A) 2015–2044; B) 2045–2074; C) 2075–2100. Var. = mudança de precipitação em %.	64
Figura 4 -	Mudança relativa dos índices de precipitação para os cenários futuros a curto, médio e longo prazo para o Recife.	66
Figura 5 -	Curvas IDF para Recife-PE até o final do século, com base no modelo MIROC do CMIP6 para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 em diferentes períodos: curto (2015–2044), médio (2045–2074) e longo prazo (2075–2100).	67

ARTIGO 3: MODELAGEM PREDITIVA DA DINÂMICA DE USO E COBERTURA DO SOLO PARA UMA CIDADE URBANA COSTEIRA NO BRASIL.

Figura 1 -	Localização da área de estudo destacando o município de Recife, Pernambuco, Brasil.	74
Figura 2 -	Etapas metodológicas da simulação de uso e ocupação do solo utilizando o plugin MOLUSCE integrado ao software QGIS.	80
Figura 3 -	Mapa de LULC do Recife em 2020 (referência) e mapa de LULC simulado pelo modelo para o mesmo período.	81
Figura 4 -	Mudanças no LULC em Recife, Brasil, entre 1990 e 2080.	82
Figura 5 -	Diagrama de Sankey ilustrando as transições LULC (1990–2080) para Recife, Brasil.	84
Figura 6 -	Variação espaço - temporal em LULC entre 1990 e 2080.	84
Figura 7 -	Evolução das áreas florestais associadas às unidades de conservação e áreas de proteção ambiental em Recife, Brasil, ao longo dos anos.	86
Figura 8 -	Classificação da suscetibilidade a movimentos de massa e inundações em Recife para o período analisado.	88
Figura 9 -	Estratégias integradas para mitigação de riscos e promoção da resiliência urbana.	91
Figura 10 -	Proposta de revitalização do Parque Jiquiá.	92

ARTIGO 4: IMPACTOS DO USO FUTURO DO SOLO E DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA DINÂMICA DE INUNDAÇÕES EM PLANÍCIE URBANA.

Figura 1 -	Fluxograma de metodologia aplicada no estudo.	103
Figura 2 -	Principais bacias hidrográficas com destaque para a Bacia do Rio Jiquiá.	104
Figura 3 -	Representação das faixas de normalização da profundidade.	105
Figura 4 -	Uso e ocupação do solo na bacia do rio Jiquiá para o cenário atual e futuro.	109
Figura 5 -	CN espacializado para a bacia do Rio Jiquiá.	109
Figura 6 -	Evento de precipitação intensa ocorrido entre os dias 3-6 /02/2025 para o Posto Imbiribeira.	110
Figura 7 -	Distribuição percentual das chuvas associadas ao 3º quartil de acordo com o Método de Huff.	111
Figura 8 -	Pontos de monitoramento de nível no Rio Jiquiá.	112
Figura 9 -	Manchas de inundação para evento de precipitação intensa entre os dias 3 e 7 de fevereiro de 2025 para a Bacia do Rio Jiquiá.	114
Figura 10 -	Distribuição espacial das profundidades de inundação no Cenário 1 (uso do solo e precipitação atuais) – TR=25 anos.	116
Figura 11 -	Distribuição espacial das profundidades de inundação no Cenário 2 (uso do solo futuro, precipitação atual) – TR=25 anos.	117
Figura 12 -	Distribuição espacial das profundidades de inundação no Cenário 3 (uso do solo atual, precipitação futura) – TR=25 anos.	118
Figura 13 -	Distribuição espacial das profundidades de inundação no Cenário 4 (uso do solo e precipitação futuros) – TR=25 anos.	119
Figura 14 -	Área inundada por classe de criticidade nos quatro cenários simulados – TR=25 anos.	120
Figura 15 -	Distribuição espacial das profundidades de inundação no Cenário 4 (uso do solo e precipitação futuros) para TR=50 anos e 100 anos (as figuras da direita representam um mapa diferencial mostrando a comparação do aumento de inundação em relação ao Tr de 25 anos).	121
Figura 16 -	Área inundada por classe de criticidade no cenário 4 para TR= 50 anos e 100 anos.	121

ARTIGO 5: AVALIAÇÃO DE RESILIÊNCIA A INUNDAÇÕES URBANAS POR MEIO DE TOMADA DE DECISÃO MULTICRITÉRIO E TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO.

Figura 1 -	Localização da Bacia do Rio Jiquiá, no município de Recife-PE, com destaque para quatro trechos ilustrativos: (1) Estreitamento das margens em função de ocupações irregulares; (2) Destinação inadequada de resíduos sólidos ao longo do curso do rio; (3) e (4) Trechos com maior largura e taludes marginais com presença de vegetação.	135
Figura 2 -	Fluxograma de pesquisa e análise do estudo.	137
Figura 3 - Parte 1	Elementos para cálculo do índice de perigo: a) Hand; c) CN; d) Declividade (%).	141
Figura 3 - Parte 2	Elementos para cálculo do índice de perigo: b) Uso e cobertura do solo; e) Precipitação; f) Manchas de inundação.	142
Figura 4 -	Elementos para cálculo do índice de exposição: a) Renda média mensal; b) Densidade Populacional; c) Instalações de saúde; d) Instalações Educacionais.	144
Figura 5 -	Elementos para cálculo do índice de susceptibilidade: Edifícios comerciais, edifícios residenciais e outros edifícios na área de estudo.	145

Figura 6 -	Elementos para cálculo do índice de capacidade de enfrentamento: a) Capacidade econômica; b) Capacidade institucional; c) Status educacional.	147
Figura 7 -	Processo hierárquico analítico (AHP) como método de ponderação para o presente estudo.	148
Figura 8 -	Índice de Perigo para a bacia do Rio Jiquiá-PE.	153
Figura 9 -	Índice de Exposição e Susceptibilidade para a bacia do Rio Jiquiá-PE.	154
Figura 10 -	Índice de Capacidade de Enfrentamento para a bacia do Rio Jiquiá-PE.	158
Figura 11 -	Índice de Resiliência para a bacia do rio Jiquiá a partir do modelo UFRI.	159
Figura 12 -	Diferença espacializada para o UFRI no cenário futuro.	161

APÊNDICE A - ARTIGO 4: IMPACTOS DO USO FUTURO DO SOLO E DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA DINÂMICA DE INUNDAÇÕES EM PLANÍCIE URBANA.

Figura 1 -	Esquema ilustrativo de instalação do sensor de nível para monitoramento de nível.	174
Figura 2 -	Ilustração da caixa de construção para instalação do sensor.	175

LISTA DE QUADROS

ARTIGO 1: ESTRATÉGIAS DE RESILIÊNCIA URBANA NO CONTEXTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS: A EXPERIÊNCIA DE UMA CIDADE COSTEIRA ALTAMENTE URBANIZADO NO BRASIL.

Quadro 1 -	Conceitos e objetivo adotados nesse estudo para resiliência de engenharia, resiliência ecológica e resiliência socioecológica.	22
Quadro 2 -	Estratégias de Resiliência de Engenharia.	23
Quadro 3 -	Estratégias de Resiliência Ecológica.	24
Quadro 4 -	Plano de ação climático de Recife-PE.	32
Quadro 5 -	Estratégias do Plano Recife 500 anos.	42
Quadro 6 -	Contribuições para auxílio de gestão e manejo das águas pluviais urbanas.	44

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 2: ATUALIZAÇÃO DAS CURVAS DE INTENSIDADE-DURAÇÃO-FREQUÊNCIA DE RECIFE-PE EM DIFERENTES CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS.

Tabela 1 -	Critérios utilizados para seleção do(s) modelo(s) climático(s). MCG = modelo climático global.	60
Tabela 2 -	Desempenho comparativo dos ajustes de função de densidade de probabilidade (FDP) para o Posto Curado, no período de 1980 a 2010.	63
Tabela 3 -	Alteração da precipitação prevista para Recife até o final do século, com base no modelo MIROC do CMIP6 para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5.	65
Tabela 4 -	Comparação da intensidade pluviométrica (mm/h) com duração de 1 hora e 1 dia entre o período atual e futuro para o cenário SSP2-4.5 e SSP5-8.5 em Recife-PE.	69

ARTIGO 4: IMPACTOS DO USO FUTURO DO SOLO E DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA DINÂMICA DE INUNDAÇÕES EM PLANÍCIE URBANA.

Tabela 1 -	Cenários de Simulação.	105
Tabela 2 -	Faixa de normalização da cota de inundação.	106
Tabela 3 -	Dados simplificados para o cadastro da bacia hidrográfica do rio Jiquiá.	107
Tabela 4 -	Valores de referência de <i>manning</i> de acordo com o uso e ocupação do solo.	109
Tabela 5 -	Medidas estatísticas a serem aplicadas na calibração e validação dos dados.	113
Tabela 6 -	Valores de desempenho recomendados para simulações mensais.	113
Tabela 7 -	Coeficiente de <i>manning</i> calibrados de acordo com o uso e ocupação do solo.	114
Tabela 8 -	Coeficientes estatísticos de calibração para a bacia do Rio Jiquiá.	115
Tabela 9 -	Áreas inundadas por classe de criticidade em cada cenário simulado (km ²) e variação percentual em comparação com o cenário 1.	119

ARTIGO 5: AVALIAÇÃO DE RESILIÊNCIA A INUNDAÇÕES URBANAS POR MEIO DE TOMADA DE DECISÃO MULTICRITÉRIO E TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO.

Tabela 1 -	Classificação do índice de Resiliência.	138
Tabela 2 -	Classificação da declividade.	140
Tabela 3 -	Escala de comparação par a par considerada no presente estudo.	149
Tabela 4 -	Matriz de comparação par a par para os índices analisados e pesos.	149
Tabela 5 -	Índice Randômico (IR).	150
Tabela 6 -	Razão de consistência para área de estudo.	151
Tabela 7 -	Quantificação de Áreas de resiliência por classificação.	160
Tabela 8 -	Técnicas compensatórias propostas como solução para uma cidade resiliente.	162

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
CA-ANN	Cellular Automata-Artificial Neural Network
CLIMBra	Climate Change Dataset for Brazil
CMIP6	Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados – Fase 6
ComClima	Comitê de Sustentabilidade e Mudanças Climáticas do Recife
FDP	Função de densidade de probabilidade
GAM-IDF	Genetic Algorithm Methodology for IDF
GEE	Gases do Efeito Estufa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICE	Índice de extremos climáticos
IDF	Intensidade-duração-frequência
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
InSAR	Interferometria com Imagens de Radar
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
LULC	Mudanças no uso e cobertura do solo
Mapbiomas	Projeto de Mapeamento Anual de Uso e Cobertura do Solo do Brasil
MCE	Modelos como avaliação multicritério
MCGs	Modelos Climáticos Globais
MOLUSCE	Módulos para Avaliação de Mudanças no Uso da Terr
NMM	Nível Médio do Mar
NSE	Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliff
PBMC	Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas
PE3D	Pernambuco Tridimensional
PNA	Plano Nacional de Adaptação
PRCPTOT	Precipitação total anual em dias chuvosos
QM	Quantile Mapping
R20mm	Número de dias no ano em que o total diário de precipitação $PRCP \geq 20\text{mm}$
RCPs	Caminhos de Concentração Representativos
RNA	Redes Neurais Artificiais
Rx1day	Precipitação anual máxima de 1 dia (mm)
Rx5day	Precipitação máxima anual consecutiva de 5 dias.

SDII	Índice Simples de Intensidade Diária
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SR	Sensoriamento Remoto
SSPs	Caminhos Socioeconômicos Compartilhados
ZR	Zona Ripária

SUMÁRIO

1 -	INTRODUÇÃO GERAL	13
1.1 -	HIPÓTESE	15
1.2 -	OBJETIVO GERAL	15
1.3 -	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.4 -	ESTRUTURA PROPOSTA PARA A TESE	16
2 -	ARTIGO 1: ESTRATÉGIAS DE RESILIÊNCIA URBANA NO CONTEXTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS: A EXPERIÊNCIA DE UMA CIDADE COSTEIRA ALTAMENTE URBANIZADA NO BRASIL.....	19
3 -	ARTIGO 2: ATUALIZAÇÃO DAS CURVAS DE INTENSIDADE- DURAÇÃO-FREQUÊNCIA DE RECIFE-PE EM DIFERENTES CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS.....	54
4 -	ARTIGO 3: MODELAGEM PREDITIVA DA DINÂMICA DE USO E COBERTURA DO SOLO PARA UMA CIDADE URBANA COSTEIRA NO BRASIL.....	75
5 -	ARTIGO 4: IMPACTOS DO USO FUTURO DO SOLO E DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA DINÂMICA DE INUNDAÇÕES EM PLANÍCIE URBANA.....	101
6 -	ARTIGO 5: AVALIAÇÃO DE RESILIÊNCIA A INUNDAÇÕES URBANAS POR MEIO DE TOMADA DE DECISÃO MULTICRITÉRIO E TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO.....	127
7 -	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	171
	APÊNDICE A - ARTIGO 4: IMPACTOS DO USO FUTURO DO SOLO E DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA DINÂMICA DE INUNDAÇÕES EM PLANÍCIE URBANA.....	174

1. INTRODUÇÃO GERAL

Mudanças climáticas globais, crescimento populacional e vulnerabilidade induzidas pelo uso intensivo do território fez com que comunidades, em todo o mundo experimentassem taxas significativas de mudança (Levy *et al.*, 2015). Os efeitos dessas mudanças destacam as áreas costeiras com um alto grau de exposição ao aumento induzido pelas mudanças climáticas no nível do mar, juntamente com riscos costeiros, precipitações intensas, erosão e inundações. Esses riscos representam ameaças ao aspecto físico, social e econômico das populações expostas (Oktari, 2020; Alifu *et al.*, 2022).

Entre esses fenômenos, as inundações urbanas destacam-se como uma das principais preocupações para o desenvolvimento socioeconômico de regiões vulneráveis, devido às perdas recorrentes de infraestrutura, patrimônio e vidas humanas. Se medidas para aumentar a resiliência dessas comunidades não forem adotadas, as inundações agravarão as repercussões econômicas e de saúde pública (Anwana *et al.*, 2023).

Reduzir a vulnerabilidade e construir resiliência às inundações requer a implementação de uma estratégia abrangente, prática e integrada de gestão de inundações, que geralmente envolve a identificação de zonas de risco de inundação com base no monitoramento e modelagem de inundações, planejamento e regulamentação de uso do solo e o desenvolvimento de sistemas de alerta precoce de enchentes (Mahato *et al.*, 2022).

Nesse contexto, a análise futura das mudanças climáticas e do uso do solo configura-se como uma ferramenta estratégica para o fortalecimento da resiliência urbana, ao permitir a antecipação de riscos crescentes e subsidiar o planejamento urbano sustentável (Cherkauer *et al.*, 2021; Abdrabo *et al.*, 2023). A projeção do aumento na frequência e intensidades das chuvas, conforme indicam cenários climáticos recentes, tende a agravar as inundações, especialmente em áreas urbanas consolidadas. O conhecimento prévio dessas variações, por meio de curvas intensidade-duração-frequência atualizadas, é essencial para a revisão dos critérios de projeto da infraestrutura de drenagem urbana, por exemplo (Almeida *et al.*, 2021).

As mudanças no uso e ocupação do solo, impulsionadas principalmente pela urbanização e crescimento populacional, também exercem um impacto significativo no risco de inundações. A impermeabilização do solo causada pela expansão urbana leva ao aumento do escoamento superficial, resultando em maiores vazões e picos de cheia. A projeção futura desses padrões de ocupação permite identificar áreas de crescimento urbano não planejado que podem apresentar vulnerabilidade elevadas (Esmail *et al.*, 2022).

A combinação entre cenários climáticos e de uso do solo, quando incorporada a modelos hidrodinâmicos, permite uma avaliação mais abrangente e precisa dos riscos de inundação urbana

(Pandey *et al*, 2021; Almeida *et al.*, 2021). Ao compreender os riscos futuros com auxílio de modelagens preditivas, as cidades podem desenvolver estratégias de resiliência e adaptação mais eficazes, proteger suas infraestruturas e populações, e promover um desenvolvimento urbano mais sustentável (Abdrabo *et al*, 2023)

A análise integrada pode então informar medidas de planejamento e controle do uso do solo para mitigar esses riscos, como a preservação de áreas permeáveis, a implementação de infraestrutura verde, padrões de construção mais resilientes (Chen *et al.*, 2022), restrição da ocupação em áreas de planície de inundação (Carvalho *et al*, 2017). Assim como, desenvolver planos urbanos que evitem a exposição de novas áreas e populações a riscos elevados de inundação e que promovam a adaptação em áreas já vulneráveis (Chang *et al*, 2021).

A vulnerabilidade às inundações varia espacialmente e condiciona diretamente a formulação de políticas públicas. Identificar regiões mais suscetíveis é essencial para compreender a capacidade adaptativa das comunidades diante de eventos extremos (Chan *et al*, 2022). Nesse sentido, a resiliência urbana assume um papel central na mitigação de impactos hidrológicos, principalmente, em cidades litorâneas e fortemente urbanizadas, contribuindo para melhor decisão dos gestores frente a desastres. É preciso repensar a relação das cidades com as águas, de uma maneira que permita que a água siga seu fluxo natural, criando zonas úmidas, solos permeáveis, margens de rios restauradas e consequentemente menos danos a população.

Diante desse cenário, a cidade do Recife configura-se como um território estratégico para estudos integrados de mudanças climáticas, uso do solo e dinâmicas de inundação urbana. Localizada no litoral do Nordeste Brasileiro, Recife reúne uma combinação singular de fatores físicos e socioambientais que a colocam entre os principais *hotspots* de risco climático global. De acordo com o IPCC (2007) e o PBMC (2016), a cidade está entre as mais vulneráveis do mundo às mudanças climáticas, devido à sua baixa altitude, elevada densidade populacional, acentuada impermeabilização do solo e ocupação em planície costeira. Essa vulnerabilidade é agravada por uma dinâmica urbana historicamente desordenada, que favorece a ocupação de áreas suscetíveis a inundações mais frequentes e de maior duração.

No contexto da malha hidrográfica do Recife, compreender as dinâmicas locais de escoamento e avaliar a resiliência requer uma abordagem em escala mais refinada, que considere as especificidades das sub-bacias hidrográficas. Entre elas, destaca-se a bacia do rio Jiquiá, sub-bacia principal do rio Tejipió, caracterizada por ser uma área de grande importância socioambiental e cultural, que materializa parte da história recifense através dos remanescentes do antigo campo de pouso do Zeppelin, veículo que sobrevoou os céus pernambucanos durante grande parte da década de 1930. Apesar de não ser extremamente extensa, a bacia do rio Jiquiá apresenta desafios importantes

relacionados à drenagem, mas que ainda viabiliza a implementação de iniciativas de planejamento e desenvolvimento urbano sustentável.

Dessa forma, analisa-se uma abordagem integrada para a avaliação da resiliência urbana frente a inundações, combinando projeções climáticas e de uso do solo, modelagem hidrodinâmica bidimensional e aplicação de um índice espacializado de resiliência. Essa abordagem viabilizará a prevenção e redução dos riscos relacionados à eventos climáticos extremos, além de fomentar uma gestão adaptativa mais eficiente, promovendo a resiliência hídrica na cidade.

1.1 HIPÓTESE

O conhecimento hidrológico e hidrodinâmico frente as mudanças climáticas com o uso e ocupação do solo futuro, irão permitir a identificação de áreas vulneráveis a inundações, que irá contribuir para a formulação de estratégias eficazes de resiliência urbana em cidades costeiras.

1.2 OBJETIVO GERAL

Avaliar a resiliência urbana frente a inundações a partir de uma abordagem integrada de mudanças climáticas e cenários de uso do solo a partir de modelagem preditiva, com auxílio da modelagem hidrodinâmica no município do Recife, com foco na bacia do rio Jiquiá.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar um diagnóstico das estratégias de resiliência urbana e capacidade adaptativa no contexto de Recife;
- Projeção das curvas intensidade–duração–frequência (IDF) para o Recife mediante cenários do modelo climático global do CMIP6;
- Projetar e analisar a evolução do uso e ocupação do solo do Recife utilizando modelagem preditiva;
- Avaliar inundações na bacia do rio Jiquiá (Recife-PE) por meio de modelagem hidrodinâmica, integrando cenários de uso do solo (atual e futuro) e precipitação obtida de curvas IDF presentes (PMDR) e futuras (CMIP6 – MIROC6, SSP2-4.5).
- Avaliar a resiliência a inundações da bacia do rio Jiquiá para apoiar a tomada de decisão na gestão de riscos às inundações.

1.4 ESTRUTURA PROPOSTA PARA A TESE

A estrutura da tese compreenderá sete capítulos, sendo que cinco destes serão organizados no formato de artigos científicos. O Capítulo 1 oferece uma introdução abrangente à tese, destacando as hipóteses, objetivos gerais e específicos.

A sequência de artigos inicia no Capítulo 2, dedicado ao diagnóstico das estratégias de resiliência urbana e da capacidade adaptativa do Recife. Além de examinar as políticas públicas, instrumentos legais e iniciativas já implementadas na cidade, destaca a importância do fortalecimento da resiliência urbana.

O capítulo 3 analisará as projeções climáticas do CMIP6 para o Recife, atualizando as curvas intensidade-duração-frequência (IDF) no cenário de curto, médio e longo prazo, incluindo a correção de vies, análises estatísticas para seleção dos modelos e obtenção de índices climáticos básicos.

O capítulo 4 abordará a partir de modelagem preditiva a dinâmica de uso e ocupação do solo, projetando cenários de expansão urbana até 2080 e como essas transformações podem impactar o sistema de drenagem urbana.

Já o capítulo 5 integrará cenários de uso e ocupação do solo no presente e futuro, IDF atual e com base em mudanças climáticas, em um modelo hidrodinâmico 2D no HEC-RAS. O capítulo apresenta também a calibração do modelo e simulação das manchas de inundação com foco na bacia do rio Jiquiá.

O Capítulo 6 avaliará a resiliência a inundações urbanas por meio do índice UFRI, com auxílio de tomada de decisão multicritério e técnicas de geoprocessamento na bacia do Rio Jiquiá. O resultado final combina índices de perigo, exposição, susceptibilidade e capacidade de enfrentamento, tanto para o cenário atual como para o cenário futuro, integrando uso e ocupação do solo, mudanças climáticas e manchas de inundação.

No Capítulo 7, são apresentados de maneira objetiva os principais resultados obtidos da tese.

REFERÊNCIAS

ABDRABO, K. I., KANTOUSH, S. A., ESMAIEL, A., SABER, M., SUMI, T., ALMAMARI, M., ELBOSHY, B., E GHONIEM, S. (2023). An integrated indicator-based approach for constructing an urban flood vulnerability index as an urban decision-making tool using the PCA and AHP techniques: A case study of Alexandria, Egypt. *Urban Climate*, 48. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101426>.

ALIFU, H., HIRABAYASHI, Y., IMADA, Y., & SHIOGAMA, H. (2022). Enhancement of river flooding due to global warming. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25182-6>

ALMEIDA, M. D. C., TELHADO, M. J., MORAIS, M., E BARREIRO, J. (2021). Multisector risk identification to assess resilience to flooding. *Climate*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/cli9050073>

ANWANA, E. O.; OWOJORI, O. M. (2023). Analysis of flooding vulnerability in informal settlements literature: Mapping and research agenda. *Social Sciences*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/socsci12010040>

CARVALHO, A. T. F.; SILVA, O. G.; CABRAL, J. J. S. P. (2017). Efeitos do Revestimento de Canal e Impermeabilização do Solo à Dinâmica de Inundação do Rio Arrombados -PE. *Geociências*, v. 36, n. 1, p. 76-88, UNESP – São Paulo.

CHAN, S. W. ; ABID, X. K.; SULAIMAN, N.; NAZIR, U.; AZAM, K. (2022). A systematic review of the flood vulnerability using geographic information system. *Heliyon*, Volume 8, Issue 3, e09075. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09075>.

CHANG, H., PALLATHADKA, A., SAUER, J., GRIMM, N. B., ZIMMERMAN, R., CHENG, C., IWANIEC, D. M., KIM, Y., LLOYD, R., MCPHEARSON, T., ROSENZWEIG, B., TROXLER, T., WELTY, C., BRENNER, R., & HERREROS-CANTIS, P. (2021). Assessment of urban flood vulnerability using the social-ecological-technological systems framework in six US cities. *Sustainable Cities and Society*, 68. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102786>

CHEN, H.; LIU, Y.; HU, L.; ZHANG, Z.; CHEN, Y.; TAN, Y.; HAN, Y. Constructing a Flood-Adaptive Ecological Security Pattern from the Perspective of Ecological Resilience: A Case Study of the Main Urban Area in Wuhan. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2023, 20, 385. <https://doi.org/10.3390/ijerph20010385>

CHERKAUER, K. A., BOWLING, L. C., BYUN, K., CHAUBEY, I., CHIN, N., FICKLIN, D. L., HAMLET, A. F., KINES, S. J., LEE, C. I., NEUPANE, R., PIGNOTTI, G. W., RAHMAN, S., SINGH, S., FEMEENA, P. V., & WILLIAMSON, T. N. (2021). Climate change impacts and strategies for adaptation for water resource management in Indiana. *Climatic Change*, 165(1–2). <https://doi.org/10.1007/s10584-021-02979-4>

ESMAIEL, A.; ABDRABO, K. I.; MOHAMED, S.; SLIUZAS, R.V.; ATUN, F.; KANTOUSH, S.A.; SUMI, T. (2022). Integration of flood risk assessment and spatial planning for disaster management in Egypt. *Progress in Disaster Science*, Volume 15, 100245. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2022.100245>.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. (2007). Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Summary for policymakers. In: Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.

LEVY B.S.; PATZ J.A. (2015). Climate change, human rights, and social justice. *Ann Glob Health*; 81(3):310–22. <https://doi.org/10.1016/j.aogh.2015.08.008>.

MAHATO, P. K., SINGH, D., BHARATI, B., GAGNON, A. S., SINGH, B. B., & BREMA, J. (2022). Assessing the impacts of human interventions and climate change on fluvial flooding using CMIP6 data and GIS-based hydrologic and hydraulic models. *Geocarto International*, 37(26), 11483–11508. <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2060311>

OKTARI, R. S.; COMFORT, L.K.; SYAMSIDIK; DWITAMA, P. (2020). Measuring coastal cities' resilience toward coastal hazards: Instrument development and validation. *Progress in Disaster Science* 5.

PANDEY, B. K.; DEEPAK, K.; KAWASAKI, A.; MESHESHA, T. W. (2021). Integrated approach to simulate hydrological responses to land use dynamics and climate change scenarios employing scoring method in upper Narmada basin, India. *Journal of Hydrology*, Volume 598, 126429. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126429>.

PBMC – PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. (2016). Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas [MARENGO, J. A.; SCARANO, F. R. (eds)]. PBMC, COPPE - UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 184 p.

2. ARTIGO 1: ESTRATÉGIAS DE RESILIÊNCIA URBANA NO CONTEXTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS: A EXPERIÊNCIA DE UMA CIDADE COSTEIRA ALTAMENTE URBANIZADA NO BRASIL.

RESUMO

O estudo analisa as estratégias de resiliência urbana adotadas pela cidade de Recife, cidade costeira altamente urbanizada localizada no Nordeste Brasileiro no enfrentamento às mudanças climáticas, com foco em inundações urbanas, um dos desastres naturais mais frequentes. A pesquisa parte da identificação dos principais desafios impostos pela urbanização acelerada, agravados pela elevação do nível do mar e eventos climáticos extremos. A metodologia utilizada combina uma revisão bibliográfica com análises qualitativas de dados da cidade, além de um estudo detalhado das políticas públicas e da participação comunitária na gestão de riscos climáticos. Os resultados mostram que Recife, por meio de ações inovadoras, como a criação de parques alagáveis, barragem móvel, ecocostos, sistemas de drenagem sustentáveis e a integração de infraestrutura verde, como o Parque das Graças e a Praça do Baobá, tem se destacado na implementação de soluções resilientes. Além disso, a cidade é pioneira no Brasil ao adotar um plano climático que visa a neutralidade de carbono até 2050. As conclusões ressaltam a importância de uma abordagem integrada que combine resiliência de engenharia, ecológica e socioecológica, além de contribuir com a governança local e o envolvimento comunitário para enfrentar os desafios climáticos. Este estudo oferece uma base sólida para o desenvolvimento de políticas públicas em cidades costeiras vulneráveis.

Palavras-Chave: Resiliência de Engenharia; Resiliência Ecológica; Resiliência Socioecológica; Mitigação.

1. INTRODUÇÃO

As inundações estão entre os desastres naturais mais catastróficos, frequentes e generalizados em todo o mundo, causando graves danos econômicos e ambientais (Shuaibu *et al.*, 2022). Os desafios representados pelas inundações urbanas, podem ter grandes impactos na saúde e no bem-estar das pessoas, tanto a curto como a longo prazo, e através de impactos diretos e indiretos do perigo, e assim exigem estratégias de resiliência para garantir que as cidades possam se adaptar e responder a tais eventos de forma sustentável. Sobre isso, o relatório de avaliação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) informa que os riscos relacionados aos eventos climáticos extremos, tais como precipitação intensa e inundações costeiras (devido ao aumento do nível do mar), já se mostram de moderado a alto podendo gerar impactos desastrosos nas grandes capitais, sendo agravado pelo uso inadequado do solo e de técnicas pouco eficientes de drenagem (IPCC, 2014). Logo, gerenciar o risco de desastres e proteger a saúde e o bem-estar das populações contra perigos naturais está se tornando cada vez mais importante (Mason *et al.*, 2021).

A mudança climática global e a urbanização exigem preocupações públicas e acadêmicas de melhoria da resiliência a inundações urbanas, especialmente para os países em desenvolvimento, que sofrem com inundações urbanas cada vez mais severas (Zhu *et al.*, 2023). Cobbinah *et al.* (2019) argumentam que o planejamento urbano pode abordar adequadamente os impactos das mudanças climáticas enquanto prepara as áreas urbanas para serem mais proativas e adaptáveis aos impactos

das mudanças climáticas por meio de parcerias eficazes. Anteriormente, a abordagem da engenharia hidráulica visava retificar o leito do rio, permitindo que o fluxo de água fluísse rapidamente para jusante, criando espaço para o desenvolvimento urbano. No entanto, essa abordagem resultou em problemas de inundação e, gradativamente, houve uma mudança em direção a uma engenharia mais resiliente, capaz de se recuperar melhor dos impactos. Isso levou a uma modificação nas decisões relacionadas à construção de infraestrutura nas cidades, incorporando a gestão dos recursos hídricos dos rios e riachos urbanos (Wheater e Evans, 2009). Essa abordagem mais resiliente busca equilibrar as necessidades humanas com a capacidade natural do ambiente para lidar com eventos extremos, promovendo a segurança e a sustentabilidade das comunidades ribeirinhas.

Complementarmente, ao longo dos anos, houve uma expansão significativa nas discussões relacionadas às inundações, com uma evolução conceitual importante. Além dos aspectos técnicos que eram levados em conta anteriormente, verificou-se a necessidade de realizar também uma eficiente gestão das águas urbanas. O conceito de gestão de inundações deixou de ser baseado exclusivamente na análise de vulnerabilidade e risco, passando a incorporar elementos de resiliência e, posteriormente, integração com a gestão sustentável (Wang *et al.*, 2022). Essa mudança de paradigma reflete uma compreensão mais abrangente e holística das inundações como eventos complexos, nos quais uma abordagem centrada exclusivamente na defesa ou mitigação não é suficiente. Em vez disso, a gestão de inundações agora busca combinar estratégias de redução de riscos com a promoção da resiliência, ou seja, a capacidade de se adaptar, absorver e se recuperar dos impactos das inundações.

Para garantir um futuro sustentável, o planejamento urbano deve ser gerido de forma adequada, levando em consideração as mudanças climáticas e o aumento da urbanização. Dessa maneira, a gestão do risco de inundação abrange uma ampla gama de estratégias, desde a previsão de perigos e vulnerabilidades de inundação até os efeitos sociais e as medidas e ferramentas de redução de risco (Wu *et al.*, 2021).

A cidade de Recife, situada no Nordeste Brasileiro, está sendo considerada um “*hotspots*” por pesquisadores de mudanças climáticas. O IPCC identifica Recife como uma das cidades mais vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas globais devido à sua localização geográfica e à história de expansão urbana. No entanto, Recife se destaca ao se tornar a primeira cidade do Brasil a oficialmente declarar o estado de emergência climática e estabelecer o ambicioso objetivo de alcançar neutralidade de carbono até 2050 (IPCC, 2007). Também, segundo PBMC (2016), o Recife está entre as cidades do mundo mais vulnerável às mudanças climáticas devido às características físicas e sociais, à alta densidade populacional do seu litoral, ao elevado índice de impermeabilização do solo

e à baixa altitude. O *Carbon Disclosure Project* (Leão *et al.*, 2021) posiciona Recife entre as 88 cidades do Mundo que em 2020 lideraram o combate à crise climática.

Considerando que a adaptação climática e a resiliência urbana devem ser objetivos-chave no planejamento e na implementação de políticas de zonas costeiras globais, apresenta-se, a partir de análises qualitativas e conhecimento local, este artigo, que visa caracterizar e diagnosticar o município de Recife, analisar as principais ações de resiliência adotadas e as estratégias aplicadas e propostas para o futuro.

2. ESTRATÉGIAS DE RESILIÊNCIA URBANA

Holling (1973) definiu como uma medida de persistência dos sistemas e de sua capacidade de absorver mudanças e perturbações e ainda manter as mesmas relações entre populações ou variáveis de estado (Holling, 1973; Sun *et al.*, 2022). O IPCC definiu resiliência como "a capacidade de um sistema e suas partes componentes de antecipar, absorver, acomodar ou se recuperar dos efeitos de um evento perigoso de maneira oportuna e eficiente, inclusive garantindo a preservação, restauração ou melhoria de suas estruturas e funções básicas essenciais" (IPCC, 2014). A cidade é um sistema complexo que consiste em muitos subsistemas em interação. E a resiliência, enquanto processo dinâmico, centra-se tanto na robustez inerente como na capacidade adaptativa da cidade (Ribeiro e Gonçalves, 2019). Neste estudo, a resiliência urbana à inundação é definida como a capacidade de um sistema urbano de resistir, absorver, e adaptar-se às inundações para manter funções críticas e características originais sob os fatores naturais, geográficos e sociais associados às inundações (Zheng e Huang, 2023).

O processo de construção de resiliência para os sistemas urbanos sugere um processo contínuo e uma abordagem de retroalimentação. Esse processo contínuo pode ajudar a aproximar as abordagens de engenharia e resiliência ecológica, uma vez que mesmo a abordagem de engenharia passará de um estado de referência para outra nova referência, aprendendo com inundações passadas dentro do processo de feedback, mudando o status original para um melhorado (Zeng *et al.*, 2024).

Ainda assim, a integração da resiliência sugere que a redução da vulnerabilidade aumenta a capacidade de um sistema (e de todos os seus componentes) para responder à turbulência e aos eventos inesperados e manter, ou retornar rapidamente, às funções básicas, desenvolvendo capacidade adaptativa e soluções inovadoras (Fuchs *et al.*, 2019). Portanto, a resiliência é uma nova direção para lidar com as mudanças climáticas, embora a mitigação e a adaptação às mudanças climáticas continuem sendo importantes (Wang *et al.*, 2022).

O Instituto de Educação Hídrica em Delft, nos Países Baixos, referência mundial, tem trabalhado internacionalmente junto com os seus parceiros na promoção de resiliência em relação aos

desafios hídricos no contexto das metas de desenvolvimento sustentável. Ações climáticas, recursos hídricos, saneamento e sustentabilidade urbana são exemplos de áreas que requerem uma abordagem holística. Eles destacam que além de técnicas, as inovações necessárias são também econômicas e sociais. Visto este perfil holístico dos problemas de cidades como o Recife, ações que juntam esforços nas áreas de ciências naturais, sociais, humanas e das artes são imprescindíveis para o desenvolvimento de soluções sustentáveis. Tais esforços devem ser realizados em colaboração com outros atores sociais, como governos locais, empresas privadas e, claramente, os próprios cidadãos recifenses (Recife, 2022).

Avaliar a gestão do risco de inundação precisa ser abrangente, conforme Quadro 1, que detalha os conceitos e objetivos de três perspectivas da resiliência: resiliência de engenharia, resiliência ecológica e resiliência do sistema socioecológico, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Conceitos e objetivo adotados nesse estudo para resiliência de engenharia, resiliência ecológica e resiliência socioecológica.

	Conceito	Objetivo
Resiliência de engenharia	Capacidade de um sistema retornar ao seu equilíbrio ou funcionamento normal após um evento disruptivo (Holling e Gunderson 2002).	Construir sistemas que possam aumentar a capacidade das organizações de reconhecer, adaptar-se e absorver variações, mudanças e interrupções, implementando estratégias de restauração eficientes (Pawar <i>et al.</i> , 2021; Steen <i>et al.</i> , 2011).
Resiliência ecológica	Capacidade de um ambiente absorver distúrbios e minimizar os impactos sobre sua biota, permitindo que ocorra um processo de renovação, reorganização e desenvolvimento de suas funções (Holling e Guderson, 2002).	Melhorar a prestação de serviços ecossistêmicos naturais e urbanos, e a infraestrutura cinza existente para ser mais amigável aos diversos ciclos ecológicos da natureza, e ajudar a manter a sustentabilidade urbana (Long <i>et al.</i> , 2022).
Resiliência socioecológica	Capacidade do corpo hídrico de se recuperar e se adaptar em um sistema dinâmico, que engloba tanto o meio ambiente quanto as pessoas que vivem e interagem com a área ao redor do rio (Laboy e Fanon, 2016).	Encontrar soluções que considerem as necessidades e as aspirações das comunidades locais, ao mesmo tempo em que preservam e restauram a integridade e a sustentabilidade do ecossistema fluvial.

2.1 RESILIÊNCIA DE ENGENHARIA

A resiliência tem despertado um interesse crescente em contextos de engenharia, referindo-se às comunidades e aos sistemas urbanos em rede, como a capacidade de recuperação de desastres naturais. Estima-se que quanto maior a área afetada pelas enchentes, maiores serão os danos à infraestrutura e a interrupção dos serviços de infraestrutura levando ao aumento dos custos

operacionais e de manutenção (Njogu, 2021). No entanto, os países em desenvolvimento fazem pouca referência à resiliência no planejamento e desenvolvimento de infraestrutura (Carter e Connelly, 2016).

Dessa maneira, destaca-se a importância de desenvolver e implementar políticas, legislação e planos de desenvolvimento de infraestrutura sensíveis ao clima para enfrentar os crescentes riscos decorrentes de eventos relacionados às mudanças climáticas. As ações prioritárias incluem a adoção da engenharia de resiliência no planejamento, desenvolvimento e manutenção da infraestrutura com base em padrões e códigos de construção apropriados. Aplicar e fortalecer a adoção dos novos códigos e padrões de construção pode reduzir significativamente os efeitos das inundações na infraestrutura (Njogu, 2021).

As técnicas de engenharia para a resiliência envolvem frequentemente estratégias para ajudar as comunidades a se recuperarem de desastres naturais, melhorando a robustez das infraestruturas e dos sistemas para resistir e se recuperar de tais eventos (Bozza *et al.*, 2017). Algumas estratégias da resiliência de engenharia são apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 - Estratégias de Resiliência de Engenharia.

Estratégia	Descrição
Técnicas compensatórias	Uso de técnicas compensatórias (como reservatório de armazenamento, trincheira de infiltração, microrreservatórios de detenção em nível de lote, jardins de chuva, pavimento permeável) precisam ser consideradas como um componente das estratégias para gerenciar o risco de inundação urbana, aumentando a resiliência das cidades (Anwana e Owojori, 2023; Vasconcelos <i>et al.</i> , 2016).
Soluções baseadas na natureza	Os espaços livres naturais existentes na cidade devem ser protegidos e melhorados para aumentar a porosidade dessas áreas, e a área impermeável deve ser gradualmente reduzida por projetos de permeabilização e arborização (Salata <i>et al.</i> , 2022).
Sistema de bombeamento	Os sistemas de bombeamento desempenham um papel importante no aumento da resiliência da engenharia dos sistemas de drenagem urbana, evitando efeitos de remanso, garantindo a drenagem segura das águas pluviais e aumentando a capacidade do sistema (Bakhshipour <i>et al.</i> , 2021; Lee <i>et al.</i> , 2017; Asghari <i>et al.</i> , 2023).
Comportas	As comportas atuam como barreiras que podem ser fechadas para evitar que o excesso de água entre nos sistemas de drenagem durante chuvas fortes ou inundações, reduzindo assim o risco de sobrecarga do sistema e falhas estruturais (Dong <i>et al.</i> , 2017).
Manutenção da infraestrutura do sistema de drenagem	Implementação de uma série de regimes de manutenção de infraestrutura melhorados e sustentáveis, com desenvolvimentos futuros focados em áreas menos propensas a inundações (Chikoore <i>et al.</i> , 2021).
Sistema de alertas	As previsões meteorológicas precisas de precipitação extrema são cruciais, garantindo que os alertas meteorológicos cheguem às comunidades em tempo hábil, a fim de proteger vidas, meios de subsistência e propriedades (Chikoore <i>et al.</i> , 2021; Osheen <i>et al.</i> , 2022).

Estratégia	Descrição
Rede de monitoramento	Estudos enfatizam a importância de previsões precisas de escoamento superficial para mecanismos eficazes de controle de cheias, especialmente durante eventos de precipitação extrema impactados por variáveis de alterações climáticas (Lu <i>et al.</i> , 2022).

2.2 RESILIÊNCIA ECOLÓGICA

Incorporar a compreensão ecológica da resiliência ao planejamento e design urbano pode tornar os ecossistemas urbanos mais sustentáveis ao promover processos adaptativos ao enfrentamento dos eventos extremos e das mudanças nas tomadas de decisão (Pickett *et al.*, 2014). Dessa maneira, a resiliência ecológica é fundamental para a manutenção da estabilidade e integridade dos ecossistemas urbanos e naturais, que podem garantir benefícios de longo prazo da infraestrutura natural e aumentar a resiliência das cidades (Hamel *et al.*, 2021). De forma geral, as abordagens da resiliência ecológica desempenham um papel fundamental na redução de alagamentos, promovendo a criação de ambientes mais saudáveis, sustentáveis e preparados para lidar com eventos climáticos extremos. Essas medidas auxiliam na minimização dos riscos de inundações e na adaptação às mudanças ambientais. Como destacado por Liao (2012), o conceito de resiliência ecológica é especialmente relevante para abordar os desafios das inundações, considerando a diversidade urbana, os fatores socioeconômicos, os processos ribeirinhos e a complexidade do ambiente natural. O Quadro 3 apresenta algumas Estratégias de Resiliência Ecológica identificadas na literatura.

Quadro 3 - Estratégias de Resiliência Ecológica.

Estratégia	Descrição
Cidades esponjas	Consideradas como um dos planos de gestão mais bem-sucedidos, realizados nos últimos vinte anos, para reduzir os custos estruturais e sociais causados por inundações em planícies de inundação urbanizadas. O programa é baseado em princípios ecológicos e soluções baseadas na natureza combinando infraestruturas verdes, azuis e cinzas e visa fornecer vários serviços ecossistêmicos (Palazzo e Wang, 2022).
Sistema de esgotamento sanitário e Gestão de Resíduos Sólidos	Implantação de sistemas eficazes de coleta de esgoto, com estações de tratamento descentralizados e gestão de resíduos sólidos. Assim, se busca a redução da poluição, protege a saúde dos ecossistemas aquáticos e contribui para a recuperação dos corpos d'água. A adequada gestão dos resíduos sólidos também desempenha um papel importante nesse processo, ajudando a prevenir a poluição e preservar os recursos naturais.
Valorização das águas subterrâneas	Aumentar e preservar a capacidade natural dos aquíferos, solos e ecossistemas para reter e armazenar água. A qualidade e a disponibilidade das águas subterrâneas, a preservação do habitat e a resiliência às mudanças climáticas podem ser melhoradas por meio de medidas como a reconexão das planícies aluviais aos rios, reencaminhamento e restauração das zonas úmidas (Ariyaningsih e Shaw, 2022).

Estratégia	Descrição
Revitalização dos rios e riachos urbanos	Abordagem integrada baseada em infraestruturas, práticas (ecológicas, físicas, espaciais) e gestão ativa, onde a participação dos atores sociais e institucionais desempenha um papel importante para encontrar soluções de compromisso para maximizar os benefícios ambientais e sociais, contribuindo com a qualidade de vida dos moradores urbanos (Veról <i>et al.</i> , 2019; Preuss <i>et al.</i> , 2021; Cabral <i>et al.</i> , 2022).
Manutenção da Zona Ripária	A Zona Ripária (ZR), do ponto de vista hidrológico e ecológico, é fundamental para a manutenção da saúde ambiental de bacias hidrográficas, assim como fator essencial para a resiliência da bacia, desempenhando funções relacionadas à geração do escoamento direto, manutenção da qualidade de água, estabilidade das margens dos rios, equilíbrio térmico da água e formação de corredores ecológicos (Mira Attanasio <i>et al.</i> , 2012).
Manutenção da Zona Hiporréica	A superfície do leito do rio se chama zona hiporréica, área que está localizada na interface entre o manancial superficial e o aquífero. Assim, a ZH funciona como um regulador de fluxo na interação rio-aquífero além de servir como um filtro natural, importante para recuperação de rios e aumento da resiliência (Carvalho Filho, 2019).
Outras soluções alternativas	Complementarmente, é possível abordar outras tecnologias que têm sido desenvolvidas para tentar restaurar a qualidade dos cursos de água superficiais: estabilização hidrológica, filtração de água, restabelecimento da biodiversidade (Primo <i>et al.</i> , 2022); Assim como, as <i>wetlands</i> com potencial para substituir em algumas situações o padrão de tratamento urbanístico dos riachos, com a tecnologia dos jardins filtrantes.

Entre as estratégias apresentadas no Quadro 3, destaca-se o conceito de cidades esponjas, que se sobressai por integrar soluções baseadas na natureza e infraestrutura urbana para mitigar os impactos das inundações em áreas densamente ocupadas. Essa abordagem, ao promover a infiltração, retenção e reaproveitamento das águas pluviais, não apenas reduz riscos de alagamento, mas também oferece múltiplos benefícios ecossistêmicos, como a melhoria da qualidade da água e o aumento da resiliência climática.

Por outro lado, estratégias como a manutenção de zonas ripárias e hiporréicas enfatizam a importância de preservar os processos naturais de regulação hídrica, enquanto medidas voltadas à valorização das águas subterrâneas contribuem para a segurança hídrica em longo prazo. A eficácia dessas abordagens, no entanto, depende de uma integração sistêmica e de esforços conjuntos entre políticas públicas, planejamento urbano e participação social. Nesse contexto, torna-se evidente que a escolha e aplicação de cada estratégia devem considerar as especificidades hidrológicas, ecológicas e socioeconômicas de cada região, de modo a maximizar os benefícios para a resiliência ecológica das cidades.

2.3 RESILIÊNCIA SOCIOECOLÓGICA

Comunidades e cidades, ao contrário da resiliência da engenharia, pertencem à categoria de resiliência socioecológica; após uma perturbação, elas alcançarão um novo equilíbrio dentro de uma linha de tempo definida. Como a operação de uma cidade envolve interação humana com sistemas naturais, tais sistemas podem aprender com desastres passados e melhorar sua capacidade de adaptação a desastres, estabelecendo um novo equilíbrio que será melhor do que o estado inicial do sistema resiliente da cidade (Wang *et al.*, 2022). A resiliência das comunidades diante das crises depende em grande parte dos recursos disponíveis. Fontes como “recursos de saúde e higiene”, “recursos sociais”, “recursos mentais”, “recursos de comunicação”, “recursos institucionais” e “segurança da área” podem levar a uma forte resiliência social contra inundações (Ghasemzadeh *et al.*, 2021). É importante destacar que com o aumento dos desastres climáticos e do risco de inundação, a pesquisa de resiliência comunitária tem se tornado cada vez mais relevante em todo o mundo (Abdel-Mooty *et al.*, 2022).

Além disso, em várias partes do mundo, a contribuição das mulheres para a resiliência socioecológica também tem sido evidenciada. Após o terremoto de Wenchuan na China, por exemplo, as mulheres desempenharam papéis importantes para a liderança e tomada de decisão durante as fases de recuperação e reconstrução (C. Hou *et al.*, 2020). No distrito de Sirajganj – Bangladesh, Azad e Pritchard (2023) usando percepções de 20 grupos de discussão focal, avaliou como as mulheres estão posicionadas dentro dos processos de resiliência e adaptação a inundações recorrentes. A discussão destaca os diversos papéis das mulheres durante emergências causadas por enchentes e seu papel na gestão de inundações era enorme.

Esses exemplos destacam a importância da resiliência socioecológica e da participação ativa da população no fortalecimento das comunidades ribeirinhas e na promoção de práticas sustentáveis, bem como na resposta e recuperação diante de eventos adversos, como inundações. Essa abordagem integrada, considerando os aspectos sociais, ambientais e culturais, é essencial para promover comunidades mais resilientes e sustentáveis em todo o mundo.

Portanto, destaca-se a necessidade de analisar a resiliência urbana em Recife, especialmente diante dos múltiplos desafios impostos pela sua configuração geográfica, dinâmica urbana e vulnerabilidades socioambientais. Como cidade construída sobre uma planície estuarina e marcada por intensos processos de urbanização, Recife apresenta um cenário complexo onde eventos extremos, como inundações e elevação do nível do mar, se tornam cada vez mais frequentes e impactantes. Compreender a resiliência permite avaliar a capacidade da cidade de se adaptar, resistir e se recuperar frente a tais impactos, considerando não apenas aspectos físicos e ambientais, mas também sociais, culturais e institucionais. Essa abordagem integrada é essencial para orientar ações

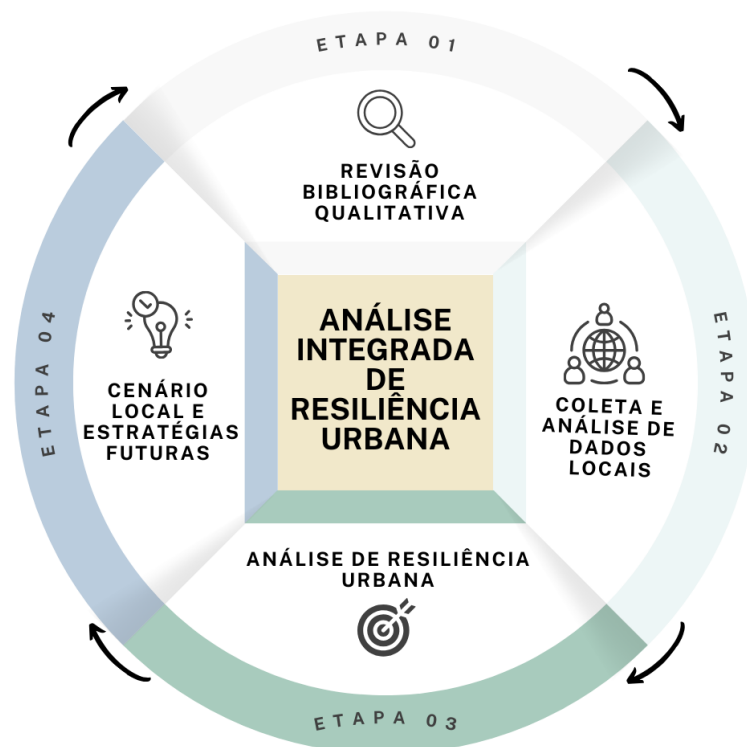
que promovam um desenvolvimento urbano mais seguro, sustentável e inclusivo, capaz de responder às transformações em curso e de garantir qualidade de vida à população.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada neste estudo compreende quatro etapas principais que contribuem para a análise dos principais fatores e identificação de estratégias de resiliência urbana na área de estudo, conforme ilustrado na

Figura 1.

Figura 1 - Etapas Metodológicas para Análise Integrada da Resiliência Urbana.



Fonte: A autora (2025).

A primeira etapa consistiu em uma revisão bibliográfica qualitativa ampla, abrangendo artigos científicos relevantes, relatórios de órgãos públicos e ambientais, e estudos de caso urbanos, visando obter uma base teórica robusta para compreender conceitos-chave e abordagens relacionadas à resiliência urbana.

Na segunda etapa, realizou-se um levantamento de dados específicos da área de estudo, incluindo variáveis demográficas, climáticas, socioeconômicas e de infraestrutura, visando identificar as principais vulnerabilidades urbanas. Além de avaliar as legislações e políticas públicas vigentes, esta etapa explora como a participação comunitária e a governança multinível se integram nas estratégias de resiliência urbana, considerando a coordenação entre governos e sociedade civil.

A terceira etapa foca em examinar as características de resiliência da cidade. Isso inclui a identificação de pontos fortes e fracos, oportunidades e desafios, tanto nas esferas socioeconômicas quanto nas infraestruturais.

A última etapa amplia a perspectiva, comparando o perfil de resiliência urbana local com cenários e tendências nacionais. São analisadas estratégias de resiliência que têm potencial para ser adotadas no futuro, levando em consideração as projeções de mudanças climáticas e as políticas de adaptação em desenvolvimento no país. Essa etapa visa a criação de um perfil de resiliência urbana que sirva de base para a formulação de políticas públicas mais robustas e adaptativas.

Dessa maneira, é possível entender o perfil de resiliência urbana, permitindo uma compreensão abrangente dos desafios e oportunidades enfrentados pela cidade e orientando a tomada de decisões informadas para promover a resiliência.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO E DIAGNÓSTICO DA ÁREA DE ESTUDO

A cidade do Recife é capital do estado de Pernambuco, na região Nordeste e uma das principais metrópoles do Brasil. De acordo com último censo demográfico, Recife possui uma população total de 1.488.920 pessoas, com densidade demográfica de 6.803,60 hab/Km², ocupando a nona posição dentre as cidades mais populosas e a posição de número doze entre as cidades mais densas do Brasil (IBGE, 2022). Atualmente é a maior área urbana do estado de Pernambuco, e sua região metropolitana abriga uma população que ultrapassa 4 milhões de habitantes.

Recife está localizado na Latitude 8° 04' 03" S e na Longitude 34° 55' 00" W, com 4 metros acima do nível do mar, e limita-se ao norte com os municípios de Olinda e Paulista; ao sul, Jaboatão dos Guararapes; a leste com o oceano Atlântico e a oeste com São Lourenço da Mata e Camaragibe (RECIFE, 2025). A planície de Recife se estende para as partes baixas do município de Olinda (até o bairro de Rio Doce) e para as partes baixas do município de Jaboatão dos Guararapes (até os bairros de Piedade e Candeias) apresentando cotas baixas, ligeiramente acima dos níveis da maré alta.

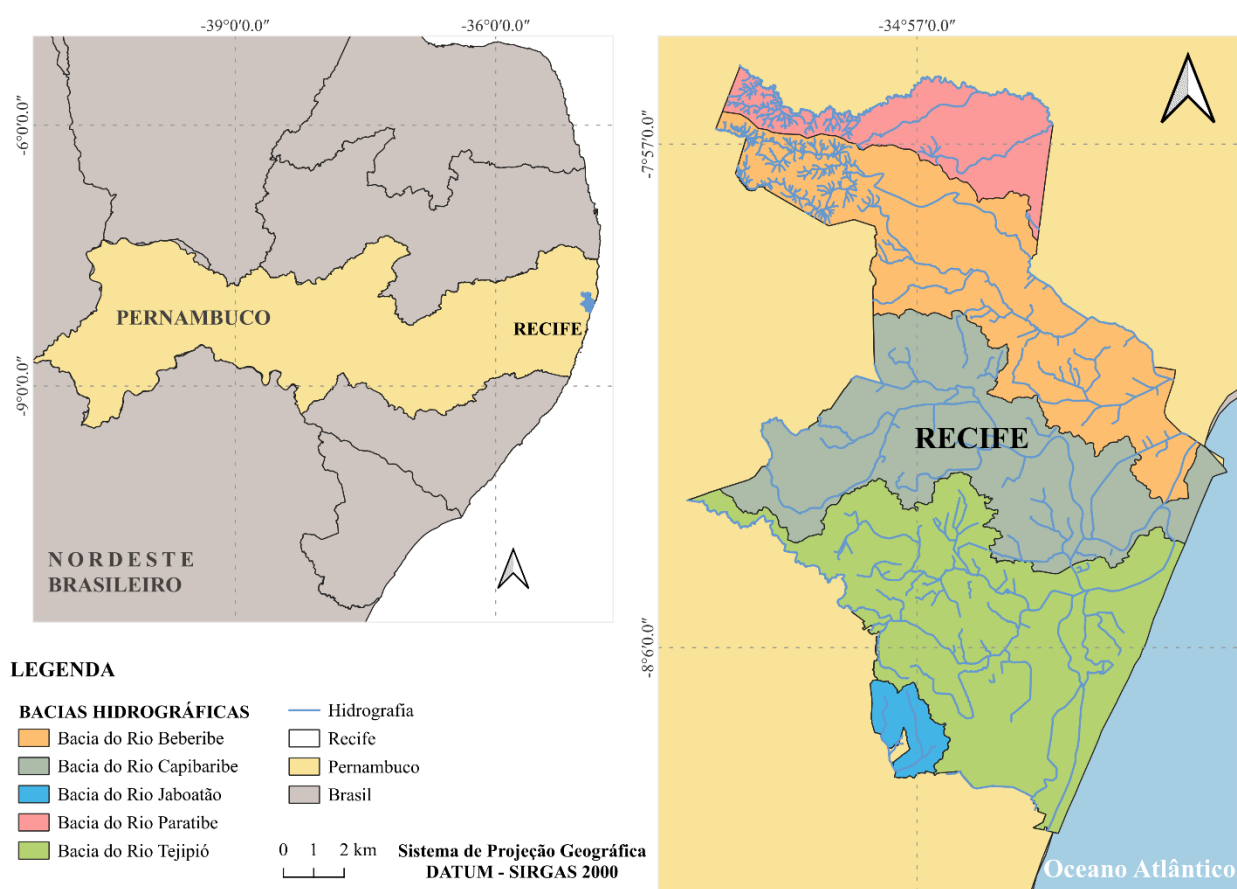
Em Recife existe uma grande quantidade de rios e riachos, constituída por 99 canais, com aproximadamente 133 km de extensão, sendo 62,4% desta extensão é revestida, e a microdrenagem compreende 1.558 km de galerias e canaletas (EMLURB, 2017). Em consequência dessa rede de rios/riachos, Recife é conhecida como a ‘Veneza Brasileira’, sendo banhada por três rios principais: o rio Capibaribe que atravessa a cidade de leste para o oeste, o rio Beberibe ao norte, e o rio Tejupió ao sul, cada um deles contando com diversos afluentes e canais de interligação entre si (Cabral e Alencar, 2005). Existe ainda as bacias dos rios Paratibe, ao norte, e Jaboatão, ao sul, completando a área da cidade, conforme a Figura 2.

O município apresenta um clima tropical quente e úmido, com classificação do clima “As” de acordo com a Köppen e Geiger, segundo os dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A partir dos dados de precipitação da estação climatológica convencional do posto Recife – Curado – Cód. OMM: 82900, operada pelo INMET, para o período entre 1962 e 2020, observou-se que a precipitação média anual é de aproximadamente 2300mm, com o quadrimestre mais chuvoso entre os meses de abril a julho, e os demais meses com menores valores de precipitação. Para o período de dados analisados as médias mensais (valor médio das quantidades de chuva registradas em cada mês ao longo do período observado), destaca os meses de junho e julho como mais chuvosos e outubro e novembro, os mais secos. Em Recife-PE, eventos frequentes de precipitação de alta intensidade têm provocado graves problemas ambientais e socioeconômicos que se manifestam por meio de alagamentos, enchentes e deslizamentos em encostas, resultando em perdas materiais e vidas humanas (Marengo *et al.*, 2023, Santos *et al.*, 2019). Dentre inúmeros eventos de precipitação intensa, destaca-se o evento ocorrido em maio de 2022, que atingiu a cidade, especialmente as pessoas que habitam áreas de risco, levando a numerosas perdas e mortes (Marengo *et al.*, 2023).

Análises de frequência dos dados de precipitação para Recife, alertam para as diversas ocorrências de precipitação extremas que ocorrem na cidade (Silva Júnior, 2020a; Wanderley *et al.*, 2021). Farias *et al.* (2024) avaliaram projeções climáticas de precipitação e temperatura com base nos Modelos Acoplados Fase 6 (CMIP6) para municípios da Região Metropolitana do Recife, revelando impactos significativos. As projeções indicam uma tendência de aumento nas temperaturas máximas e mínimas, enquanto para precipitação destacam-se incertezas quanto aos volumes de chuva, com tendência de redução precipitação total, mas aumento na intensidade pluviométrica. Araújo *et al.* (2024) reforça a necessidade de monitorar os efeitos das mudanças climáticas, realizando análises em todo o estado de Pernambuco e corroborando os resultados de Farias *et al.* (2024) e Marengo (2017), que também indicam elevação das temperaturas e redução da precipitação total anual.

A maioria dos bairros do Recife apresenta riscos a desastres e vulnerabilidade, destacando as Regiões Político-Administrativas Sul e Oeste com os maiores índices de riscos a desastres, os quais apresentam áreas constituídas de morros íngremes, adensamento da população, aliadas as condições sociais e econômicas (Souza, 2011). Outro ponto a ser considerado é o prognóstico apresentado por Costa *et al.* (2010), no qual afirma que em consequência da elevação do Nível Médio do Mar (NMM) até 2100, prevê-se que a capital pernambucana poderá perder 33,7 km² do seu território (PBMC, 2016). No caso de Recife, Olinda e parte costeira de Jaboatão dos Guararapes, Costa *et al.* (2010) avaliaram os efeitos no local considerando o cenário crítico de aumento de 1,00 m no NMM. A análise indicou que 81,8% das construções urbanas, que se encontram a menos de 30 m da linha de costa, deverão ser rapidamente atingidas pela mudança no nível do mar.

Figura 2 - Bacias hidrográficas e rede de rios na cidade de Recife-PE.



Fonte: A autora (2025) a partir de dados do IBGE (2022).

Com o sistema de macro e micro drenagem urbana fragilizado e altamente vulnerável às oscilações da maré, Recife se encontra diante de um cenário em que é necessário adotar medidas que contribuam para a adaptação do sistema de drenagem às mudanças climáticas, visando aumentar a resiliência da cidade. A ocorrência de alagamentos e inundações está associada também a outras causas, sendo a ocupação urbana desordenada uma das principais e resulta em situações de vulnerabilidade, caracterizadas pela construção de habitações em áreas com cotas de terreno muito baixas, que frequentemente sofrem com alagamentos. Além disso, a ocupação desordenada também se estende às margens dos rios, levando ao estreitamento do leito principal dos mesmos e à redução de suas capacidades de drenagem durante os períodos chuvosos mais intensos.

Ao longo dos últimos quase cinco séculos, a cidade de Recife vem realizando aterros para ampliar as áreas de moradia, comércio e circulação de pessoas e veículos. Comparando-se os mapas de alguns séculos atrás com os mapas atuais, verifica-se que os aterros foram reduzindo o espaço de escoamento das águas que hoje está muito reduzido em relação ao que era inicialmente. Tavares Júnior *et al.* (2013) analisaram mapas do Recife Antigo (nome dado à seção histórica do centro do Recife, que está localizada na Ilha do Recife, perto do porto do Recife), dos séculos 17, 18 e 19, em

diferentes momentos do crescimento urbano e verificou a implementação dos sucessivos aterros nos bairros de Santo Antônio, São José, Coelho, Santo Amaro e Recife Antigo. Santos e Albuquerque (2003) justificam que o Recife Antigo sofreu intervenções de sucessivos aterros em decorrência da expansão do povoamento inicial do Recife que era de uma pequena vila em uma estreita faixa arenosa entre o mar e o Rio Beberibe para dar suporte à criação do Porto para escoamento da produção da Capitania de Pernambuco. Com o período da ocupação holandesa no Nordeste do Brasil, no século XVII, ocorreram novos aterros. Atualmente, a cidade sofre as consequências desses aterros sucessivos, como os recorrente pontos de alagamentos observados nos períodos chuvosos.

Na cidade de Recife observa-se também a ocorrência de subsidência do solo em determinadas áreas, criando pontos mais baixos que são particularmente suscetíveis a inundações, tornando-se um fator adicional de preocupação na gestão de eventos relacionados às águas pluviais. Souza (2022) realizou um estudo da subsidência do solo em Recife em locais com histórico de áreas impactadas pela liberação de água do solo usando técnicas de geoprocessamento a partir de interferometria com imagens de radar (InSAR). A pesquisa abrangeu duas regiões distintas da cidade e ao analisar os resultados obtidos, foram identificados diversos locais de rebaixamento. As principais manifestações de subsidência do solo foram concentradas na zona Oeste, onde foram observadas áreas extensas com taxas significativas de afundamento. Essa região apresentou deslocamentos médios da ordem de -15 mm/ano, abrangendo os bairros do Prado, Afogados, Torrões, Cordeiro, Bongüi, San Martin, Curado, Várzea e Caxangá. Em casos semelhantes, porém de menor abrangência geográfica, foram registrados na área que engloba os bairros do Ipsep e Ibura, os quais apresentaram o maior índice de afundamento na cidade, com velocidades próximas a -25 mm/ano. Além dessas localidades, observaram-se rebaixamentos nas zonas Norte (Arruda e Campo Grande) com velocidades próximas de -20 mm/ano; Centro (Boa Vista) com valores perto de -10 mm/ano; e Sul (Boa Viagem) com taxas próximas de -4 mm/ano (Souza 2022, Souza *et al.* 2024).

4.2 PLANO DE AÇÃO CLIMÁTICA LOCAL

Recife foi pioneira, entre as cidades brasileiras, a criar instrumentos técnicos e políticos alinhados à agenda climática, tendo reconhecido a emergência climática global, e recomenda que a sociedade civil deve ser incluída nos debates, principalmente por meio do Comitê de Sustentabilidade e Mudanças Climáticas do Recife (ComClima), instituído pelo Decreto Municipal nº. 27.343/2013, além de projetar esforços para neutralização das emissões de carbono até 2050 e transversalizar o tema das mudanças climáticas nos planos municipais. Dessa maneira, após estudos realizados pela academia e pelo poder público municipal indicarem que o Recife precisa se preparar para os eventos ambientais extremos, um conjunto de ações relacionadas à Agenda do Clima obteve reconhecimento

internacional pelo esforço da gestão municipal no desenvolvimento de uma política de baixo carbono. Além disso, evidenciaram a necessidade de avançar na adoção de medidas para tornar a cidade resiliente e capaz de enfrentar o agravamento de problemas como inundações, avanços do mar e deslizamentos (Melo *et al.*, 2021).

O conjunto de ações descrito demonstra avanços importantes no Recife, com a implementação de um arranjo institucional voltado para a Política de Sustentabilidade e de Enfrentamento das Mudanças Climáticas. O tema foi introduzido na agenda urbana municipal e os atores começaram a compreender sua relevância. Com a regulamentação, a definição das diretrizes, a elaboração dos inventários de emissões de GEE (Gases do Efeito Estufa) e do plano de baixo carbono, e o funcionamento regular do Comitê, a cidade avança para a consolidação de uma estrutura de planejamento mais resiliente e sustentável (Melo *et al.*, 2021).

Assim, foram identificados e apresentados no Quadro 4 as principais contribuições para o plano de ação climático de Recife-PE.

Quadro 4 – Plano de ação climático de Recife-PE.

Ano	Projeto	Principais Contribuições
2010	Lei Nº 14.090/2010: Política Estadual de Enfrentamento às Mudanças Climáticas de Pernambuco (Pernambuco, 2010).	Prevê o desenvolvimento de planos de ação para a mitigação/adaptação às mudanças climáticas, nos níveis de planejamento estadual e municipal.
2011	Plano Estadual de Mudanças Climáticas (Pernambuco, 2011a).	É um dos instrumentos da Política Estadual de Mudanças Climáticas, constituído por ações estaduais, considerando os cenários de mudança do clima, que favoreçam a capacidade de resiliência dos sistemas naturais e das cidades.
2012	Urban Leds - Estratégias de desenvolvimento urbano de baixo carbono.	Foi implementado pela ONU Habitat e pelo Iclei - Governos Locais pela Sustentabilidade com financiamento da Comissão Europeia.
2013	Comclima (Comitê de Sustentabilidade e Mudanças Climáticas do Recife).	Cria o órgão responsável pelo debate, compartilhamento de informações e subsídio à formulação e desenvolvimento de políticas ligadas à sustentabilidade e às mudanças climáticas.
2014	Lei nº 18.011: Política de Sustentabilidade e de Enfrentamento das Mudanças Climáticas do Recife (PSMC).	Cria instrumentos para efetivação de ações sustentáveis e de enfrentamento ao aquecimento global e elabora o primeiro inventário de emissão dos GEEs do município.
	Lei nº 18.014: Sistema Municipal de Unidades Protegidas – SMUP Recife e dá outras providências.	Estabelece requisitos básicos para criação, implantação e gestão de unidades e de suas categorias específicas, dispõe sobre a compensação ambiental e dá outras providências.
	Plano Municipal de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais do Recife (PMDR)	Atualiza o incentivo à adaptação às mudanças climáticas do município, com objetivo de minimizar os impactos negativos das inundações e alagamentos.

Ano	Projeto	Principais Contribuições
2015	Lei nº 18112: Melhoria da qualidade ambiental das edificações por meio da obrigatoriedade de instalação do "telhado verde", e construção de reservatórios de acúmulo ou de retardo do escoamento das águas pluviais para a rede de drenagem.	Incentiva a aplicação de técnicas de drenagem urbana para lotes com área superior a 500 m² edificados ou não, que tenham área impermeabilizada superior a 25% da área total do lote como condição para aprovação de projetos iniciais.
2016	Plano de Redução de Emissões de GEE.	Indica como um dos temas prioritários o desenvolvimento urbano sustentável e resiliência - incluindo adaptação e resiliência; arborização e reflorestamento e educação para sustentabilidade.
2019	Análise de Riscos e Vulnerabilidades Climáticas e Estratégia de Adaptação do Município do Recife.	Subsidia a elaboração do Plano de Adaptação à Mudança Climática municipal e permite identificar áreas de maior vulnerabilidade e risco visando a priorização de medidas concretas de adaptação.
2020	Plano Local de Ação Climática da Cidade do Recife.	Combate as consequências da mudança do clima e traz maior qualidade de vida aos seus cidadãos e cidadãs, tendo como norte a neutralização de emissões de GEE até 2050.
2022	Lei Municipal nº 18.983: Gabinete de Gerenciamento do Programa de Requalificação e Resiliência Urbana em Áreas de Vulnerabilidade Socioambiental – ProMorar Recife.	Visa uma cidade mais resiliente, evitando alagamentos e deslizamentos de terra, com aplicação de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos e instalação de medidores de nível do rio em postos estratégicos. Outras atividades previstas são: implantação do Sistema de Gestão e Monitoramento de Riscos Climáticos, Sistema de Gestão de Dados Urbanos Habitacionais e Socioambientais; Desenvolvimento de Sistema Automatizado de Controle Urbano e Capacitação de Mulheres Agentes Comunitárias em Prevenção e Gestão de Riscos Climáticos.
2023	Hackathon Recife – modelando uma cidade resiliente.	Reuniu um time de especialistas do Brasil e dos Países Baixos, para avaliar várias medidas, incluindo o alargamento da calha do Rio Tejipió, a desocupação de áreas aterradas ao longo do rio, a implementação de parques alagáveis e o realocamento das comunidades que residem em regiões de risco.
2024	Lei Municipal nº 19.226: Instalação de caixas coletoras para retenção de material sólido nas obras e serviços de construção e manutenção de bueiros e galerias de águas pluviais realizados em empreendimentos privados no município de Recife.	Incentivo a empreendimentos privados como medida mitigadora de drenagem urbana com o objetivo de reduzir os impactos ambientais de alagamentos, enchentes e inundações, contribuindo com a resiliência do município.

Em 2024, pelo segundo ano consecutivo, Recife recebeu o Selo ‘Nível Ouro’ de Boas Práticas de Cidade Inteligente do *Connected Smart Cities*. Trata-se da categoria máxima da premiação que

ocorre, desde 2015, e um reconhecimento ao esforço da gestão da capital pernambucana para entregar serviços à população de forma inovadora e sustentável. É de grande importância reconhecer os desafios impostos pelas mudanças climáticas, mas também estar ativamente engajado na implementação de soluções práticas e inovadoras para enfrentá-los. Portanto, se faz necessário uma governança efetiva e com participação ativa da sociedade civil, com colaboração entre governo, organizações e populações para a aplicação dos planos propostos.

4.3 ESTRATÉGIAS APLICADAS EM RECIFE

Historicamente, os governos têm adotado soluções cinzas, ou seja, técnicas de engenharia tradicional como canais de drenagem, diques, barragens e reservatórios, para reduzir os riscos de desastres associados às inundações. No entanto, à medida que os efeitos negativos das inundações pioram, também aumenta o interesse em uma estratégia mais abrangente para gerenciar o risco de inundação urbana. As soluções de infraestrutura verde-azul precisam ser seriamente consideradas como um componente das estratégias para gerenciar o risco de inundação urbana (Anwana e Owojori, 2023). Na cidade de Recife, vem sendo realizado algumas ações de drenagem ‘não tradicionais’ para tentar resolver alguns problemas localizados de inundação urbana, como por exemplo os reservatórios de retenção subterrâneo implantados no bairro do Espinheiro, na zona noroeste da cidade, entre as Ruas Santo Elias e Conselheiro Portela, com capacidade de armazenamento de 150m³, e no bairro do Barro, na zona sudoeste da cidade, na Rua Pedro José Vieira, com capacidade de 126m³; e a instalação de válvula *flap* na saída da rede de microdrenagem da rua do Lima, no bairro de Santo Amaro, no centro da cidade (Silva Jr *et al.*, 2020b).

Dentre ações baseadas em drenagem urbana sustentável, tem-se o Parque Alagável às margens do Rio Tejió, inaugurado em novembro de 2024, que conta com equipamentos públicos para urbanização das margens do rio. As intervenções incluíram, ainda, o alargamento da calha e a implantação de equipamentos públicos, como minicampo, playground, áreas para jogos, pista de cooper e espaços para piquenique e contemplação. As intervenções nas encostas/barreiras também são exemplos de resiliência de engenharia, visto que garantem estabilidade e segurança às construções nos seus entornos, evitando deslizamentos, e cada intervenção é composta por um pacote de serviços, de acordo com a necessidade de cada setor de risco. Os projetos executados pela Autarquia de Urbanização do Recife (URB) são compostos por construção de muros de arrimo, colocação de revestimento de tela argamassada, construção de muretas de proteção, de drenagem e corrimão, e pavimentação.

Em relação ao fenômeno de subsidência que ocorre em diversos pontos da cidade em que o solo sofre um movimento vertical para baixo, em geral devido a bolsões de argila mole ou área de

antigos manguezais, a drenagem urbana fica mais difícil e, muitas vezes, é necessário adotar sistemas mecânicos de apoio. Um exemplo é o sistema de bombeamento e de comportas no canal Derby-Tacaruna para resolver problema de subsidência da Avenida Agamenon Magalhaes e a drenagem forçada na esquina da Avenida Recife com a Avenida Dom Hélder, no bairro do Ipsep, na zona sul da cidade, para resolver problemas de subsidência da Avenida Recife. Um outro exemplo de resiliência de engenharia são as comportas do canal Derby Tacaruna nas extremidades da Avenida Agamenon Magalhães. O canal com 5,30 km de comprimento e seção transversal trapezoidal (EMLURB, 2017) teve as comportas instaladas para evitar inundações na avenida e as comportas são acionadas nas horas de maré alta principalmente nas ocasiões de maré de sizígia.

No contexto das estratégias de resiliência de engenharia, no Recife, foram implantados dispositivos móveis denominados ecocestos em pontos estratégicos do sistema de microdrenagem da cidade, que apresentaram resultados satisfatórios, melhorando o escoamento das águas de chuva que era prejudicado pela quantidade de resíduos sólidos urbanos. A Figura 3-A ilustra o modelo de ecocesto em PEAD, com a área circulada indicando o detalhe de ancoragem, sendo este instalado na Praça Abelardo Baltar, e a Figura 3-B, o modelo do ecocesto em fibra implantado na Rua Professor Benedito Monteiro, com material proveniente de descarte irregular (Santos, 2023).

Para atendimento ao sistema de macrodrenagem, as ecobarreiras implantadas nas calhas dos canais, impediram que mais de 1000 toneladas de resíduos flutuantes chegassem nos rios e nos mares, melhorando ainda o fluxo do escoamento destas águas. Destaca-se na Figura 3 (C, D e E), a ecobarreira implantada no canal do Vasco da Gama, com remoção de resíduos sólidos aproximadamente 230 t entre o período de abril de 2023 e dezembro de 2022. A solução está em fase de implantação no município, com a previsão de acréscimo de mais sete dispositivos a serem instalados nas localidades de Arruda, Torrões, Ibiaporã, Guarulhos, ABC, Cavouco e Jordão. (Santos, 2023).

Complementarmente, também há o sistema conhecido como “Barragem móvel”, em que o equipamento se resume a uma lona resistente fixada a uma estrutura metálica treliçada que se move ao longo da calha do riacho, utilizado para limpeza de alguns canais da cidade. O funcionamento se baseia no fechamento de uma comporta, a partir do enchimento da lona, com posterior abertura, propiciando uma descarga que objetiva arrastar os resíduos a jusante, principalmente os suspensos, promovendo uma limpeza superficial da calha do canal (Cabral, 2025).

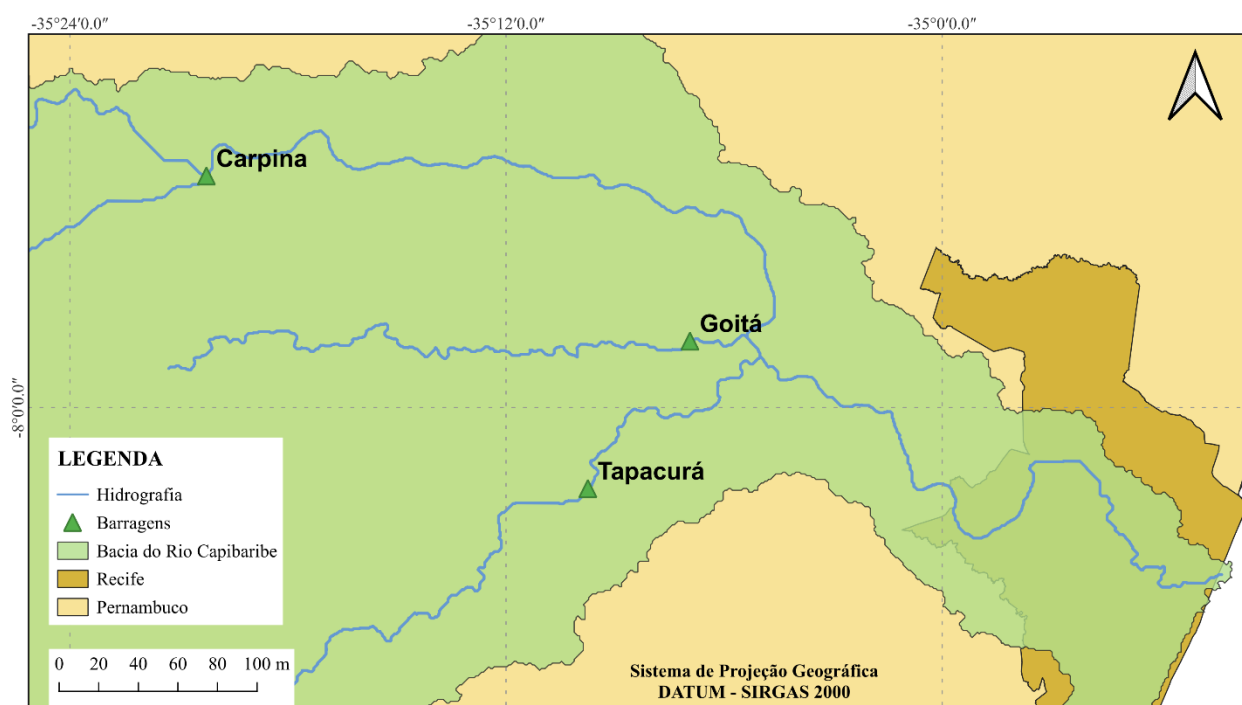
Figura 3 – Modelo do Ecocesto em PEAD (A) e Fibra (B) com material proveniente de descarte irregular; Ecobarreira em funcionamento com remoção dos resíduos (C) e finalização da limpeza (D) no Canal do Vasco da Gama (bairro Arruda) e Implantação da Barragem Móvel (E) no Canal Derby Tacaruna na Avenida Agamenon Magalhães em Recife.



Fonte: Santos, 2023 (A-D); Emlurb, 2020 (E)

Dentre outras ações de resiliência de engenharia, também pode-se mencionar as barragens de contenção de cheias, representadas na Figura 4. Até a década de 1970, Recife enfrentou grandes enchentes que chegaram a inundar 80% da cidade. Para responder ao problema das enchentes, o Governo Federal construiu três grandes barragens de retenção do rio Capibaribe. A primeira barragem foi construída na sub-bacia do rio Tapacurá, a segunda tomou lugar na sub-bacia do rio Goitá, e a terceira foi erguida no eixo do rio Capibaribe, no município de Carpina. Após, essas três, foi construída a barragem de Jucazinho, no trecho médio superior, com a finalidade de abastecimento de algumas cidades do Agreste, mas que também contribui na proteção contra enchentes (Cabral e Alencar, 2005).

Figura 4 - Barragens de contenção de cheias na Bacia do Rio Capibaribe.



Fonte: A autora (2025) a partir de dados do IBGE (2022).

Dentre as ações voltadas para a previsão e monitoramento, a Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) é uma instituição estadual responsável por monitorar e fornecer informações sobre recursos hídricos e clima na região, e possui um sistema de alertas, tendo instalado um radar meteorológico, que possibilita o monitoramento contínuo dos sistemas meteorológicos, sendo possível acompanhar a formação dos principais sistemas que atuam no Estado, inclusive em localidades de maior vulnerabilidade (APAC, 2024).

A prefeitura do Recife também possui o “Alerta do COP” (Centro de Operações do Recife) para orientação da população e contato da Defesa Civil para emergências, que contribuem com a resiliência de engenharia na cidade. As informações são divulgadas em diversos canais de comunicação como mídia local, jornais locais, internet e redes sociais. O funcionamento eficiente de um sistema de alerta de chuvas irá contribuir para reduzir ou até mesmo controlar os riscos de uma população, diminuindo os desastres, alterando-se sua probabilidade de ocorrência ou gerenciando suas consequências (Souza, 2011). Essa prática possibilita a detecção precoce de eventos extremos e, com base nessas informações, as autoridades podem emitir alertas e avisos oportunos, permitindo que a população realize medidas preventivas para mitigar os impactos desses eventos adversos. O monitoramento contínuo de vazão de rios, de níveis de água, de precipitação e de outros parâmetros climáticos é de extrema importância, pois em conjunto com o sistema de alertas atua na proteção de vidas e bens, contribuindo para a gestão de riscos e a segurança da sociedade diante das condições

climáticas críticas. Além de auxiliar na tomada de decisões, com controle dos níveis dos reservatórios de contenção de cheias.

Ao abordar a resiliência ecológica da cidade, é fundamental compreender o papel dos ecossistemas naturais na proteção e na promoção do bem-estar das comunidades urbanas. O Parque Capibaribe em Recife é um exemplo de resiliência ecológica em ação, cujo objetivo é transformar o Recife em uma cidade-parque, elevando a taxa de área verde pública. Ao transformar as margens do Rio Capibaribe em um espaço multifuncional de convivência, lazer e cultura, o projeto adota soluções baseadas na natureza, como áreas verdes permeáveis, para enfrentar os desafios urbanos. O espaço da Praça do Baobá e o Parque das Graças são um reflexo dessas ações, que vem sendo ampliado e incentivado com equipamentos de lazer para ocupação da população. A cidade parque reduz os riscos de enchentes, melhora a qualidade da água e protege a biodiversidade local.

Além disso, promove conscientização ambiental e envolvimento da comunidade. Assim, o Parque Capibaribe exemplifica como a integração entre natureza e ambiente urbano traz benefícios sociais, ambientais e econômicos, tornando a cidade mais resiliente. Ao recombinar rios e vida cotidiana urbana por meio da restauração cultural e dos ecossistemas altamente sensíveis na interseção do solo e da água, a cidade se torna mais resiliente, promovendo uma melhor qualidade de vida para os cidadãos e estabelecendo uma base sustentável para o futuro (RECIFE, 2022). Estão em andamento outras soluções urbanísticas que visam proporcionar espaços de aproximação ao rio, como passarelas nas margens e manguezais, e píeres para permitir que as pessoas possam chegar ao rio, percorrê-lo e atravessá-lo, ativando ações a partir desse ambiente. Um outro convênio foi realizado entre a prefeitura e a UFPE para incorporar o rio Beberibe, o rio Tejipió e a frente marinha no conceito cidade Parque.

Como incentivo a resiliência ecológica, há o projeto de pesquisa Riachos Urbanos, vinculado ao Grupo de Recursos Hídricos da UFPE, que inspira outros como o do Módulo Experimental de Desenho Urbano Sensível às Águas e Projetos de Pesquisa e Extensão para a Recuperação dos riachos do Cavouco (UFPE) e do Sítio dos Pintos, liderada pela Associação Águas do Nordeste (ANE). Dentre as ações associadas ao Riacho Cavouco, tem-se a instalação de jardins filtrantes em seu exutório. Os jardins serão responsáveis pela filtragem de 350 mil litros de água por dia do riacho, o que corresponde a 60% da vazão no período chuvoso e 8% no período seco, o que será de grande contribuição para a saúde do rio Capibaribe, onde o Cavouco deságua. Esses jardins foram baseados nos jardins já implantados no rio Sena, na França, além disso, essa solução baseada na natureza já vem sendo aplicada em outros países (RECIFE, 2022).

Com o intuito de resgatar o senso de pertencimento e de apropriação das pessoas em relação ao rio e ao espaço público, foram realizadas diversas atividades, envolvendo a participação de

centenas de pessoas. Essas iniciativas visam fortalecer a conexão emocional da comunidade com o rio, incentivando a valorização e o cuidado com esse recurso natural. Carvalho *et al.*, (2021) avaliaram a participação da comunidade em diferentes processos de intervenção em cursos d'água brasileiros, como o Projeto Manuelzão, A ver o rio, Parque Capibaribe, Praias do Capibaribe, Rios e Ruas e entre outros, e a importância da integração da população com as atividades culturais desenvolvidas, sendo essa participação uma das principais causas do sucesso dos programas de revitalização dos cursos d'água. Através desse engajamento, busca-se promover um senso de comunidade e o uso adequado do espaço público, resultando em benefícios para a qualidade de vida e o bem-estar da população.

Associado ao contexto da resiliência socioecológica, a cidade reconhece os barqueiros que realizam travessias no Rio Capibaribe entre os bairros de Poço da Panela (Zona Norte) e Iputinga (Zona Leste). Essa atividade, transmitida por mais de 100 anos de geração a geração, representa uma fonte de sustento econômico para essas famílias. Os barqueiros adaptaram-se às mudanças ao longo do tempo, fornecendo um serviço de transporte vital para os moradores das margens esquerda e direita do rio. Essa interação demonstra a capacidade de resiliência socioecológica ao manter um equilíbrio sustentável entre a utilização do recurso natural e a subsistência da comunidade local. A resiliência dos rios urbanos está diretamente relacionada à resiliência das comunidades ribeirinhas. Um exemplo interessante de resiliência socioecológica é observado nos pescadores da Ilha de Deus, localizada na bacia do rio Tejipió. Ao longo de muitas gerações, esses pescadores realizam pesca artesanal utilizando barcos simples na região estuarina, que abrange o Parque dos Manguezais e se estende até o braço morto do Rio Capibaribe.

Em Recife, as várias colônias de pescadores, como Brasília Teimosa, Ilha de Deus, Coque e Pina, desempenham um papel socioeconômico importante devido à pesca artesanal impulsionada pelos ecossistemas locais, como manguezais e recifes costeiros. A dependência dessas comunidades ressalta a necessidade crucial de conservação e manejo adequado dessas áreas para garantir a continuidade das atividades pesqueiras e a sustentabilidade das comunidades ribeirinhas. Nesse contexto, as mulheres pescadoras, autodenominadas pescadeiras, têm um papel essencial na resiliência socioecológica dessas comunidades pesqueiras. Elas são as principais defensoras dos direitos e protagonistas na busca por buscar soluções para problemáticas recorrentes. Sua participação é crucial, pois evidencia a importância das mulheres no ambiente da pesca, que por vezes foi e são excluídas. Atualmente, as pescadeiras são reconhecidas como peças-chave para a conquista de direitos e a promoção da resiliência socioecológica em toda a comunidade pesqueira. Esse engajamento fortalece a relação entre as pessoas e o ecossistema, contribuindo para a sustentabilidade e o bem-estar das comunidades ribeirinhas.

Para fortalecer a resiliência urbana, é crucial estabelecer um sistema contínuo de monitoramento e avaliação das estratégias aplicadas. A integração de tecnologias de monitoramento em tempo real e a criação de mecanismos formais para o engajamento comunitário podem acelerar a capacidade adaptativa da cidade.

4.4 ESTRATÉGIAS PARA O FUTURO

Com base nos desafios analisados, as estratégias futuras devem refletir um equilíbrio entre a resiliência urbana e a necessidade urgente de adaptação às mudanças climáticas. Assim, os relatórios sobre mudanças climáticas no Brasil destacam várias estratégias para enfrentar os desafios futuros. Entre essas estratégias estão: maximizar as sinergias entre os objetivos climáticos e de desenvolvimento, implementar reformas políticas setoriais e econômicas, e realizar investimentos direcionados em medidas de mitigação e adaptação. Além disso, enfatizam a importância de priorizar a conservação e gestão dos ecossistemas nas zonas costeiras, além de promover ações colaborativas entre entidades estatais e não estatais no âmbito da governança climática nas cidades brasileiras. Também ressaltam a necessidade de compreender os impactos atuais e futuros do aquecimento global em regiões vulneráveis, como o Nordeste, onde se projetam aumentos de temperatura e redução das chuvas, exigindo estratégias eficazes de adaptação e mitigação.

O Resumo Executivo do Brasil 2040 (BRASIL, 2015), por exemplo, destaca que Recife foi uma das regiões metropolitanas selecionadas como área crítica de acordo com o Plano Nacional de Gestão de Riscos e Respostas a Desastres Naturais 2012-2014, juntamente com São Paulo, Rio de Janeiro, Fortaleza e Salvador. Em relação a infraestrutura costeira, as projeções de elevação da maré, para os anos de 2030 e 2050, implicam em maior redução das bordas livres dos cais dos portos. O porto de Recife, que apresenta borda livre de 0,97 m em 2015, teria esse valor reduzido para 0,87 m, em 2030, e 0,70, em 2050. São apresentadas sugestões de medidas de (1) atuação imediata como a gestão dos mangues, reforço de armaduras de maciços de molhes e quebra-mares, com blocos artificiais, alteamento dos maciços de molhes e quebra-mares; (2) com conclusão até 2030: alteamento de paramento e microdrenagem de cais e (3) com conclusão até 2050: barreiras contra “Storm Surge” (sobrelevação do nível do mar durante tempestades).

Os desafios são múltiplos e, diante do contexto, o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC, 2016) reconhece a falta de conhecimento sistemático sobre a dinâmica costeira, e as informações imprecisas relacionadas à altimetria e batimetria como a maior vulnerabilidade da zona costeira. Dessa maneira, dentre as políticas de adaptação das cidades costeiras podem ser destacadas as seguintes: (1) maior acesso à informação sobre os possíveis riscos locais da elevação do nível do mar às populações, enchentes, deslizamentos; (2) identificação das áreas de risco e vulneráveis; (3)

proteção das barreiras naturais; (4) criação de planos de investimentos. Complementarmente, o Plano Nacional de Adaptação (PNA) brasileiro (MMA, 2016), por exemplo reconhece 11 setores (agricultura, biodiversidade e ecossistemas, cidades, gestão de riscos de desastres, indústria e mineração, infraestrutura, populações vulneráveis, recursos hídricos, saúde, segurança alimentar e nutricional e estratégia para zonas costeiras) que serão consideravelmente afetados pelas mudanças climáticas. Entretanto, as metas do setor da água não refletem a importância de aumentar a resiliência com mecanismos eficientes para permitir o uso sustentável da água, a restauração de bacias hidrográficas, o aumento da capacidade de armazenamento e reabastecimento de água e preços econômicos.

O Relatório sobre Clima e Desenvolvimento (Banco Mundial, 2023) elaborado por uma equipe multissetorial do Grupo Banco Mundial relata que o Brasil tem uma oportunidade privilegiada de alcançar o crescimento econômico mais forte e inclusivo, construir resiliência às mudanças climáticas e conseguir zerar as emissões líquidas até 2050. Entretanto, são necessárias medidas de adaptação adequadas, indicando a preparação de planos específicos de mitigação e adaptação às mudanças climáticas em setores-chave. Destaca-se que os municípios brasileiros já estão começando a agir para enfrentar as mudanças climáticas, com mapeamento das emissões de GEE, implementando políticas de desenvolvimento urbano de baixo carbono e resilientes, incluindo incorporação compacta, mecanismos de uso do solo urbano para tratar a subutilização, adensamento de centros urbanos, desenvolvimento orientado ao trânsito e incentivos para o transporte público limpo, energia renovável, infraestrutura ecológica e eficiência energética para construções novas ou reformas. A adoção de programas de certificação de edifícios ecológicos, como o EDGE¹ da Corporação Financeira Internacional (IFC), é uma das formas mais relevantes de promover essa agenda. Entre 2017 e 2020, o Brasil certificou cerca de 8,2 milhões de metros quadrados de lajes ecológicas, posicionando-se como líder neste segmento na América do Sul.

O setor de recursos hídricos por ser fortemente dependente de fatores climáticos é um dos mais vulneráveis a serem impactados pela mudança climática, principalmente nos países em desenvolvimento, de acordo com o Relatório de Impacto da Mudança Climática nos Recursos Hídricos do Brasil (ANA, 2024) elaborado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). O estudo apresentou uma avaliação do impacto da mudança climática nos recursos hídricos do Brasil a partir da utilização de cenários de clima futuros oriundos dos modelos climáticos globais

¹ O sistema e a aplicação da certificação EDGE é uma ferramenta de projeto e um método de certificação acessível, desenvolvido e de propriedade da IFC, que reconhece diferentes níveis de ambição para edifícios ecológicos até zerar as emissões de carbono. Terceiros fornecedores de certificação EDGE licenciados pela IFC certificam edifícios desde 2015. Veja <https://edgebuildings.com>.

(MCGs) e afirma a importância desses estudos, especialmente a nível local para auxiliar no processo de tomada de decisão e desenvolvimento de políticas públicas, para enfrentar as consequências de mudanças no clima futuro da segurança hídrica do Brasil.

Diante do exposto, no ano de 2037, o Recife será a primeira capital do Brasil a completar cinco séculos, e essa data vem sendo considerada como um símbolo da construção de um novo caminho. Em carta inovadora, escrita do futuro para os dias de hoje, na primeira pessoa, Recife — cidade nas águas — nos conta da sua natureza anfíbia, nascida aquática e da mistura de águas doces, salgadas e salobras. Mas também nos conta dos seus pesares. Entre eles, o esquecimento que as águas são sua essência. No texto, o Recife alerta que poderia ser a primeira cidade brasileira a sucumbir com o aumento do nível do mar, caso mudanças substanciais na forma de compreendê-la e de planejá-la não acontecessem (Recife, 2022).

Dessa maneira, o Plano Recife 500 anos, busca estratégias de adaptação e resiliência, conforme apresentado no Quadro 5, que visam preparar Recife para os impactos das mudanças climáticas, melhorar a infraestrutura de drenagem e reduzir a vulnerabilidade da cidade a eventos extremos, como enchentes. A implementação dessas ações não só promove a resiliência ambiental, mas também contribui para o desenvolvimento social e urbano sustentável.

Quadro 5 – Estratégias do Plano Recife 500 anos.

Estratégia	Descrição
Expansão e Modernização do Sistema de Drenagem	Ampliar, reestruturar e modernizar o sistema de drenagem urbana com foco em locais com problemas recorrentes de alagamento e deficiência de drenagem.
Plano de Macrodrenagem Urbana	Implementar o Plano de Macrodrenagem Urbana com intervenções significativas nos rios principais (Capibaribe, Camaragibe, Beberibe, Tejipió, Jiquiá, Jaboatão, Moxotó e Jordão) e ações estruturais para uma chuva com recorrência de 25 anos.
Solução de Pontos de Alagamento de Microdrenagem	Solucionar pontos críticos de alagamento de microdrenagem.
Revisão das Normas de Solo Natural	Revisar as normas relacionadas ao solo natural e implementar campanhas públicas de conscientização junto com a eficiência na fiscalização.
Medidas de Resiliência Climática	Integrar medidas de resiliência climática, como a recuperação de áreas de manguezais e pântanos para aumentar a capacidade de absorção de águas pluviais e marinhos.
Proteção da Biodiversidade	Proteger a biodiversidade e os corpos d'água, como córregos, rios, praias e mangues, e combater a erosão costeira.
Gerenciamento de Bacias Hidrográficas	Gerenciar as bacias hidrográficas e conservar os mananciais, garantindo a manutenção das áreas de captação e a infiltração adequada do solo.
Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa	Reduzir as emissões de gases de efeito estufa através da diminuição do uso de combustíveis fósseis, promovendo uma cidade de baixo carbono.

Estratégia	Descrição
Criação de Parques Urbanos	Desenvolver parques urbanos nas áreas de intervenção (ex. Capibaribe, Tejipió) para atuar como áreas de retenção de água e espaços recreativos.
Estudos de Mudanças Climáticas	Aprofundar os estudos de impacto das mudanças climáticas na RMR, em especial a elevação do nível do mar.
Revitalização	Revitalizar os rios Capibaribe, Beberibe e Tejipió, com recuperação das margens e renaturalização dos canais
Sistema de proteção e defesa civil	Fortalecer o sistema de proteção e defesa civil na cidade, a fim de ampliar o monitoramento e reduzir o tempo de resposta da cidade à ocorrência de eventos extremos
Monitoramento	Monitorar o nível do mar e dos eventos extremos que provoquem inundação na cidade.

Fonte: Adaptado de Recife (2022).

A resiliência urbana frente aos desafios hidrológicos e climáticos demanda uma abordagem integrada, que articule diferentes frentes de atuação. A Figura 5 sintetiza eixos estratégicos essenciais para enfrentar os impactos das inundações e promover uma gestão mais sustentável do território urbano. Entre eles, destacam-se o planejamento da drenagem, os sistemas de alerta, o zoneamento de áreas sensíveis e o desenvolvimento de soluções adaptativas.

Figura 5 – Temáticas estratégicas relacionadas à resiliência urbana.



Fonte: A Autora (2025).

No Quadro 6, são apresentadas temáticas que contribuem para a resiliência de Recife, com destaque para as pesquisas científicas voltadas à gestão hídrica e à infraestrutura urbana. Essas pesquisas também desempenham um papel fundamental na conscientização da sociedade e na promoção de mudanças de paradigmas. A aplicação prática dos resultados e as recomendações futuras são especialmente relevantes, pois fornecem uma base sólida para o desenvolvimento de estratégias

e políticas que aumentem a capacidade da cidade de responder e se adaptar às mudanças climáticas e aos eventos extremos.

Quadro 6 – Contribuições para auxílio de gestão e manejo das águas pluviais urbanas.

Título	Aplicação Prática	Recomendações Futuras
Gestão das Águas Pluviais Urbanas (Gusmão, 2016; Azevêdo, 2019)	- Diretrizes para a gestão do Sistema de Drenagem e Manejo das Águas Pluviais Urbanas que estivesse fundamentado em um modelo de desenvolvimento urbano sistêmico e sustentável. - Proposta de contratos de financiamento para a implantação das intervenções e de recursos a nível local através do desenvolvimento de uma taxa de drenagem municipal para manutenção e operação do sistema.	- Ampliação da integração da gestão das águas pluviais urbanas com a gestão de outros serviços urbanos; - Inclusão de ações financiáveis para projetos básicos e executivos, assim como estudos científicos e tecnológicos em busca de sistemas mais eficientes, eficazes e mais baratos;
Sistemas de Previsão e Alerta (Góes, 2009; Souza, 2011)	- Previsão de inundações e planejamento de intervenções físicas na rede de rios e canais; - Auxílio para as intervenções nas populações de áreas de risco; - Previsão de alerta em tempo real;	- Cadastro do sistema de drenagem; - Elaboração de estudos técnicos para melhorar o sistema existente; - Verificação de possibilidade de retenção de parte das vazões afluentes; - Elaboração de campanhas de educação ambiental.
Influência das Mudanças Climáticas (Ramos, 2010; Silva Junior, 2015)	- Análise dos impactos decorrentes de possíveis mudanças climáticas, provocadas pelo aquecimento global, em sistemas de drenagem - Identificação de redes de drenagem que estão trabalhando com sobrecarga em decorrência de utilização de novas equação IDFs.	- Atualização contínua das equações IDF's;
Diagnóstico de Pontos críticos de alagamentos (Silva Junior, 2015; Oliveira, 2017; Parisi, 2019)	- Proposta de adequação da rede de drenagem na área de influência de pontos críticos de drenagem a partir de simulações com os softwares hidrológicos e hidrodinâmicos.	- Atualização do cadastro técnico do sistema de microdrenagem; - Implantação de estações de monitoramento hidrológico.
Zoneamento das áreas ribeirinhas com restrições a ocupação (Neves, 2019; Silva, 2010; Cavalcanti Neto, 2020; Prado, 2023)	- Análise de indicadores de perigo como auxílio no zoneamento; - Zoneamento do uso e ocupação do solo, incentivando a legislação para garantir o percentual destinado para área permeável; - Análise da influência da maré no desempenho hidrodinâmico do canal;	- Identificação das áreas críticas e orientação da população, a partir dos indicadores de perigo; - Elaboração/atualização de planos diretores para as bacias hidrográficas dos principais rios da cidade do Recife; - Políticas de educação ambiental eficiente.

Título	Aplicação Prática	Recomendações Futuras
	- Identificação de áreas vulneráveis aos fenômenos de subsidência e deslizamento de encostas a partir de imagens de satélites e bancos de dados de livre acesso.	- Avaliação de cenários com utilização de medidas estruturais.
Projetos Resilientes (Falcão, 2018; Souza, 2019).	- Implementação de projetos compostos por infraestruturas verdes como um parque urbano, para aumentar com o percentual do volume infiltrado em eventos de precipitação intensa; - Caracterização hidrodinâmica do solo e determinação da curva de retenção e condutividade hidráulica; - Capacidade de infiltração de diversas praças em Recife-PE;	- Desenvolvimento e implantação de projetos compostos por infraestruturas verdes, como o Parque Capibaribe, ao longo de 15km da margem do Rio Capibaribe, contribuindo para a gestão de recursos hídricos da cidade; - Estudo aprofundado nas demais camadas do solo para adaptação de praças públicas em microbacias de infiltração.

5. CONCLUSÕES

A resiliência urbana em Recife, especialmente em relação à gestão de riscos às inundações, constitui um desafio multidisciplinar que exige uma abordagem integrada e adaptativa, que identificou e analisou diversas estratégias de resiliência, categorizadas em resiliência de engenharia, ecológica e socioecológica.

As estratégias de engenharia destacam a importância de desenvolver infraestruturas que possam resistir e se recuperar rapidamente de eventos extremos. A resiliência ecológica enfatiza a necessidade de integrar soluções baseadas na natureza. Por fim, a resiliência socioecológica aborda a interação entre comunidades humanas e sistemas naturais. A participação comunitária é crucial para o sucesso das estratégias de resiliência.

Programas de educação e conscientização ambiental podem ser implementados com foco em práticas sustentáveis, gestão responsável dos recursos hídricos, manejo adequado de resíduos, ocupação segura do solo e conservação das áreas verdes e corpos hídricos. Essas estratégias promovem o engajamento social, fortalecem o senso de corresponsabilidade ambiental e ajudam a preparar a população para agir de forma preventiva e adaptativa diante de riscos climáticos.

Este estudo contribui para a compreensão das práticas de resiliência em contextos urbanos, especialmente em cidades de países em desenvolvimento como Recife. As estratégias discutidas podem servir de guia para planejadores urbanos e formuladores de políticas que buscam construir cidades mais resilientes e sustentáveis. Além disso, a integração das três perspectivas de resiliência

fornece uma abordagem holística que pode ser aplicada em diferentes contextos para enfrentar os desafios crescentes das mudanças climáticas e urbanização acelerada.

Para garantir o sucesso das estratégias de resiliência, é fundamental continuar investindo em pesquisa, capacitação e políticas públicas que promovam a colaboração entre diferentes níveis de governo, setores empresariais e a sociedade como um todo. A articulação com a Defesa Civil e Autarquias de Trânsito e Transporte para a implementação de um plano de ação para emergências, por exemplo, é essencial. A integração com a Apac para o controle da vazão máxima dos reservatórios e o sistema de monitoramento e informações pluviométricas com radar são cruciais para prevenir inundações e fornecer dados precisos em tempo real. Além disso, o monitoramento e controle da qualidade da água, coordenado com a Agência de Meio Ambiente, assegura que a água disponível esteja em condições adequadas para uso.

A conexão entre esses órgãos e a população é fundamental para garantir a resiliência da cidade. Somente agindo de maneira integrada será possível criar cidades que não apenas resistam a desastres, mas também se adaptem e floresçam em um ambiente em constante mudança. A colaboração contínua entre os setores governamentais e a participação ativa da comunidade garantem uma resposta rápida e eficaz a eventos climáticos adversos, promovendo uma cidade mais segura e resiliente.

REFERÊNCIAS

ABDEL-MOOTY, M. N.; EL-DAKHAKHNI, W.; COULIBALY, P. (2022). Data-driven community flood resilience prediction. *Water (Switzerland)*, 14(13). <https://doi.org/10.3390/w14132120>

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. (2024). Impacto da mudança climática nos recursos hídricos no Brasil. Brasília, 96p. Disponível em: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/31604c98-5bbe-4dc9-845d-998815607b33/attachments/Mudancas_Climaticas_25012024.pdf. Acesso em agosto de 2024.

ANWANA, E. O.; OWOJORI, O. M. (2023). Analysis of flooding vulnerability in informal settlements literature: Mapping and research agenda. *Social Sciences*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/socsci12010040>

APAC – AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA. (2024). Radar meteorológico. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/sobre-meteorologia/113-sobre-meteorologia/271-sobre-o-radar>. Acesso em agosto de 2024.

ARAUJO, D. C. S.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, S. F.; FARIAS, V. E. M.; RODRIGUES, A. B. (2024). Analysis of climate change scenarios using CMIP6 models in Pernambuco, Brazil. *Brazilian Journal of Environmental Sciences*, 59, e1868.

ARIYANINGSIH; SHAW, R. (2022). Integration of SETS (social–ecological–technological systems) framework and flood resilience cycle for smart flood risk management. *Smart Cities*, 5(4), 1312–1335. <https://doi.org/10.3390/smartcities5040067>

- ASGHARI, F.; PIADÉ, F.; EGYIR, D.; YOUSEFI, H.; RIZZUTO, J. P.; CAMPOS, L. C.; BEHZADIAN, K. (2023). Resilience assessment in urban water infrastructure: A critical review of approaches, strategies and applications. *Sustainability*, 15, 11151. <https://doi.org/10.3390/su151411151>
- AZAD, M. J.; PRITCHARD, B. (2023). The importance of women's roles in adaptive capacity and resilience to flooding in rural Bangladesh. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 90. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103660>
- AZEVEDO, J. H. C. (2019). Financiamento da drenagem urbana: uma proposta para a região da cidade do Recife - PE – Brasil. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco.
- BAKHSHIPOUR, A. E.; HESPEN, J.; HAGHIGHI, A.; DITTMER, U.; NOWAK, W. (2021). Integrating structural resilience in the design of urban drainage networks in flat areas using a simplified multi-objective optimization framework. *Water*, 13, 269. <https://doi.org/10.3390/w13030269>
- BANCO MUNDIAL. (2023). Relatório sobre clima e desenvolvimento para o país: Brasil. Brasília: Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento/Banco Mundial.
- BOZZA, A.; ASPRONE, D.; FABBROCINO, F. (2017). Urban resilience: a civil engineering perspective. *Sustainability*, 9, 103. <https://doi.org/10.3390/su9010103>
- BRASIL. PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. SECRETARIA DE ASSUNTOS ESTRATÉGICOS. (2015). Bases conceituais e compilação dos estudos. Brasília. Resumo Executivo.
- CABRAL, J. J. S. P.; ALENCAR, A. V. (2005). Recife e a convivência com as águas. Gestão do Território e Manejo Integrado das Águas Urbanas. Ministério das Cidades, Brasília-DF.
- CABRAL, J. J. S. P.; DA SILVA JUNIOR, M. A. B.; NEVES, Y. T.; RODRIGUES, A. B.; CARVALHO FILHO, J. A. A. (2022). Urban river resilience. In: ESLAMIAN, S.; ESLAMIAN, F. (eds). *Disaster risk reduction for resilience*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-08325-9_14
- CABRAL, J. J. S. P.; NEVES, Y. T.; RODRIGUES, A. B.; CIRILO, J. A. (2025). Computer modeling of small mobile dams for urban channel application. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 18(1), 741–755. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v18.1.p741-755>
- CARTER, J.; CONNELLY, A. (2016). RESIN conceptual framework: supporting decision making for resilient cities. European Union.
- CARVALHO FILHO, J. A. A. (2019). Estudo de contaminantes emergentes e meiofauna no rio Ipojuca no município de Caruaru. Dissertação, Universidade Federal de Pernambuco.
- CARVALHO, M. E. F. S. (2021). Incentivo à revitalização de rios urbanos com abordagem sociohidrológica: estudo de caso da bacia do Capibaribe, Recife-PE. Dissertação, Universidade Federal de Pernambuco.
- CAVALCANTI NETO, M. M. (2020). Modelagem hidráulica-hidrológica do canal do Rio Jordão em Recife levando em conta a urbanização e o efeito da maré. Dissertação, Universidade de Pernambuco.
- CHIKOORE, H.; BOPAPE, M. J. M.; NDARANA, T.; MUOFHE, T. P.; GIJBEN, M.; MUNYAI, R. B.; MANYANYA, T. C.; MAISHA, R. (2021). Synoptic structure of a sub-daily extreme

precipitation and flood event in Thohoyandou, north-eastern South Africa. *Weather and Climate Extremes*, 33. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100327>

COBBINAH, P. B.; ASIBEY, M. O.; OPOKU-GYAMFI, M.; PEPRAH, C. (2019). Urban planning and climate change in Ghana. *Journal of Urban Management*, 8, 261–271. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2019.02.002>

COSTA, M. B. S. F.; MALLMANN, D. L. B.; PONTES, P. M.; ARAUJO, M. (2010). Vulnerability and impacts related to the rising sea level in the metropolitan center of Recife, Northeast Brazil. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*, 5, 169–177.

DONG, X.; GUO, H.; ZENG, S. (2017). Enhancing future resilience in urban drainage system: green versus grey infrastructure. *Water Research*, 124, 280–289. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.07.038>

EMLURB/ PREFEITURA DO RECIFE. (2017). Plano Consolidado (Resumo Executivo). In: PDDR, ABF Engenharia, Serviços e Comércio Ltda, Recife, 245 p.

EMLURB/PREFEITURA DO RECIFE. (2020). Drenagem. Disponível em: <https://emlurb.recife.pe.gov.br/drenagem-1>

FALCÃO, L. C. (2018). Infraestrutura verde como estratégia de gestão de recursos hídricos em área urbana em Recife (PE). Dissertação, Universidade Federal de Pernambuco.

FARIAS, V. E. M.; RODRIGUES, A. B.; MONTEIRO, P. B. C.; ARAÚJO, D. C. S.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; CABRAL, J. J. S. P. (2024). Perspectivas climáticas futuras com base nos modelos do CMIP6 para municípios da Região Metropolitana do Recife (PE), Brasil. *Revista Caminhos de Geografia*, 25(101), 58–79. <https://doi.org/10.14393/RCG2510171642>

FUCHS, S.; KEILER, M.; ORTLEPP, R.; SCHINKE, R.; PAPATHOMA-KÖHLE, M. (2019). Recent advances in vulnerability assessment for the built environment exposed to torrential hazards: challenges and the way forward. *Journal of Hydrology*, 575, 587–595. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.067>

GHASEMZADEH, B.; ZARABADI, Z. S. S.; MAJEDI, H.; BEHZADFAR, M.; SHARIFI, A. (2021). A framework for urban flood resilience assessment with emphasis on social, economic and institutional dimensions: a qualitative study. *Sustainability*, 13, 7852. <https://doi.org/10.3390/su13147852>

GÓES, V. C. (2009). Simulação hidrológico-hidrodinâmica integrada ao geoprocessamento para avaliação da macrodrenagem em centros urbanos. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco.

GUSMÃO, M. B. R. (2016). Diretrizes para uma abordagem sistêmica de gestão das águas pluviais urbanas. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco.

HAMEL, P.; HAMANN, M.; KUIPER, J.; ANDERSSON, E.; ARKEMA, K.; SILVER, J.; DAILY, G.; GUERRY, A. (2021). Combinando perspectivas de serviço ecossistêmico e resiliência no planejamento de infraestrutura natural: lições da área da Baía de São Francisco. *Frontiers in Environmental Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.601136>

HOLLING, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, 1–23. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>

- HOLLING, C. S.; GUNDERSON, L. H. (2002). *Panarchy: understanding transformations in human and natural systems*. Island Press, Washington, DC.
- HOU, C.; WU, H. (2020). Rescuer, decision maker, and breadwinner: women's predominant leadership across the post-Wenchuan earthquake efforts in rural areas, Sichuan, China. *Safety Science*, 125. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104649>
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (2022). Censo Demográfico. <https://www.ibge.gov.br/>. Accessed 22 July 2024
- IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. (2007). *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Summary for policymakers*. In: Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC. (2014). 5th Assessment Report. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland.
- LABOY, M.; FANNON, D. (2016). Resilience theory and praxis: a critical framework for architecture. *Enquiry*, 13, 39–52.
- LEÃO, E.; ANDRADE, J.; NASCIMENTO, L. (2021). Recife: a climate action profile. *Cities*, 116, 103270. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2021.103270>
- LEE, E. H.; LEE, Y. S.; JOO, J. G.; JUNG, D.; KIM, J. H. (2017). Investigating the impact of proactive pump operation and capacity expansion on urban drainage system resilience. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143:7. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000775](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000775)
- LONG, N. V.; LE, T. D. N.; NGUYEN, H.; KHANH, D. V.; THE, N. T. M.; DO, D. T.; CHENG, Y. (2022). From a hard to soft approach for flood management in the Vietnamese Mekong Delta: integrating ecological engineering for urban sustainability in My Tho City. *Water*, 14:7. <https://doi.org/10.3390/w14071079>
- LU, J.; LIU, J.; YU, Y.; LIU, C.; SU, X. (2022). Network structure optimization method for urban drainage systems considering pipeline redundancies. *International Journal of Disaster Risk Science*, 13, 793–809. <https://doi.org/10.1007/s13753-022-00445-y>
- MARENGO, J. A. (2017). Relatório Especial do Painel e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas.
- MARENGO, J.; ALCANTARA, E.; CUNHA, A. P.; SELUCHI, M.; NOBRE, C. *et al.* (2023). Flash floods and landslides in the city of Recife, Northeast Brazil after heavy rain on May 25–28, 2022: causes, impacts, and disaster preparedness. *Weather and Climate Extremes*, 39:100545. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100545>
- MASON, K.; LINDBERG, K.; HAENFLING, C.; SCHORI, A.; MARSTERS, H.; READ, D.; BORMAN, B. (2021). Social vulnerability indicators for flooding in Aotearoa New Zealand. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18:8. <https://doi.org/10.3390/ijerph18083952>
- MELO, I. S.; CARVALHO, R. M. C. M. O.; SOBRAL, M. C. M.; LYRA, M. R. C. C.; SILVA, H. P. (2021). Adaptação aos impactos das mudanças climáticas na perspectiva do Plano Diretor da

cidade do Recife. *Revista Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos*, 23. <https://doi.org/10.22296/2317-1529.rbeur.202140pt>

MIRA ATTANASIO, C.; GANDOLFI, S.; ZAKIA, M. B. J.; TOLEDO VENIZIANI JUNIOR, J. C.; DE PAULA LIMA, W. (2012). A importância das áreas ripárias para a sustentabilidade hidrológica do uso da terra em microbacias hidrográficas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 17(4).

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. (2016). National adaptation plan to climate change. Volume I: general strategy. Brasília. https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/climaozoniodesertificacao/clima/arquivos/pna_volume-i_en.pdf

NEVES, Y. T. (2019). Modelagem hidrológica e hidrodinâmica acoplada 1D/2D utilizando imagens de perfilamento a laser. Dissertation, Universidade Federal de Pernambuco.

NJOGU, H. W. (2021). Effects of floods on infrastructure users in Kenya. *Journal of Flood Risk Management*, 14:4. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12746>

OLIVEIRA, R. L. M. (2017). Alternativas compensatórias para drenagem urbana em ponto crítico da cidade de Recife-PE. Dissertation, Universidade de Pernambuco.

OSHEEN; KANSAL, M. L.; BISHT, D. S. (2022). Evaluation of an urban drainage system using functional and structural resilience approach. *Urban Water Journal*, 20, 1794–1812. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2022.2044495>

PALAZZO, E.; WANG, S. (2022). Landscape design for flood adaptation from 20 years of constructed ecologies in China. *Sustainability (Switzerland)*, 14. <https://doi.org/10.3390/su14084511>

PARISI, S. A. (2019). Análise da capacidade de infiltração para atenuação de alagamento em um ponto crítico na cidade do Recife. Dissertação, Universidade de Pernambuco, 151 p.

PAWAR, B.; PARK, S.; HU, P.; WANG, Q. (2021). Applications of resilience engineering principles in different fields with a focus on industrial systems: A literature review. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 69:104366. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104366>

PBMC – PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. (2016). Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas [MARENGO, J. A.; SCARANO, F. R. (eds)]. PBMC, COPPE - UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 184 p.

PICKETT, S.; MCGRATH, B.; CADENASSO, M.; FELSON, A. (2014). Resiliência ecológica e cidades resilientes. *Building Research e Information*, 42:143–157. <https://doi.org/10.1080/09613218.2014.850600>

PRADO, P. A. A. (2023). Uso de sensoriamento remoto para zoneamento de áreas susceptíveis à ocorrência de subsidência do solo e deslizamento de encostas. Dissertação, Universidade Federal de Pernambuco, 107 p.

PREUSS, S. L. da C.; CABRAL, J. J. da S. P.; MORRISON-SAUNDERS, A.; HUGHES, M.; DE ARAÚJO NUNES, A. B. (2021). Understanding community perceptions of an urban stream before and after a discussion of revitalization possibilities using photo-elicitation. *Environment, Development and Sustainability*, 23(3):3946–3965. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00751-9>

PRIMO, K. R.; SILVA, R. A. e; OLIMPIO, B. C.; SILVA, G. B.; SILVA, A. P. M.; SCHULZ, H. E.; DA SILVA, A. M. (2022). Assessing an ecological revitalization project of urban streams in

Brazilian southeastern region by Analytic Hierarchy Process. *Water, Air, e Soil Pollution*, 233(6). <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05695-6>

RAMOS, A. M. (2010). Influência das mudanças climáticas devido ao efeito estufa na drenagem urbana de uma grande cidade. Tese, Universidade Federal de Pernambuco, 160 p.

RECIFE (2022). Parque Capibaribe: a reinvenção da Recife Cidade Parque. Circe Maria Gama Monteiro, Luiz Goes Vieira Filho, Roberto Montezuma (orgs.). 2. ed. Recife: Cepe.

RECIFE (2022). Recife 500 anos: plano estratégico de longo prazo para o desenvolvimento da cidade. Agência Recife de Inovação e Estratégia – ARIES. 2. ed. Recife: Cepe.

RECIFE (2025). Caracterização do território. <https://www2.recife.pe.gov.br/pagina/caracterizacao-do-territorio#:~:text=Limites%3A%20Limita%2Dse%20ao%20norte,acima%20do%20n%C3%ADvel%20do%20mar>. Acesso em 03/01/2025.

RIBEIRO, P. J. G.; PENA JARDIM GONÇALVES, L. A. (2019). Urban resilience: A conceptual framework. *Sustainable Cities and Society*, 50:101625. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101625>

SALATA, S.; VELIBEYOĞLU, K.; BABA, A.; SAYGIN, N.; COUCH, V. T.; UZELLI, T. (2022). Adapting cities to pluvial flooding: The case of Izmir (Türkiye). *Sustainability (Switzerland)*, 14(24). <https://doi.org/10.3390/su142416418>

SANTOS, A. P. P. dos; ALBUQUERQUE, M. (2003). Do istmo à ilha: Arqueologia Histórica e o estudo dos aterros do Recife Antigo. In: Congresso da Sociedade de Arqueologia Brasileira – Arqueologias da América Latina, 12., São Paulo. Resumos. São Paulo: All Prints Produções, p. 89.

SANTOS, C. R. L. dos (2023). Implantação de dispositivos móveis para retenção de resíduos sólidos nos sistemas de micro e na macrodrenagem da cidade do Recife-PE. Dissertação, Universidade de Pernambuco – Escola Politécnica, Recife, 82 f.

SANTOS, L.; CABRAL, C.; GONÇALVES, R.; DA SILVA, O. (2019). Vulnerabilidades a eventos pluviais de alta magnitude da cidade do Recife – Pernambuco/Brasil. *Revista Geográfica*, 9(2):160–185. <https://doi.org/10.34019/2236-837X.2019.v9.18079>

SHUAIBU, A.; HOUNKPÈ, J.; BOSSA, Y. A.; KALIN, R. M. (2022). Flood risk assessment and mapping in the Hadejia River Basin, Nigeria, using hydro-geomorphic approach and multi-criterion decision-making method. *Water (Switzerland)*, 14(22). <https://doi.org/10.3390/w14223709>

SILVA JUNIOR, M. A. B. (2015). Alternativas compensatórias para controle de alagamentos em localidade do Recife-PE. Dissertação, Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 153 p.

SILVA JUNIOR, M. A. B. da; CABRAL, J. J. P. S.; FONSECA NETO, G. C. da; SILVA, P. O. da; GUERRA, C. M. F.; SILVA, S. R. da (2020a). Desafios para a adaptação da infraestrutura de drenagem urbana em cenário de mudança do clima no Recife-PE. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 5(3):302–318.

SILVA JUNIOR, M. A. B.; FONSECA NETO, G. C.; CABRAL, J. J. S. P. (2020b). Análise estatística para detecção de tendências em séries temporais de temperatura e precipitação no Recife-PE. *Revista Geografia (Recife)*, 37(1):222–240.

- SILVA, P. O. (2010). Análise de técnicas compensatórias de drenagem urbana para atenuação de inundações em uma sub-bacia do rio Jiquiá no Recife. Dissertação, Universidade Federal de Pernambuco, 139 p.
- SOUZA, N. M. de (2019). Importância das praças na gestão dos recursos hídricos. Dissertação, Universidade de Pernambuco, 83 p.
- SOUZA, W. de O.; DE MOURA REIS, L. G.; DA SILVA PEREIRA CABRAL, J. J.; RUIZ-ARMENTEROS, A. M.; QUENTAL COUTINHO, R.; DA PENHA PACHECO, A.; RAMOS ARAGÃO JUNIOR, W. (2024). Analysis of urbanization-induced land subsidence in the city of Recife (Brazil) using persistent scatterer SAR interferometry. *Remote Sensing*, 16:2592. <https://doi.org/10.3390/rs16142592>
- SOUZA, W. de O. (2022). InSAR para avaliação de subsidência do solo devido a ações antrópicas sobre os recursos hídricos subterrâneos e sobre o solo na planície do Recife, Brasil. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco.
- SOUZA, W. M. de (2011). Impactos socioeconômicos e ambientais dos desastres associados às chuvas na cidade do Recife-PE. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, 121p.
- STEEN, R.; AVEN, T. (2011). A risk perspective suitable for resilience engineering. *Safety Science*, 49:292–297. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2010.09.003>
- SUN, R.; SHI, S.; REHEMAN, Y.; LI, S. (2022). Measurement of urban flood resilience using a quantitative model based on the correlation of vulnerability and resilience. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 82:103344. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.103344>
- TAVARES JÚNIOR, J. R.; CANDEIAS, A. L. B. (2013). Localização de aterros no Recife Antigo, Pernambuco a partir do georreferenciamento dos mapas holandês de 1648, inglês de 1907, da planta cadastral de 1990 e da imagem HRC-2008.
- VASCONCELOS, A. F.; MIGUEZ, M. G.; VAZQUEZ, E. G. (2016). Critérios de projeto e benefícios esperados da implantação de técnicas compensatórias em drenagem urbana para controle de escoamentos na fonte, com base em modelagem computacional aplicada a um estudo de caso na zona oeste do Rio de Janeiro. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 21(4):655–662.
- VERÓL, A. P.; BATTEMARCO, B. P.; MERLO, M. L.; MACHADO, A. C. M.; HADDAD, A. N.; MIGUEZ, M. G. (2019). The urban river restoration index (URRIX) – A supportive tool to assess fluvial environment improvement in urban flood control projects. *Journal of Cleaner Production*, 239:118058. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118058>
- WANDERLEY, L. S. de A.; NÓBREGA, R. S.; DUARTE, C. C.; MOREIRA, A. B.; ANJOS, R. S. dos (2021). Tipos de tempo associados a eventos diários de chuvas intensa na cidade de Recife-PE, Brasil. *Sociedade e Natureza*, 33. <https://doi.org/10.14393/SN-v33-2021-60520>
- WANG, L.; CUI, S.; LI, Y.; HUANG, H.; MANANDHAR, B.; NITIVATTANANON, V.; FANG, X.; HUANG, W. (2022). A review of the flood management: from flood control to flood resilience. *Heliyon*, 8(11). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11763>
- WHEATER, H.; EVANS, E. (2009). Land use, water management and future flood risk. *Land Use Policy*, 26:251–264.

- WU, C. F.; CHEN, S. H.; CHENG, C.; TRAC, L. V. T. (2021). Climate justice planning in global south: Applying a coupled nature-human flood risk assessment framework in a case for Ho Chi Minh City, Vietnam. *Water*, 13(15). <https://doi.org/10.3390/w13152021>
- ZENG, X.; YU, Y.; YANG, S.; LV, Y.; SARKER, M. N. I. (2022). Urban resilience for urban sustainability: Concepts, dimensions, and perspectives. *Sustainability*, 14:2481. <https://doi.org/10.3390/su14052481>
- ZHENG, J.; HUANG, G. (2023). Towards flood risk reduction: Commonalities and differences between urban flood resilience and risk based on a case study in the Pearl River Delta. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 86:103568. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.103568>
- ZHU, S.; LI, D.; FENG, H.; ZHANG, N. (2023). The influencing factors and mechanisms for urban flood resilience in China: From the perspective of social-economic-natural complex ecosystem. *Ecological Indicators*, 147:109959. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.109959>

3. ARTIGO 2: ATUALIZAÇÃO DAS CURVAS DE INTENSIDADE-DURAÇÃO-FREQUÊNCIA DE RECIFE-PE EM DIFERENTES CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

RESUMO

Este estudo objetivou realizar uma breve avaliação das mudanças climáticas e atualizar as curvas IDF de precipitação para Recife-PE. Utilizando o modelo climático MIROC6, selecionado a partir de um conjunto de modelos globais do CMIP6, foram analisadas projeções de precipitação para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Essas projeções foram corrigidas pelo método *Quantile Mapping* e consideradas para três diferentes períodos: curto (2015–2044), médio (2045–2074) e longo prazo (2075–2100). Os resultados indicam variação da precipitação, com tendência de redução, nos dois cenários. Além disso, embora seja esperada redução na intensidade das precipitações acumuladas em 1 dia, em escalas temporais menores, como de 1 hora, há tendência significativa de aumento de eventos extremos, o que gera alertas para possíveis problemas de inundação ainda mais severos, destacando aumento para precipitações acumuladas em 5 dias. Diante dos dados gerados, a atualização das curvas IDF se mostrou uma abordagem essencial para o planejamento urbano, auxiliando na adaptação das infraestruturas de drenagem e mitigação de riscos de inundações, reforçando a importância de considerar as mudanças climáticas nas estratégias de gestão de águas pluviais, contribuindo com a segurança hídrica.

Palavras-Chave: Inundações urbanas; Curvas IDF; CMIP6; Segurança hídrica.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças na intensidade e frequência do clima, incluindo eventos extremos, chuvas fortes e intensas, têm grande impacto na gestão dos recursos hídricos e na gestão do risco de cheias. O quinto relatório de avaliação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), já informava que os riscos relacionados aos eventos climáticos extremos, tais como precipitação intensa e inundações costeiras, devido ao aumento do nível do mar, já se mostram de moderado a alto, podendo chegar a desastrosos nas grandes capitais, sendo agravados pelo uso inadequado do solo e de técnicas pouco eficientes de drenagem (IPCC, 2014). O sexto relatório do IPCC destaca que para o período de 2011–2020, a temperatura média da superfície global aumentou em 1,09°C em comparação com o período de 1850–1900. Esse aumento é o mais significativo já registrado (IPCC, 2021).

Diante dessa situação, as projeções climáticas futuras desempenham um papel crucial na compreensão dos potenciais impactos das alterações climáticas. Elas são essenciais para orientar a tomada de medidas de mitigação e para formular recomendações direcionadas aos decisores políticos (Nashwan e Shahid, 2020).

O Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados – Fase 6 (CMIP6) estabelece diferentes cenários de emissão para projeções climáticas futuras com base na combinação de Caminhos de Concentração Representativos (RCPs) e Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (SSPs). Os cenários no CMIP6 cobrem uma gama mais ampla de características de emissão do que as

consideradas no CMIP5, com emissões altas e muito altas de gases de efeito estufa (GEE) (SSP3-7.0 e SSP5-8.5), emissões intermediárias de GEE (SSP2-4.5) e emissões muito baixas e baixas de GEE e CO₂ (SSP1-1.9 e SSP1-2.6) (O'Neill *et al.*, 2016). Nesta fase, a combinação de RCPs e SSPs tem uma descrição mais clara da evolução socioeconômica da sociedade futura, levando a cenários projetados mais razoáveis. A aplicação de cenários de SSPs na análise das alterações climáticas e na avaliação do risco de catástrofes pode ajudar a fornecer possíveis estratégias de mitigação e resposta (Peng e Li, 2021).

Os eventos climáticos extremos, que podem ser detectados com base nas projeções climáticas do CMIP6, desempenham papel importante na determinação da frequência da sua ocorrência, que é muitas vezes expressa como um intervalo de recorrência. Para analisar padrões extremos de chuva, os pesquisadores geralmente empregam funções de distribuição de probabilidade, como Normal, Log-normal, Exponencial, Gama, Gumbel, Weibull e Valor Extremo Generalizado (GEV). Assim, é possível avaliar as ocorrências extremas utilizando diferentes intervalos de recorrência, como 5, 10, 25, 50 e 100 anos (Sime e Dibaba, 2023).

Uma curva de intensidade-duração-frequência (IDF) de chuva descreve as relações entre a intensidade, duração e frequência de chuvas extremas em um local específico e são construídas ajustando uma distribuição de probabilidade teórica a dados históricos de séries temporais de precipitação, usando séries anuais de precipitação máxima ou séries de duração parcial (Xu *et al.*, 2024).

Os projetos de infraestrutura são baseados nas curvas de precipitação IDF com a suposição de estacionaridade, o que significa que as propriedades estatísticas de eventos futuros serão semelhantes às do passado (Pino-Vargas *et al.*, 2022).

No entanto, essas relações IDF podem mudar ao longo do tempo devido às mudanças climáticas. Portanto, o projeto de um sistema de drenagem adequado deve levar em consideração a curva IDF atualizada com base nos efeitos das mudanças climáticas, visando reduzir os impactos de possíveis inundações em cidades (Bibi e Tekesa, 2022).

Para facilitar a tomada de decisões no planejamento e gestão de infraestruturas hidráulicas urbanas, é importante quantificar o impacto das alterações climáticas nesses sistemas (Noor *et al.*, 2018). Dessa maneira, levar em consideração os efeitos da dinâmica climática na determinação das curvas IDF é útil na avaliação de opções alternativas para tomar precauções contra problemas de capacidade que os sistemas de estrutura de drenagem existentes e recém-construídos podem enfrentar (Gul e Kayaalp, 2023).

As curvas IDF são utilizadas por sua capacidade de descrever as propriedades estatísticas da precipitação em uma determinada área. Elas permitem associar eventos de precipitação de diferentes

durações e intensidades à probabilidade de ocorrência, o que é essencial para conduzir avaliações de perigo ou risco de eventos desencadeados por precipitações (Oguz *et al.*, 2024).

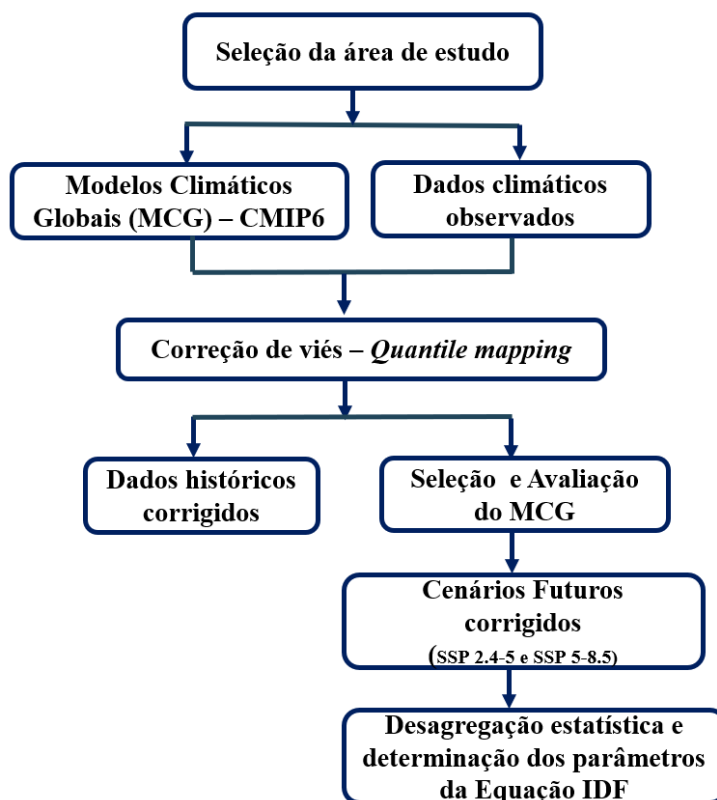
Em Recife-PE, eventos frequentes de precipitação de alta intensidade têm provocado graves problemas ambientais e socioeconômicos que se manifestam por meio de alagamentos, enchentes e deslizamentos em encostas, resultando em perdas materiais e vidas humanas (Marengo *et al.*, 2023; Santos *et al.*, 2019). Em maio de 2022, um evento climático extremo de precipitação atingiu a população de baixa renda na cidade, que habita áreas de risco, levando a numerosas perdas e mortes (Marengo *et al.*, 2023).

Compreender as influências das mudanças climáticas na intensidade das chuvas extremas em Recife é essencial para o planejamento e gestão eficazes do sistema de gerenciamento de águas pluviais, visando reduzir os riscos de inundações urbanas. Portanto, este estudo realiza uma breve avaliação das mudanças climáticas e atualiza as curvas IDF para a cidade de Recife, utilizando o modelo climático global MIROC6 em diferentes cenários de emissões de GEE e períodos de tempo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 1 apresenta, o fluxo metodológico adotado neste estudo, desde a seleção e pré-processamento dos dados climáticos até a projeção das curvas IDF para Recife-PE.

Figura 1 – Fluxograma das etapas metodológicas.



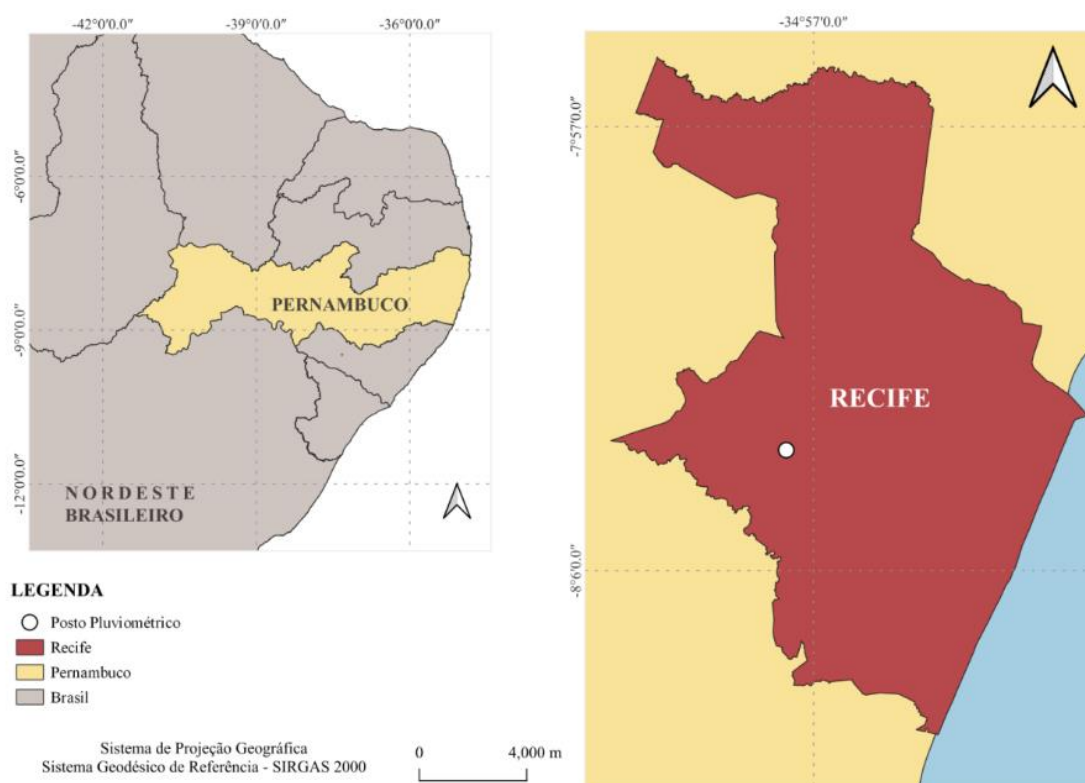
Fonte: A Autora (2025).

2.1 ÁREA DE ESTUDO

Recife é uma cidade situada na Região Nordeste do Brasil (Figura 2), caracterizada por ser uma área costeira composta por uma extensa planície cercada por morros de baixa altitude. A planície de Recife se estende para as partes baixas de Olinda até o bairro de Rio Doce e para as partes baixas de Jaboatão dos Guararapes até os bairros de Piedade e Candeias, apresentando cotas baixas, ligeiramente acima dos níveis da maré alta.

Atualmente, é a maior área urbana do estado de Pernambuco. Sua região metropolitana abriga uma população que ultrapassa 4 milhões de habitantes e a densidade demográfica gira em torno de 7.333 habitantes por km², divididos em 94 bairros (IBGE, 2022). Essa região altamente urbanizada enfrenta alagamentos periódicos durante épocas de precipitação intensa, principalmente quando esses eventos coincidem com marés altas de sizígia.

Figura 2 – Localização da área de estudo, Recife-PE.



Fonte: A autora (2025) a partir de dados do IBGE (2022).

O município apresenta um clima tropical quente e úmido, com classificação do clima “As” de acordo com a Köppen e Geiger, segundo os dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). De acordo com os dados da estação climatológica convencional do posto Recife (Curado), para o período entre 1962 e 2020, a precipitação média anual é de aproximadamente 2300 mm, com

o quadrimestre mais chuvoso entre os meses de abril a julho, e os demais meses com menores valores de precipitação.

Complementarmente, Recife tem altitude média de 4 metros acima do nível do mar, o que a coloca em uma posição sensível em relação às mudanças no nível do mar. O Recife vem sendo afetado pelos impactos provocados com a mudança do clima e vem sendo considerado por pesquisadores de mudanças climáticas como um dos “*hotspots*” que estão mais vulneráveis.

O IPCC (IPCC, 2007) reconhece Recife como uma das cidades mais vulneráveis às mudanças climáticas globais, devido às suas características geográficas e histórico de ocupação urbana. Todavia, a cidade se destaca por ser a primeira no Brasil a declarar estado de emergência climática e estabelecer o ambicioso objetivo de alcançar neutralidade de carbono até 2050. O *Carbon Disclosure Project* posiciona Recife entre as 88 cidades do Mundo que em 2020 lideraram o combate à crise climática (Leão *et al.*, 2021).

2.2 MODELOS CLIMÁTICOS GLOBAIS DO CMIP6

A fim de analisar as alterações climáticas, extremos climáticos e seus efeitos na hidrologia, foram empregados dados climáticos provenientes dos modelos climáticos globais do CMIP6. Os dados foram obtidos a partir da base de dados brutos do CLIMBra (Ballarin *et al.*, 2023), desenvolvido por pesquisadores da Universidade de São Paulo que realizaram o processo de alteração de resolução espacial para 0,25° em todo o Brasil. Foram considerados os dados históricos e os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 de dezenove modelos climáticos globais (MCGs) para a variável de precipitação. Os modelos utilizados que compõem o *dataset* do CLIMBra e detalhes podem ser encontrados em Ballarin *et al.* (2023).

Foram considerados o cenário SSP2-4.5 que apresenta desafios moderados em termos de mitigação e adaptação, associados ao desenvolvimento contínuo de recursos de combustíveis fósseis em escala global. Assim como, o cenário SSP 5-8.5 que indica desafios mais significativos em relação à mitigação e sugere uma abordagem menos pronunciada para a adaptação às mudanças climáticas (Gebrechorkos *et al.*, 2023).

2.3 CORREÇÃO DE VIÉS – MÉTODO QUANTILE MAPPING (QM)

No procedimento de correção de viés, adotou-se o *Quantile Mapping*, um método de correção amplamente reconhecido por sua eficácia na correção de dados oriundos de modelos climáticos (Anil e Raj, 2022; Heo *et al.*, 2019). A implementação prática do QM foi realizada por meio de um código desenvolvido e disponibilizado por Shrestha (2017) no ambiente RStudio. Este código incorpora uma técnica de redução de escala baseada no método de mapeamento quantil, através do pacote ‘*qmap*’.

Os dados climáticos futuros provenientes do CLIMBra foram utilizados como entrada para o código, enquanto os dados observados, do Posto Curado – Recife, compuseram a base de referência. O posto tem código 82900, sob coordenadas de -34,95° (longitude) e -8,06° (latitude), e altitude de 11,3 m, situado no perímetro urbano com baixa taxa de ocupação no bairro do Curado. O resultado consiste em dados climáticos futuros corrigidos, ajustados de acordo com os cenários estabelecidos.

Os fatores de correção de viés foram aplicados às projeções futuras de precipitação dos modelos apresentados no intervalo de 2015 a 2100, pressupondo que o viés permanece invariável nas condições futuras. Esse procedimento visa aprimorar a representação das condições climáticas projetadas, levando em consideração as discrepâncias identificadas nos modelos em comparação com os dados observados.

2.4 SELEÇÃO DOS MODELOS CLIMÁTICOS GLOBAIS – CMIP6

A partir das séries temporais diárias, foram realizados os acumulados mensais para todo o período histórico do posto pluviométrico de análise e dos 19 modelos climáticos, com auxílio de programação em *python*. Dessa maneira, foram calculadas, mês a mês, as medidas estatísticas de avaliação a partir das métricas: viés relativo, coeficiente de correlação de Pearson (r) e índice de Willmott (d).

O viés relativo (Equação 1) indica a variação percentual entre valores simulados (M) e dados de referência (O), destacando superestimativas (valores positivos) ou subestimativas (valores negativos) na precipitação simulada. Essa métrica é mais representativa que o viés absoluto, visto que padroniza as discrepâncias em uma mesma escala percentual.

$$Viés_{rel} = \frac{M - O}{O} \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

O coeficiente de Pearson (Equação 2) e o índice de Willmott (Equação 3) são utilizados para avaliar a correlação entre os modelos globais e os dados de precipitação observados. Os valores próximos a 1 indicam uma correlação positiva, enquanto valores próximos a -1 indicam uma correlação negativa. Valores próximos a 0 indicam a ausência de correlação entre as variáveis.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O)(M_i - M)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i - M)^2 \sum_{i=1}^n (O_i - O)^2}}$$

Equação 2

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - O)^2}$$

Equação 3

Para um modelo ser considerado com boa performance, foram considerados: (i) um viés relativo entre $\pm 50\%$; (ii) correlação de Pearson com valor maior que 0,5 e (iii) índice de Willmott

maior que 0,7, utilizando abordagem similar à proposta por Oliveira *et al.* (2023). No entanto, para este estudo, maior rigor foi aplicado aos valores das métricas, dada a maior quantidade de MCGs.

Para assegurar uma comparação mais assertiva na seleção dos MCGs, todos os valores dos índices estatísticos foram normalizados e, sem seguida, foi calculada a média de valores para formar um *ranking* para cada modelo, conforme a Equação 4. A normalização das métricas garante que todas tenham a mesma influência no ranqueamento.

$$Ranking = \frac{Viés_{rel.norm} + Pearson_{norm} + Willmott_{norm}}{3} \quad \text{Equação 4}$$

Com base nos critérios adotados, os modelos foram classificados por ordem de desempenho (Tabela 1). Quanto maior o valor da coluna *ranking*, melhor a performance do modelo em reproduzir a climatologia local. Cores mais frias (azul) indicam melhores resultados, para todos os indicadores, enquanto cores mais quentes (amarelo) indicam resultados menos favoráveis.

Tabela 1 – Critérios utilizados para seleção do(s) modelo(s) climático(s). MCG = modelo climático global.

MCG	País/região de origem	Viés Relativo	Correlação de Pearson	Índice de Willmott	Ranking
MIROC6	Japão	40,36	0,55	0,79	1,00
GFDL-CM4	EUA	44,06	0,55	0,79	0,95
UKESM1.0	UK	50,59	0,55	0,79	0,85
INM-CM5	Rússia	46,37	0,51	0,77	0,76
GFDL-ESM4	EUA	60,85	0,53	0,78	0,63
HadGEM3-GC31-LL	UK	48,75	0,48	0,76	0,62
EC-EARTH3	Europa	48,65	0,49	0,75	0,62
NESM3	China	53,79	0,49	0,76	0,57
KIOST-ESM	Coréia do Sul	56,28	0,50	0,76	0,56
INM-CM4-8	Rússia	55,49	0,49	0,76	0,55
NorESM2-MM	Noruega	48,79	0,47	0,73	0,51
MPI-ESM1.2-HR	Alemanha	52,53	0,46	0,75	0,49
CMCC-ESM2	Europa	53,17	0,47	0,74	0,47
TaiESM1	Taiwan	52,74	0,45	0,73	0,40
ACCESS-ESM1-5	Austrália	45,84	0,43	0,71	0,39
ACCESS-CM2	Austrália	51,50	0,47	0,68	0,32
MRI-ESM2	Japão	53,33	0,43	0,72	0,31
IPSL-CM6A	Europa	48,20	0,41	0,70	0,28
K-ACE	Coréia do Sul	63,44	0,43	0,72	0,17

Fonte: A Autora (2025).

O modelo global MIROC6 foi o que apresentou melhor desempenho, de acordo com o *ranking* apresentado. Desse modo, foi o modelo selecionado para as análises posteriores em Recife-PE. A

escolha de gerar as curvas IDF com apenas um modelo se deu, principalmente, devido à melhor resposta e praticidade na gestão e planejamento. Curvas IDF baseadas em diferentes modelos podem dificultar a elaboração de projetos de infraestruturas, visto que causam dúvidas sobre qual o modelo mais adequado a utilizar. Além disso, uma média multimodelo (média dos 19 MCGs) pode não ser recomendada neste caso, considerando as grandes variações na qualidade dos dados estimados mesmo após correção de viés, conforme evidenciado na Tabela 1. Visando facilitar esse processo, optou-se por utilizar o MIROC6, dada a sua boa capacidade na detecção da climatologia local. Costa *et al.* (2020), revisando as curvas IDF em condições de mudanças climáticas na Bacia do Tapajós, na região amazônica do Brasil, também detectaram que o MIROC5 apresentou melhores resultados quando comparado a outros modelos. Avaliando um conjunto de modelos, Sabóia *et al.* (2017) selecionaram o MIROC5 e identificaram que o mesmo gerou curvas IDF que menos divergiram da equação oficial de Fortaleza-CE.

2.4 ESTRATÉGIAS DE AVALIAÇÃO DO MODELO CLIMÁTICO

Para verificar variação da precipitação projetada pelo MIROC6, nos dois cenários, foram calculadas anomalias subtraindo o valor do modelo climático do valor da climatologia de referência. As anomalias relativas foram obtidas conforme abordagem proposta por Jayawardhana e Chathurange (2020), de acordo com equação do viés relativo apresentada na Equação 5.

$$Anomalia_{m,y} = \left(\frac{Projetado - Referência}{Referência} \right) \times 100 \quad \text{Equação 5}$$

Onde: $Anomalia_{m,y}$ representa as anomalias de precipitação mensais ou anuais, "Projetado" refere-se aos dados climáticos dos diferentes cenários e "Referência" corresponde aos dados históricos de referência.

As variações na frequência e intensidade de eventos climáticos extremos podem causar impactos imediatos e significativos na sociedade e no meio ambiente, intensificando os desafios existentes em uma região (Junqueira *et al.*, 2020; Reboita *et al.*, 2021). Com base em dados diários de precipitação fornecidos pelo modelo climático MIROC6, cinco índices relacionados à precipitação e relevantes para esse estudo foram calculados. São eles: (i) PRCPTOT: precipitação total anual em dias chuvosos ($PR \geq 1 \text{ mm}$); (ii) R20mm: número de dias no ano em que o total diário de precipitação $PRCP \geq 20\text{mm}$; (iii) SDII: Índice Simples de Intensidade Diária (mm); (iv) Rx1day: precipitação anual máxima de 1 dia (mm) e (v) Rx5day: precipitação máxima anual consecutiva de 5 dias. A aplicação desses índices tem sido amplamente aceita em diversos estudos sobre mudanças climáticas (Medeiros *et al.*, 2022; Avila-Diaz *et al.*, 2020), destacando sua relevância e utilidade na análise climática.

Para avaliar as mudanças dos índices para os diferentes períodos futuros em relação ao histórico, a variação relativa de cada índice relacionado à precipitação foi calculada utilizando a mesma lógica da equação do viés relativo (Tabela 1), abordagem também utilizada por Medeiros *et al.* (2022). Os índices apresentados foram calculados para diferentes períodos de curto (2015–2044), médio (2045–2074) e longo prazo (2075–2100), utilizando como referência para cálculo das anomalias o período histórico de precipitação de dados disponibilizados entre 1980 e 2010.

Como os dados de projeção climática utilizados abrangiam o intervalo de 2015 a 2100, os dois primeiros períodos analisados seguiram a extensão padrão de 30 anos, conforme as normas climatológicas recomendadas para estudos climáticos. Já o último período compreendeu os 26 anos finais da série (2075–2100), em razão da limitação da disponibilidade dos dados.

Destaca-se que a análise foi realizada até o ano de 2100 em conformidade com as diretrizes adotadas pelo IPCC, que utiliza este horizonte temporal como referência para projeções climáticas de longo prazo. Esse período é amplamente reconhecido na literatura científica por permitir a avaliação dos impactos cumulativos das mudanças climáticas sob diferentes cenários de emissões, fornecendo subsídios relevantes para o planejamento urbano e a formulação de políticas públicas adaptativas.

2.5 DESAGREGAÇÃO ESTATÍSTICA E DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA EQUAÇÃO IDF

O método da curva IDF é utilizado para encontrar uma máxima intensidade de precipitação, que corresponde a um determinado tempo de retorno e duração. Apresenta-se a seguir a curva IDF (Equação 6), na qual os critérios utilizados são obtidos de análise processamento de dados de pluviométricos.

$$i = \frac{a \cdot T_r^b}{(t + c)^d} \quad \text{Equação 6}$$

Onde: i é a intensidade (mm/h); T_r é o tempo de retorno (anos); t é a duração da chuva (minutos); a , b , c e d são os parâmetros que devem ser determinados para cada local.

Para desagregação de precipitações diárias foram considerados os coeficientes desenvolvidos pela DAEE/CETESB (1979), que oferecem valores médios aplicáveis em todo o Brasil e são amplamente adotados devido à sua fácil aplicação e consolidação no meio técnico.

A determinação dos parâmetros da equação IDF foi conduzida por meio da utilização do software *Genetic Algorithm Methodology for IDF* (GAM-IDF), software de livre acesso, desenvolvido por membros do Grupo de Pesquisa em Hidrologia e Modelagem Hidrológica em Bacias Hidrográficas da Universidade Federal de Pelotas (UFPel). O GAM-IDF emprega um

algoritmo genético² para ajustar equações IDF com base em dados diários de chuva, combinando-os com a técnica de desagregação da chuva diária.

Existem diversas probabilidades disponíveis para definir a função de densidade de probabilidade (FDP). Dessa maneira, para o período de dados pluviométricos analisados para o posto Curado, foram simuladas todas as funções de densidade de probabilidade disponíveis e selecionadas as que melhor apresentaram coeficientes estatísticos. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos a partir dessa comparação entre as FDP disponíveis no GAM-IDF para os dados de precipitação ocorridos do Posto Curado entre 1980 e 2010.

Tabela 2 – Desempenho comparativo dos ajustes de função de densidade de probabilidade (FDP) para o Posto Curado, no período de 1980 a 2010.

FDP	Teste de Anderson Darling ao nível de significância de 5%			NSE	RMSE
	Estatística	P-valor	Status		
Logística Generalizada	0,1540	0,9984	FDP se ajusta	0,9985	3,4882
Gumbel	0,1548	0,9983	FDP se ajusta	0,9963	5,5012
Generalizada de Valores Extremos	0,1519	0,9985	FDP se ajusta	0,9959	5,7118
Normal Generalizada	0,1573	0,9981	FDP se ajusta	0,9959	5,7231
Lognormal 3P	0,1573	0,9981	FDP se ajusta	0,9959	5,7231
Pearson Tipo III	0,1818	0,9947	FDP se ajusta	0,9950	6,2203
Gamma	0,1905	0,9929	FDP se ajusta	0,9948	6,1998

Fonte: A autora (2025).

O p-valor varia de 0 a 1 e representa a probabilidade de observar uma discrepância entre os dados e a FDP tão grande quanto a observada, caso a FDP seja verdadeira. Valores altos de p-valor (próximos de 1) indicam baixa evidência contra o ajuste da FDP, ou seja, sugerem que a distribuição é adequada para representar os dados. Já valores baixos (menores que o nível de significância) indicam que a distribuição não se ajusta bem aos dados.

O coeficiente de eficiência de *Nash-Sutcliffe* (NSE) varia de $-\infty$ a 1, sendo que um valor mais próximo de 1 indica um ajuste melhor do modelo em relação aos dados observados. A partir dos dados apresentados, foi selecionada a distribuição Logística Generalizada, para a análise com os dados pluviométricos do posto Curado e os cenários climáticos futuro. Os tempos de retorno considerados foram de 5, 10, 25, 50 e 100 anos.

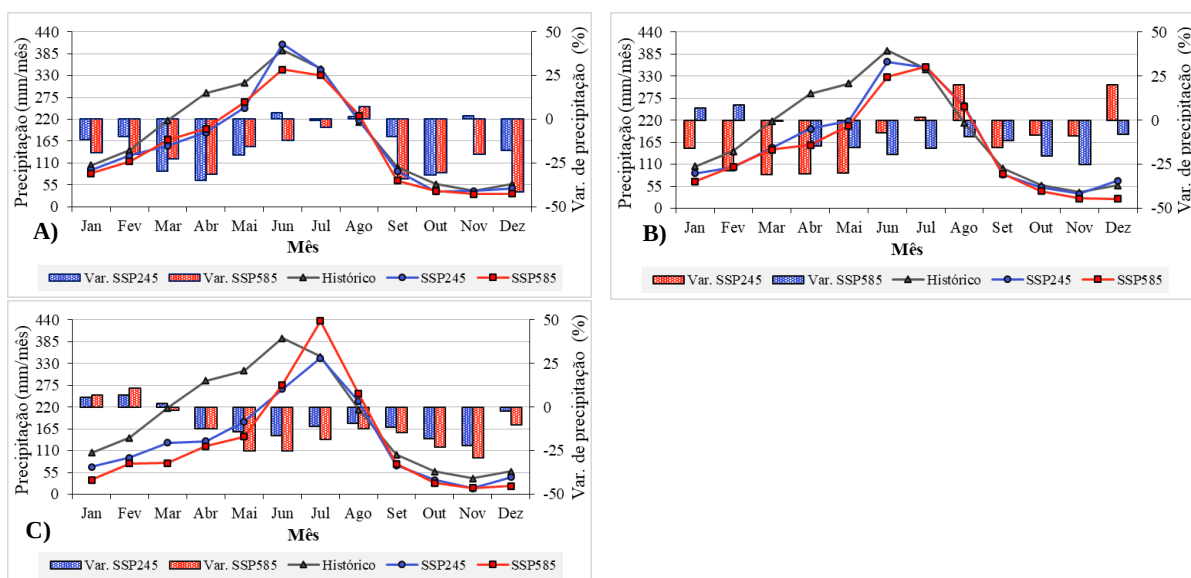
² Algoritmos genéticos são métodos de otimização inspirados na teoria da evolução natural, utilizados para encontrar soluções ótimas em problemas complexos. No contexto das equações IDF, esses algoritmos buscam os parâmetros que melhor ajustam os dados observados de precipitação, maximizando o desempenho estatístico do modelo por meio de operadores evolutivos como seleção, cruzamento e mutação (Goldberg, 1989).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ANOMALIAS FUTURAS DE PRECIPITAÇÃO PARA O RECIFE – PE

As projeções climáticas analisadas a partir dos MCGs desempenham um papel importante na avaliação das implicações das mudanças climáticas, sendo essenciais para a formulação de estratégias adaptativas em escalas global, regional e local, visando mitigar os efeitos adversos. Foram realizadas análises das médias climáticas para o dado de precipitação para 3 intervalos temporais: curto, médio e longo prazo, para os cenários de emissão SSP2-4.5 e SSP5-8.5 do MCG MIROC6 (Figura 3).

Figura 3 – Anomalias de precipitação para Recife-PE até o final do século, com base no modelo MIROC6 para os cenários SSP 2-4.5 e SSP 5-8.5. A) 2015–2044; B) 2045–2074; C) 2075–2100. Var. = mudança de precipitação em %.



Fonte: A autora (2025) a partir de dados de Ballarin *et al.* (2023).

O modelo avaliado prevê redução na precipitação, especialmente no primeiro semestre e para os diferentes períodos, com impacto mais significativo no cenário SSP5-8.5, o que já era esperado. Essa redução no regime pluviométrico pode acarretar diversos problemas, como redução de disponibilidade hídrica, comprometimento da recarga de aquíferos e diminuição no volume de armazenamento de reservatórios, requerendo maior atenção na gestão hídrica.

Os dados da Figura 2 também são apresentados na Tabela 3, que expressa o quanto as precipitações tendem a variar em comparação com o valor histórico de referência (1980–2010), totalizando a precipitação anual de 2271,37 mm. Está prevista uma redução da precipitação total anual de até -12,06% e -16,19% já em curto prazo, nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, respectivamente. Para o período mais longo essa redução deve ser ainda mais extrema, variando de -28,80% a -31,06%, nos dois cenários.

Tabela 3 – Alteração da precipitação prevista para Recife até o final do século, com base no modelo MIROC do CMIP6 para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5.

Período	Precipitação anual		Variação de precipitação (mm)		Variação de precipitação (%)	
	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5
2015-2044	1997,47	1903,73	-273,91	-367,64	-12,06%	-16,19%
2045-2074	1972,03	1794,13	-299,35	-477,24	-13,18%	-21,01%
2075-2100	1617,14	1565,84	-654,24	-705,53	-28,80%	-31,06%

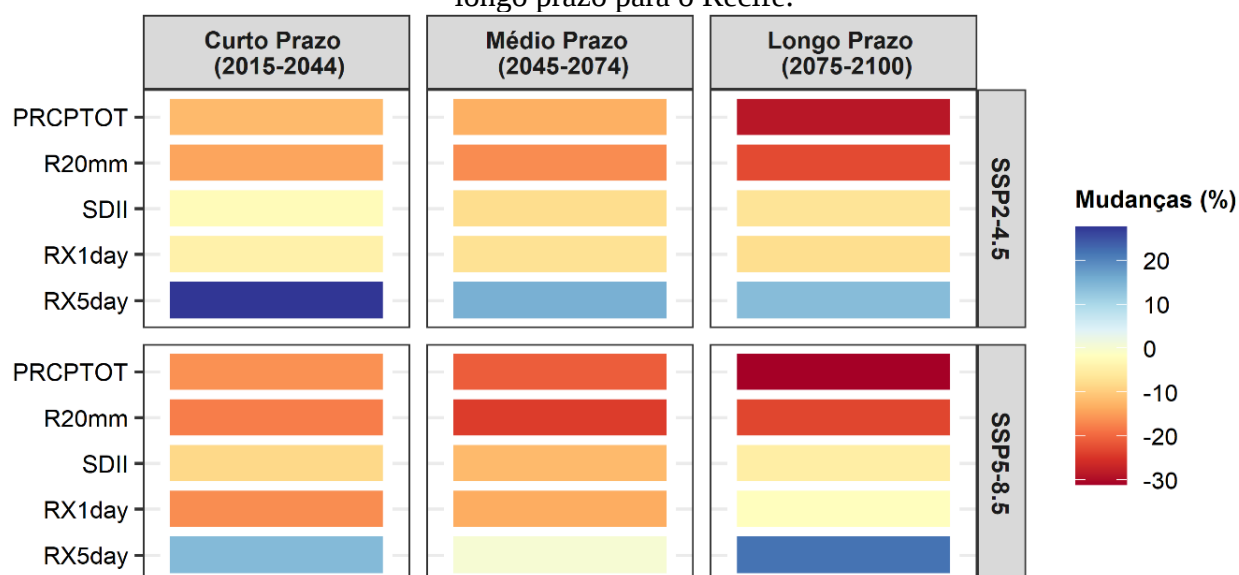
Fonte: A autora (2025).

O Relatório de Impacto da Mudança Climática nos Recursos Hídricos do Brasil (ANA, 2024) observou que as regiões hidrográficas localizadas no Norte, Nordeste e parte do Centro-Oeste tenderão a sofrer com maior escassez hídrica em virtude de uma tendência na diminuição da disponibilidade hídrica. Isso poderá se intensificar com o passar do tempo à medida em os níveis de emissão de GEE aumentem e, conseqüentemente, a temperatura. As projeções indicam que pode haver diminuições de até 40% na disponibilidade hídrica já em 2040 nas principais regiões hidrográficas brasileiras, além de um aumento substancial no número de trechos de rios intermitentes.

Na avaliação da Região Metropolitana do Recife, Nóbrega *et al.* (2015) observaram que a utilização de índices revelou uma tendência desfavorável, indicando uma diminuição na precipitação acumulada, além de alterações adversas na distribuição sazonal e intensidade das chuvas. Complementarmente, Souza e Azevedo (2012) sugerem que a precipitação total anual para Recife está em declínio ou que há um aumento no número de dias anuais com chuvas. Essa tendência também foi confirmada pelos dados obtidos no presente estudo.

Os índices climáticos utilizados são apresentados na Figura 4, considerando os diferentes períodos e cenários de emissão, também apresentam possíveis variações. O PRCPTOT serve como um indicador complementar para avaliar a variabilidade da precipitação no Recife, permitindo a identificação de aumentos ou diminuições na precipitação e das tendências de curto, médio e longo prazo quando calculado para cenários futuros. Em Recife, ele tende a diminuir significativamente em ambos os cenários de emissão, com a redução se tornando mais acentuados no longo prazo, especialmente no cenário SSP5-8.5, onde a precipitação pode reduzir até 31% em comparação com os dados históricos. Esse dado está em consonância com estudos anteriores, como o PBMC (2016) que, utilizando o Eta-HadGEM e o MIROC5, identificou uma redução nas chuvas de verão e das chuvas de outono no litoral.

Figura 4 - Mudança relativa dos índices de precipitação para os cenários futuros a curto, médio e longo prazo para o Recife.



Fonte: A autora (2025).

Os índices R20mm e SDII podem identificar a intensidade e frequência das chuvas intensas e avaliar os impactos desses eventos, como em inundações e erosão do solo. Tanto o índice R20mm quanto o SDII indicam uma tendência de redução na frequência e intensidade das chuvas intensas em Recife para ambos os cenários de emissão de GEE. Há uma redução no número de dias em que a precipitação diária atinge ou excede 20 mm. A diminuição varia de 14,26% em curto prazo no cenário intermediário de emissões até 23,36% no cenário SSP5-8.5 em longo prazo. A intensidade média diária da precipitação também apresenta uma redução, embora menos acentuada, variando de 2,44% a 4,89% nos dois cenários, respectivamente.

A máxima precipitação diária (RX1day) apresenta uma redução, variando de 1,81% a 16,53%. Isso sugere que eventos de precipitação extrema em um único dia tendem a diminuir. Em contrapartida, a máxima precipitação em 5 dias consecutivos (RX5day) mostra um aumento significativo em todos os períodos e cenários, sugerindo aumento de eventos de precipitação ao longo de cinco dias. Esse resultado está alinhado com o PBMC (2016), que observou uma pequena tendência de aumento nas chuvas intensas representadas por RX1day e RX5day na cidade. Portanto, embora os eventos de precipitação extrema em um único dia possam diminuir, há uma tendência de que esses eventos se concentrem mais em períodos de cinco dias.

Guedes e Silva (2020) observaram que os valores de chuva acima de 50 mm podem ocorrer em todos os meses do período chuvoso, com uma frequência de 8 vezes por ano. A partir de uma análise decadal, os resultados indicam uma diminuição das chuvas no acumulado anual, e essa redução é mais evidenciada nas faixas de chuvas fracas ($10 < P < 30$ mm), moderadas ($30 < P < 50$ mm) e fortes ($50 < P < 70$ mm), enquanto a categoria muito forte ($70 < P < 100$ mm) foi quase estável,

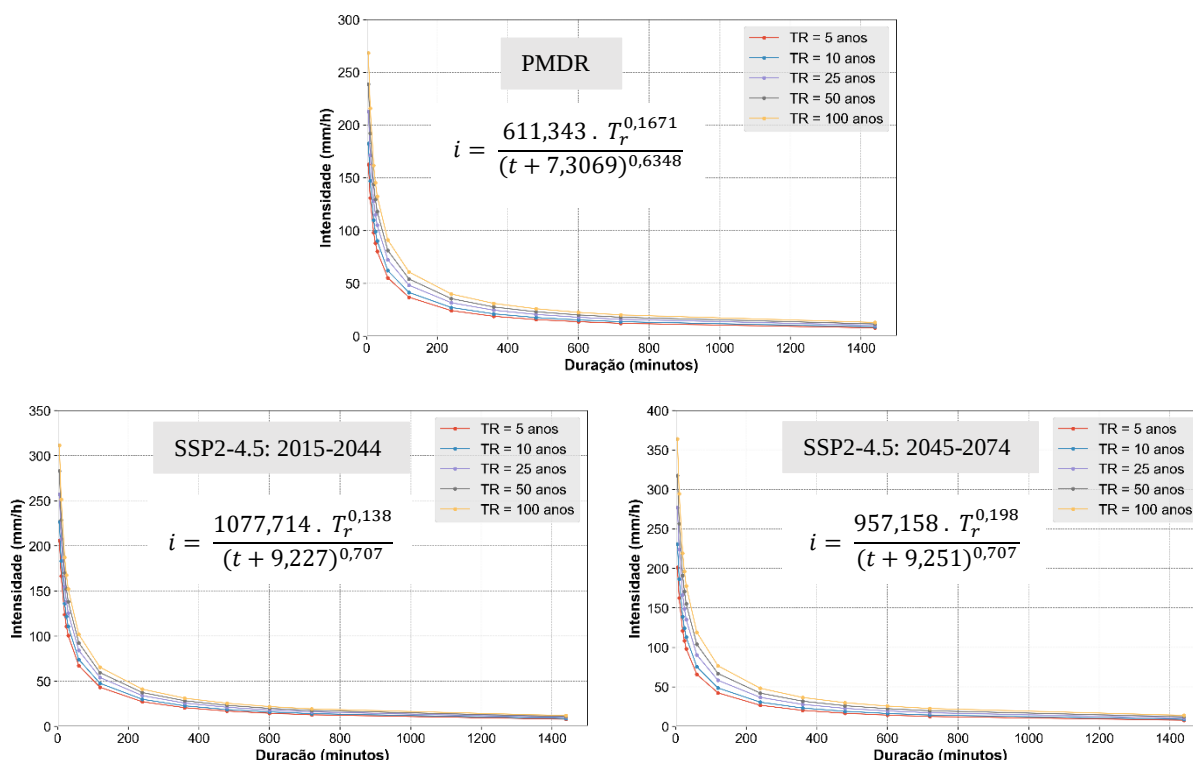
aumentando nas últimas três décadas. Os autores atentam para o indicativo de aumento dos dias sem chuva e aumento relativo dos eventos de chuvas extremas.

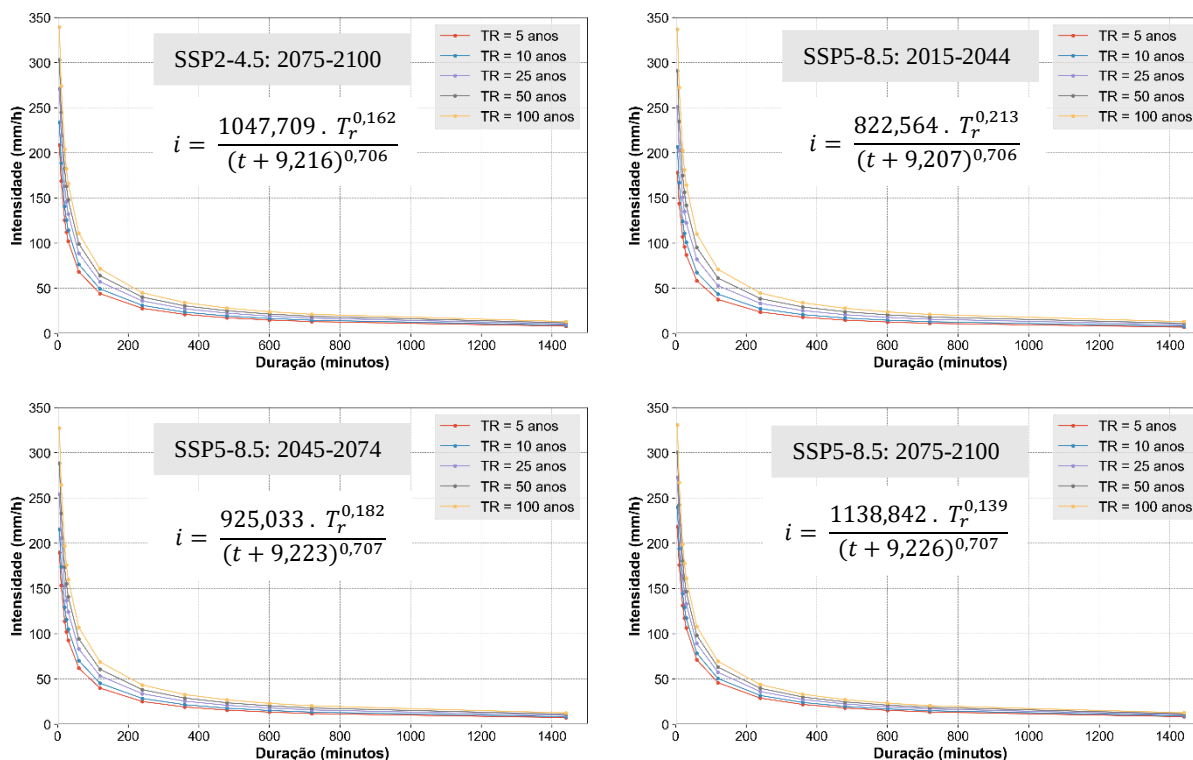
3.2 CURVAS IDF

Ao incorporar os dados do índice RX1day, que está associado a eventos de precipitação extrema em um único dia, as curvas IDF geradas refletirão de forma mais precisa os padrões de chuva esperados para o período considerado. A escolha dos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 reforça essa estratégia de análise, uma vez representam diferentes trajetórias socioeconômicas e, consequentemente, diferentes contextos para as projeções climáticas.

A Figura 5 apresenta a curva IDF existente disponível no Plano Municipal de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais do Recife (PMDR), e as curvas IDFs para os cenários climáticos futuros desenvolvidos para Recife-PE de acordo com o modelo climático global selecionado, MIROC6. As curvas IDF de precipitação fornecem informações sobre a magnitude da intensidade da precipitação para treze durações selecionadas (5, 10, 20, 25, 30 min, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12 e 24 h) e cinco períodos de retorno (5, 10, 25, 50 e 100 anos).

Figura 5 – Curvas IDF para Recife-PE até o final do século, com base no modelo MIROC do CMIP6 para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 em diferentes períodos: curto (2015–2044), médio (2045–2074) e longo prazo (2075–2100).





Fonte: A autora (2025).

Para cada duração, as intensidades de precipitação aumentaram conforme o período de retorno aumentou. Para o período de 2015–2044, a maior intensidade de precipitação em uma duração de 5 min e período de retorno de 100 anos para o cenário SSP2-4.5 e SSP5-8.5 do modelo MIROC6 é 311,35 mm/h e 336,90 mm/h, respectivamente.

As relações IDF revelam que a intensidade de chuva sobre a condição climática futura será diferente do período atual para todas as durações e períodos de retorno. A IDF atual do PMDR para uma duração de 5 min e mesmo período de retorno de 100 anos, é de 268,20 mm/h, indicando o aumento na intensidade pluviométrica para o SSP2-4.5 e SSP5-8.5 de 13,86% e 20,39%, respectivamente.

De acordo com alguns estudos (Prodanovic e Simonovic, 2007; Bibi *et al.*, 2022), a intensidade máxima é esperada em precipitações intensas de curta duração, correspondendo a um período de retorno de 100 anos, com base em modelos climáticos globais observados e projetados para o futuro, também de acordo com o observado neste estudo.

A Tabela 4 apresenta quantitativamente as curvas IDF, considerando a IDF atual do PMDR e os cenários futuros para o tempo de duração do evento de precipitação de 1 hora e 1 dia. Essas informações são importantes para compreender as mudanças projetadas nas características de precipitação, permitindo uma abordagem direta no planejamento e tomada de decisão com foco em estratégias de mitigação futuras.

Tabela 4 – Comparação da intensidade pluviométrica (mm/h) com duração de 1 hora e 1 dia entre o período atual e futuro para o cenário SSP2-4.5 e SSP5-8.5 em Recife-PE.

Duração	Tr (anos)	IDF	Cenário: SSP2-4.5			Cenário: SSP5-8.5		
		Atual (PMDR)	Curto	Médio	Longo	Curto	Médio	Longo
1 hora	5	55,29	67,28	65,80	68,28	58,20	61,99	71,21
	10	62,08	74,03	75,47	76,39	67,46	70,32	78,41
	25	72,35	84,01	90,49	88,62	81,99	83,09	89,06
	50	81,23	92,45	103,80	99,15	95,04	94,26	98,07
	100	91,21	101,73	119,07	110,93	110,16	106,93	107,99
1 dia	5	7,88	7,83	7,66	7,97	6,80	7,22	8,29
	10	8,85	8,62	8,79	8,92	7,88	8,19	9,13
	25	10,32	9,78	10,54	10,35	9,58	9,68	10,37
	50	11,58	10,77	12,09	11,58	11,10	10,98	11,42
	100	13,01	11,85	13,87	12,96	12,87	12,45	12,58

Fonte: A autora (2025)

Para um período de retorno de 5 anos e duração de 1 hora, a intensidade atual de 55,29 mm/h aumenta para 67,28 mm/h no curto prazo e até 71,21 mm/h no longo prazo, no cenário SSP5-8.5. Para um período de retorno de 25 anos, a intensidade atual de 72,35 mm/h aumenta para 90,49 mm/h no médio prazo (SSP 2-4.5) e 89,06 mm/h no longo prazo (SSP 5-8.5).

Em termos de precipitação diária, para um período de retorno de 10 anos, a intensidade atual de 8,85 mm/dia aumenta para 8,79 mm/dia no médio prazo (SSP 2-4.5) e, para um período de retorno de 100 anos, a intensidade atual de 13,01 mm/dia atinge 13,87 mm/dia no longo prazo (SSP 2-4.5). Este aumento é mais acentuado nos cenários de longo prazo, especialmente no cenário SSP 5-8.5, refletindo o impacto das maiores emissões de gases de efeito estufa.

Embora a precipitação total anual tenda a diminuir (Tabela 3), assim como a intensidade média diária das chuvas (Figura 3), há uma tendência preocupante de aumento na intensidade das precipitações em intervalos curtos de tempo. Isso significa que, ao invés de chuvas mais espaçadas ao longo do dia, que causariam menos danos, a cidade poderá enfrentar eventos de chuvas intensas concentradas em períodos curtos, como em intervalos de poucos minutos ou horas, aumentando o risco de desastres como inundações e erosão do solo. Isso ressalta a importância das análises para que a cidade de Recife se prepare adequadamente para lidar com esses eventos extremos, com estratégias de gestão de risco e adaptação para minimizar os impactos negativos.

Considerando esse aspecto, a infraestrutura de drenagem urbana existente pode se tornar inadequada para lidar com essas intensidades de precipitação projetadas, exigindo reavaliação e atualização para evitar falhas e mitigar riscos de inundações. A atualização das curvas IDF é relevante para o planejamento urbano e a gestão de recursos hídricos, destacando a necessidade de adaptações preventivas para garantir a resiliência frente às mudanças climáticas.

Atualmente em Recife, chuvas de curta duração já exibem alta intensidade, sendo frequentemente associadas a inundações e sobrecarga no sistema de drenagem. Assim, a partir dos resultados apresentados, é possível concluir que precipitações futuras, ainda mais intensas, irão variar como resultado das mudanças climáticas, com tendências crescentes e decrescentes, de acordo com as projeções climáticas futuras selecionadas e tempos de duração.

Como resultado, as variações na intensidade futura das chuvas prevista pelo modelo MIROC6 causarão um aumento no pico de escoamento e nas inundações na área de estudo. O sistema de gerenciamento de águas pluviais é normalmente projetado com base nas relações IDF históricas. No entanto, essa suposição não é válida sob condições de mudanças climáticas, que podem alterar a frequência e a magnitude das precipitações extremas. Além disso, as projeções futuras das relações IDF tornarão esses sistemas mais vulneráveis no futuro.

Portanto, diante da tendência de aumento da intensidade das chuvas em intervalos curtos, é essencial adotar ações estratégicas para reduzir os riscos associados. Entre as principais medidas recomendadas estão: o redimensionamento da infraestrutura de drenagem urbana para suportar picos de vazão; a implementação de sistemas de drenagem sustentáveis, como bacias de retenção, pavimentos permeáveis e jardins de chuva; e o reforço do monitoramento climático com sensores em tempo real e sistemas de alerta precoce. Também se destaca a necessidade de atualizar o zoneamento urbano para restringir ocupações em áreas de risco e integrar critérios climáticos nos planos diretores. Por fim, é fundamental investir em educação comunitária e planos de contingência que preparem a população para responder de forma adequada a eventos extremos.

4. CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo mostram que as projeções do modelo MIROC6 para Recife apontam uma redução significativa na precipitação total anual, especialmente no cenário mais pessimista (SSP5-8.5), onde a redução pode chegar a 31% em comparação aos dados históricos. Além disso, observa-se uma tendência de diminuição na frequência e intensidade das chuvas intensas diárias, enquanto eventos de precipitação extrema em períodos de cinco dias consecutivos mostram um aumento significativo. Essas mudanças sugerem um padrão futuro de chuvas menos frequentes, porém potencialmente mais intensas em períodos concentrados. São informações importantes para a adaptação e gestão de riscos climáticos na região, destacando a necessidade de estratégias para lidar com os impactos esperados por essas mudanças.

As condições atuais e futuras das curvas IDF geradas são importantes para avaliar a capacidade dos sistemas de drenagem urbana existentes e projetar novos sistemas de infraestrutura. O aumento previsto na intensidade da precipitação pelas curvas IDF pode indicar possíveis

deficiências nos sistemas atuais, exigindo que os governos locais planejem medidas preventivas adequadas.

É válido ressaltar que os modelos climáticos globais são desenvolvidos com base em teorias físicas semelhantes, mas devido às diferenças no uso do solo e nos parâmetros usados para terra, oceano e atmosfera, o desempenho local desses modelos pode variar significativamente, de modo que é prudente selecionar os modelos mais representativos para cada região. Seguindo esse preceito, os resultados gerados nesse estudo são relevantes para o planejamento local, gestão e tomada de decisão, especialmente quando se considera já é uma cidade extremamente vulnerável a eventos climáticos extremos.

REFERÊNCIAS

- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (2024). Impacto da mudança climática nos recursos hídricos no Brasil. Brasília, 96 p. https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/31604c98-5bbe-4dc9-845d-998815607b33/attachments/Mudancas_Climaticas_25012024.pdf
- ANIL, S.; RAJ, A. (2022). Deciphering the projected changes in CMIP-6 based precipitation simulations over the Krishna River Basin. *Journal of Water and Climate Change*, 13(3):1389–1407. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.399>
- ÁVILA-DIAZ, Á.; BENEZOLI, V.; JUSTINO, F.; TORRES, R.; WILSON, A. (2020). Assessing current and future trends of climate extremes across Brazil based on reanalyses and earth system model projections. *Climate Dynamics*, 55:1403–1426. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05333-z>
- BALLARIN, A.; SONE, J.; GESUALDO, G.; SCHWAMBACK, D.; REIS, A.; ALMAGRO, A.; WENDLAND, E. (2023). CLIMBra – Climate Change Dataset for Brazil. *Scientific Data*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41597-023-01956-z>
- BIBI, T.; TEKESA, N. (2022). Impacts of climate change on IDF curves for urban stormwater management systems design: The case of Dodola Town, Ethiopia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195:170.
- CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (1979). Drenagem urbana – Manual de projeto. 3. ed. São Paulo, 464 p.
- COSTA, C.; BIANCO, C.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. (2020). IDF curves for future climate scenarios in a locality of the Tapajós Basin, Amazon, Brazil. *Journal of Water and Climate Change*, 11(3).
- GEBRECHORKOS, S.; TAYE, M.; BIRHANU, B.; SOLOMON, D.; DEMISSIE, T. (2023). Future changes in climate and hydroclimate extremes in East Africa. *Earth's Future*, 11(2). <https://doi.org/10.1029/2022EF003011>
- GOLDBERG, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley.
- GUEDES, R.; SILVA, T. (2020). Análise descritiva da precipitação, temperatura, umidade e tendências climáticas no Recife – PE. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13(7):3234–3253.

GUL, B.; KAYAALP, N. (2023). Estimating IDF curves under changing climate conditions for different climate regions. *Journal of Water and Climate Change*, 14(12):4527.

HEO, J. H.; AHN, H.; SHIN, J. Y.; KJELDTSEN, T. R.; JEONG, C. (2019). Probability distributions for a quantile mapping technique for a bias correction of precipitation data: A case study to precipitation data under climate change. *Water*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/w11071475>

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (2022). Censo Demográfico. <https://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 22 jul. 2024.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2007). Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Summary for policymakers. In: Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2014). 5th Assessment Report. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2021). Technical Summary. In: Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

MARENGO, J.; ALCANTARA, E.; CUNHA, A. P.; SELUCHI, M.; NOBRE, C.; *et al.* (2023). Flash floods and landslides in the city of Recife, Northeast Brazil after heavy rain on May 25–28, 2022: Causes, impacts, and disaster preparedness. *Weather and Climate Extremes*, 39:100545. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100545>

JAYAWARDHANA, W. G. N. N.; CHATHURANGE, M. (2020). Investigate the sensitivity of the satellite-based agricultural drought indices to monitor the drought condition of paddy and introduction to enhanced multi-temporal drought indices. *Journal of Remote Sensing e GIS*, 9(272). <https://doi.org/10.35248/2469-4134.20.9.272>

JUNQUEIRA, R.; VIOLA, M.; DE MELLO, C.; VIEIRA-FILHO, M.; ALVES, M.; AMORIM, J. (2020). Drought severity indexes for the Tocantins River Basin, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, 141:465–481. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03229-w>

LEÃO, E.; ANDRADE, J.; NASCIMENTO, L. (2021). Recife: A climate action profile. *Cities*, 116:103270. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2021.103270>

MEDEIROS, F.; OLIVEIRA, C.; AVILA-DIAZ, A. (2022). Evaluation of extreme precipitation climate indices and their projected changes for Brazil: From CMIP3 to CMIP6. *Weather and Climate Extremes*, 38:100511. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100511>

MERESA, H.; TISCHBEIN, B.; MEKONNEN, T. (2022). Climate change impact on extreme precipitation and peak flood magnitude and frequency: Observations from CMIP6 and hydrological models. *Natural Hazards*, 111(3):2649–2679. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05152-3>

NASHWAN, M. S.; SHAHID, S.; CHUNG, E.-S. (2020). High-resolution climate projections for a densely populated Mediterranean region. *Sustainability*, 12:3684. <https://doi.org/10.3390/su12093684>

NÓBREGA, R.; DE LIMA FARIAS, R.; DOS SANTOS, C. (2025). Variabilidade temporal e espacial da precipitação pluviométrica em Pernambuco através de índices de extremos climáticos. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 30(2):171–180. <https://doi.org/10.1590/0102-778620130624>

- NOOR, M.; ISMAIL, T.; CHUNG, E.-S.; SHAHID, S.; SUNG, J. H. (2018). Uncertainty in rainfall intensity duration frequency curves of Peninsular Malaysia under changing climate scenarios. *Water* (Switzerland), 10(12). <https://doi.org/10.3390/w10121750>
- O'NEILL, B.; TEBALDI, C.; VAN VUUREN, D.; EYRING, V.; FRIEDLINGSTEIN, P.; HURTT, G.; KNUTTI, R.; *ET AL.* (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9):3461–3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- OGUZ, E. A.; BENESTAD, R.; PARDING, K.; DEPINA, I.; THAKUR, V. (2024). Quantification of climate change impact on rainfall-induced shallow landslide susceptibility: A case study in central Norway. *Georisk*, 18(2):467–490.
- OLIVEIRA, D.; RIBEIRO, J.; FARIA, L.; REBOITA, M. (2023). Performance dos modelos climáticos do CMIP6 em simular a precipitação em subdomínios da América do Sul no período histórico. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 16(1):116–133.
- PBMC – PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (2016). Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas [MARENGO, J. A.; SCARANO, F. R. (Eds.)]. Rio de Janeiro: PBMC, COPPE – UFRJ. 184 p. ISBN: 978-85-285-0345-6.
- PENG, L.; LI, Z. (2021). Ensemble flood risk assessment in the Yangtze River Economic Belt under CMIP6 SSP-RCP scenarios. *Sustainability* (Switzerland), 13(21). <https://doi.org/10.3390/su132112097>
- PINO-VARGAS, E.; CHÁVARRI-VELARDE, E.; INGOL-BLANCO, E.; MEJÍA, F.; CRUZ, A.; VERA, A. (2022). Impacts of climate change and variability on precipitation and maximum flows in Devil's Creek, Tacna, Peru. *Hydrology*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/hydrology9010010>
- PRODANOVIC, P.; SIMONOVIC, S. (2007). Development of rainfall intensity duration frequency curves for the City of London under the changing climate. *Water Resources Research Report*, 58.
- REBOITA, M.; KUKI, C.; MARRAFON, V.; *ET AL.* (2022). South America climate change revealed through climate indices projected by GCMs and Eta-RCM ensembles. *Climate Dynamics*, 58:459–485. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05918-2>
- SABÓIA, M.; SOUZA FILHO, F.; ARAÚJO JÚNIOR, L.; SILVEIRA, C. (2017). Climate changes impact estimation on urban drainage system located in low latitudes districts: A study case in Fortaleza-CE. *Brazilian Journal of Water Resources*, 22:e21. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011716074>
- SANTOS, L.; CABRAL, C.; GONÇALVES, R.; DA SILVA, O. (2019). Vulnerabilidades a eventos pluviais de alta magnitude da cidade do Recife – Pernambuco/Brasil. *Revista de Geografia*, 9(2):160–185. <https://doi.org/10.34019/2236-837X.2019.v9.18079>
- SHRESTHA, M.; ACHARYA, S.; SHRESTHA, P. K. (2017). Bias correction of climate models for hydrological modelling – Are simple methods still useful? *Meteorological Applications*, 24(3):531–539. <https://doi.org/10.1002/met.1655>
- SIME, C. H.; DIBABA, W. T. (2023). Evaluation of CMIP6 model performance and extreme precipitation prediction in the Awash basin. *Heliyon*, 9(11). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21578>

SOUZA, W.; AZEVEDO, P. (2012). Índices de detecção de mudanças climáticas derivados da precipitação pluviométrica e das temperaturas em Recife-PE. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 5(1):143. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v5i1.232793>

XU, P.; WANG, D.; WANG, Y.; WU, J.; HENG, Y.; SINGH, V. P.; LIU, C.; WANG, L.; SHANG, X.; FANG, H. (2024). Quantifying the urbanization and climate change-induced impact on changing patterns of rainfall Intensity-Duration-Frequency via nonstationary models. *Urban Climate*, 55:101990.

4. ARTIGO 3: MODELAGEM PREDITIVA DA DINÂMICA DE USO E COBERTURA DO SOLO PARA UMA CIDADE URBANA COSTEIRA NO BRASIL

RESUMO

Um melhor planejamento urbano depende da avaliação de como o uso e a cobertura do solo (LULC) evoluíram nas últimas décadas e quais são as perspectivas de mudança no futuro. As cidades são o resultado da interação de diversos fatores, e a configuração do território influencia diretamente a gestão de águas pluviais, o conforto térmico e a mobilidade urbana, entre outros aspectos. Este estudo analisou mudanças no LULC no município de Recife, Brasil, entre 1990 e 2080, utilizando modelagem preditiva para subsidiar estratégias de gestão territorial. A metodologia envolveu a integração de dados de LULC do projeto MapBiomass, seguida pela implementação de um modelo baseado em autômatos celulares e redes neurais artificiais. O modelo foi executado com o plugin MOLUSCE no software QGIS, e a validação apresentou uma porcentagem de correção de 89,08% e coeficientes kappa superiores a 0,80, indicando desempenho preditivo excelente. Os resultados evidenciam um avanço significativo da urbanização, impulsionado por fatores como expansão demográfica e desenvolvimento econômico, resultando na conversão de pastagens e vegetação nativa. A cobertura florestal inicialmente declinou, estabilizando-se até 2020, possivelmente devido a políticas de conservação e limitações espaciais ao desmatamento. Manguezais e corpos hídricos mantiveram-se relativamente estáveis, apesar da pressão urbana. A pesquisa destaca a necessidade de políticas públicas voltadas ao planejamento urbano sustentável, implementação de infraestrutura verde e fortalecimento da legislação ambiental. Projeções futuras indicam que ações preventivas são essenciais para minimizar impactos climáticos e socioambientais, promovendo desenvolvimento urbano resiliente.

Palavras-Chave: Crescimento urbano; Planejamento territorial; Cidade costeira; MOLUSCE.

1. INTRODUÇÃO

Mudanças no uso e cobertura do solo (LULC) desempenham papel significativo nas transformações ambientais locais e globais, tornando-se essenciais para o planejamento territorial e a gestão de recursos naturais. A detecção e previsão de categorias futuras de LULC são fundamentais para identificar padrões de desenvolvimento baseados em transformações históricas e contemporâneas. Essas análises ajudam a antecipar problemas potenciais e incertezas, além de fornecer informações críticas sobre tipos, direções, localizações e magnitudes das mudanças. Assim, estudos de LULC servem como ferramentas valiosas para a formulação de políticas, avaliação de impactos e elaboração de planos de uso do solo (Chisanga e Mubanga, 2024).

A perda de áreas naturais e as mudanças climáticas estão entre os principais desafios ambientais decorrentes de alterações no LULC (Meraj *et al.*, 2022). Transições ligadas à expansão de áreas construídas, por exemplo, impactam o bem-estar populacional ao influenciar acesso a recursos, condições ambientais e saúde pública (Ashaolu *et al.*, 2019). Portanto, o monitoramento e a previsão da dinâmica de LULC são críticos para estabelecer cenários de desenvolvimento sustentável (Meng *et al.*, 2023), representando um marco para avaliar consequências de fenômenos naturais e atividades antrópicas, permitindo otimizar estratégias de gestão urbana (Alipbeki *et al.*, 2024).

O crescimento populacional acelerado, especialmente em países em desenvolvimento, é um dos principais motores de mudanças no uso do solo (Tenagashaw *et al.*, 2022). Esse aumento amplia demandas por produção de alimentos e exerce pressão sobre recursos naturais, levando ao desmatamento para expansão agrícola e urbana. Embora mudanças na cobertura do solo sejam fenômenos naturais em ecossistemas dinâmicos, atividades humanas podem alterar drasticamente a dinâmica hidrológica em escalas temporais mais curtas (Bhatta *et al.*, 2019).

Nas últimas décadas, a maioria das transformações em ambientes físicos e humanos tem sido vinculada a mudanças no LULC. A disponibilidade de recursos hídricos (superficiais e subterrâneos), variabilidade climática, fertilidade do solo e produtividade agrícola são diretamente afetadas por essas mudanças. Por outro lado, a própria variabilidade climática pode exacerbar efeitos negativos no LULC, comprometendo a integridade estética de paisagens (Lukas *et al.*, 2023).

Estudos sobre LULC fornecem insights críticos para políticas públicas, planejamento territorial e diversos setores (Gao *et al.*, 2023), além de aprofundar a compreensão de impactos multidimensionais dessas mudanças. Enfrentar tais impactos exige esforços colaborativos entre comunidades, governos e organizações não governamentais para promover estabilidade ambiental (Anose *et al.*, 2021).

O interesse em integrar sensoriamento remoto (SR) e Sistemas de Informação Geográfica (SIG) tem crescido nesse contexto. O plugin MOLUSCE (Módulos para Avaliação de Mudanças no Uso do Solo) do QGIS destaca-se como ferramenta confiável para avaliar mudanças recentes e projetar cenários futuros de LULC. Essa capacidade preditiva pode orientar estratégias de planejamento territorial, utilizando fatores como estado inicial de pixels, condições da vizinhança e regras de transição para estimar mudanças espaciais (Vaddiraju *et al.*, 2023).

O método markoviano é empregado para construir uma matriz de potencial de transição, seguido pela aplicação de modelos como avaliação multicritério (MCE), redes neurais artificiais (RNA), regressão logística (LR) ou pesos de evidência (WoE) para treinar o modelo de simulação. Mapas simulados de LULC são gerados por meio de autômatos celulares de Monte Carlo (Li *et al.*, 2015; Vaddiraju *et al.*, 2024), otimizando parâmetros para resolver desafios associados a múltiplas variáveis espaciais (Fontana *et al.*, 2023).

Recife é reconhecido como um hotspot de vulnerabilidade climática, classificado entre as cidades mais suscetíveis a impactos globais (IPCC, 2007; PBMC, 2016). Em 2020, foi listado pelo Carbon Disclosure Project (CDP) como uma das 88 cidades líderes no combate à crise climática (Leão *et al.*, 2021), reforçando seu papel estratégico em soluções sustentáveis e resilientes.

Essa vulnerabilidade é agravada por expansão urbana desordenada e efeitos climáticos, exigindo monitoramento contínuo de mudanças ambientais. A detecção de alterações na superfície terrestre é crucial para entender fenômenos dinâmicos, priorizar ações e orientar tomadas de decisão,

especialmente em Recife, onde mudanças no LULC persistem devido ao rápido crescimento urbano (Leão *et al.*, 2021).

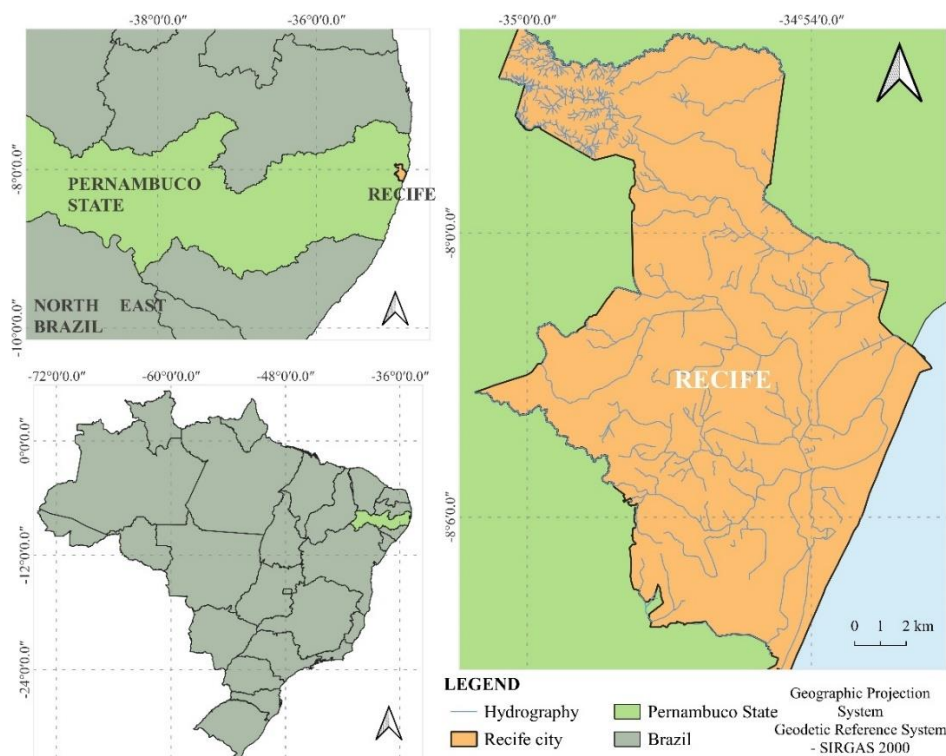
A escolha de Recife para análises de LULC justifica-se pela necessidade de antecipar e planejar mudanças futuras, mitigando riscos e implementando estratégias protetivas robustas. A vulnerabilidade intrínseca da cidade reforça a importância de priorizar soluções urbanas que garantam preservação ambiental e resiliência frente a desafios climáticos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

A cidade do Recife, capital de Pernambuco, está situada no nordeste do Brasil na latitude 8° 04' 03" S e longitude 34° 55' 00" W (Recife, 2025) (Figura 1), abrangendo uma área de aproximadamente 218,84 km². Com uma população de 1.488.920 (IBGE, 2022), faz parte de uma região metropolitana com mais de 4 milhões de habitantes. Localizada ao longo da costa do Oceano Atlântico, Recife constitui a maior aglomeração urbana do estado de Pernambuco.

Figura 1 - Localização da área de estudo destacando o município de Recife, Pernambuco, Brasil.



Fonte: A autora (2025) a partir de dados do IBGE (2022).

Recife tem um clima tropical quente e úmido, classificado como As pelo sistema Köppen – Geiger, com temperaturas médias mensais superiores a 20°C e precipitação média anual de aproximadamente 2.450 mm (APAC, 2025). A cidade, situada a uma altitude média de 4 metros

acima do nível do mar, fica dentro do bioma da Mata Atlântica. Apelidada de "Veneza brasileira", é atravessada pelos rios Capibaribe, Beberibe, Tejupió, Jordão e Jiquiá e apresenta uma extensa rede de cursos d'água, compreendendo 99 canais que abrangem aproximadamente 133 quilômetros (EMLURB, 2017). Suas características naturais — incluindo topografia baixa, terreno plano, lençol freático raso e influências das marés — complicam os processos de drenagem, principalmente durante as chuvas sazonais, tornando as áreas urbanas propensas a inundações e sobrecarregando os sistemas de saneamento (Cabral e Alencar, 2005).

De sua área total, 142,99 km² são urbanizados, enquanto 71,6 km² (44,3% do território) são áreas verdes, resultando em uma taxa de 46,02 m² por habitante (Recife, 2022). No entanto, esses espaços verdes estão distribuídos de forma desigual pelos bairros da cidade. A maioria dos bairros enfrenta riscos de desastres e vulnerabilidades socioambientais, particularmente nas Regiões Político-Administrativas Sul e Oeste, que apresentam os maiores índices de risco de desastres. Essas áreas são caracterizadas por morros íngremes, adensamento populacional e desafios socioeconômicos agravados (Souza, 2011). Segundo o IBGE (2018), aproximadamente 206.761 moradores (13,4% da população de 2010) estavam expostos a riscos de inundações, inundações e deslizamentos. Um relatório de 2022 do Instituto de Redução de Riscos e Desastres (IRRD), do Instituto Keizo Asami (iLIKA) e da Academia Pernambucana de Ciências (APC) destaca ainda que 44% do território do Recife é classificado como de alto risco de inundação.

2.2 MODELAGEM DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

O Projeto de Mapeamento Anual de Uso e Cobertura do Solo do Brasil – MapBiomas (<https://brasil.mapbiomas.org/>) (MAPBIOMAS, 2023) é uma iniciativa colaborativa lançada em 2015, envolvendo uma rede multidisciplinar de especialistas e instituições (Brito *et al.*, 2023). Seu objetivo principal é gerar mapas anuais de LULC para o Brasil abrangendo 1985 até o presente. O projeto é estruturado por categorização baseada em biomas (por exemplo, Amazônia, Mata Atlântica, Caatinga, Cerrado, Pampa e Pantanal) e temas transversais como pastagem, agricultura, plantações florestais, zonas costeiras, mineração e infraestrutura urbana. Essa estrutura permite o monitoramento anual de mudanças ambientais em todo o país, servindo como um recurso crítico para governança ambiental e planejamento territorial baseado em evidências (Shimabukuro *et al.*, 2023).

Do MapBiomas são derivados de imagens de satélite com resolução espacial de 30 metros, provenientes da constelação Landsat. Esses dados permitem classificação detalhada de LULC por meio de uma metodologia que integra aprendizado de máquina, análise de séries temporais e validação de especialistas, garantindo alta precisão e confiabilidade. Os mapas gerados são revisados

e atualizados periodicamente para incorporar técnicas avançadas de processamento, abordar inconsistências e aumentar a precisão (Souza *et al.*, 2020).

Na última atualização, para o ano de 2023, mais de 85.150 pontos de amostragem foram utilizados para treinar e validar o modelo, abrangendo toda a extensão territorial do Brasil. Esses pontos, analisados pelo Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento (LAPIG – UFG), foram validados usando imagens Landsat de estações secas e chuvosas por meio da ferramenta Temporal Visual Inspection (TVI) de livre acesso (Nogueira *et al.*, 2017). A comparação desses pontos com os mapas gerados permitiu a derivação de uma matriz de confusão, facilitando o cálculo da precisão geral por bioma, juntamente com erros de omissão e comissão para cada classe de LULC. O processo incorpora validação cruzada usando imagens de satélite e dados coletados em campo para garantir robustez metodológica (MAPBIOMAS, 2024).

2.3 PREVISÃO DE MUDANÇAS FUTURAS NO LULC

Para projetar mudanças de classe LULC, o plugin de código aberto *Modules for Land Use Change Simulations* (MOLUSCE), integrado ao QGIS, foi empregado. Desenvolvido pela Asia Air Survey Co., Ltd. (Kanagawa, Japão), uma empresa japonesa de soluções geoespaciais especializada em sensoriamento remoto, cartografia e análise ambiental, o MOLUSCE permite que pesquisadores simulem a dinâmica LULC por meio de métodos estatísticos espaciais e algoritmos de aprendizado de máquina (Asia Air Survey, 2025). Projetado para versatilidade, o plugin facilita a modelagem de cenários integrando dados LULC multitemporais, probabilidades de transição e drivers espaciais (por exemplo, proximidade de infraestrutura, elevação e densidade populacional), apoiando assim projeções robustas de padrões futuros de uso do solo.

O modelo utilizou imagens de entrada de 1990 e 2005, juntamente com variáveis explicativas relacionadas à estrutura espacial do território. Essas variáveis incluem o Modelo Digital de Elevação (MDE), que descreve a topografia da área, declive, distância de rios, distância de áreas urbanas, redes hidrográficas e proximidade de rodovias. Esses fatores foram selecionados devido à sua influência direta nas mudanças de LULC e sua relevância dentro do contexto geográfico e socioambiental do estudo.

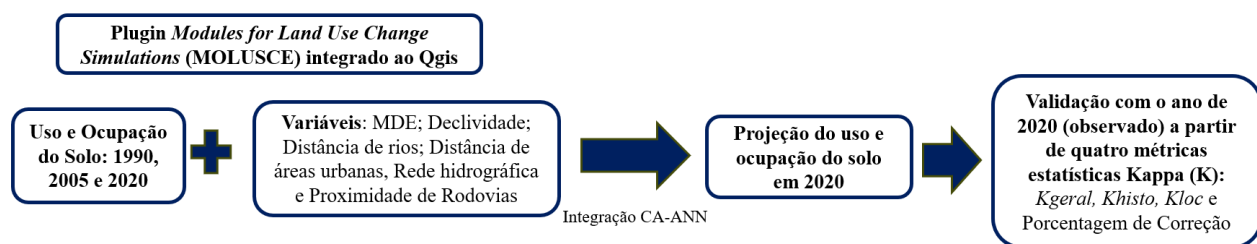
No MOLUSCE, a integração CA-ANN (*Cellular Automata-Artificial Neural Network*) é aplicada para simular transições LULC, alavancando imagens históricas e variáveis explicativas. Essa abordagem híbrida permite a estimativa de probabilidades de transição e a projeção de padrões LULC futuros. A projeção inicial tinha como alvo 2020, onde a precisão do modelo foi validada pela comparação de saídas simuladas com o mapa LULC classificado pelo MapBiomass de 2020. A CA-ANN é reconhecida por sua capacidade de representar heterogeneidades espaciais complexas,

tornando-a uma abordagem de modelagem robusta para prever futuras mudanças LULC (Osman *et al.*, 2023; Vaddiraju *et al.*, 2023).

As projeções foram validadas usando quatro métricas estatísticas Kappa (K): *Kgeral*, *Khisto*, *Kloc* e Porcentagem de Correção, calculadas por meio do módulo Validação dentro do plugin MOLUSCE. Kappa geral (*Kgeral*) quantifica a concordância geral entre os mapas LULC classificados e previstos, contabilizando a chance aleatória; Kappa Localização (*Kloc*) avalia a precisão espacial do modelo na localização de mudanças LULC; Kappa Histograma (*Khisto*) mede a concordância para classes LULC individuais entre rasters observados e previstos, indicando precisão preditiva específica da classe. Essas métricas avaliam coletivamente a confiabilidade do modelo na simulação da magnitude e alocação espacial das mudanças LULC.

A Figura 2 a seguir apresenta, de forma esquemática, as etapas metodológicas adotadas e descritas anteriormente para a simulação do uso e ocupação do solo.

Figura 2 - Etapas metodológicas da simulação de uso e ocupação do solo utilizando o plugin MOLUSCE integrado ao software QGIS.



Fonte: A Autora (2025).

O coeficiente Kappa normalmente varia de 0 a 1, com o último indicando concordância completa, e é frequentemente multiplicado por 100 para fornecer uma medida percentual de precisão de classificação. Um valor Kappa (K) maior que 0,80 (80–100%) representa forte concordância e alta precisão; valores entre 0,40 e 0,80 (40–80%) indicam precisão moderada, enquanto valores abaixo de 0,40 (<40%) refletem baixa precisão (Congalton, 1991). Com resultados de validação satisfatórios, cenários LULC foram simulados para 2050 e 2080.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados deste estudo fornecem uma visão geral abrangente das mudanças de LULC no município de Recife, PE, Brasil. A análise delinea a dinâmica de LULC em um período temporal significativo, avaliando mudanças históricas (1990, 2005 e 2020) e cenários futuros (2050 e 2080).

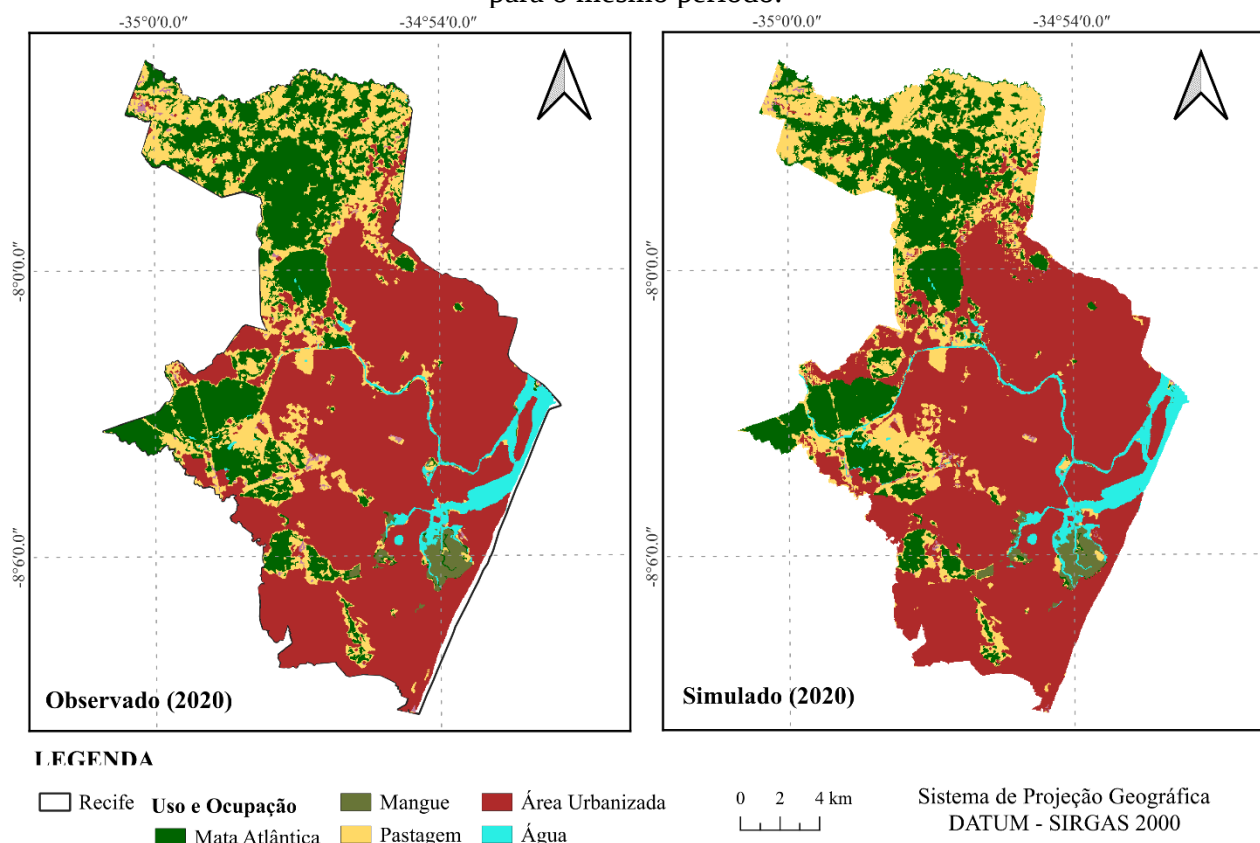
Essas descobertas oferecem insights críticos para o planejamento territorial, governança ambiental e formulação de políticas públicas voltadas para promover o desenvolvimento sustentável em Recife.

3.1 MÉTRICAS DE VALIDAÇÃO

Para validar a confiabilidade do modelo de previsão, um processo de validação foi conduzido usando o plugin MOLUSCE, comparando dados de LULC observados para 2020 com a simulação do modelo CA-ANN para o mesmo ano (Figura 3). Este procedimento permitiu uma avaliação da precisão da modelagem verificando o alinhamento entre os padrões de LULC projetados e observados.

Os resultados da validação demonstraram desempenho satisfatório do modelo, indicando que as saídas do modelo são confiáveis e representativas. Os índices de validação obtidos foram os seguintes: i) Porcentagem de Correção: 89,088; ii) Kappa geral: 0,823; iii) Histograma Kappa: 0,967; iv) e localização Kappa: 0,851. Esses resultados sugerem que a modelagem capturou efetivamente os padrões espaciais das mudanças de LULC em Recife. Lukas *et al.* (2023) avaliaram as mudanças de uso e ocupação do solo para a bacia do Alto Rio Omo-Gibe (Etiópia), obtendo valores do coeficiente kappa com forte concordância entre os dados classificados e de referência.

Figura 3 - Mapa de LULC do Recife em 2020 (observado) e mapa de LULC simulado pelo modelo para o mesmo período.



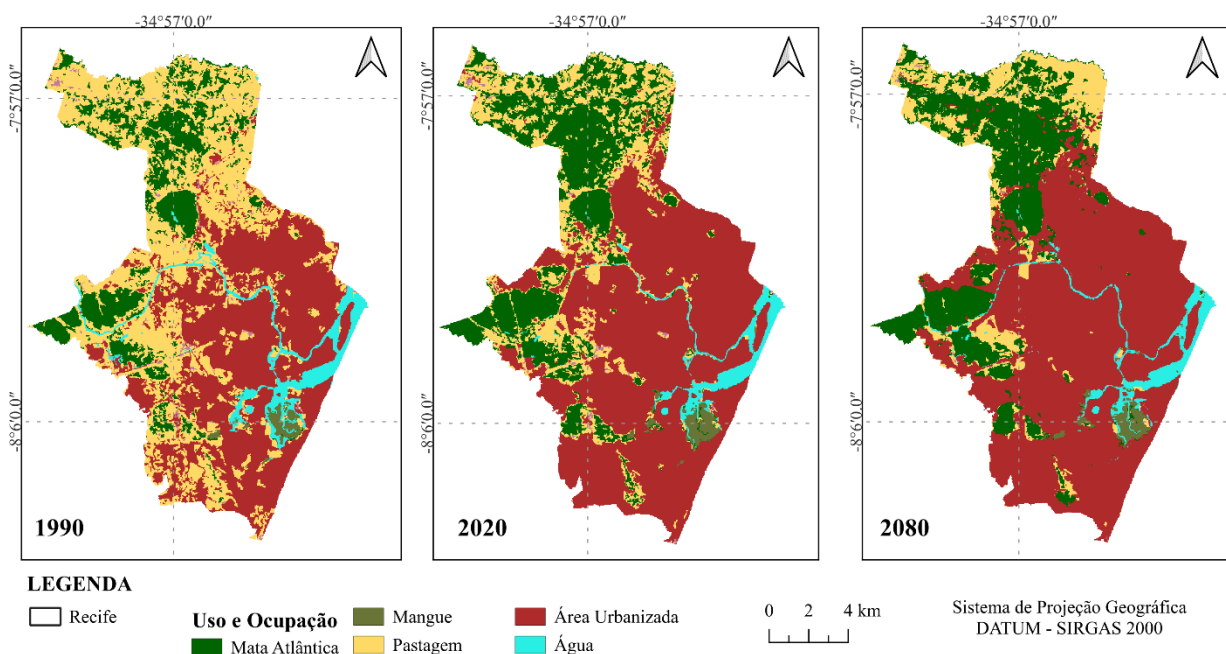
Fonte: A autora (2025) a partir de dados do Mapbiomas (2023).

3.2 USO E COBERTURA DO SOLO – LULC

Recife está dentro do bioma Mata Atlântica, um dos biomas historicamente mais impactados do Brasil em termos de mudanças de LULC (Souza *et al.*, 2020). Este bioma passou por transformações significativas desde a era colonial do século XVI (Tabarelli *et al.*, 1999; Morellato *et al.*, 2022) e agora está altamente fragmentado por redes rodoviárias e centros urbanos, inseridos em uma matriz agrícola expansiva (Freitas *et al.*, 2010).

Neste contexto, a dinâmica do LULC entre 1990 e 2080 é apresentada para a cidade do Recife. Uma transição marcante é observada entre as principais categorias, enfatizando o impacto da urbanização e mudanças na vegetação natural, áreas agrícolas e corpos d'água. A Figura 4 ilustra essas tendências dentro do município.

Figura 4 - Mudanças no LULC em Recife, Brasil, entre 1990 e 2080.



Fonte: A autora (2025) a partir de dados do Mapbiomas (2023).

A expansão das áreas urbanas se destaca como um dos padrões mais evidentes nas mudanças de LULC em Recife, exibindo um aumento progressivo entre 1990 e 2080. Isso reflete o avanço da urbanização impulsionado por pressões demográficas, expansão econômica e desenvolvimento de infraestrutura. Em 1990, as áreas urbanas ocupavam uma porção limitada do território; no entanto, a projeção para 2080 demonstra expansão substancial nas áreas urbanas.

Salgueiro *et al.* (2024) analisaram a evolução da LULC nos municípios de Recife, Olinda e Jaboatão dos Guararapes, documentando um aumento nos coeficientes de urbanização para o período entre 1985 e 2021. Especificamente em Recife, a área urbanizada expandiu-se de 52,33 km² em 1985

para 121,1 km² em 2021, constituindo um crescimento urbano de aproximadamente 57%. Leonardo *et al.* (2025) corroboram essas mudanças da LULC, destacando a expansão urbana e o desenvolvimento infraestrutural na cidade, sendo esse crescimento diretamente ligado à redução das áreas de pastagem.

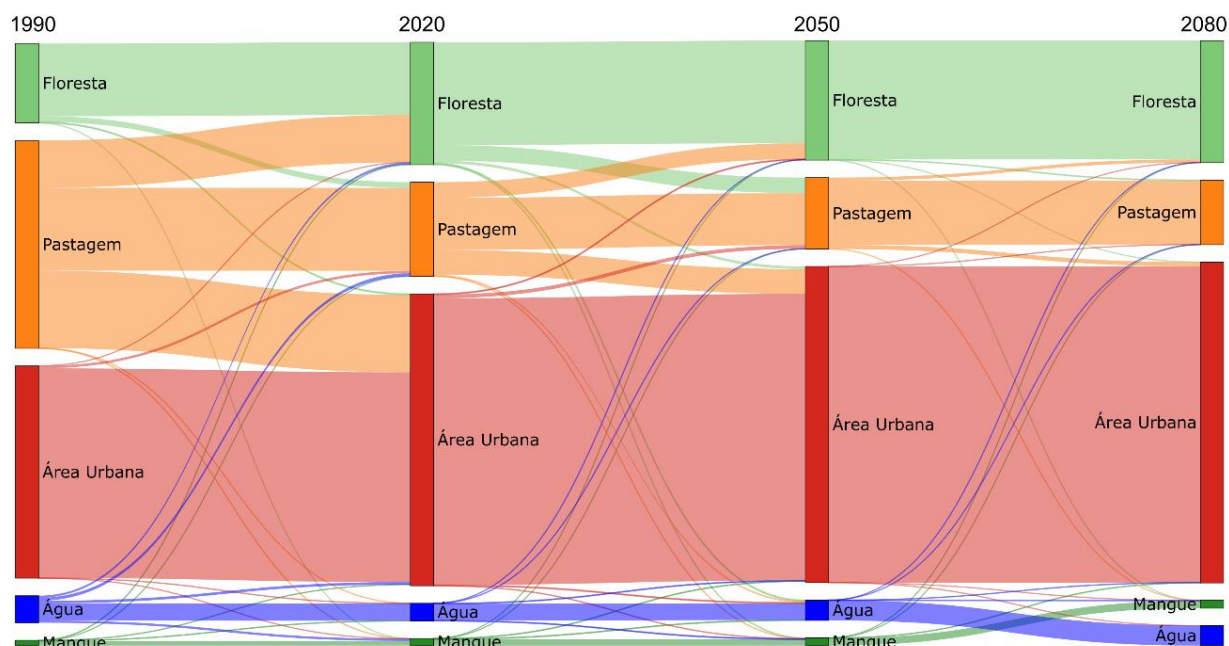
As áreas de pastagem apresentam um declínio progressivo ao longo do período analisado, particularmente entre 2020 e 2080. Essa redução é parcialmente atribuída à sua substituição pela regeneração florestal e expansão urbana, refletindo tendências simultâneas de preservação florestal e avanço das mudanças antropogênicas de LULC.

A cobertura florestal apresentou crescimento gradual ao longo do período analisado, apesar das pressões antropogênicas persistentes sobre os ecossistemas naturais. A desaceleração das taxas de desmatamento pode refletir a eficácia das políticas de conservação ou a diminuição da disponibilidade de áreas viáveis para mais desmatamento. Lira *et al.* (2012) observaram tendências contrastantes nas paisagens da Mata Atlântica: entre 1960 e 1980, a cobertura florestal declinou em duas paisagens, enquanto uma terceira experimentou regeneração marginal. De 1980 a 2000, no entanto, a regeneração florestal superou as taxas de desmatamento, levando a um aumento líquido na cobertura florestal nessas regiões.

Áreas de manguezais e corpos d'água exibiram variação mínima ao longo do período analisado, sugerindo relativa estabilidade nessas classes de LULC, apesar da degradação persistente desde o período de análise inicial. Recife exemplifica a expansão urbana desregulada, impulsionada pela especulação imobiliária e invasão de ecossistemas de manguezais e outros espaços naturais públicos. Esse crescimento impactou desproporcionalmente manguezais, dunas, vegetação de bancos de areia e remanescentes de Mata Atlântica, resultando em profundos impactos ecológicos na paisagem natural (Magarotto *et al.*, 2019).

Um exemplo notável desse declínio ecológico é o Parque Natural Municipal de Manguezal Josué de Castro, um ecossistema de manguezal cada vez mais comprometido pela invasão urbana. Essa área desempenha funções ecológicas críticas dentro da cidade, incluindo atuar como uma bacia de retenção natural para resíduos sólidos e líquidos, ao mesmo tempo em que mitiga riscos de inundação (Magarotto *et al.*, 2021). O diagrama de Sankey do LULC (Figura 5) corrobora as mudanças do LULC observadas na Figura 4, quantificando as transições entre as classes do LULC ao longo do período analisado.

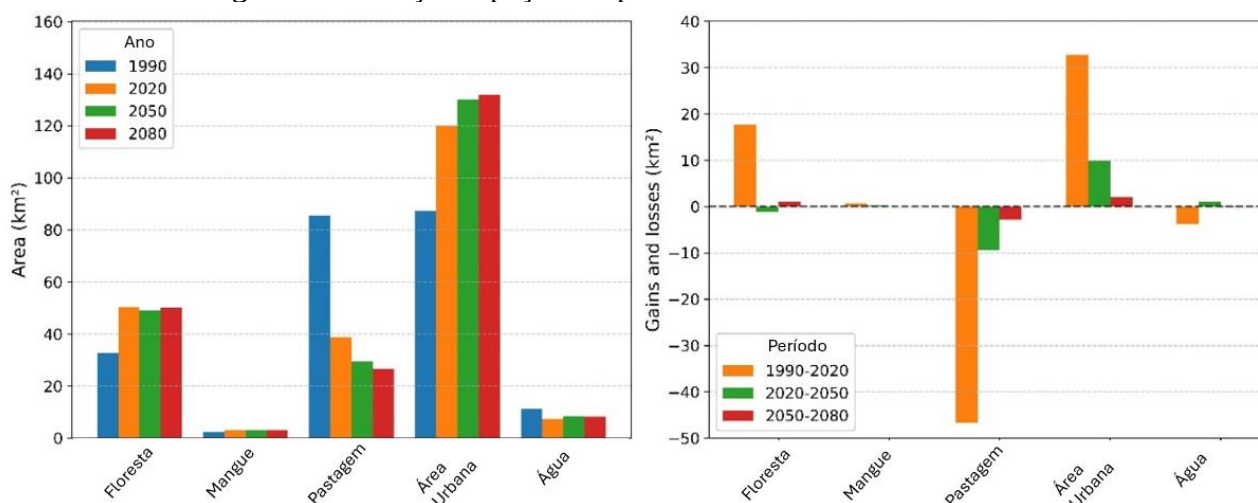
Figura 5 - Diagrama de Sankey ilustrando as transições LULC (1990–2080) para Recife, Brasil.



Fonte: A autora (2025) a partir de dados do Mapbiomas (2023).

Para reforçar e complementar a compreensão das mudanças de LULC em Recife ao longo do tempo, a Figura 6 corrobora tendências observadas na expansão de áreas florestais e urbanas, declínio em áreas agrícolas e de pastagem e equilíbrio entre ecossistemas de água e mangue. Esta visualização fornece uma perspectiva sobre padrões espaço-temporais de ganhos e perdas entre classes de LULC, permitindo uma análise detalhada da dinâmica de transição entre 1990 e 2080. No entanto, destaca-se que não foi realizada uma abordagem estatística sobre essas variações espaço-temporais, e assim não se pode garantir que essas diferenças são estatisticamente significantes.

Figura 6 - Variação espaço-temporal em LULC entre 1990 e 2080.



Fonte: A autora (2025) a partir de dados do Mapbiomas (2023).

O aumento acentuado em áreas florestais se destaca como uma das tendências mais significativas, com regeneração florestal observada entre 1990 e 2020 — ao contrário dos padrões típicos de regiões urbanizadas. Após 2020, a estabilização na cobertura florestal sugere a influência de políticas de conservação ou a disponibilidade limitada de terras conversíveis para mais mudanças de LULC.

O antigo *Plano Diretor do Recife (PDR)* (2015) estabeleceu uma estrutura de instrumentos legais e elementos de planejamento visando conservar e preservar o ambiente natural da cidade por meio de unidades de paisagem, com foco em características naturais como águas superficiais, fauna e flora. Ele consolidou e aprimorou medidas legislativas urbanas, notadamente a *Lei de Uso e Cobertura do Solo (Lei 16.176/96)*, que introduziu Zonas Especiais de Proteção Ambiental (ZEPA) e Propriedades de Proteção de Áreas Verdes (IPAV) para salvaguardar áreas ecologicamente sensíveis do desenvolvimento não regulamentado.

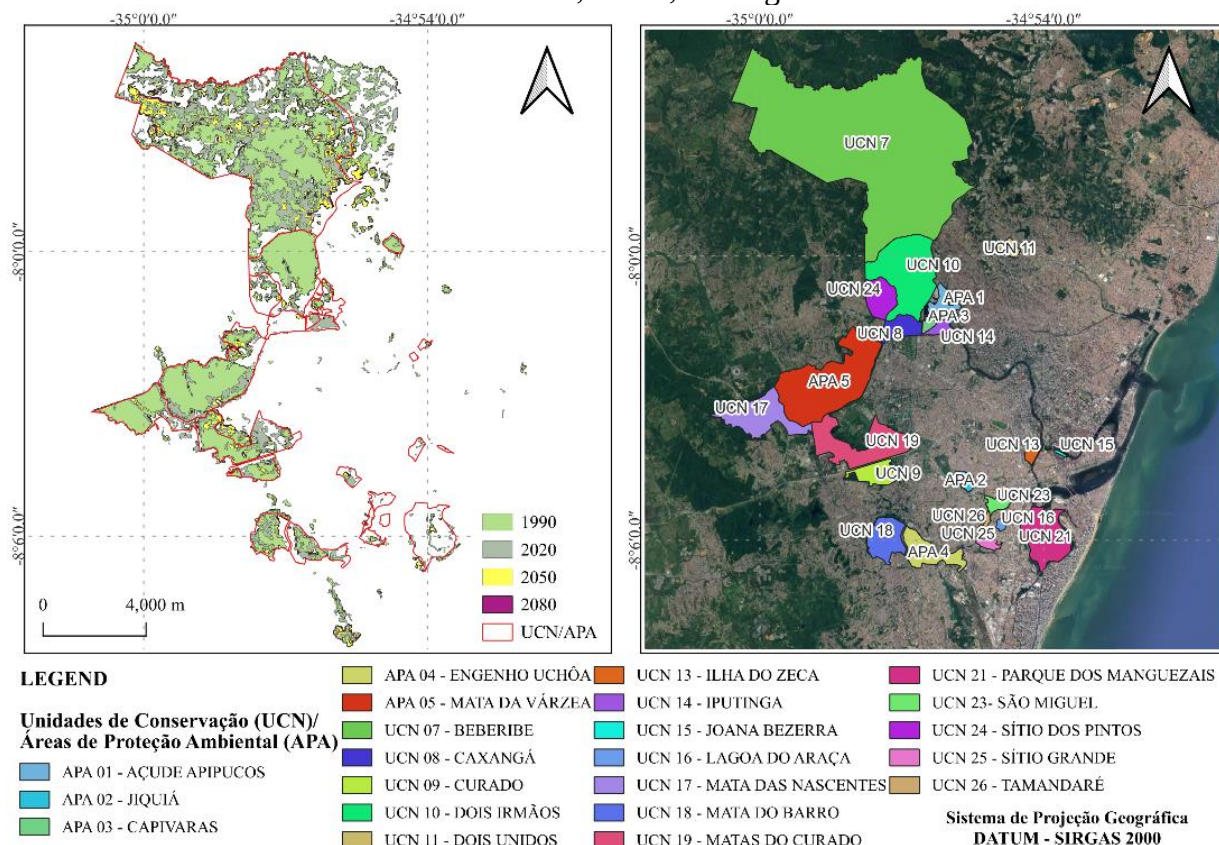
O atual Plano de Desenvolvimento do Recife (PDR) (*Lei nº 18.770/2020*) estabelece duas macrozonas: a Macrozona do Ambiente Construído (MAC) e a Macrozona do Ambiente Natural (MAN). Estas são subdivididas em quatro Zonas do Ambiente Natural (ZAN), organizadas de acordo com as bacias hidrográficas e áreas costeiras. As ZANs abrangem Zonas Especiais de Proteção Ambiental (ZEPA), áreas de preservação permanente, setores de sustentabilidade ambiental, espaços públicos vegetados e Zonas Especiais de Preservação do Patrimônio Histórico e Cultural (ZEPH) e Zonas de Interesse Social (ZEIS) (Emlurb, 2016).

A Figura 7 ilustra a dinâmica espacial das mudanças de LULC em Recife. O mapa da esquerda destaca a expansão de áreas florestais durante o período analisado, demonstrando recuperação ambiental — uma tendência contrária aos padrões típicos de urbanização observados em regiões densamente povoadas. O mapa da direita identifica Unidades de Conservação Natural (UCN) e Áreas de Proteção Ambiental (APA), implementadas sob a estrutura de governança municipal de Recife. Essas estratégias de conservação desempenharam um papel fundamental na preservação e restauração de espaços verdes, alinhando-se com as metas de desenvolvimento urbano sustentável (Emlurb, 2016).

Recife atualmente designa 25 Unidades de Conservação (UCs) pela *Lei nº 18.014/2014*, que estabelece o Sistema Municipal de Unidades Protegidas (SMUP). Abrangendo coletivamente 4.823,38 hectares, a UC 07 - Beberibe, situada no bairro de Guabiraba, representa a maior área protegida. A estrutura de conservação da cidade também inclui o Jardim Botânico do Recife e as Unidades de Equilíbrio Ambiental, uma categoria que abrange Propriedades de Proteção de Áreas Verdes (IPAVs), Jardins Históricos e Árvores Listadas. Essas medidas exemplificam o compromisso do Recife em integrar a preservação ecológica à governança urbana, contrabalançando as pressões

das mudanças do LULC e, ao mesmo tempo, salvaguardando a biodiversidade e o patrimônio cultural (Recife, 2020; Emlurb, 2016).

Figura 7- Evolução das áreas florestais associadas às unidades de conservação e áreas de proteção ambiental em Recife, Brasil, ao longo dos anos.



Fonte: A autora (2025) a partir de dados da Emlurb (2016).

Essas Unidades de Conservação (UCs) e Áreas de Proteção Ambiental (EPAs), demarcadas e governadas por estruturas legais, facilitam a salvaguarda de ecossistemas naturais, incluindo manguezais, florestas ribeirinhas e zonas de retenção de água. O estabelecimento e o gerenciamento dessas áreas garantem a sustentabilidade ambiental ao mitigar a invasão urbana e preservar serviços ecossistêmicos críticos, como regulação de enchentes, sequestro de carbono e conservação da biodiversidade.

Incentivar o estabelecimento de parques urbanos e áreas verdes, juntamente com a preservação e restauração de florestas, é essencial para mitigar os impactos das mudanças climáticas — um dos maiores desafios que a humanidade enfrenta hoje. Essas áreas desempenham um papel fundamental na redução do escoamento de águas pluviais, na prevenção de inundações, na melhoria da qualidade do ar, no apoio à biodiversidade por meio da criação de habitats e na mitigação de ilhas de calor urbanas (Park *et al.*, 2024). No contexto do aquecimento global, as florestas contribuem significativamente para o ciclo global do carbono ao absorver emissões de carbono (Forzieri *et al.*,

2022). No nível regional, elas também aprimoram as funções do ciclo da água relacionadas à precipitação e evapotranspiração (Sun *et al.*, 2013).

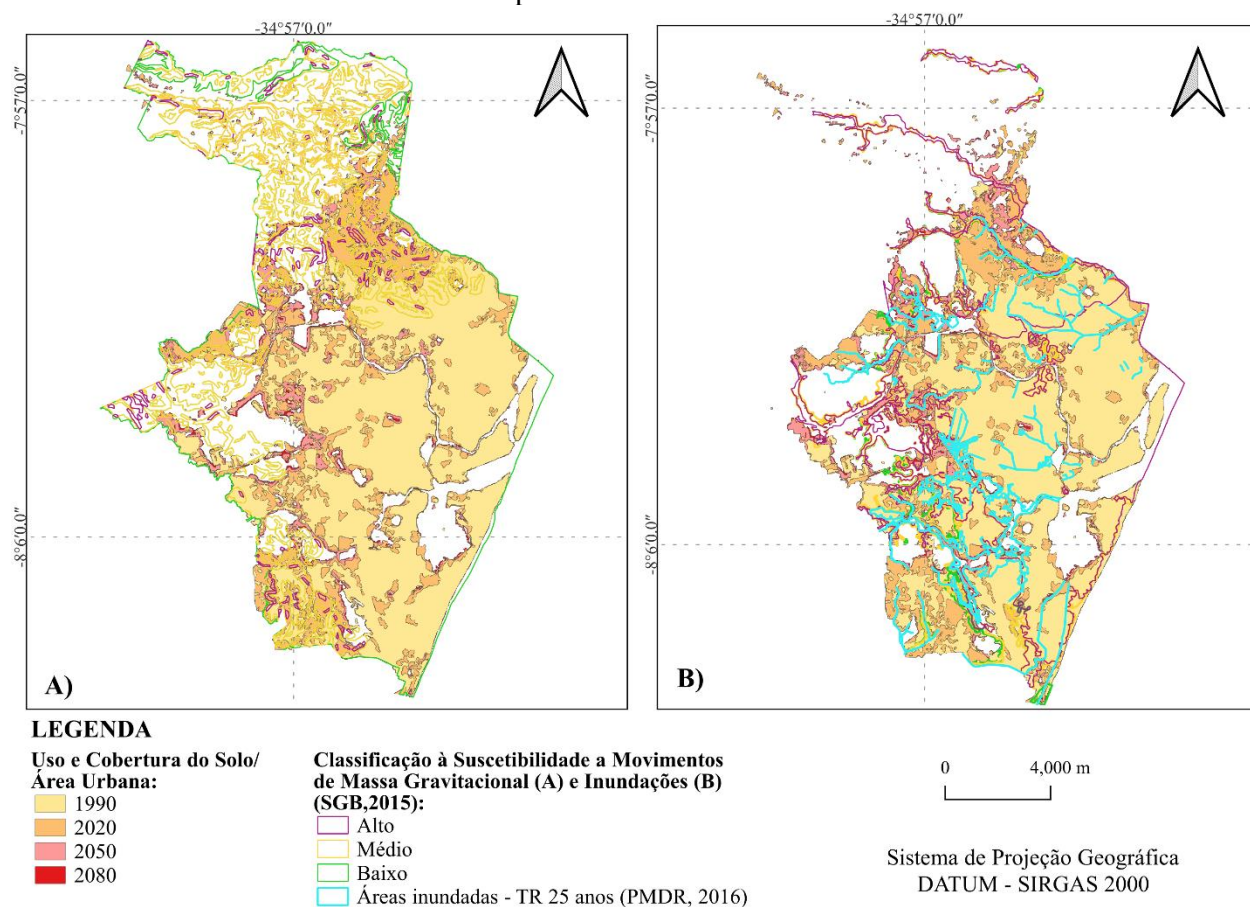
A integração de políticas públicas e medidas de conservação ressalta a importância de estratégias holísticas na mitigação dos impactos da urbanização e das mudanças climáticas. Essa abordagem também demonstra que iniciativas semelhantes podem ser replicadas em outras regiões para atingir resultados positivos na preservação ambiental.

A expansão das áreas urbanas surge como a tendência mais significativa em todos os períodos analisados. Entre 1990 e 2020, o crescimento urbano é particularmente pronunciado, com ganhos em áreas urbanizadas superando perdas em todas as outras categorias de LULC. Essa tendência continua até 2080, embora em um ritmo ligeiramente reduzido nas últimas décadas, refletindo uma relativa estabilização e diminuição da disponibilidade de áreas adequadas para o desenvolvimento urbano.

A urbanização é um fenômeno global em rápido crescimento, amplamente reconhecido por seu impacto nas mudanças climáticas e seu papel na geração de desafios sociais, ambientais e econômicos em áreas urbanas. Entender os impulsionadores e processos da expansão urbana é essencial para um planejamento urbano eficaz. Prever o uso futuro do solo fornece insights críticos para formuladores de políticas, permitindo o desenvolvimento de estratégias direcionadas para acomodar o crescimento urbano enquanto minimiza seus impactos adversos (Isinkaralar, 2024).

A Figura 8 ilustra a progressão da expansão urbana ao longo das décadas, destacando sua sobreposição com regiões classificadas como altamente suscetíveis a movimentos de massa e inundações. Essas classificações são baseadas na Carta de Suscetibilidade a Movimentos de Massa Gravitacionais e Inundações: Município do Recife, desenvolvida pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB) e pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). O estudo emprega modelagem matemática, validada por meio de pesquisa de campo, e incorpora fatores naturais espacialmente predisponentes (SGB, 2015). A análise revela que, à medida que a urbanização avança, particularmente em cenários futuros, há uma tendência clara de expansão para áreas de maior vulnerabilidade ambiental e geotécnica. Esse padrão é provavelmente impulsionado pela disponibilidade decrescente de terras adequadas para o desenvolvimento, juntamente com a invasão de regiões com topografia acidentada ou planícies de inundação — áreas frequentemente visadas devido à supervisão regulatória mais fraca ou menores custos de aquisição de terras.

Figura 8- Classificação da suscetibilidade a movimentos de massa e inundações em Recife para o período analisado.



Fonte: A autora (2025) a partir de dados do SGB (2015).

No mapa que descreve a suscetibilidade a movimentos de massa (Figura 7A), fica evidente que uma parcela significativa da expansão urbana projetada para 2050 e 2080 ocorre em regiões classificadas como de média a alta suscetibilidade. Essas áreas, tipicamente situadas em encostas ou terrenos instáveis, estão associadas a um risco elevado de deslizamentos de terra, particularmente durante períodos de chuvas intensas — eventos que devem se intensificar devido às mudanças climáticas. A ocupação não planejada dessas zonas representa um desafio substancial à segurança da população e à gestão urbana eficaz.

O crescimento desordenado do Recife resultou na criação de áreas propensas a riscos e vulneráveis a desastres naturais, principalmente durante a estação chuvosa. Durante esses períodos, inundações ocorrem frequentemente em planícies baixas, enquanto deslizamentos de terra são comuns em áreas com encostas instáveis ou formações de barreiras (Souza *et al.*, 2023).

Além disso, a subsidência do solo foi observada em certas áreas, criando depressões que são particularmente propensas a inundações. Este fenômeno representa um desafio adicional para o gerenciamento de eventos relacionados à água da chuva. Souza (2024) conduziu um estudo sobre subsidência do solo em Recife, com foco em locais com histórico de esgotamento do lençol freático.

Usando técnicas de geoprocessamento, especificamente radar de abertura sintética interferométrica (InSAR), a pesquisa analisou várias regiões da cidade e identificou vários locais de subsidência. As manifestações mais significativas de subsidência do solo se concentraram na Zona Oeste, onde extensas áreas exibiram taxas de subsidência notáveis.

Em relação ao mapa de suscetibilidade a inundações (Figura 7B), as áreas de crescimento urbano projetado não apenas se alinham com regiões de alta suscetibilidade, mas também coincidem com zonas propensas a inundações identificadas no Plano Municipal de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais do Recife (PMDR) para um período de retorno de 25 anos. Esses impactos provavelmente se intensificarão, principalmente durante episódios de chuvas intensas. Análises de dados de frequência de precipitação para Recife destacam a vulnerabilidade da cidade a eventos extremos de chuva (Silva Júnior, 2020; Wanderley *et al.*, 2021). Esse cenário ressalta a necessidade urgente de uma infraestrutura de drenagem robusta para mitigar os impactos das inundações, salvaguardando comunidades e atividades econômicas. Nesse contexto, as descobertas ressaltam a importância da adoção de um modelo de planejamento urbano sustentável baseado em tecnologias ecológicas para melhorar a qualidade do desenvolvimento urbano. Isso implica transformar práticas convencionais de urbanização priorizando estratégias de desenvolvimento verde, promovendo o uso eficiente de recursos como água, solo e energia, e fomentando a construção de cidades e vilas que enfatizem a conservação de recursos e a eficiência ambiental (Gao *et al.*, 2023).

Manguezais e corpos d'água exibem relativa estabilidade ao longo do período analisado, demonstrando sua resiliência diante da crescente urbanização. As florestas de manguezais estão entre os ecossistemas mais biologicamente significativos nas regiões costeiras (Aburto-Oropeza *et al.*, 2008). Elas desempenham um papel crítico na estabilização de litorais ao mitigar inundações e tempestades (Chowdhury e Hafsa, 2022) e sequestrar carbono atmosférico (Jadin e Rousseau, 2022). No entanto, elas continuam sendo alguns dos ecossistemas mais vulneráveis do mundo, enfrentando ameaças generalizadas de perturbações antropogênicas (Zhu *et al.*, 2021; Osorio, 2024). Consequentemente, há uma necessidade urgente de monitorar a saúde desses ecossistemas, particularmente sob pressão urbana, para garantir a preservação dos serviços essenciais que eles fornecem, como proteção contra inundações e conservação da biodiversidade.

Neste estudo, a classe LULC da água exibiu mudanças mínimas ao longo do período analisado, o que pode ser atribuído aos volumes de precipitação nos anos de referência usados para seleção de imagens de satélite. No entanto, é crucial destacar que as mudanças de LULC influenciam diretamente o escoamento superficial, a erosão do solo e o transporte de sedimentos em corpos d'água, impactando sua qualidade e capacidade de armazenamento. Dentro deste contexto, as análises de

LULC podem dar suporte a estudos detalhados sobre o transporte de sedimentos, oferecendo insights valiosos para o planejamento e gestão integrados de bacias hidrográficas (Admas *et al.*, 2024).

Uma relativa estabilização nas águas superficiais, com uma tendência reduzida de expansão, juntamente com o crescimento em áreas não vegetadas e cobertura florestal, foi observada em Recife. Tendências semelhantes foram identificadas em avaliações do bioma Mata Atlântica (Souza *et al.*, 2020). Os resultados do LULC ressaltam a viabilidade da modelagem preditiva do uso do solo, facilitada por recursos acessíveis, como a coleção MapBiomas, que é adaptada aos diversos biomas do Brasil. Essa base de recursos expandida abre novos caminhos para a modelagem hidrológica e urbana, aumentando a capacidade de entender e antecipar dinâmicas complexas de uso do solo (Brito *et al.*, 2023).

Além disso, essas mudanças de LULC são ainda mais exacerbadas pelos efeitos das mudanças climáticas, que impulsionam mudanças nos padrões de precipitação e aumento das temperaturas do ar. Esses fatores influenciam diretamente o ciclo hidrológico, aumentando o volume, a variabilidade e a intensidade das chuvas. Essas mudanças podem intensificar os processos de erosão e o transporte de sedimentos, amplificando seus impactos ambientais (Admas *et al.*, 2024).

Farias *et al.* (2024) analisaram projeções climáticas para precipitação e temperatura com base no Coupled Model Intercomparison Project Fase 6 (CMIP6) para municípios da Região Metropolitana do Recife, identificando impactos significativos. As projeções indicam um aumento consistente nas temperaturas máximas e mínimas. Em relação à precipitação, embora haja incerteza sobre os volumes totais de precipitação, é evidente uma tendência de redução da precipitação anual, juntamente com um aumento na intensidade dos eventos de precipitação. Araujo *et al.* (2024) enfatizam a importância do monitoramento dos efeitos das mudanças climáticas, estendendo suas análises para todo o estado de Pernambuco. Seus achados corroboram os de Farias *et al.* (2024) e Marengo (2017), que também projetam aumento das temperaturas e declínio dos totais anuais de precipitação.

3.3 PROPOSTAS PARA REDUÇÃO DE RISCOS EM CENÁRIOS DE URBANIZAÇÃO

Nesse contexto, diversas ações estratégicas podem ser adotadas para mitigar os impactos da urbanização em áreas vulneráveis e promover um desenvolvimento urbano mais resiliente. A Figura 9 sintetiza um conjunto de diretrizes fundamentais voltadas à gestão de riscos urbanos, destacando desde o mapeamento de áreas suscetíveis até a importância da legislação e fiscalização adequadas.

Figura 9 - Estratégias integradas para mitigação de riscos e promoção da resiliência urbana.



Fonte: A Autora (2025).

A análise ressalta a necessidade urgente de integrar o planejamento urbano com avaliações de risco e a implementação de políticas públicas voltadas para o uso ordenado e seguro do solo. A expansão projetada de áreas urbanas, particularmente em regiões altamente suscetíveis a movimentos de massa e inundações, necessita de ações concretas para garantir a segurança da população e a sustentabilidade ambiental. Uma abordagem integrada, envolvendo colaboração entre partes interessadas sociais e institucionais, é essencial para identificar soluções equilibradas que maximizem os benefícios ambientais e sociais. Tais esforços podem melhorar significativamente a qualidade de vida dos moradores urbanos (Cabral *et al.*, 2022).

Diante disso, várias propostas podem ser destacadas para mitigar os impactos adversos da urbanização em áreas vulneráveis e promover o desenvolvimento urbano resiliente. Primeiramente, é essencial conduzir o mapeamento periódico de áreas propensas a riscos, atualizando regularmente os mapas de suscetibilidade para movimentos de massa e inundações. Esses mapas fornecem dados críticos para informar decisões sobre expansão urbana e projetos de infraestrutura. Além disso, implementar sistemas de drenagem sustentáveis — como bacias de retenção, jardins de chuva e a restauração da vegetação natural — pode desempenhar um papel estratégico na redução dos impactos de eventos climáticos extremos, ao mesmo tempo em que contribui para a preservação ambiental.

Outra medida crítica é o monitoramento contínuo de áreas vulneráveis usando tecnologias avançadas, como sensores remotos e sistemas de alerta precoce, para fornecer dados em tempo real, prevenir desastres e orientar respostas rápidas de emergência. Políticas de habitação que promovam a ocupação de áreas de menor risco, por meio de incentivos como subsídios e programas planejados de reassentamento, são igualmente vitais para prevenir a ocupação não regulamentada de zonas de alto risco.

Além disso, é essencial integrar a gestão de riscos aos planos diretores urbanos, incorporando estratégias de mitigação em todos os estágios do planejamento urbano — desde regulamentações de zoneamento até padrões de construção. Por exemplo, o Plano Municipal de Drenagem e Gestão de Águas Pluviais (PMDR) determina a preservação de áreas adjacentes a rios e córregos, designadas

como Áreas de Preservação Permanente (APP) pela legislação brasileira. Essas regulamentações proíbem a ocupação dessas áreas ou a construção de estruturas permanentes, a menos que sejam destinadas ao reflorestamento ou ao desenvolvimento de parques lineares ao longo das margens dos rios. No entanto, essa disposição ainda não foi totalmente implementada na prática, ressaltando a necessidade não apenas de cumprir com os requisitos legislativos, mas também de promover o paisagismo ao longo das margens dos canais. Essas medidas podem promover maior harmonia ambiental, melhorar a qualidade de vida dos moradores em áreas adjacentes e contribuir para o desenvolvimento de uma cidade mais sustentável e resiliente.

É crucial enfatizar a necessidade de proteger e promover a recuperação de áreas urbanas ambientalmente significativas, integrando seu valor histórico e cultural para promover o engajamento entre autoridades públicas e cultivar um senso de propriedade comunitária. Um exemplo notável é o Parque Jiquiá, uma área protegida atualmente em estado de abandono. Este local tem importância histórica como a localização da última torre de atracação de dirigíveis Zeppelin remanescente do mundo — um legado que liga Recife a um momento crucial na história da aviação global. No entanto, o parque enfrenta vários desafios, incluindo ocupação não regulamentada, descarte inadequado de resíduos sólidos, degradação da vegetação e cursos d'água e manutenção inadequada. Essas questões prejudicam tanto sua importância ambiental quanto seu potencial para uso social e turístico.

O Plano de Desenvolvimento e Revitalização Municipal (MDRP) do Recife inclui a revitalização do Parque do Jiquiá por meio do projeto “Parque Científico e Cultural do Jiquiá”, conforme ilustrado na Figura 10. Esta iniciativa propõe um conceito inovador que integra ciência, cultura e lazer, com foco na produção de conhecimento, pesquisa científica e revalorização dos espaços urbanos. O projeto é um esforço colaborativo entre os governos federal, estadual e municipal. Sua implementação visa não apenas restaurar a liderança do estado na produção científica, mas também revitalizar o entorno do Rio Jiquiá, promovendo o uso sustentável e planejado da área.

Figura 10 - Proposta de revitalização do Parque Jiquiá.



Fonte: Emlurb (2016).

No entanto, como destacado por Sousa *et al.* (2020) e Uchôa (2020), a implementação do projeto ainda não se materializou, deixando a área negligenciada e subutilizada. A falta de manutenção adequada, eventos públicos e iniciativas institucionais restringiu o potencial da região e agravou sua degradação. Recentemente, em 2023, foi apresentada uma proposta de restauração do parque, enfatizando a importância de sua revitalização tanto para a conservação ambiental quanto para a restauração de seu significado histórico e turístico, particularmente ligado à torre Zeppelin.

Além de proteger a área da expansão urbana desregulamentada, um esforço coordenado é essencial para garantir a implementação bem-sucedida do projeto de remodelação. Esta iniciativa deve integrar a história local com a conservação ambiental e os princípios de planejamento urbano sustentável. Tal abordagem não apenas protege os ativos naturais e históricos, mas também promove a conscientização pública, incentivando o crescimento urbano ordenado e planejado. Ela serve como um modelo para harmonizar preservação, cultura e desenvolvimento. Consequentemente, a revitalização do Parque Jiquiá representa um passo crítico em direção à recuperação ambiental do rio e seus arredores, ao mesmo tempo em que celebra seu significado histórico. Este esforço reforça o papel do parque como um símbolo da resiliência urbana do Recife.

Essas medidas ressaltam a importância do planejamento integrado que combina estratégias de preservação ambiental, segurança da população e infraestrutura urbana robusta. Ao fazer isso, é possível fortalecer compromissos para reduzir riscos futuros e construir cidades mais resilientes, capazes de enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas e pela expansão urbana.

Nesse contexto, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) destacam a sustentabilidade ambiental como tema central, enfatizando a preservação dos recursos naturais em níveis que não comprometam as gerações futuras. A mitigação das mudanças climáticas está intrinsecamente ligada à preservação dos ecossistemas, principalmente por meio das Áreas Protegidas (APs). Essas áreas garantem o equilíbrio dos sistemas naturais e possuem valores ecológicos, naturais e culturais essenciais para o avanço dos princípios de sustentabilidade defendidos pelos ODS (Sobhani *et al.*, 2021; Folharini *et al.*, 2023). No entanto, as APs enfrentam mudanças de LULC que prejudicam sua resiliência e interrompem a prestação de serviços ecossistêmicos, dificultando o alcance de seus objetivos de proteção e conservação. Esse cenário é prevalente em várias regiões do mundo, incluindo o Brasil (Silva *et al.*, 2023; Folharini *et al.*, 2022; da Silva *et al.*, 2023).

Diante disso, a modelagem LULC surgiu como uma ferramenta essencial, amplamente aplicada em estudos de gestão de uso e ocupação do solo. Dado que as APs são particularmente vulneráveis a pressões externas decorrentes de atividades humanas, seus planos de gestão devem integrar técnicas de modelagem preditiva LULC. Essa abordagem permite a proposta de estratégias

de controle e gestão mais eficazes, garantindo a conservação a longo prazo desses territórios críticos (Folharini *et al.*, 2023).

4. CONCLUSÕES

Os resultados destacam a complexa interação entre crescimento urbano e preservação ambiental em Recife. Projeções para 2050 e 2080 indicam expansão urbana significativa, acompanhada por um declínio acentuado em áreas de pastagem e uma tendência à estabilização de manguezais e corpos d'água. No entanto, a ocupação desregulada de zonas de alto risco e o aumento da impermeabilização do solo aumentaram a vulnerabilidade da cidade a inundações e deslizamentos de terra, ressaltando a necessidade urgente de estratégias de mitigação. Implementar medidas como restauração florestal, manejo agrícola sustentável e infraestrutura verde é essencial para mitigar esses impactos e garantir um futuro mais equilibrado e sustentável para Recife.

Para enfrentar esses desafios, é necessário atualizar a Lei de Uso e Cobertura do Solo, garantindo a preservação de espaços verdes, a manutenção de zonas de amortecimento ambiental e o controle efetivo da expansão urbana para evitar a ocupação de áreas de alto risco. Além disso, a revisão do Plano Diretor de Drenagem Urbana em 2026 é crucial para se adaptar às mudanças climáticas e ao crescimento urbano, incorporando soluções baseadas na natureza, como infraestrutura verde e azul e sistemas de drenagem urbana sustentáveis. O monitoramento da impermeabilização do solo é igualmente essencial, pois sua intensificação tem agravado os riscos de escoamento superficial e inundação. Implementar regulamentações mais rigorosas, juntamente com incentivos para práticas sustentáveis, como jardins de chuva e pavimentação permeável, é vital para minimizar esses impactos.

É essencial implementar políticas públicas que equilibrem o desenvolvimento econômico e a conservação ambiental, particularmente em um contexto de vulnerabilidade climática e socioambiental como o de Recife. Nesse sentido, este estudo fornece insights valiosos para moldar políticas públicas e aprimorar a gestão territorial, fomentando o desenvolvimento urbano resiliente, adaptativo e ambientalmente sustentável para a cidade.

É relevante destacar que modelagens preditivas de uso e cobertura do solo, como as realizadas com o modelo MOLUSCE, são ferramentas importantes para apoiar o planejamento urbano, mas envolvem incertezas inerentes. Essas incertezas decorrem da qualidade dos dados de entrada, da escolha das variáveis explicativas, da calibração dos algoritmos utilizados e das suposições sobre a continuidade dos padrões históricos. Além disso, fatores institucionais, políticos e sociais que influenciam diretamente a dinâmica urbana muitas vezes não são capturados pelo modelo. Por isso,

os resultados devem ser interpretados considerando tais incertezas e utilizados como subsídio para a tomada de decisão, e não como previsões absolutas.

REFERÊNCIAS

- ABURTO-OROPEZA, O.; EZCURRA, E.; DANEMANN, G.; *ET AL.* (2008). Os manguezais no Golfo da Califórnia aumentam o rendimento da pesca. *PNAS*, 105:10456–10459. <https://doi.org/10.1073/pnas.0804601105>
- ADMAS, M.; MELESSE, A. M.; TEGEGNE, G. (2024). Prevenindo os impactos do uso/cobertura da terra e mudanças climáticas nos fluxos de água e sedimentos na bacia hidrográfica de Megech, Bacia do Alto Nilo Azul. *Sensoriamento Remoto*, 16(13):2385. <https://doi.org/10.3390/rs16132385>
- ALIPBEKI, O.; ALIPBEKOVA, C.; MUSSAIF, G.; *ET AL.* (2024). Análise e previsão de mudanças no uso da terra/cobertura da terra no distrito de Korgalzhyn, Cazaquistão. *Agronomy*, 14:268. <https://doi.org/10.3390/agronomy14020268>
- ANOSE, F. A.; BEKETIE, K. T.; ZELEKE, T. T.; AYAL, D. Y.; FEYISA, G. L. (2021). Variabilidade hidroclimática espaço-temporal na bacia do rio Omo-Gibe, Etiópia. *Serviços Climáticos*, 24.
- APAC – AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA (2025). Climatologia – Precipitação média por município. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/193-climatologia/521-climatologia-por-municipio>. Acesso em: 17/02/2025.
- ARAUJO, D. C. S.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, S. F.; FARIAS, V. E. M.; RODRIGUES, A. B. (2024). Análise de cenários de mudanças climáticas usando modelos CMIP6 em Pernambuco, Brasil. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, 59:e1868.
- ASHAOLU, E. D.; OLORUNFEMI, J. F.; IFABIYI, I. P. (2019). Avaliação do padrão espaço-temporal de uso da terra e mudanças na cobertura da terra na bacia de drenagem de Osun, Nigéria. *Journal of Environmental Geography*, 12(1–2):41–50. <https://doi.org/10.2478/jengeo-2019-0005>
- ASIA AIR SURVEY (2025). Next GIS MOLUSCE – Análise rápida e conveniente de mudanças na cobertura do solo. Disponível em: <https://nextgis.com/blog/molusce>. Acessado em: 12/01/2025.
- BHATTA, B.; SHRESTHA, S.; SHRESTHA, P. K.; TALCHABHADEL, R. (2019). Avaliação e aplicação de um modelo SWAT para avaliar o impacto das mudanças climáticas na hidrologia da Bacia do Rio Himalaia. *Catena*, 181, 104082. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104082>
- BRITO, H. C. D.; RUFINO, I. A. A.; BARROS FILHO, M. N. M.; MENESES, R. A. (2023). Uso de dados espaciais na simulação da demanda doméstica de água em uma cidade semiárida: o caso de Campina Grande, Brasil. *Ciência Urbana*, 7(4), 120. <https://doi.org/10.3390/urbansci7040120>
- CABRAL, J. J. S. P.; DA SILVA JUNIOR, M. A. B.; NEVES, Y. T.; RODRIGUES, A. B.; CARVALHO FILHO, J. A. A. (2022). Resiliência fluvial urbana. In ESLAMIAN, S.; ESLAMIAN, F. (Eds.), *Redução do risco de desastres para resiliência* (pp. 281–304). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-08325-9_14

CABRAL, J. J. S. P.; ALENCAR, A. V. (2005). Recife e a convivência com as águas. In *Gestão do Território e Manejo Integrado das Águas Urbanas*. Ministério das Cidades, Brasília-DF.

CHISANGA, C. B.; PHIRI, D.; MUBANGA, K. H. (2024). Dinâmica de cobertura/uso da terra multidécada e previsões futuras para a Zâmbia: 2000–2030. *Discover Environment*, 2, 38. <https://doi.org/10.1007/s44274-024-00066-w>

CHOWDHURY, M. S.; HAFSA, B. (2022). Análise de mudança de cobertura de terra multidecadal sobre a floresta de mangue de Sundarbans em Bangladesh: uma abordagem baseada em GIS e sensoriamento remoto. *Global Ecology and Conservation*, 37, e02151. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2022.e02151>

CONGALTON, R. G. (1991). Uma revisão da avaliação da precisão das classificações de dados sensorizados remotamente. *Sensoriamento Remoto do Meio Ambiente*, 37(1), 35–46. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90048-B](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-B)

DA SILVA, R. F. B.; DE CASTRO VICTORIA, D.; NOSSACK, F. Á.; VIÑA, A.; MILLINGTON, J. D. A.; VIEIRA, S. A.; BATISTELLA, M.; MORAN, E.; LIU, J. (2023). A desaceleração do desmatamento após uma política florestal brasileira foi menos eficaz em terras privadas do que em todas as áreas de conservação. *Communications Earth e Environment*, 4, 111.

EMLURB - EMPRESA DE MANUTENÇÃO E LIMPEZA URBANA. (2016). Plano Diretor de Drenagem e Manejo das Águas Urbanas do Recife: Relatório do diagnóstico do sistema de drenagem existente. ABF Engenharia LTDA, Recife, 333p.

EMLURB/PREFEITURA DO RECIFE. (2017). Plano Consolidado (Resumo Executivo). Em PDDR, ABF Engenharia, Serviços e Comércio Ltda, Recife, 245p.

FARIAS, V. E. M.; RODRIGUES, A. B.; MONTEIRO, P. B. C.; ARAÚJO, D. C. S.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; CABRAL, J. J. S. P. (2024). Perspectivas Climáticas Futuras com Base nos Modelos do CMIP6 para Municípios da Região Metropolitana do Recife (PE), Brasil. *Revista Caminhos de Geografia*, 25(101), 58–79. <https://doi.org/10.14393/RCG2510171642>

FOLHARINI, S.; VIEIRA, A.; BENTO-GONÇALVES, A.; SILVA, S.; MARQUES, T.; NOVAIS, J. (2023). Uma Estrutura Utilizando Software Aberto para Previsão do Uso do Solo e Análise de Séries Temporais de Dados Climáticos em uma Área Protegida de Portugal: Parque Natural do Alvão. *Terreno*, 12(7), 1302. <https://doi.org/10.3390/land12071302>

FOLHARINI, S. D. O.; DE MELO, S. N.; CAMERON, S. R. (2022). Efeito das Áreas Protegidas nos Crimes Florestais no Brasil. *Revista de Planejamento e Gestão Ambiental*, 65(2), 272–287.

FONTANA, A. G.; NASCIMENTO, V. F.; OMETTO, J. P.; DO AMARAL, F. H. F. (2023). Análise do crescimento urbano passado e futuro em escala regional usando sensoriamento remoto e aprendizado de máquina. *Frontiers in Remote Sensing*, 4, 1123254. <https://doi.org/10.3389/frsen.2023.1123254>

FORZIERI, G.; DAKOS, V.; MCDOWELL, N. G.; RAMDANE, A.; CESCATTI, A. (2022). Sinais emergentes de declínio da resiliência florestal sob as mudanças climáticas. *Nature*, 608, 534–539.

FREITAS, S. R.; HAWBAKER, T. J.; METZGER, J. P. (2010). Efeitos de estradas, topografia e uso da terra na dinâmica da cobertura florestal na Mata Atlântica brasileira. *Ecologia e Manejo Florestal*, 259(3), 410–417.

GAO, C.; CHENG, D.; IQBAL, J.; YAO, S. (2023). Análise e previsão de mudanças espaço-temporais da cobertura do solo da região do Grande Rio Amarelo (GYRR) e análise do relacionamento com os perigos das montanhas. *Terreno*, 12(2), 340. <https://doi.org/10.3390/land12020340>

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (2018). População em áreas de risco no Brasil. Rio de Janeiro, 91p.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (2022). Cidades. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/recife/panorama>. Acesso em: 17/02/2025.

IPCC – PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. (2007). Mudanças climáticas 2007: impactos, adaptação e vulnerabilidade. Resumo para formuladores de políticas. Em Contribuição do Grupo de Trabalho II para o quarto relatório de avaliação do painel intergovernamental sobre mudanças climáticas. Cambridge University Press, Cambridge.

ISINKARALAR, O. (2024). Um marco metodológico na determinação do crescimento urbano: projeções espaço-temporais para Eskişehir, Türkiye. *Análise Espacial Aplicada e Política*, 17, 1485–1495. <https://doi.org/10.1007/s12061-024-09592-9>

JADIN, J.; ROUSSEAU, S. (2022). Atitudes da comunidade local em relação à conservação da floresta de mangue. *Journal for Nature Conservation*, 68, 126232. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2022.126232>

LEÃO, E.; ANDRADE, J.; NASCIMENTO, L. (2021). Recife: um perfil de ação climática. *Cidades*, 116, 103270. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2021.103270>

LEONARDO, H. R. DE A. L.; ALMEIDA, D. N. O. DE; AMORIM, A. R. DE; PAIVA, A. L. R. DE; OLIVEIRA, L. M. M. DE; SANTOS, S. M. DOS. (2024). Sensoriamento remoto aplicado a parâmetros biofísicos e cobertura do solo para identificação de ilhas de calor urbanas em Recife (PE), Brasil. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, 60, e2107. <https://doi.org/10.5327/Z2176-94782107>

LI, T.; LI, W. (2015). Simulação de múltiplas mudanças no uso da terra com abordagem de Monte Carlo e modelo CA-ANN, um estudo de caso em Shenzhen, China. *Environmental Systems Research*, 4(1). <https://doi.org/10.1186/s40068-014-0026-6>

LIRA, P.; TAMBOSI, L.; EWERS, R.; METZGER, J. (2012). Mudanças no uso e cobertura da terra em paisagens da Mata Atlântica. *Ecologia e Manejo Florestal*, 278, 80–89. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.05.008>

LUKAS, P., MELESSE, A. M., & KENEA, T. T. (2023). Prediction of Future Land Use/Land Cover Changes Using a Coupled CA-ANN Model in the Upper Omo–Gibe River Basin, Ethiopia. *Remote Sensing*, 15(4), 1148. <https://doi.org/10.3390/rs15041148>

MAGAROTTO, M. G.; TENEDÓRIO, J. A.; COSTA, M. F.; CALOR, I.; SILVA, C. P. (2019). Análise do crescimento urbano em áreas costeiras apoiada por dados GIS 2D/2.5D. Um estudo

comparativo entre a Praia de Boa Viagem (Brasil) e a Praia da Rocha (Portugal). *Journal of Coastal Conservation*, 17, 1–11. <https://doi.org/10.1007/s11852-019-00715-w>

MAPBIOMAS. (2023). MapBiomas Brasil. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/>. Acessado em: 28/12/2024.

MAPBIOMAS. (2024). Análise de Acurácia – MapBiomas Brasil. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/analise-de-acuracia/>. Acesso em: 28/12/2024.

MARENGO, J. A. (2017). Relatório Especial do Painel e Adaptação das Cidades Costeiras Brasileiras às Mudanças Climáticas.

MAGAROTTO, M. G.; COSTA, M. F. (2021). Parque de Manguezais do Recife: Um século de usos e abusos extremos (?). *Estudos Regionais em Ciência Marinha*, 42, 101654. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101654>

MENG, F.; ZHOU, Z.; ZHANG, P. (2023). Otimização multiobjetivo do uso da terra na região de Pequim–Tianjin–Hebei da China com base no modelo de vedação GMOP-PLUS. *Sustentabilidade*, 15, 3977.

MERAJ, G.; KANGA, S.; AMBADKAR, A.; *et al.* (2022). Avaliação do rendimento do trigo usando algoritmos de aprendizado de máquina baseados em sensoriamento remoto por satélite e modelagem de simulação. *Sensoriamento Remoto*, 14(13), 3005. <https://doi.org/10.3390/rs14133005>

MORELLATO, L. P. C.; HADDAD, C. F. B. (2000). Introdução: A Mata Atlântica Brasileira. *Biotropica*, 32(4b), 786–792.

NOGUEIRA, S. H. M.; PARENTE, L. L.; FERREIRA, L. G. (2017). Inspeção visual temporal: uma ferramenta destinada à inspeção visual de pontos em séries históricas de imagens de sensoriamento remoto. In: *Anais do XXVII Congresso Brasileiro de Cartografia e XXVI Exposicarta*, p. 624–628. SBC, Rio de Janeiro.

OSMAN, M. A. A.; ABDEL-RAHMAN, E. M.; ONONO, J. O.; *et al.* (2023). Mapeamento, intensidades e previsão futura da dinâmica de uso/cobertura da terra usando o Google Earth Engine e o modelo de rede neural artificial CA. *PLoS ONE*, 18, e0288694.

OSORIO, L. O.; RIOKA, R. R.; IRINEO, E. T.; MARTINEZ, F. G. (2023). Efeito das áreas naturais protegidas na taxa de mudança de cobertura de florestas de manguezais na Península de Yucatán, México. *Wetlands*, 43, 52. <https://doi.org/10.1007/s13157-023-01697-0>

PARK, M.; LEE, J.; WON, J. (2024). Navegando pela sustentabilidade urbana: planejamento urbano e a análise preditiva da dinâmica das áreas verdes de Busan usando o modelo CA-ANN. *Florestas*, 15(10), 1681.

PBMC – PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. (2016). Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. COPPE – UFRJ, Rio de Janeiro, 184p. ISBN: 978-85-285-0345-6.

RECIFE. (2025). Caracterização do território. Disponível em: <https://www2.recife.pe.gov.br/pagina/caracterizacao-do-territorio>. Acesso em: 01/03/2025.

RECIFE. (2022). Recife 500 anos: plano estratégico de longo prazo para o desenvolvimento da cidade. Agência Recife de Inovação e Estratégia – ARIES, 2. ed. Recife: Cepe.

SALGUEIRO, C. O. DE B.; COUTINHO RODRIGUES JUNIOR, J.; BORJA GONÇALVES GOMES DE MENEZES, R.; LUIZ RIBEIRO DE PAIVA, A.; MARIA MACIEL DE OLIVEIRA, L.; MELO DOS SANTOS, S. (2024). Urbanização e eventos pluviométricos: avaliação do impacto na ocorrência de desastres naturais. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 17(6), 4029–4043. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.6.p4029-4043>

SGB – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. (2015). Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação: município de Recife – PE. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/15030>. Acesso em: fevereiro/2025.

SHIMABUKURO, Y. E.; ARAI, E.; DA SILVA, G. M.; HOFFMANN, T. B.; DUARTE, V.; MARTINI, P. R.; DUTRA, A. C.; MATAVELI, G.; CASSOL, H. L. G.; ADAMI, M. (2023). Mapeamento de classes de uso e cobertura do solo no estado de São Paulo, sudeste do Brasil, usando dados multiespectrais Landsat-8 OLI e os índices espectrais derivados e imagens de fração. *Florestas*, 14(8), 1669. <https://doi.org/10.3390/f14081669>

SILVA JUNIOR, M. A. B. DA; CABRAL, J. J. P. S.; FONSECA NETO, G. C. DA; SILVA, P. O. DA; GUERRA, C. M. F.; SILVA, S. R. DA. (2020). Desafios para a adaptação da infraestrutura de drenagem urbana ao cenário de mudança do clima no Recife-PE. *Jornal de Análise e Progresso Ambiental*, 5(3), 302–318.

SILVA, R. M. D.; LOPES, A. G.; SANTOS, C. A. G. (2023). Desmatamento e incêndios na Amazônia brasileira de 2001 a 2020: impactos na variabilidade da precipitação e na temperatura da superfície terrestre. *Journal of Environmental Management*, 326, 116664.

SOBHANI, P.; ESMAEILZADEH, H.; BARGHJELVEH, S.; SADEGHI, S. M. M.; MARCU, M. V. (2021). Integridade do habitat em áreas protegidas ameaçadas por mudanças e fragmentação de LULC: um estudo de caso na província de Teerã, Irã. *Terra*, 11(6).

SOUSA, N. M. DE; PORTELA, M. F. DE A.; NASCIMENTO, E. C. DO; TORRES, D. M.; FIGUEIREDO, A. A. DE O. (2020). Ocupação desordenada e deposição de resíduos sólidos: um estudo sobre o entorno do Parque Jiquiá – Recife/PE. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental*, 14(2), 179–186. <https://doi.org/10.18378/rbga.v14i2.7944>

SOUZA, W. DE O.; DE MOURA REIS, L. G.; DA SILVA PEREIRA CABRAL, J. J.; RUIZ-ARMENTEROS, A. M.; QUENTAL COUTINHO, R.; DA PENHA PACHECO, A.; RAMOS ARAGÃO JUNIOR, W. (2024). Análise da subsidência de terras induzida pela urbanização na cidade do Recife (Brasil) usando interferometria SAR de espalhamento persistente. *Sensoriamento Remoto*, 16(14), 2592. <https://doi.org/10.3390/rs16142592>

SOUZA, W. M. DE. (2011). Impactos socioeconômicos e ambientais dos desastres associados às chuvas na cidade do Recife-PE. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, 121p.

SOUZA, C. M.; SHIMBO, J. Z.; ROSA, M. R.; PARENTE, L. L.; ALENCAR, A. A.; RUDORFF, B. F.; HASENACK, H.; MATSUMOTO, M.; FERREIRA, L. G.; SOUZA-FILHO, P. W.; DE OLIVEIRA, S. W.; ROCHA, W. F.; FONSECA, A. V.; MARQUES, C. B.; DINIZ, C. G.; COSTA, D.; MONTEIRO, D.; ROSA, E.; VÉLEZ-MARTIN, E.; ...; AZEVEDO, T. (2020). Reconstruindo

três décadas de mudanças no uso e cobertura da terra nos biomas brasileiros com arquivo Landsat e Earth Engine. *Sensoriamento Remoto*, 12(17), 2735. <https://doi.org/10.3390/rs12172735>

SOUZA, C. M., JR.; ROSA, M. R.; PARENTE, L. L.; ALENCAR, A. A.; RUDORFF, B. F. T.; HASENACK, H.; MATSUMOTO, M.; FERREIRA, L. G.; SOUZA-FILHO, P. W. M.; *et al.* (2020). Reconstruindo três décadas de mudanças no uso e cobertura da terra em biomas brasileiros com o Landsat Arquivo e o Earth Engine. *Sensoriamento Remoto*, 12(17), 2735. <https://doi.org/10.3390/rs12172735>

SOUZA, J. N. S.; VIGODERIS, R. B.; SILVA, N. T. C.; DE SOUZA, W. M.; DA SILVA, J. M.; LEITE, G. S.; ...; GONZAGA, N. DA C. (2024). Dinâmica climática e transformação histórica do uso e ocupação do solo devido à urbanização em Recife-PE. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 18(4), e04619. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n4-049>

SUN, G.; LIU, Y. (2013). Influências florestais no clima e nos recursos hídricos na paisagem até a escala regional. In: *Ecologia da Paisagem para o Meio Ambiente e Cultura Sustentáveis*, p. 309–334. Springer.

TABARELLI, M. (1999). Efeitos da fragmentação de habitat na estrutura de guildas de plantas na floresta atlântica montana do sudeste do Brasil. *Biological Conservation*, 91(2–3), 119–127.

TENAGASHAW, D. Y.; MULUNEH, M.; METAFERIA, G.; MEKONNEN, Y. A. (2022). Uso da terra e impactos das mudanças climáticas no fluxo de água usando o modelo SWAT, sub-bacia do Middle Awash, Etiópia. *Water Conservation Science and Engineering*, 7, 183–196. <https://doi.org/10.1007/s41101-022-00135-2>

UCHÔA, M. E. G. C. (2020). A inserção das áreas verdes nas unidades ambientais da cidade do Recife: uma reflexão sobre a conservação da geodiversidade no espaço urbano. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-graduação em Geografia, Recife.

VADDIRAJU, S. C.; TALARI, R.; BHAVANA, K.; *et al.* (2023). Prevenindo o uso futuro da terra e mudanças na cobertura da terra para a Bacia Hidrográfica de Saroor Nagar, Telangana, Índia, usando GIS de código aberto. *Monitoramento e Avaliação Ambiental*, 195, 1499. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-12128-2>

WANDERLEY, L. S. DE A.; NÓBREGA, R. S.; DUARTE, C. C.; MOREIRA, A. B.; ANJOS, R. S. DOS. (2021). Tipos de tempo associados a eventos diários de chuvas intensas na cidade de Recife-PE, Brasil. *Sociedade e Natureza*, 33. <https://doi.org/10.14393/SN-v33-2021-60520>

ZHU, B.; LIAO, J.; SHEN, G. (2021). Combinando séries temporais e dados de cobertura do solo para análise de mudanças espaço-temporais em florestas de mangue: um estudo de caso da Reserva Natural Qinglangang, Hainan, China. *Ecological Indicators*, 131, 108135. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108135>

5. ARTIGO 4: IMPACTOS DO USO FUTURO DO SOLO E DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA DINÂMICA DE INUNDAÇÕES EM PLANÍCIE URBANA.

RESUMO

Considerando os crescentes impactos das mudanças climáticas sobre as áreas urbanas, especialmente em cidades vulneráveis como Recife, torna-se essencial compreender como a intensificação de eventos extremos pode afetar a dinâmica das inundações. Nesse contexto, este estudo avaliou as inundações na bacia do rio Jiquiá (Recife-PE) por meio de modelagem hidrodinâmica 2D no HEC-RAS 6.3.1, integrando cenários de uso do solo (atual e futuro) e precipitação obtida de curvas IDF presentes (PMDR) e futuras (CMIP6 – MIROC6, SSP2-4.5). Após calibração com o evento de precipitação intensa ocorrido entre 3 a 6 fevereiro 2025, os parâmetros *Manning* e Curva Number (CN) foram ajustados, resultando em desempenho satisfatório para os dois pontos de monitoramento de nível. Foram analisados quatro cenários baseados em TR = 25 anos indicando variações de área inundada com incremento máximo de 15 % na classe “Muito Alto” (1,0–1,5 m) e 4,8 % na classe “Crítico” (> 1,5 m) sob condições futuras combinadas. Simulações complementares para TR = 50 e 100 anos no cenário de uso do solo e precipitação no futuro, indicaram aumento nas profundidades maiores que 1,0 m em até 159%, confirmando a influência da intensificação climática sobre os impactos das inundações. A abordagem demonstrou a eficácia na combinação de cenários climáticos e de ocupação para auxiliar na gestão dos riscos urbanos e subsidiar estratégias adaptativas e de resiliência.

Palavras-Chave: Modelagem Hidrodinâmica 2D; HEC-RAS; Inundações Urbanas; Uso Futuro do solo.

1. INTRODUÇÃO

Inundações, são riscos naturais recorrentes e amplamente distribuídos, frequentemente associados a perdas socioeconômicas e impactos ambientais. Nas zonas urbanas, o impacto pode ser especialmente acentuado, manifestando-se tanto por meio de danos diretos resultantes da inundação de propriedades e infraestruturas críticas quanto por consequências indiretas, incluindo a redução da produtividade e a diminuição de oportunidades de negócios (Cea e Costabile, 2022).

Esse cenário é particularmente preocupante em cidades costeiras, onde a topografia naturalmente baixa, combinada à expansão urbana desordenada, torna essas áreas especialmente vulneráveis ao aumento do nível do mar, tempestades e inundações intensificadas pelas mudanças climáticas. Estima-se que mais de 40% da população mundial reside em regiões costeiras, muitas vezes em habitações informais situadas em áreas de risco geológico e hidrológico, o que agrava o potencial de perdas humanas e materiais (Saboia *et al.*, 2020).

Diante desses desafios, compreender a dinâmica das inundações em termos de extensão, profundidade, velocidade de fluxo torna-se essencial para o desenvolvimento de estratégias eficazes de mitigação e adaptação, especialmente em ambientes urbanos (Sahoo e Sreeja, 2017). Nesse contexto, as modelagens computacionais têm se consolidado como ferramentas indispensáveis para o suporte à gestão de riscos, permitindo antecipar cenários, avaliar vulnerabilidades e embasar a tomada de decisões em planejamento urbano e gestão de emergências.

Os primeiros modelos numéricos foram baseados nas equações 1D de Saint Venant, também conhecidas como equações 1D de águas rasas (1D-SWEs). Esses modelos foram amplamente utilizados nas décadas de 80 e 90 para modelar enchentes de rios, sendo o HEC-RAS 1D o modelo mais difundido. A capacidade computacional e a disponibilidade de dados na época tornavam tais modelos os mais adequados em termos de precisão e tempo de cálculo. No entanto, a aproximação 1D tem sérias limitações ao modelar inundações em áreas urbanas e foram progressivamente substituídos por modelos 2D para reproduzir os caminhos de fluxo complexos e multidirecionais que ocorrem em áreas urbanas (Cea e Costabile, 2022).

O software HEC-RAS, desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA, destaca-se como uma das principais ferramentas de modelagem hidrodinâmica, permitindo a simulação de fluxo permanente e transiente, análise de qualidade de água e cálculo de transporte de sedimentos, auxiliando em estudos de planejamento urbano, gestão de cheias e elaboração de mapas de risco (USACE, 2016).

A simulação de escoamentos não-permanentes unidimensionais se baseia na solução da equação completa de Saint-Venant através do método das diferenças finitas. Já para modelos bidimensionais, o software possui duas opções, a ser escolhidas pelo usuário: solução da equação completa de Saint-Venant ou da equação da onda de difusão. Em ambas as abordagens, a solução das equações 2D é realizada através do método do volume finito implícito (Verçosa, 2019).

Os resultados gerados por modelos como o HEC-RAS, especialmente os mapas de inundação, oferecem dados qualitativos e quantitativos essenciais, como extensão, profundidade, velocidade e duração da inundação. Essas informações são fundamentais para apoiar ações de prevenção, resposta a emergências e dimensionamento de infraestruturas de controle (Pokhrel *et al.*, 2020; Mohanty *et al.*, 2022). Além disso, a integração dessas informações com dados de ativos econômicos, sociais e ambientais permite a quantificação de possíveis danos e a adoção de medidas preventivas e de controle mais eficazes (Gomes *et al.*, 2019).

A bacia do rio Jiquiá, se destaca como uma sub-bacia estratégica do rio Tejupió, reunindo relevância socioambiental e valor histórico-cultural. Essa bacia enfrenta desafios expressivos relacionados à drenagem urbana e à gestão de inundações, exigindo análises em escala local para subsidiar intervenções mais eficazes. Além disso, seu território abriga marcos históricos, como os vestígios do antigo campo de pouso do Zeppelin, reforçando sua importância na memória urbana da cidade. Por essas razões, o estudo da bacia do Jiquiá é essencial para promover soluções integradas de resiliência e planejamento sustentável em Recife.

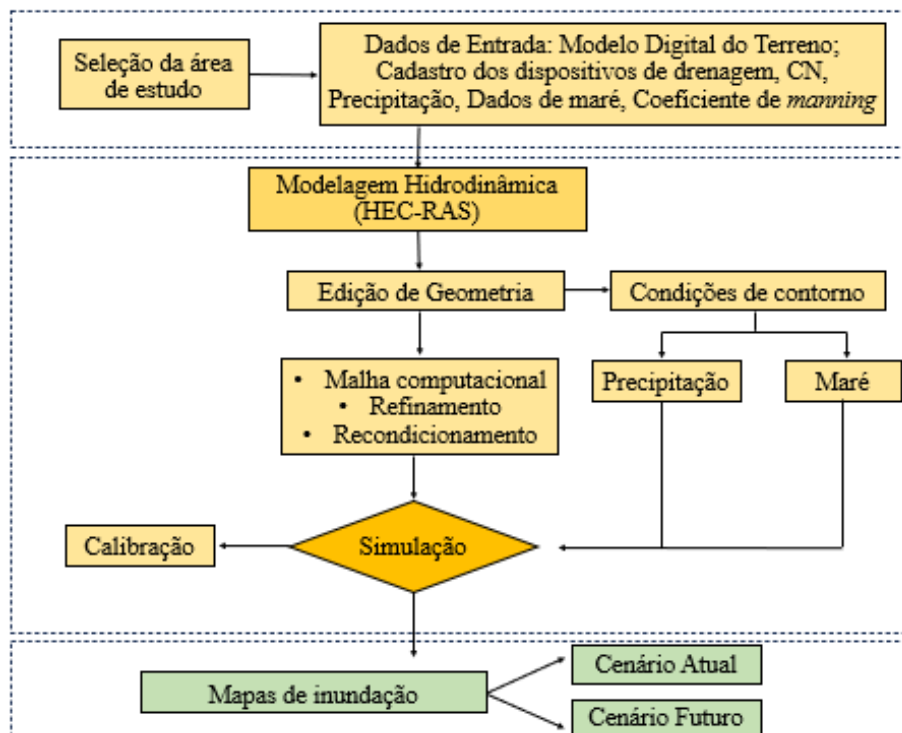
Assim, este estudo tem como objetivo mapear a planície de inundação da bacia do rio Jiquiá, localizada em Recife-PE, considerando cenários atual e futuro, a partir da aplicação de modelos

hidrodinâmicos no software HEC-RAS. A análise futura incorpora projeções climáticas do CMIP6, bem como cenários de uso e ocupação do solo projetados para o futuro. A integração desses dados visa aprimorar a compreensão dos riscos de inundação frente às mudanças climáticas, contribuindo para a formulação de estratégias de adaptação e a implementação de respostas antecipadas a eventos de precipitação intensa. Os resultados obtidos poderão subsidiar os tomadores de decisão na adoção de medidas mais eficazes para a gestão dos recursos hídricos e redução da vulnerabilidade urbana em contextos futuros.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada neste estudo envolveu, inicialmente, a seleção da área de estudo e a obtenção dos dados de entrada necessários à modelagem. Em seguida, foi realizada a calibração do modelo hidrodinâmico com base em um evento de referência, permitindo o ajuste dos parâmetros hidráulicos. Por fim, realizou-se o mapeamento da planície de inundação para cada um dos cenários analisados, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma de metodologia aplicada no estudo.



Fonte: A autora (2025).

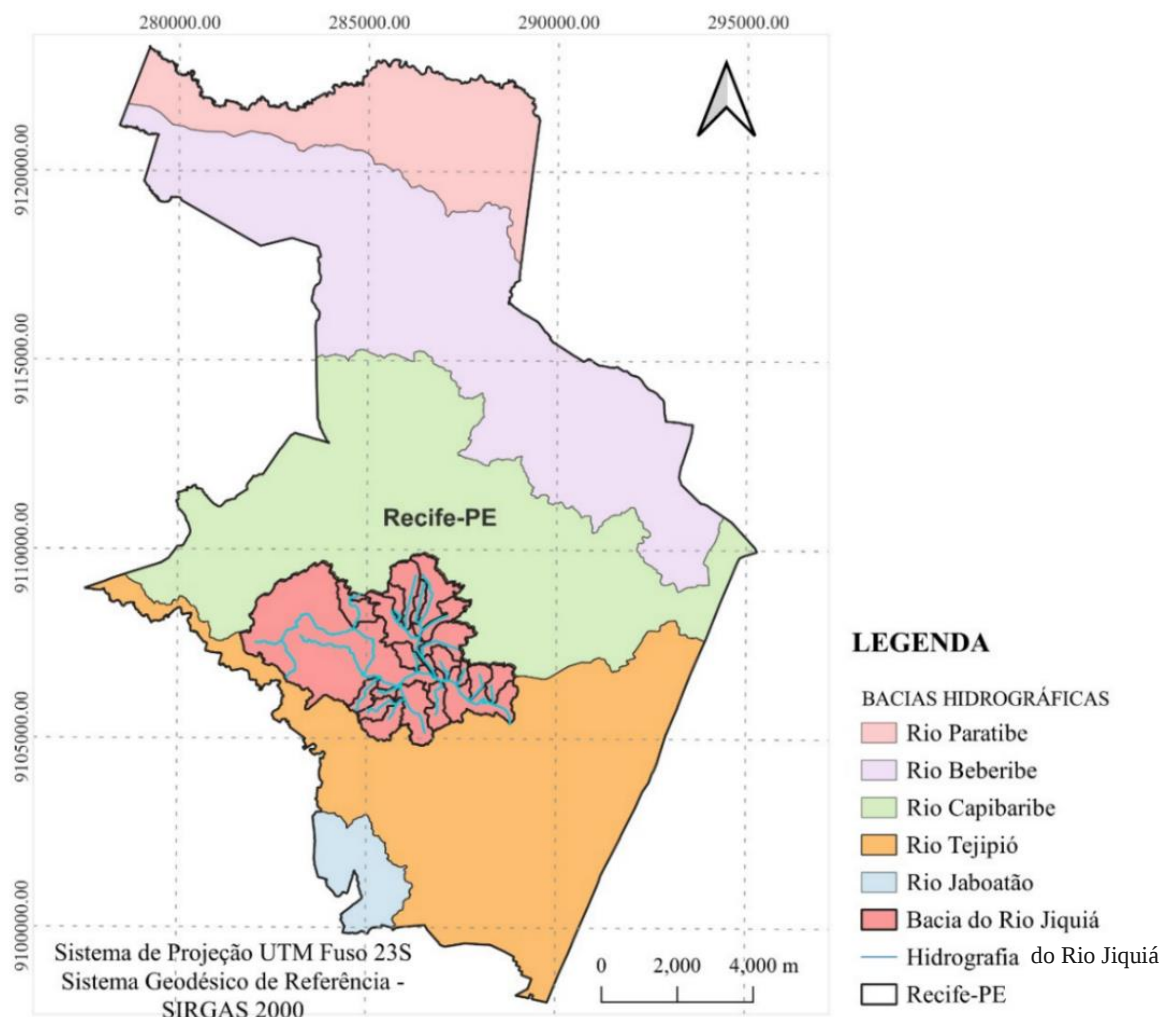
2.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O Recife, situado na confluência de vários rios, possui uma extensa rede de canais, cerca de cem quilômetros, que atravessam o seu território em várias direções e exigem um cuidado muito especial da população e da administração pública. Além disso, Recife está sendo considerada por

pesquisadores de mudanças climáticas como um dos “hotspots” que estão muito vulneráveis, juntamente com um processo intenso de urbanização realizado às custas da ocupação do espaço natural das águas. Altamente urbanizada, sofre frequentes alagamentos em épocas de chuvas intensas principalmente se ocorrerem nas horas de maré alta.

O rio Jiquiá e sua bacia hidrográfica (Figura 2) atravessa principais bairros de Recife, com comprimento total de 6,5 km e uma área de captação de 20 km². Esta sub-bacia é considerada de grande importância para a drenagem do Recife, não só pela sua extensão como pelo elevado grau de urbanização que apresenta, além da rápida tendência de ocupação que se espera para o restante de seu solo (Emlurb,2016).

Figura 2– Principais bacias hidrográficas com destaque para a Bacia do Rio Jiquiá.



Fonte: A autora a partir de dados do IBGE (2025).

2.2 CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO E NORMALIZAÇÃO DAS COTAS DE INUNDAÇÃO

As modelagens permitem a construção de diferentes cenários (Tabela 1) com o objetivo de avaliar os impactos das alterações no uso do solo e nas condições de precipitação sobre a bacia. O primeiro cenário representou a situação atual, com uso do solo e precipitação correspondentes às

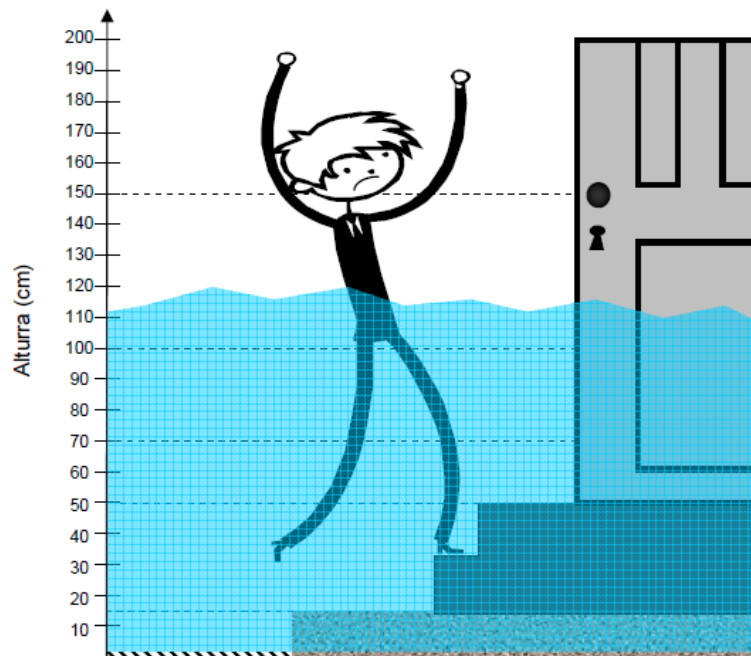
condições atuais, servindo como linha de base para comparação. O segundo cenário considerou o uso do solo projetado para o ano de 2080, mantendo a precipitação atual, a fim de isolar os efeitos das mudanças no uso e ocupação do território. No terceiro cenário, manteve-se o uso do solo atual, aplicando-se a precipitação futura estimada para 2075, com o objetivo de analisar isoladamente os impactos das alterações climáticas. Por fim, o quarto cenário combinou o uso do solo e a precipitação futuros, representando o pior cenário previsto.

Tabela 1 – Cenários de Simulação.

Cenário	Uso do Solo	Precipitação	Finalidade
1	Atual	Atual	Representar a situação atual da bacia (cenário de referência)
2	Futuro	Atual	Avaliar o impacto isolado da mudança no uso do solo
3	Atual	Futuro	Avaliar o impacto isolado das alterações nas condições de precipitação
4	Futuro	Futuro	Avaliar o impacto combinado das mudanças no uso do solo e na precipitação

Para a caracterização do nível de criticidade, foi utilizada a profundidade como um fator relevante a ser analisado em cenários de inundação. Quanto à categorização, adotou-se a classificação proposta por Zonensein (2007), que apresenta a normalização das profundidades em cinco faixas definidas de forma empírica, conforme representado na Figura 3 e apresentado na Tabela 2.

Figura 3 – Representação das faixas de normalização da profundidade.



Fonte: Adaptado de Zonensein (2007).

Tabela 2 – Faixa de normalização da cota de inundação.

Cota (cm)	Classificação	Efeito	Impactos Típicos
10–15	Baixo	Pode atingir o meio-fio (15 cm), água começa a acumular nas calçadas.	Dificuldade para pedestres, início de interrupção em vias secundárias.
15–50	Médio	Inundação de ruas, parques, calçadas e estacionamentos. Possível entrada em casas com soleiras baixas.	Interrupção do tráfego, danos em quintais e garagens.
50–100	Alto	Água provavelmente já invade casas, danificando estrutura e conteúdo.	Perda de móveis, risco à integridade das residências.
100–150	Muito Alto	Água invade a maioria das casas, atingindo objetos internos.	Perda total de bens, necessidade de evacuação.
>150	Crítico	Água atinge profundidade suficiente para representar risco de afogamento.	Perigo à vida humana e animais, danos estruturais graves.

Fonte: Adaptado de Zonensein (2007).

2.3 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

A modelagem hidrodinâmica foi realizada com auxílio do modelo computacional HEC-RAS 6.3.1, software de domínio público desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos “US Army Corps of Engineers”, que tem como finalidade realizar cálculos hidráulicos unidimensionais e bidimensionais para rede de rios e canais naturais e artificiais (USACE, 2016a).

Na modelagem bidimensional em regime não permanente, o modelo utiliza as equações bidimensionais de Águas Rasas (também chamadas de equações bidimensionais de Saint-Venant, referentes à equação da continuidade e à equação da quantidade de movimento) ou as equações da Onda Difusa. A discretização das equações da Onda Difusa é realizada utilizando o método das diferenças finitas para o tempo e um esquema híbrido combinando os métodos das diferenças finitas e dos volumes finitos para a discretização do espaço (USACE, 2016b).

As equações de Águas Rasas em duas dimensões são apresentadas a seguir, sendo a Equação 1 a da continuidade e a Equação 2 e Equação 3, correspondente a quantidade de movimento:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad \text{Equação 1}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v \quad \text{Equação 2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f u \quad \text{Equação 3}$$

Onde: H - elevação da superfície da água que é igual à elevação da superfície do terreno mais a altura da lâmina de água (m); t - tempo; h - altura da lâmina de água (m); u e v - são as componentes da velocidade nas direções x e y , respectivamente; x e y - direções cartesianas; q - fluxo de entrada/saída; g - aceleração da gravidade; v_t - coeficiente de viscosidade turbulenta horizontal; c_f - coeficiente de atrito; e f - parâmetro de Coriolis.

2.3.1 Modelo Digital do Terreno

No modelo desenvolvido para as simulações bidimensionais (2D), foi utilizado o Modelo Digital do Terreno (MDT) fornecido pelo Programa Pernambuco Tridimensional (PE-3D), com escala de 1:1000 e resolução espacial de 50 cm. Com o objetivo de aprimorar a rede de drenagem, o MDT foi ajustado com base nas seções transversais disponibilizadas pelo Plano Municipal de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais do Recife (PMDR) (Tabela 3).

Tabela 3 – Dados simplificados para o cadastro da bacia hidrográfica do rio Jiquiá.

Nome Sub-bacia	Nome Afluente	Trecho	Tipo Seção	Largura média	Profundidade média
Rua Carlos de Brito	Canal da Rua Carlos de Brito	A	Trapezoidal	3,7	1,2
		B	Irregular	3,7	-
Carneiro de Mariz	Canal Carneiro de Mariz	A	Trapezoidal	2,6	1,2
		B	Trapezoidal	2,5	1,2
		A	Trapezoidal	5,1	1,7
Torrões	Canal de Torrões	B	Irregular	4,0	-
Chesf	Canal da Chesf	A	Irregular	3,5	-
		A	Irregular	2,5	-
		B	Trapezoidal	4,0	2,0
		C	Irregular	4,0	-
São Leopoldo	Canal de São Leopoldo	D	Irregular	4,0	-
Roda de Fogo	Canal de Roda de Fogo	A	Retangular	2,0	0,9
Jardim São Paulo	Canal de Jardim São Paulo	A	Irregular	4,0	-
		A	Irregular	6,5	-
		B	Irregular	4,0	-
Marinha	Canal da Marinha	A	Trapezoidal	1,5	1,0
		C	Irregular	4,6	-
		E	Retangular	1,1	1,0
Sanbra	Canal do Sanbra	F	Irregular	1,5	-
		A	Retangular	2,8	2,1
		B	Retangular	2,8	1,8
21 de Abril	Canal 21 de Abril	C	Irregular	4,0	-
		A	Trapezoidal	2,3	1,0
		C	Irregular	4,5	-
		D	Trapezoidal	5,5	1,2
Guarulhos	Canal Guarulhos	E	Trapezoidal	7,3	1,2
		F	Irregular	10	-
		A	Irregular	3,0	-
		B	Irregular	2,5	-
Av. Liberdade	Canal da Av. Liberdade	C	Retangular	1,2	1,1
		A	Trapezoidal	1,9	1,0
Areias	Canal de Areias	B	Trapezoidal	2,0	1,0
Av. 30 de Outubro	Canal da Av. 30 de Outubro	A	Irregular	3,0	-
		B	Trapezoidal	1,6	1,4
		A	Retangular	1,4	1,2
Barreto	Canal do Barreto	A	Retangular	1,6	1,0
		B	Irregular	1,0	-
		A	Retangular	3,0	1,5
Itep	Canal do ITEP	B	Irregular	6,0	-
		C	Irregular	4,8	-
		A	Retangular	2,1	0,8
São Pedro	Canal de São Pedro	B	Retangular	2,1	1,1
Mangueira	Canal da Mangueira	B	Retangular	2,1	1,1

Nome Sub-bacia	Nome Afluente	Trecho	Tipo Seção	Largura média	Profundidade média
Zeppelin	Canal do Zeppelin	A	Irregular	5,0	-
		A	Irregular	7,0	10
Curado	Riacho Curado	B	Irregular	8,0	15

Fonte: Emlurb (2016).

2.3.2 Geometria

A definição das características geométricas do HEC-RAS 2D para a construção da malha computacional de escoamento foi efetuada considerando, células quadradas com 10 m de lado para a geração dos mapas de extensão da inundação e de profundidades dos picos de cheias. Foram testadas malhas quadradas com 2 m e 5m, em busca de mais precisão para o modelo, mas não foi obtido estabilidade.

Foram inseridas curvas de nível com o objetivo de aprimorar a representação do relevo e orientar de forma mais precisa o escoamento superficial. Essas curvas foram utilizadas como linhas de quebra (*breaklines*), garantindo que a malha 2D seguisse as variações topográficas do terreno, buscando uma simulação hidráulica mais fiel à realidade.

Para a região dos cursos d'água também foi realizado um refinamento da malha, em busca de uma redução do tamanho das células, com o objetivo de orientar o escoamento e aumentar a precisão do modelo. As dimensões das células nas áreas refinadas variaram entre 1m x 1m até atingir as dimensões da malha original de 10m x 10m.

Foram determinadas duas condições de contorno no modelo 2D. A primeira, espacializada sobre a bacia hidrográfica, foi definida a partir de dados de precipitação distribuída, representando a chuva atuante ao longo da área modelada. A segunda, como condição de contorno de saída foi aplicada no exutório, utilizando dados de maré, com o objetivo de representar a influência das oscilações do nível d'água no ponto de saída da bacia. O passo de tempo utilizado para as simulações foi de 1 minuto, assim como os intervalos de resultados, atendendo as condições de Courant (Usee, 2016).

2.3.3 Coeficiente de rugosidade de *Manning*

Os coeficientes de rugosidade de *Manning* foram espacializados em toda a bacia com base nas classes de uso e ocupação do solo disponibilizadas pelo MapBiomas, com resolução espacial de 30 metros. Foram consideradas duas situações: a condição atual da bacia e uma projeção futura para o ano de 2080, conforme apresentado na Figura 4 e os resultados apresentados no Artigo 3.

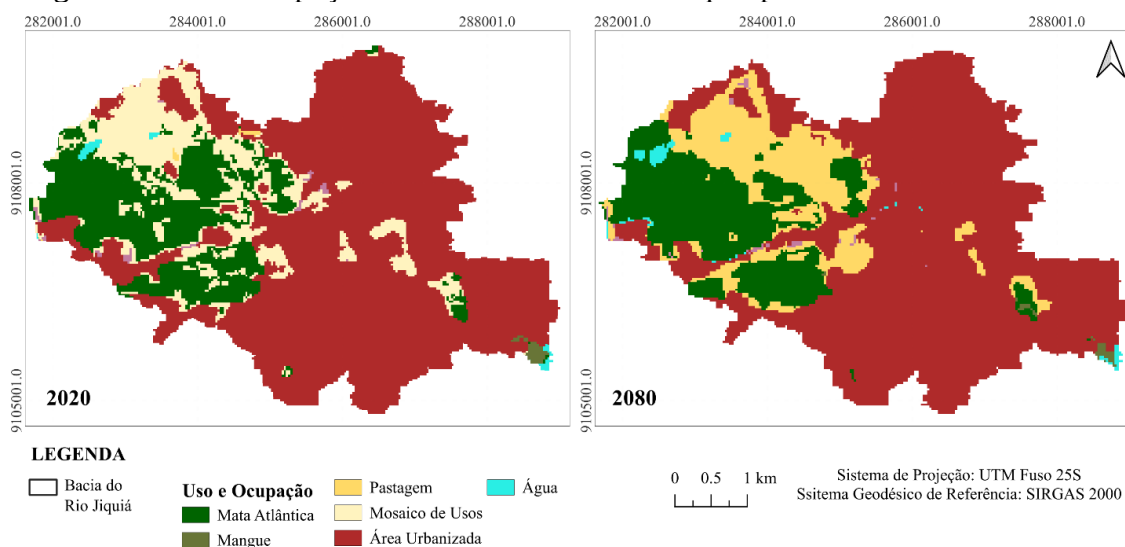
A Tabela 4 a seguir apresenta os coeficientes de rugosidade de *Manning* adotados para cada classe de uso e ocupação do solo.

Tabela 4 – Valores de referência de *manning* de acordo com o uso e ocupação do solo.

Classes de Uso e Ocupação do Solo - MapBiomias	Valores de referência	Valores adotados
Floresta Natural ¹	0,10 - 0,16	0,13
Manguezais ¹	0,045 - 0,15	0,10
Pastagem ¹	0,025 - 0,05	0,04
Agricultura (culturas temporárias e perenes) ¹	0,025 - 0,05	0,04
Áreas Urbanizadas - Alta Intensidade ²	0,12 - 0,20	0,16
Rios, Lagos e Oceanos ¹	0,025 - 0,05	0,04

Fonte: Adaptado de 1) Chow (1959) / 2) USACE (2016).

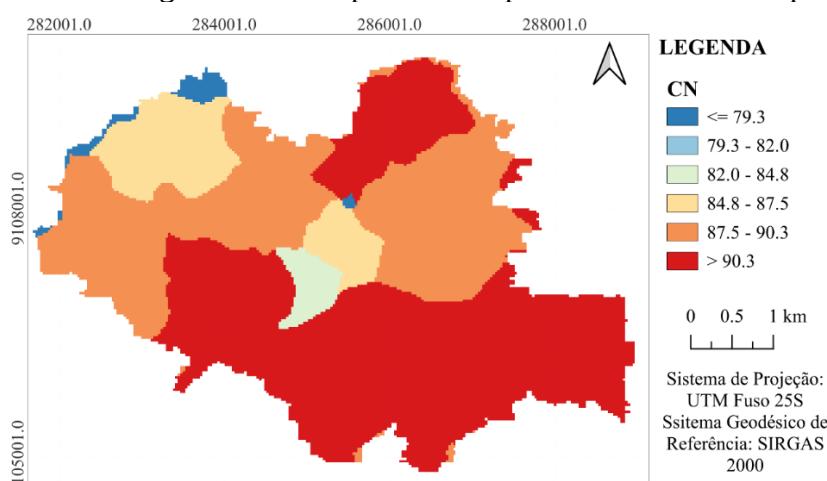
Figura 4 – Uso e ocupação do solo na bacia do rio Jiquiá para o cenário atual e futuro.



2.3.4 Parâmetros de Infiltração

O parâmetro *CN* (Curve Number ou número de escoamento da bacia hidrográfica) retrata as condições da camada superficial do solo, que pode variar desde uma cobertura muito permeável até uma cobertura completamente impermeável, e da camada superior de solo, que pode ter capacidade de infiltração alta ou baixa. O *CN* foi obtido a partir da base de dados otocodificada disponibilizada pela Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA), apresentado na Figura 5.

Figura 5 – *CN* espacializado para a bacia do Rio Jiquiá.



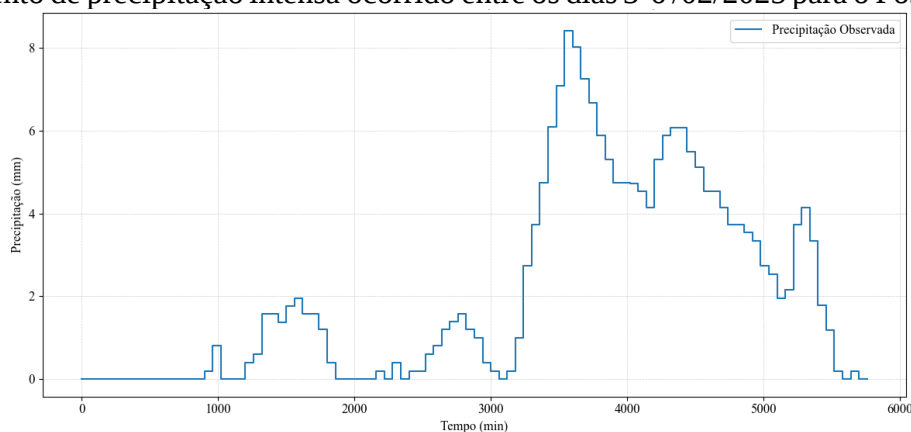
Fonte: Elaborado pela autora a partir de dados da ANA (2025).

2.3.5 Dados Pluviométricos

Para a definição do evento de precipitação utilizado na calibração do modelo hidrodinâmico, foi considerado o evento ocorrido entre os dias 3 e 6 de fevereiro de 2025, com precipitação acumulada de 199,98 mm, registrada no Posto Pluviométrico Imbiribeira (261160609A) do Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN), conforme apresentado na Figura 6. Esse evento foi responsável por inúmeros transtornos na cidade, incluindo alagamentos e inundações em diversos pontos, quedas de árvores, deslizamentos de terra, suspensão de aulas e sérios impactos na mobilidade urbana.

Ressalta-se que outros postos pluviométricos localizados nas proximidades da área de estudo não apresentavam dados disponíveis no período analisado. Após contato com a equipe do CEMADEN, foi informado que esses postos estavam em manutenção e, portanto, sem registros válidos para o evento em questão.

Figura 6 – Evento de precipitação intensa ocorrido entre os dias 3-6 /02/2025 para o Posto Imbiribeira.



Fonte: A autora (2025) a partir de dados do CEMADEN (2025).

Após a calibração dos parâmetros de coeficiente de *manning* e CN, foram consideradas as curvas Intensidade-Duração-Frequência (IDF) correspondentes aos cenários atual e futuro. Para o cenário atual, considerou-se a equação IDF desenvolvida pelo Plano Municipal de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais do Recife (PMDR) (Equação 4) (Emlurb, 2016).

$$i = \frac{611,3425 \times T^{0,1671}}{(t + 7,3069)^{0,6348}} \quad \text{Equação 4}$$

Onde: *i* = intensidade da chuva (mm/h); *T* = período de retorno (anos); *t* = duração da chuva em minutos;

Para o cenário futuro, foi considerada a equação IDF correspondente ao cenário de emissões SSP2-4.5, com base nos dados do Modelo Climático Global (MCG) MIROC6. A projeção adotada refere-se ao médio prazo, com horizonte até o ano de 2075, conforme apresentado no Artigo 2 e na Equação 5 a seguir.

$$i = \frac{957,158 \cdot T_r^{0,198}}{(t + 9,251)^{0,707}} \quad \text{Equação 5}$$

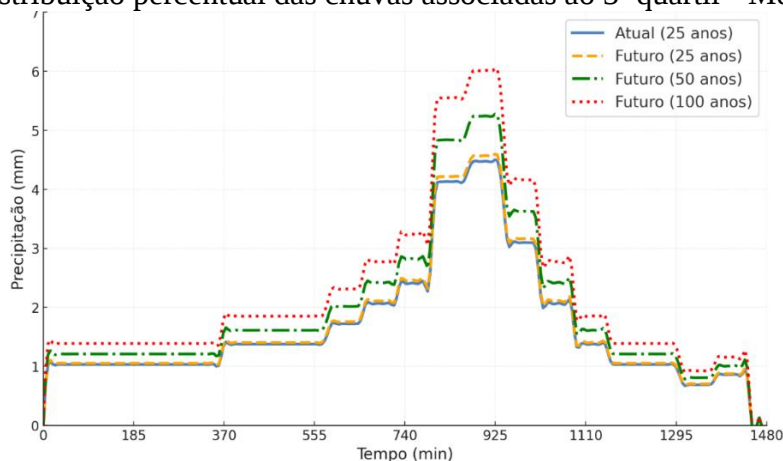
Onde: i = intensidade da chuva (mm/h); T = período de retorno (anos); t = duração da chuva em minutos;

Considerou-se para os cenários analisados a adoção de um tempo de retorno de 25 anos e uma duração crítica de 1440 minutos (24 horas) para as simulações dos eventos de projeto, por representarem uma correlação adequada entre a frequência de ocorrência e a severidade dos eventos extremos (Walega *et al*, 2019). Esses parâmetros são comumente utilizados em estudos hidrológicos e hidrodinâmicos de drenagem urbana voltados ao dimensionamento e à análise de risco em áreas urbanizadas. Essa escolha permite avaliar a capacidade do sistema diante de eventos significativos, porém ainda adequadas ao longo do ciclo de vida útil das obras de infraestrutura. Para o cenário 4, avaliou-se também os tempos de retorno de 50 anos e 100 anos para a mesma duração crítica de 24 horas, e assim identificar os impactos em uma condição de maior risco.

Em seguida, foi empregado o Método de Huff para definir a distribuição temporal da precipitação ao longo da duração do evento. Esse método é fundamental para o desenvolvimento da simulação chuva-vazão, pois permite representar a variabilidade da intensidade da chuva ao longo do tempo. O Método de Huff classifica os eventos de precipitação em quatro grupos distintos, conhecidos como quartis, que representam diferentes padrões de concentração da chuva ao longo do evento. Esses quartis são expressos por curvas adimensionais, que indicam a probabilidade de a precipitação acumulada exceder determinado padrão de distribuição temporal.

Conforme a metodologia proposta por Huff (Huff, 1992), recomenda-se a aplicação do 1º quartil para precipitações com duração de até 6 horas; 2º quartil para precipitações com duração entre 6,1 e 12 horas; 3º quartil para precipitações com duração entre 12,1 e 24 horas e o 4º quartil para precipitações com duração superior a 24 horas. No presente estudo, como a duração crítica adotada foi de 24 horas, aplicou-se o 3º quartil, cuja distribuição é apresentada na Figura 7 a seguir.

Figura 7 - Distribuição percentual das chuvas associadas ao 3º quartil - Método de Huff.



Fonte: A autora (2025).

2.4 ANÁLISE DE DESEMPENHO DO MODELO HIDRODINÂMICO

A calibração do modelo hidrodinâmico se deu pela determinação do valor de *Manning* e CN mais adequado e estável para a simulação do evento extremo de precipitação ocorrido entre os dias 3 e 6 de fevereiro de 2025. O dia 3 de fevereiro foi inserido para estabilizar o modelo, e ajustar o nível inicial do Rio Jiquiá para as simulações.

Diante da ausência de medições de vazão na bacia, a avaliação da simulação foi realizada com base na comparação horária entre os níveis d'água simulados e os dados observados nas estações de monitoramento instaladas na Escola Professor Trajano de Mendonça com instalação apresentada no Apêndice A e na Fábrica Yolanda, ambas localizadas ao longo do Rio Jiquiá, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Pontos de monitoramento de nível no Rio Jiquiá.



Fonte: A autora (2025).

Os valores de rugosidade foram modificados manualmente repetidas vezes até que os pontos observados e simulados fossem adequadamente próximos em simulações estáveis. A calibração por tentativa e erro envolve o ajuste manual dos parâmetros para combinar os resultados simulados (por exemplo, hidrogramas de vazão e nível de água) com registros históricos observados em campo. A adequação entre a simulação e a observação pode ser avaliada visual e estatisticamente após cada simulação com parâmetros alterados.

Para avaliação estatística do desempenho do modelo, foram comparados os dados observados e simulados com base nos critérios mencionados na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5 - Medidas estatísticas a serem aplicadas na calibração e validação dos dados.

Índice estatístico	Descrição	Fórmula
Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE)	O analisado coeficiente avalia estatisticamente a precisão do modelo, sendo considerado o melhor na análise do ajuste dos dados simulado ao observado. Seu valor fica entre $-\infty$ e 1, e quanto maior valor, melhor a concordância entre o simulado e o observado (Nash e Sutcliffe, 1970).	$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - Y_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - \overline{Y_{mediaobs}})^2}$
Coeficiente de determinação (R^2)	Número que descreve o nível de correlação linear entre os dados simulados e observados. Seu valor fica entre 0 e 1, e quanto maior o valor melhor a concordância entre o simulado e o observado.	$R^2 = \frac{\sum (Y_{obs} - \overline{Y_{mediaobs}}) (Y_{sim} - \overline{Y_{mediasim}})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - \overline{Y_{mediaobs}})^2 \sum_{i=1}^n (Y_{sim} - \overline{Y_{mediasim}})^2}$
Percent Bias (PBias)	Este índice representa a diferença de volume entre os fluxos simulado e observado, com o ideal sendo representado pelo zero, valores negativos e positivos indicam superestimação e subestimação, respectivamente.	$PBias = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - Y_{sim}) * 100}{\sum_{i=1}^n (Y_{obs})} \right]$
RSR	Este índice padroniza o RMSE, através da taxa de desvio padrão dos dados. É o quociente da raiz do erro médio quadrático pela raiz do desvio padrão dos dados observados. O RSR varia do valor ideal 0, que indica zero RMSE ou variação residual e, portanto, perfeita simulação do modelo, a um grande valor positivo. Quanto menor o RSR, menor o RMSE e melhor o desempenho da simulação do modelo (Moriasi <i>et al.</i> , 2007).	$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}}$ $= \left \frac{[\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - Y_{sim})^2]^{1/2}}{[\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - \overline{Y_{mediaobs}})^2]^{1/2}} \right $

Onde: Y_{obs} é o evento observado; Y_{sim} , o evento simulado pelo modelo; $\overline{Y_{mediaobs}}$ corresponde à média do evento observado no período de simulação; $\overline{Y_{mediasim}}$ corresponde à média do evento simulado no período de simulação e n, o número de eventos.

Zappa (2002) propõe valores acima de 0,5 para NSE. Van Liew *et al.* (2007) classificam como muito bons os valores de NSE acima de 0,75 e aceitáveis entre 0,75 e 0,36, seja para passo de tempo diário ou mensal. Moriasi *et al.* (2007) classificam os indicadores de desempenho R^2 com valores acima de 0,5 como satisfatórios e os demais NSE, Pbias e RSR para calibração e validação tem seus valores de desempenho indicados na Tabela 6 a seguir.

Tabela 6 - Valores de desempenho recomendados para simulações mensais.

Valores de desempenho recomendados para simulações mensais	NSE	PBIAS (%)	RSR	R^2
Ótimo	0,75 a 1,00	$< \pm 10$	0 a 0,5	0,7 a 1,0
Bom	0,65 a 0,75	De ± 10 a ± 15	0,5 a 0,6	0,6 a 0,7
Satisfatório	0,50 a 0,65	De ± 15 a 25	0,6 a 0,7	0,5 a 0,6
Insatisfatório	$< 0,50$	$> \pm 25$	$> 0,7$	$< 0,5$

Fonte: Adaptado de: Moriasi *et al.* (2007).

3. RESULTADOS

3.1 CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO

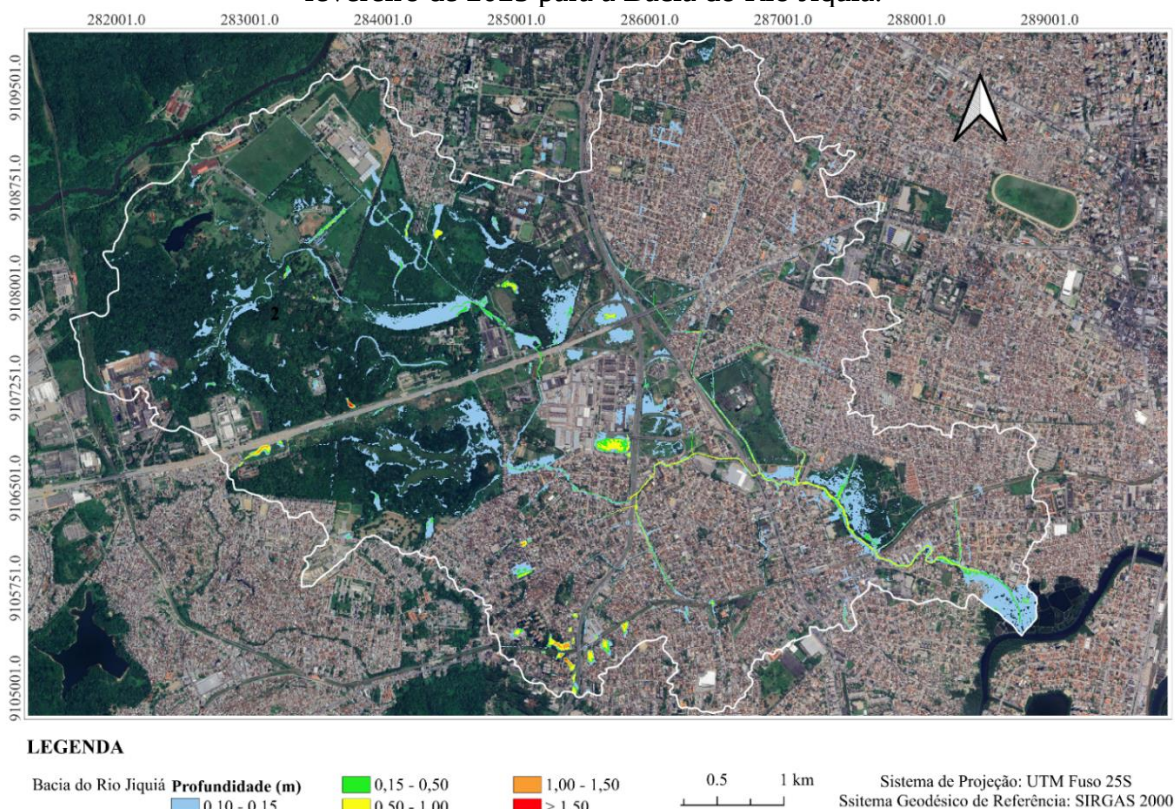
A calibração do modelo hidrodinâmico é uma etapa fundamental para garantir a representatividade dos resultados simulados em relação às condições reais observadas. Por meio dessa etapa, ajustam-se parâmetros com o objetivo aproximar o comportamento do escoamento superficial do modelo com a realidade. Portanto, foi calibrado os valores dos coeficientes de rugosidade de *Manning*, com resultados apresentados na Tabela 7 e reduzidos em até 20% o valor do CN.

Tabela 7 – Coeficiente de *manning* calibrados de acordo com o uso e ocupação do solo.

Classes de Uso e Ocupação do Solo - MapBiomas	Valores calibrados
Floresta Natural	0,13
Manguezais	0,10
Pastagem	0,04
Áreas Urbanizadas	0,16
Água	0,03

A Figura 9 apresenta a mancha de inundação resultante do evento de precipitação intensa ocorrido entre os dias 3 e 6 de fevereiro de 2025. A distribuição da lâmina d'água foi classificada em cinco faixas de profundidade, conforme metodologia adotada para os demais cenários.

Figura 9 – Manchas de inundação para evento de precipitação intensa entre os dias 3 e 7 de fevereiro de 2025 para a Bacia do Rio Jiquiá.



Fonte: A autora (2025).

Para a classificação Baixa (0,10 – 0,15 m), foi identificada uma área inundada máxima de 0,57 km². Na classe Média (0,15 – 0,50m), a área alagada foi de 1,79 km², representando a maior extensão entre as categorias. A classificação Alta (0,50-1,0m) resultou em 0,67 km², enquanto as categorias Muito Alta (1,0 – 1,5m) e Crítico (>1,5m) apresentaram 0,16 km² e 0,07 km², respectivamente.

Os dados indicam que, embora a maior parte das inundações tenha se concentrado nas faixas de baixa e média profundidade, ainda foram observados pontos com lâminas superiores a 1,0 metro, o que evidencia a presença de áreas críticas em termos de segurança urbana e necessidade de ações mitigadoras.

Após a calibração do modelo, foram comparadas, em base horária, as profundidades de inundação simuladas e observadas no período compreendido entre 00:00 do dia 4 de fevereiro e 12:00 do dia 6 de fevereiro de 2025. Os resultados dos coeficientes estatísticos utilizados para avaliar o desempenho da simulação estão apresentados na Tabela 8 a seguir.

Tabela 8 – Coeficientes estatísticos de calibração para a bacia do Rio Jiquiá.

Coeficientes Estatísticos	Pontos de Monitoramento – Evento 04/02 – 06/02	
	Trajano de Mendonça	Fábrica Yolanda
NSE	0,87	0,67
R ²	0,93	0,87
PBIAS	10,23	-16,83
RSR	0,36	0,58

O coeficiente estatístico NSE indicou ótimo desempenho para o ponto de monitoramento da Escola Trajano de Mendonça (0,87) e desempenho satisfatório para a Fábrica Yolanda (0,67), ambos acima do limite mínimo recomendado de 0,65. O coeficiente de determinação R² apresentou desempenho excelente em ambos os pontos, com valores de 0,93 e 0,87, enquadrando-se na faixa de 0,7 a 1,0. Para o PBIAS, o desempenho foi considerado satisfatório em Trajano de Mendonça (10,23) e aceitável em Fábrica Yolanda (-16,83), ainda dentro dos limites estabelecidos para modelagens hidrodinâmicas. O coeficiente RSR apresentou desempenho bom em ambos os pontos, com valores de 0,36 e 0,58, abaixo do limite máximo de 0,6. De forma geral, os resultados estatísticos indicam que o modelo apresentou desempenho satisfatório, conforme os critérios adotados e os valores recomendados pela literatura e descritos anteriormente no item 2.4.

3.2 IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS PROPENSAS A INUNDAÇÕES

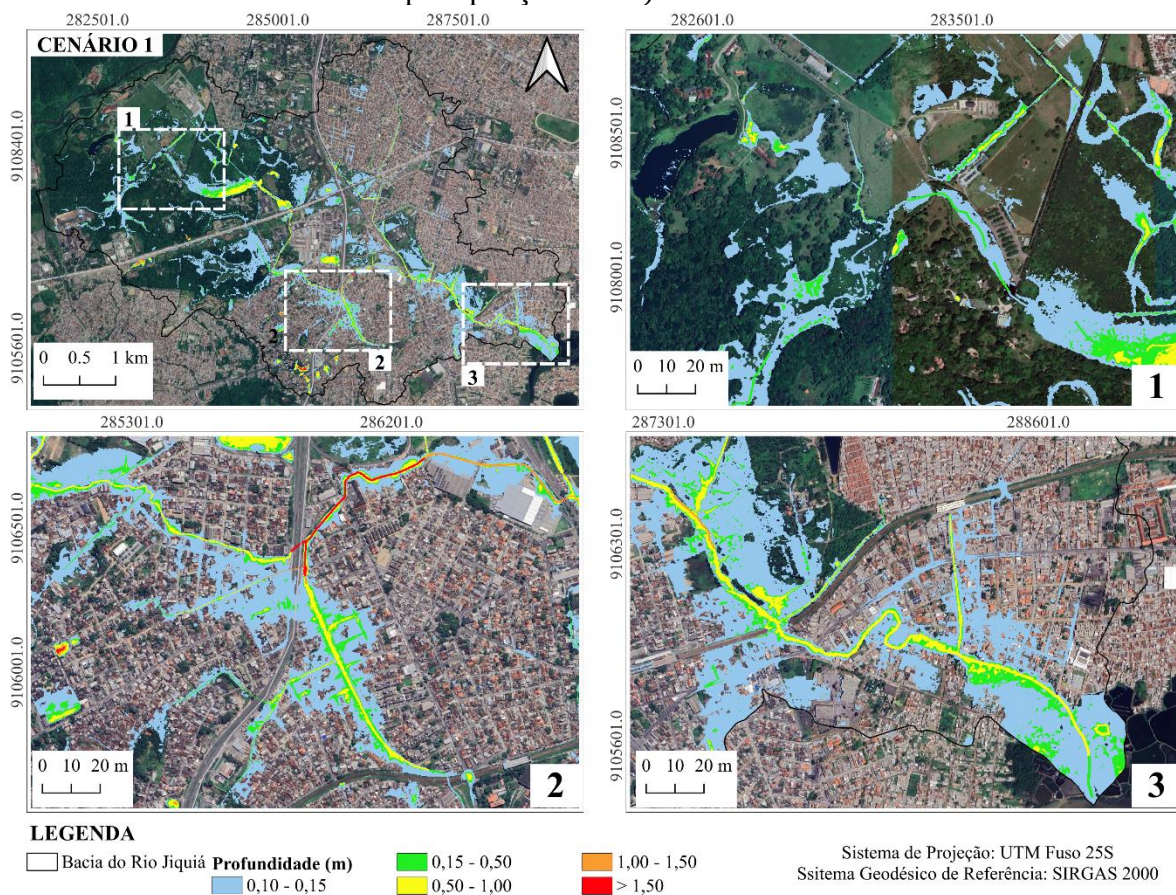
A região da cidade do Recife onde está localizado o rio Jiquiá tem enfrentado recorrentes episódios de inundação durante os períodos chuvosos ao longo dos últimos anos. Esse problema é provocado, principalmente, pela ocupação urbana desordenada, com construção de muitas residências

em áreas de cota altimétrica muito baixa, frequentemente sujeitas a alagamentos, e a ocupação da planície de inundação. Essa ocupação resultou no estrangulamento da calha expandida do rio, reduzindo sua capacidade de escoamento, especialmente durante as precipitações mais intensas.

A análise dos resultados modelados para os quatro cenários propostos contemplando combinações entre uso do solo e precipitação, no cenário atual e futuro, permitiu avaliar a distribuição espacial das inundações na Bacia do Rio Jiquiá, bem como a intensidade e a extensão dessas áreas de alagamento.

A Figura 10 ilustra a distribuição espacial da profundidade de inundação para o Cenário 1, que representa a situação atual da bacia, com uso do solo e precipitação observados no momento presente. Nota-se que as áreas mais críticas de alagamento se concentram ao longo do rio Jiquiá e em regiões urbanizadas, indicando infraestrutura de drenagem insuficiente. As faixas de profundidade predominantes variam entre 0,15 m e 1,0 m, com alguns trechos superiores a 1,5 m, evidenciando zonas com maior potencial de impacto.

Figura 10 - Distribuição espacial das profundidades de inundação no Cenário 1 (uso do solo e precipitação atuais) – TR=25 anos.

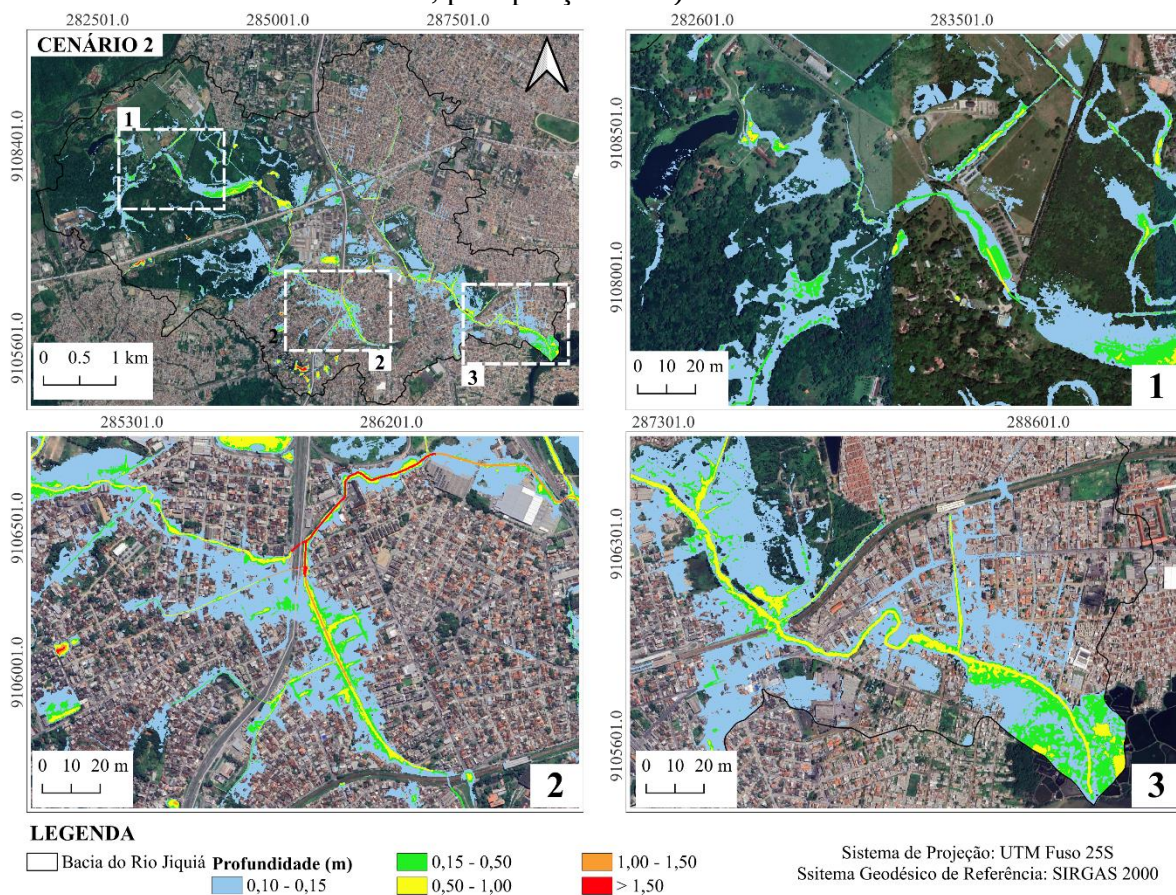


Fonte: A autora (2025).

As ampliações das áreas 1, 2 e 3 permitem observar de maneira mais detalhada as inundações em diferentes situações na bacia do Rio Jiquiá. A área 1, situada em uma região com predominância de vegetação, apresentou inundações com menores profundidades (até 0,50m), mas comparando com os próximos cenários variaram em até 0,40 m. As áreas de ampliação 2 e 3, são mais urbanizadas, concentrando os trechos mais críticos com profundidades elevadas, indicando a maior vulnerabilidade nessas regiões.

A Figura 11 apresenta os resultados do Cenário 2, no qual foi considerada o uso e ocupação da terra para o ano de 2080, representando a expansão urbana e mantendo-se as condições pluviométricas atuais. Em comparação ao cenário 1 de referência, observa-se uma redução de 1,33% e 0,37% para as classes Baixo e Médio, respectivamente, leve aumento de 0,65% para a classe Alto e um aumento significativo de 12,50% para áreas com profundidade superior a 1,0m, equivalente a classe Muito Alto. Ainda assim, as alterações são pontuais e não provocam uma redistribuição significativa das zonas de inundação.

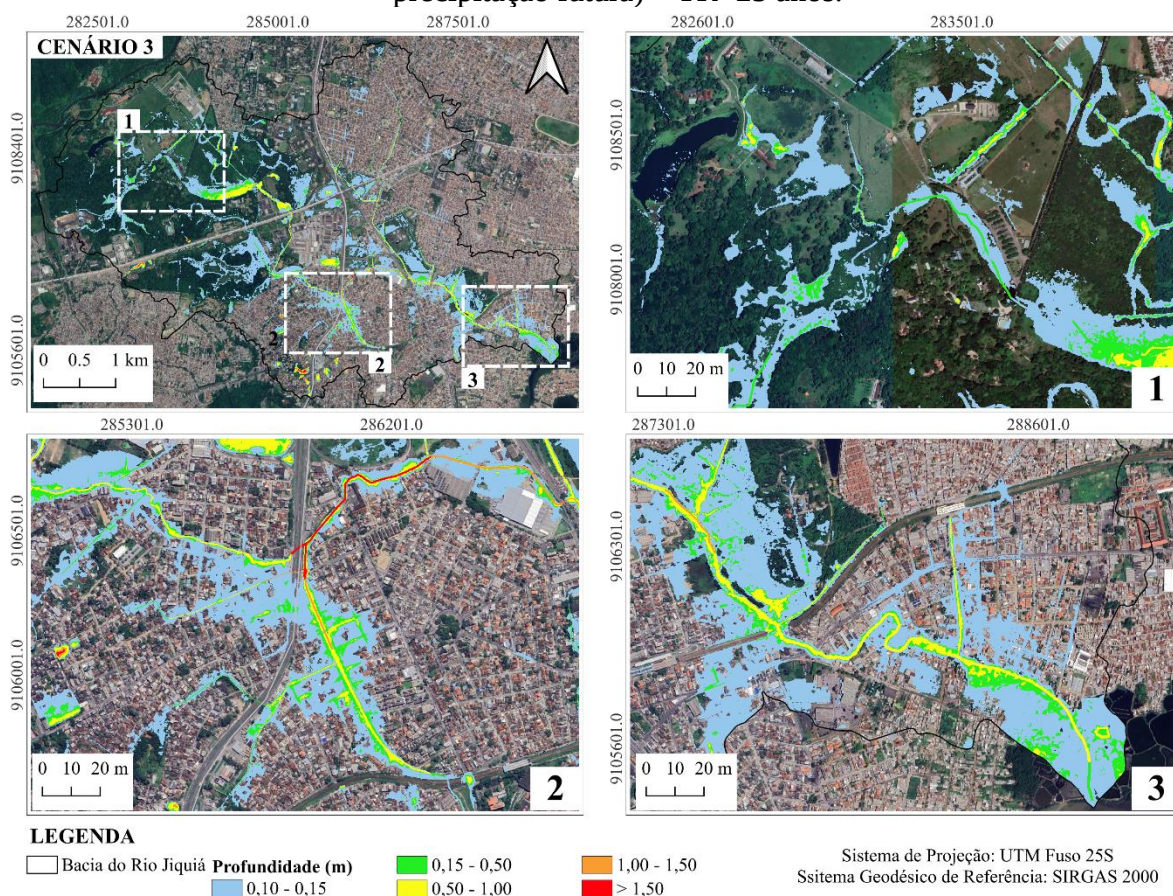
Figura 11 - Distribuição espacial das profundidades de inundação no Cenário 2 (uso do solo futuro, precipitação atual) – TR=25 anos.



Fonte: A autora (2025).

Na Figura 12, observa-se o comportamento hidrológico da bacia sob condições de precipitação futuras, mantendo o uso do solo atual. Este cenário simula o efeito isolado de eventos extremos associados às mudanças climáticas. As áreas de alagamento aumentam levemente em relação ao cenário 1 de referência, sem variações na classe baixa, e 0,37% para classe média; 2,58% para a classe Alto e 2,50% para classe muito alto. Destaca-se o crescimento da faixa de profundidade maior que 1,5 m, aumentando 4,76%.

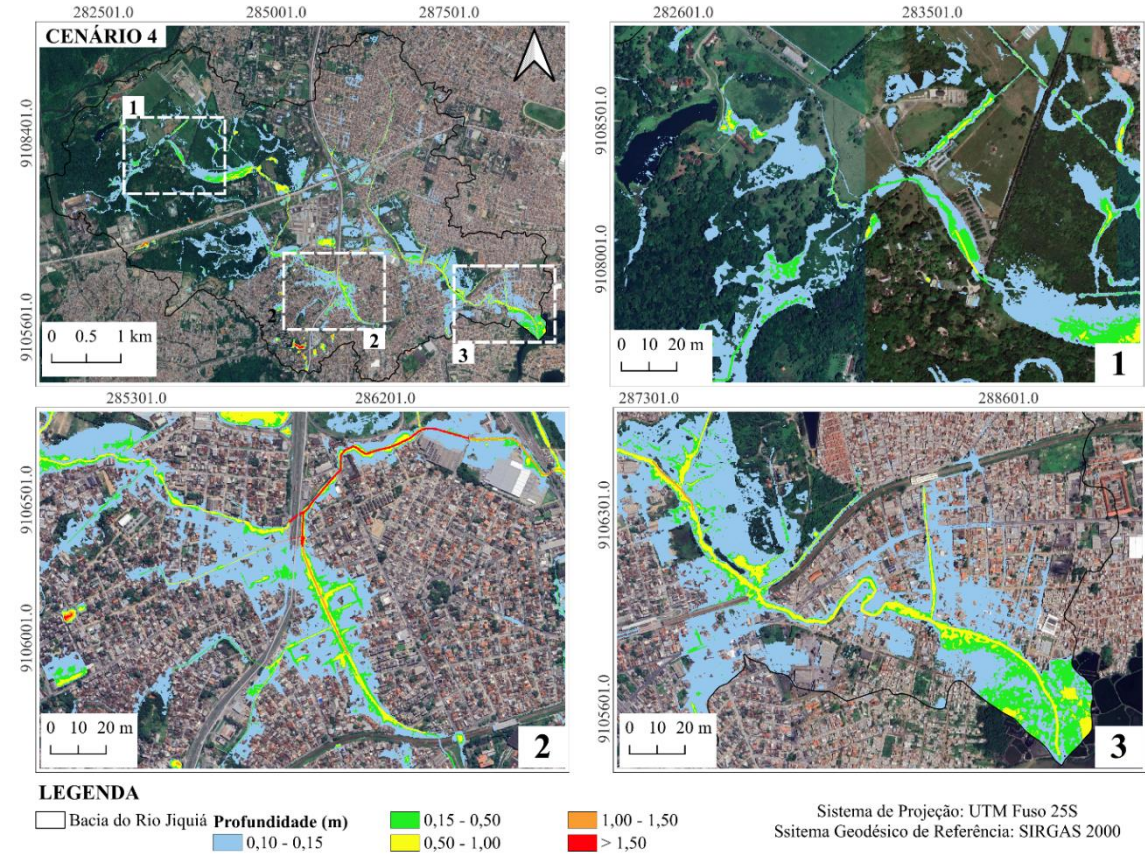
Figura 12 - Distribuição espacial das profundidades de inundação no Cenário 3 (uso do solo atual, precipitação futura) – TR=25 anos.



Fonte: A autora (2025).

A Figura 13 refere-se ao Cenário 4, no qual são considerados simultaneamente o uso do solo e a precipitação futuros. Este cenário representa o caso mais extremo e, portanto, o pior cenário projetado. Observa-se uma redução de 1,33% na classe baixa, pequeno acréscimo nas áreas de maior profundidade, com 0,37% para classe média, 3,23% para a classe alta e 4,76% para classe crítica. Destaca-se um aumento de 15% na classe muito alta, com valores entre 1,0 e 1,5m, que são expressivas nos dados de inundação, reforçando a influência predominante do uso e ocupação, precipitação e consequentemente os impactos na infraestrutura urbana existente sobre o comportamento das inundações.

Figura 13 - Distribuição espacial das profundidades de inundação no Cenário 4 (uso do solo e precipitação futuros) – TR=25 anos.



Fonte: A autora (2025).

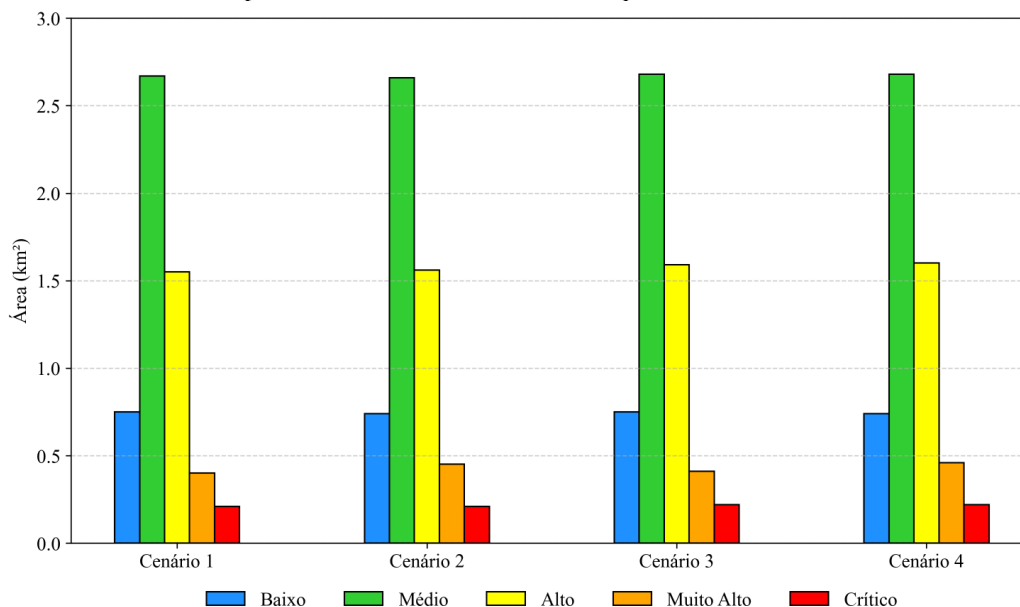
A Tabela 9 e Figura 14 sintetiza as áreas inundadas por classe de criticidade em cada um dos quatro cenários. As faixas de profundidade foram categorizadas em cinco níveis: Baixo, Médio, Alto, Muito Alto e Crítico. Nota-se que a distribuição das áreas entre as classes permanece praticamente constante nos quatro cenários. As áreas de criticidade média e alta são as mais expressivas, com valores próximos a 2,67 km² e 1,56 km², respectivamente. As faixas Muito Alto e Crítico somam áreas bem menores, com valores médios de 0,43 km² e 0,22 km².

Tabela 9 - Áreas inundadas por classe de criticidade em cada cenário simulado (km²) e variação percentual em comparação com o cenário 1.

Cenário de Simulação / Área Máxima Alagada (km²)	Classificação de Nível de Criticidade				
	Baixo 0,10 - 0,15	Médio 0,15 - 0,50	Alto 0,50 - 1,00	Muito Alto 1,00 - 1,50	Crítico > 1,50
Cenário 1	0,75	2,67	1,55	0,4	0,21
Cenário 2	0,74	2,66	1,56	0,45	0,21
	-1,33%	-0,37%	0,65%	12,50%	0,00%
Cenário 3	0,75	2,68	1,59	0,41	0,22
	0,00%	0,37%	2,58%	2,50%	4,76%
Cenário 4	0,74	2,68	1,6	0,46	0,22
	-1,33%	0,37%	3,23%	15,00%	4,76%

Fonte: A autora (2025).

Figura 14 - Área inundada por classe de criticidade nos quatro cenários simulados – TR=25 anos.



Fonte: A autora (2025).

Para complementar as análises realizadas, as Figuras 15 e 16 apresentam os resultados do Cenário 4, simulando eventos com tempos de retorno de 50 e 100 anos. Além das manchas de inundação correspondentes a cada tempo de retorno, a figura inclui mapas diferenciais que comparam as profundidades obtidas com as do evento de 25 anos.

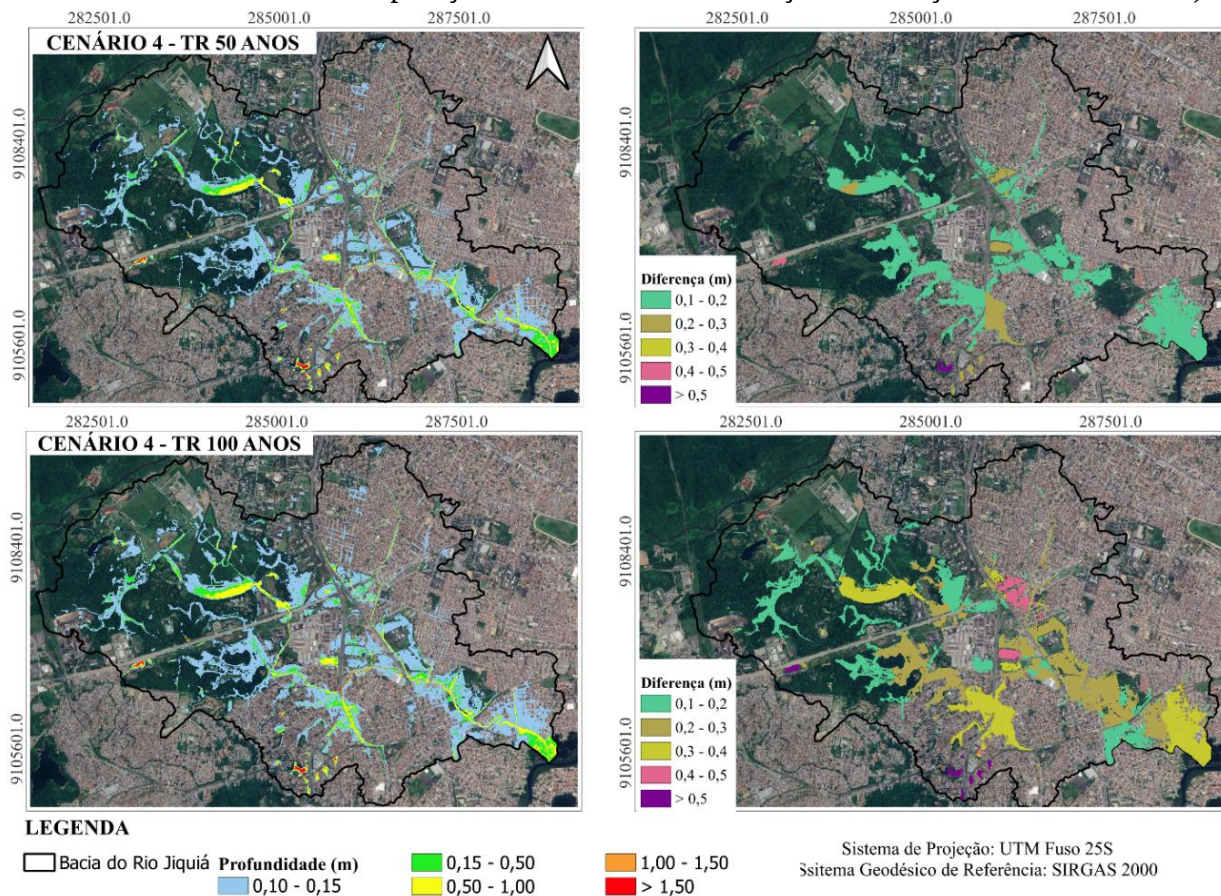
Observa-se um aumento significativo na extensão e na intensidade das áreas inundadas à medida que o tempo de retorno aumenta. Em ambos os casos (TR=50 anos e TR=100 anos), há uma ampliação visível das áreas com profundidades maiores que 1,0m, incluindo regiões que, no cenário de 25 anos, apresentavam alagamentos menos severos ou inexistentes. O cenário 4 com TR=50 anos apresenta um aumento de 21,74% na classe Muito Alto e 159% na classe crítica, em comparação com o cenário 4 e TR=25 anos. Para o cenário com TR=100 anos, destaca-se aumento de 26,25% para a classe Alta, 50% e 54,55% para a classe Muito Alto e Crítico, respectivamente.

Nos mapas diferenciais, destacam-se faixas em tons amarelo, magenta e roxo, que representam aumentos de profundidade superiores a 0,3 m, chegando a ultrapassar 0,5 m em algumas regiões críticas. Essas diferenças se concentram, principalmente, em áreas com maior densidade urbana e menor capacidade de escoamento, evidenciando a sensibilidade da bacia às intensificações dos eventos extremos.

Essa análise reforça que a elevação do tempo de retorno associada a eventos mais intensos e menos frequentes provoca impactos mais severos em termos de inundações, tanto pela ampliação da área afetada quanto pelo aumento das lâminas d'água. Portanto, destaca-se a importância de considerar diferentes cenários de retorno no planejamento urbano e na definição de medidas estruturais e não estruturais de mitigação. A quantificação dos impactos das mudanças climáticas nos

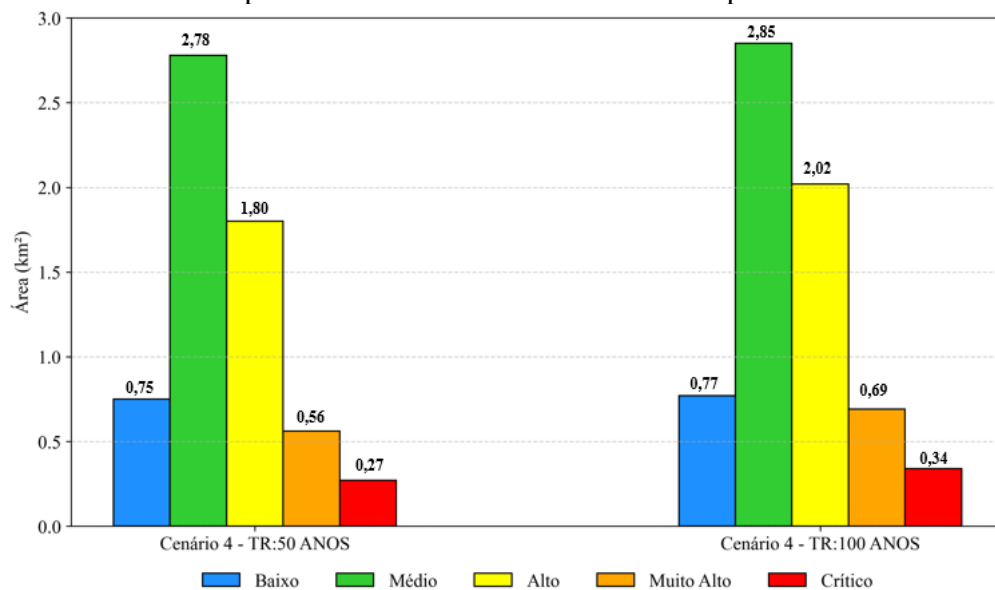
danos causados por inundações é essencial para formular estratégias de adaptação adequadas e mitigar os riscos futuros (Kuntiyawichai *et al*, 2020).

Figura 15 - Distribuição espacial das profundidades de inundação no Cenário 4 (uso do solo e precipitação futuros) para TR=50 anos e 100 anos (as figuras da direita representam um mapa diferencial mostrando a comparação do aumento de inundação em relação ao Tr de 25 anos).



Fonte: A autora (2025).

Figura 16 - Área inundada por classe de criticidade no cenário 4 para TR= 50 anos e 100 anos.



Fonte: A autora (2025).

Os modelos hidrodinâmicos desempenham um papel importante na gestão eficiente de inundações, identificando zonas de risco de inundação (Shaik *et al*, 2023). Esses mapeamentos são essenciais para fornecer informações sobre as áreas propensas a inundações em diferentes cenários climáticos, permitindo a implementação de medidas preventivas (Vashist *et al*, 2023) e aprimoramento da resiliência da comunidade frente às mudanças climáticas e, portanto, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias de gestão e adaptação. Nos últimos anos, a modelagem hidrodinâmica de eventos de inundação foi significativamente aprimorada devido ao desenvolvimento de métodos numéricos cada vez mais confiáveis, poder de computação eficiente (Costabile *et al*, 2020).

Ao visualizar a extensão potencial das inundações, as autoridades podem tomar decisões mais fundamentadas sobre o uso do solo e o planejamento urbano, evitando ou restringindo o desenvolvimento em áreas de alto risco (Mitsopoulos *et al*, 2022). Yalcin (2020) analisa os impactos das resoluções de dados topográficos e cobertura do solo em uma planície de inundação urbana no Riacho Kilicozu (Turquia) com o modelo hidrodinâmico 2D do HEC-RAS, obtendo como resultado simulações confiáveis e resultados satisfatórios. Miha-Pintilie (2020) também realizou modelagem 2D utilizando HEC-RAS e dados LiDAR para simulação de vazão na área urbana e periurbana da cidade de Bacău (nordeste da Romênia), produzindo informações suficientemente precisas sobre a vulnerabilidade a riscos de inundação.

Este estudo não apenas busca tentar antecipar a previsão dos impactos em cenários de desenvolvimento futuro, mas também fornece uma base sólida para o planejamento sustentável e a tomada de decisões informadas no âmbito da gestão dos recursos hídricos. Outros pesquisadores destacam que a avaliação de cenários futuros de uso do solo constitui uma abordagem eficaz para determinar a distribuição espacial do risco de inundação (Luo *et al*, 2023; Lin *et al*, 2020; Walega *et al*, 2019).

Os resultados obtidos com a combinação de cenários climáticos também se destacam nas simulações hidrodinâmicas, visto que as mudanças no clima podem alterar significativamente os padrões de precipitação, a frequência e a intensidade dos eventos extremos (Kuntiyawichai *et al*, 2020). A integração desses modelos com dados de mudanças climáticas é considerada uma ferramenta eficiente para estudos de inundação (Ramachandran *et al.*, 2019).

As curvas IDF, por exemplo, são ferramentas importantes para fornecer intensidades de chuva para estudos de modelagem de inundações (Bhusal *et al*, 2022). Rangari *et al* (2019) analisou os eventos extremos de chuva a partir de curvas IDFs para a cidade de Hyderabad (Índia), identificando riscos de inundação, que podem atuar como sistemas de alertas precoce para a população, decidir estratégias de atuação e medidas de salvamento.

Em áreas urbanas já consolidadas, é necessário adotar estratégias flexíveis de gestão de inundações em múltiplas escalas. A principal medida é a adaptação dinâmica do uso do solo, considerando cenários futuros de inundações. Isso inclui revisar os tipos de edificações, aprimorar normas construtivas e incorporar soluções que aumentem a resiliência urbana. Além disso, é fundamental que o poder público implemente planos de emergência, rotas de evacuação e sistemas eficientes de resgate e assistência (Luo *et al*, 2023).

4. CONCLUSÕES

A calibração do modelo hidrodinâmico, realizada com o evento de precipitação intensa de 3 a 6 de fevereiro de 2025, implicou em ajustes nos coeficientes de *Manning* e redução de 20 % no *Curve Number*, resultando em desempenho de coeficientes estatísticos considerado de bom a ótimo. Esse resultado confirma a adequação do MDT de alta resolução, da malha de 10 m (refinada para 1 m nos canais) e da espacialização dos parâmetros, garantindo confiabilidade às simulações preditivas.

A metodologia adotada (combinação de cenários climáticos e de ocupação do solo), mostrou-se ferramenta eficaz para subsidiar o planejamento de cidades costeiras associadas com alta expansão urbana e às mudanças climáticas, fortalecendo a gestão eficiente de recursos hídricos e a formulação de estratégias de adaptação.

Os mapas de inundação gerados para os quatro cenários (TR = 25 anos) mostraram área total alagada aproximadamente constante, porém aumento da severidade: as classes “Muito Alto” (1,0–1,5 m) e “Crítico” (> 1,5 m) cresceram, respectivamente, 15 % e 4,8 % quando uso do solo futuro e precipitação futura foram combinados. Para TR = 50 anos, as ampliações alcançaram 21 % e 159 %; para TR = 100 anos, 50 % e 54 %, evidenciando a não linearidade da resposta hidrodinâmica a eventos extremos.

É possível verificar que a severidade dos alagamentos é sensível tanto à intensificação pluviométrica quanto à expansão urbana prevista, reforçando a necessidade de estratégias adaptativas e mitigadoras. Recomenda-se a revisão dinâmica do zoneamento, implantação de sistemas de drenagem resilientes, definição prévia de rotas de evacuação e integração de planos de emergência em múltiplas escalas.

REFERÊNCIAS

Bhusal, A.; Parajuli, U.; Regmi, S.; Kalra, A. Application of Machine Learning and Process-Based Models for Rainfall-Runoff Simulation in DuPage River Basin, Illinois. *Hydrology* 2022, 9, 117. <https://doi.org/10.3390/hydrology9070117>

Cea, L., e Costabile, P. (2022a). Flood Risk in Urban Areas: Modelling, Management and Adaptation to Climate Change: A Review. In *Hydrology* (Vol. 9, Issue 3). MDPI. <https://doi.org/10.3390/hydrology9030050>

Chow, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. New York: McGraw-Hill Book Company.

Costabile, P.; Costanzo, C.; Ferraro, D.; Macchione, F.; Petaccia, G. Performances of the New HEC-RAS Version 5 for 2-D Hydrodynamic-Based Rainfall-Runoff Simulations at Basin Scale: Comparison with a State-of-the Art Model. *Water* 2020, 12, 2326. <https://doi.org/10.3390/w12092326>

Emlurb - Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana. (2016). Plano Diretor de Drenagem e Manejo das Águas Urbanas do Recife: Relatório do diagnóstico do sistema de drenagem existente. ABF Engenharia LTDA, Recife, 333p.

Gomes, M. M. de A. (2019). Abordagem integrada de modelagem hidrológica e operação de barragens para avaliação da eficiência do controle de cheias na Bacia do Rio Capibaribe. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Tecnologias e Geociências. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife-PE, 155 f.

Kuntiyawichai, K.; Sri-Amporn, W.; Wongsasri, S.; Chindapasirt, P. Anticipating of Potential Climate and Land Use Change Impacts on Floods: A Case Study of the Lower Nam Phong River Basin. *Water* 2020, 12, 1158. <https://doi.org/10.3390/w12041158>

Lin, W.; Sun, Y.; Nijhuis, S.; Wang, Z. Scenario-based flood risk assessment for urbanizing deltas using future land-use simulation (FLUS): Guangzhou Metropolitan Area as a case study. *Sci. Total Environ.* 2020, 739, 139899.

Luo, P.; Wang, X.; Zhang, L.; Mohd Arif Zainol, M.R.R.; Duan, W.; Hu, M.; Guo, B.; Zhang, Y.; Wang, Y.; Nover, D. Future Land Use and Flood Risk Assessment in the Guanzhong Plain, China: Scenario Analysis and the Impact of Climate Change. *Remote Sens.* 2023, 15, 5778. <https://doi.org/10.3390/rs15245778>

Mihu-Pintilie, A.; Cîmpianu, C.I.; Stoleriu, C.C.; Pérez, M.N.; Paveluc, L.E. Using High-Density LiDAR Data and 2D Streamflow Hydraulic Modeling to Improve Urban Flood Hazard Maps: A HEC-RAS Multi-Scenario Approach. *Water* 2019, 11, 1832. <https://doi.org/10.3390/w11091832>

Mitsopoulos, G.; Diakakis, M.; Bloutsos, A.; Lekkas, E.; Baltas, E.; Stamou, A. The Effect of Flood Protection Works on Flood Risk. *Water* 2022, 14, 3936. <https://doi.org/10.3390/w14233936>

Mohanty, M. P., e Simonovic, S. P. (2022). A Comprehensive Approach for Floodplain Mapping through Identification of Hazard Using Publicly Available Data Sets over Canada. *Water* (Switzerland), 14(14). <https://doi.org/10.3390/w14142280>

Moriasi, D. N.; Arnold, J. G.; Van Liew, M. W.; Bingner, R. L.; Harnel, R. D.; Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. Vol. 50(3): 885–900

Pokhrel, I., Kalra, A., Rahaman, M. M., e Thakali, R. (2020). Forecasting of Future Flooding and Risk Assessment under CMIP6 Climate Projection in Neuse River, North Carolina. *Forecasting*, 2(3), 323–345. <https://doi.org/10.3390/forecast2030018>

Ramachandran A, Palanivelu K, Mudgal BV, Jeganathan A, Guganesh S, Abinaya B, Elangovan A. Climate change impact on fluvial flooding in the Indian sub-basin: A case study on the Adyar sub-basin. PLoS One. 2019 May 14;14(5):e0216461. doi: 10.1371/journal.pone.0216461. PMID: 31086383; PMCID: PMC6516649.

Rangari, V.A., Umamahesh, N.V. e Bhatt, C.M. Assessment of inundation risk in urban floods using HEC RAS 2D. *Model. Earth Syst. Environ.* 5, 1839–1851 (2019). <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00641-8>

Saboia, M. A. M., Souza Filho, F. A., Helfer, F., e Rolim, L. Z. R. (2020). Robust strategy for assessing the costs of urban drainage system designs under climate change scenarios. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 146(11), 05020022. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001281](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001281).

Sahoo, S. N.; Sreeja, P. (2017) Development of flood inundation maps and quantification of flood risk in an urban catchment of Brahmaputra River. *ASCE ASME J Risk Uncertain Eng Syst Part A Civ Eng* 3(1):A4015001. <https://doi.org/10.1061/AJRUA6.0000822>

Shaikh, A.A., Pathan, A.I., Waikhom, S.I. *et al.* Application of latest HEC-RAS version 6 for 2D hydrodynamic modeling through GIS framework: a case study from coastal urban floodplain in India. *Model. Earth Syst. Environ.* 9, 1369–1385 (2023). <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01567-4>

USACE. (2016). River Analysis System HEC-RAS: User's Manual. Version 5.0. United States Army Corps of Engineers - USACE. Hydrologic Engineering Center – HEC. Davis, California, EUA, 962 p.

USACE. (2016b). River Analysis System HEC-RAS: Hydraulic Reference Manual. Version 5.0. United States Army Corps of Engineers - USACE. Hydrologic Engineering Center – HEC. Davis, California, EUA, 547 p.

USACE. (2016a.). River Analysis System HEC-RAS: User's Manual. Version 5.0. United States Army Corps of Engineers - USACE. Hydrologic Engineering Center – HEC. Davis, California, EUA, 962 p.

Van Liew, M. W; Veith, T.L.; Arnold, J.G. (2007). Suitability of SWAT for the Conservation Effects Assessment Project: Comparison on USDA Agricultural Research Service Watersheds. *Journal Of Hydrologic Engineering*, v. 12, n. 2, p.173-189.

Vashist, K., Singh, K.K., 2023. HEC-RAS 2D modeling for flood inundation mapping: a case study of the Krishna River Basin. *Water Practice Tech.* 18, 831–844. <https://doi.org/10.2166/wpt.2023.048>

Verçosa, L. F. de. (2019). M. Modelagem hidrológica e hidrodinâmica aplicada à avaliação da ocorrência de inundações na cidade de Recife, PE. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Tecnologias e Geociências. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife-PE, 114 f.

Walęga, A.; Radecki-Pawlik, A.; Cupak, A.; Hathaway, J.; Pukowiec, M. Influence of Changes of Catchment Permeability and Frequency of Rainfall on Critical Storm Duration in an Urbanized Catchment—A Case Study, Cracow, Poland. *Water* 2019, 11, 2557. <https://doi.org/10.3390/w11122557>

Wałęga, A.; Radecki-Pawlik, A.; Cupak, A.; Hathaway, J.; Pukowiec, M. Influence of Changes of Catchment Permeability and Frequency of Rainfall on Critical Storm Duration in an Urbanized Catchment—A Case Study, Cracow, Poland. *Water* 2019, *11*, 2557. <https://doi.org/10.3390/w11122557>

Yalcin, E. Assessing the impact of topography and land cover data resolutions on two-dimensional HEC-RAS hydrodynamic model simulations for urban flood hazard analysis. *Nat Hazards* 101, 995–1017 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03906-z>

Zappa, M. (2002). Multiple-response verification of a distributed hydrological model at different spatial scales. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology, 167p.

Zonensein, J. Índice de risco de cheia como ferramenta de gestão de enchentes. 2007. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

6. ARTIGO 5: AVALIAÇÃO DE RESILIÊNCIA A INUNDAÇÕES URBANAS POR MEIO DE TOMADA DE DECISÃO MULTICRITÉRIO E TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO.

RESUMO

As inundações urbanas representam um dos principais desafios para a gestão sustentável das cidades, especialmente em contextos de urbanização acelerada e mudanças climáticas. Este estudo visa avaliar a resiliência a inundações na bacia do rio Jiquiá, sub-bacia do rio Tejipió em Recife-PE, por meio da aplicação do modelo UFRI, que integra variáveis como perigo, exposição, susceptibilidade e capacidade de enfrentamento. A metodologia emprega técnicas de geoprocessamento e o método de Análise Hierárquica (AHP) para atribuição de pesos aos indicadores selecionados. Foram utilizados dados físicos, socioeconômicos e institucionais, integrados em ambiente SIG, permitindo a espacialização da resiliência urbana. Os resultados demonstram que a maior parte da bacia apresenta baixa a muito baixa resiliência, com destaque para as regiões norte, nordeste e leste, onde se concentram altos níveis de exposição e susceptibilidade associados a limitada capacidade de enfrentamento. A porção sudoeste, por outro lado, apresenta resiliência média, refletindo melhores condições socioambientais. A abordagem proposta se mostra eficaz para orientar ações de mitigação e adaptação no planejamento urbano, contribuindo para a construção de cidades mais preparadas frente aos eventos extremos.

Palavras-Chave: Resiliência Urbana; UFRI; AHP; Geoprocessamento.

1. INTRODUÇÃO

As inundações urbanas têm se tornado um problema global cada vez mais comum nas últimas décadas, impulsionadas pela aceleração da urbanização e pelas alterações climáticas (Li *et al.*, 2019). A urbanização, um fenômeno inerente à evolução econômica e social, é particularmente evidente em países em desenvolvimento, como o Brasil. No entanto, esse crescimento traz consigo desafios consideráveis para as cidades, como congestionamento de tráfego, poluição ambiental, escassez de energia e aumento da população, além de demandar um planejamento adequado das infraestruturas, como sistemas de transporte e drenagem (Zhu *et al.*, 2021).

Nesse contexto, os desastres naturais, como inundações, não devem mais ser encarados como eventos imprevisíveis e transitórios que exigem respostas de emergência, mas sim como riscos contínuos com ciclos de vida que se estendem por anos ou séculos, cuja mitigação e adaptação devem ser permanentemente incorporadas no planejamento e nas políticas urbanas (Harrison e Williams, 2016). Antecipar e analisar os riscos de inundações tornou-se uma abordagem eficaz na redução das perdas causadas por esses eventos (L. Wang *et al.*, 2022).

A consideração da resiliência na avaliação do risco de inundações pode proporcionar uma visão mais abrangente dos impactos desses eventos no funcionamento e nas características dos sistemas urbanos, contribuindo para o aumento da resiliência e a redução do risco de inundações (Zheng e Huang, 2023). O mapeamento da resiliência a inundações urbanas desempenha um papel

crítico na primeira fase do planejamento e concepção de planos de controle de inundação e alocação de proteção contra inundações, bem como infraestruturas preditivas e de alerta (C. F. Wu *et al.*, 2021).

Ao incorporar a resiliência na avaliação e gestão de inundações urbanas, a capacidade de drenagem existente de uma área pode ser otimizada e o investimento pode ser concentrado em locais menos resilientes às inundações (Y. Wang *et al.*, 2019). Contudo, para tornar a resiliência útil no processo de tomada de decisão, é importante poder avaliá-la (Moura Rezende *et al.*, 2019). Dado que a resiliência capta um quadro geral, ao reunir muitos componentes para uma análise mais ampla, tem um grande potencial para ser utilizada na criação das ferramentas de gestão do futuro (Bertilsson *et al.*, 2019).

Um dos métodos mais eficazes para avaliar a resiliência em face de inundações é o índice de vulnerabilidade a inundações, o qual permite medir a resiliência, especialmente em estudos holísticos que buscam uma representação mais fiel da realidade. Esse índice abrange a capacidade das pessoas de lidar, adaptar-se e responder aos perigos relacionados às inundações, contribuindo para uma melhor compreensão dos impactos potenciais desses eventos (Begg *et al.*, 2021).

É importante ressaltar que os impactos das inundações não são distribuídos igualmente entre diferentes grupos de pessoas, devido à sua exposição diferenciada e características socioeconômicas (Hamidi *et al.*, 2022). Portanto, a análise da vulnerabilidade desempenha um papel fundamental ao identificar susceptibilidades e fragilidades das pessoas expostas, contribuindo para a redução das consequências dos riscos naturais (Hamidi *et al.*, 2022).

Para determinar a resiliência nas comunidades, os métodos atuais incluem o Processo Hierárquico Analítico (AHP), o Sistema de Informação Geográfica (SIG) e a Metodologia Baseada em Indicadores (Pan *et al.*, 2023). Behazin *et al.* (2016), Ikirri *et al.* (2022), Shuaibu *et al.*, 2022 argumentam que a integração de técnicas de sensoriamento remoto e SIG juntamente com o AHP, é a abordagem mais eficaz para avaliar o risco de inundação e a vulnerabilidade, especialmente em áreas com dados esparsos ou desatualizados. Dados como os modelos digitais de elevação, características do solo, precipitação, declividade, densidade de drenagem e uso e cobertura do solo estão entre os fatores físicos comuns usados pelos pesquisadores (Basu *et al.*, 2023).

O pensamento futuro de longo prazo garante o planejamento além do curto prazo e o desenvolvimento de estratégias de resiliência diante de eventos extremos (Iwaniec *et al.*, 2020). Recife será a primeira capital do Brasil a completar 500 anos, em 2037 e apesar de ter muitos problemas atualmente, tem como objetivo para a comemoração do quinto centenário, ser uma cidade parque inclusiva e sustentável, com um amplo e eficiente sistema de drenagem e de proteção de barreiras, alta resiliência frente aos eventos ambientais extremos decorrentes das mudanças

climáticas, evitando alagamentos, cheias e deslizamentos, com meio ambiente recuperado e conservado, rios e canais revitalizados, num território com reduzida desigualdade social.

Portanto, o presente estudo desempenha um papel fundamental na análise da resiliência na bacia do rio Jiquiá, sub-bacia do rio Tejipió em Recife-PE. Ao abordar os desafios específicos da região e identificar áreas menos resilientes, este trabalho visa direcionar ações práticas que contribuirão para a construção de uma cidade mais preparada e resistente a inundações, auxiliando na tomada de decisão para o planejamento do futuro.

2. MODELOS E ÍNDICES DE AVALIAÇÃO DE VULNERABILIDADE E RESILIÊNCIA A INUNDAÇÕES URBANAS EM DIFERENTES CONTEXTOS GEOGRÁFICOS

A resiliência a inundações em escala regional pode ser medida usando curvas de desempenho do sistema. No entanto, a métrica mais comumente utilizada é baseada em índices, especialmente nas escalas de cidade e aglomeração urbana. Vários índices relacionados à resiliência foram selecionados para construir estruturas, e a resiliência a inundações pode ser medida integrando esses índices em um único critério (Tayyab *et al.*, 2021).

Um número crescente de estudos avaliou a vulnerabilidade às mudanças climáticas, particularmente a vulnerabilidade às inundações. Conforme indicado por (Wang *et al.*, 2021) não há consenso sobre a abordagem padrão para medir a resiliência a inundações urbanas. Muitos estudos tentaram operacionalizar por métodos multidisciplinares.

O desenvolvimento de abordagens de avaliação de vulnerabilidade pode apoiar as partes interessadas na redução de perdas humanas e de propriedade, ao mesmo tempo em que aprimora nossa compreensão da vulnerabilidade ao risco de inundação. Ao longo das últimas duas décadas, vários métodos para a avaliação da vulnerabilidade a inundações foram desenvolvidos (Abdrabo *et al.*, 2023).

Sun *et al.*, (2022) propuseram um modelo quantitativo de resiliência urbana a inundações, considerando a correlação entre vulnerabilidade e resiliência, considerando a capacidade de recuperação no estágio pós-desastre em Pequim, norte da China. Hoq *et al.*, (2021) examinaram a vulnerabilidade de famílias em Bangladesh ao risco de inundação devido aos efeitos da mudança de temperatura global, empregando o índice LVI. O índice aplicado tem como principais componentes o perfil sociodemográfico, estratégias de subsistência, redes sociais, saúde, alimentação, água, habitação e meios de produção, desastres naturais e variabilidade climática. Hagos *et al.*, (2022) combinaram informações de múltiplos critérios para gerar um índice de avaliação de risco de inundação, a partir das seguintes variáveis: declividade, elevação, densidade de drenagem, proximidade do rio, pluviosidade, textura do solo e uso da do solo, com auxílio de geoprocessamento.

Wu, (2021) aplicou um índice de vulnerabilidade a inundações (FVI) com base nos dados dos setores censitários, identificando por município a vulnerabilidade físico-natural, vulnerabilidade socioeconômica e exposição a riscos. Adicionalmente, a partir dos resultados obtidos, realizou a análise de vulnerabilidade de inundação costeira (CFV), que pode ser usada como uma ferramenta de monitoramento contínuo e um sistema de suporte à tomada de decisões.

Chikoore *et al.*, (2021) também aplicaram o índice FVI para as aldeias no distrito de Mopani, Província do Limpopo, África do Sul, verificando que as famílias empregaram várias estratégias/ações de adaptação temporária e de longo prazo. Abdrabo *et al* (2023) avaliou os níveis de vulnerabilidade a inundações FVI integrado para áreas urbanas em países em desenvolvimento nas principais dimensões de vulnerabilidade: física, social e econômica no Egito. A metodologia de ponderação AHP foi comparada com a Análise de Componentes Principais (PCA), apresentando resultados próximos e satisfatórios.

Cian *et al.*, (2021) aplicaram um método para avaliar a vulnerabilidade a inundações multitemporais no nordeste da Itália. Uma das novidades do método é a proposta de combinação multitemporal de dados censitários e dados de observação (imagens de satélites, por exemplo), o que contribui para a compreensão da evolução dinâmica da vulnerabilidade ao longo do tempo e permite ir além da resolução temporal limitada dos inquéritos censitários, que para a Itália vem a cada dez anos.

Almeida *et al.*, (2021) encontraram resultados satisfatórios e com grande potencial para combinar dados de conhecimento de diferentes fontes com modelos, permitindo assim obter tendências de exposição e vulnerabilidade a inundações para cenários atuais e de mudanças climáticas para a cidade de Lisboa, Portugal e assim identificar caminhos para aumentar a resiliência às inundações.

Hewawasam e Matsui, (2022) examinaram as percepções da comunidade sobre o risco e a resiliência de inundações urbanas em quatro áreas propensas a inundações em Colombo, Sri Lanka. Em geral, verificou-se que as comunidades próximas a rios enfrentam maiores riscos, mas também foi possível avaliar que outros fatores sociais como educação, renda, condições de moradia e preparação para enchentes afetaram as percepções de vulnerabilidade das comunidades.

Ahmadi *et al.*, (2022) investigaram a vulnerabilidade dos agricultores às inundações no nível local da região de Pol-e Dokhtar no Irã, sendo possível identificar que os prejuízos não se devem apenas à alta exposição às inundações; é também devido a uma alta susceptibilidade e uma capacidade adaptativa insuficiente. Fatores sociais e econômicos, como taxas de dependência mais altas, altas taxas de desemprego, infraestrutura precária, meios de subsistência dependentes do clima,

baixos níveis de diversificação de renda e acesso insuficiente a informações sobre mudanças climáticas contribuíram para altos níveis de vulnerabilidade.

Padhan e Madheswaran, (2023) aplicaram um índice composto de vulnerabilidade a inundações para avaliar a vulnerabilidade a inundações dos distritos costeiros de Odisha, a partir de uma abordagem integrada entre exposição, susceptibilidade e capacidade de adaptação.

Chang *et al.*, (2021) utilizaram um índice que combina três dimensões de vulnerabilidade – exposição, susceptibilidade, capacidade adaptativa – dentro de cada um dos três domínios do SETS: sistemas sociais (S), ecológicos (E) e tecnológicos (T) que compreendem áreas urbanas para avaliar a vulnerabilidade a inundações em seis cidades dos EUA e assim contribuir com o planejamento espacial para resiliência e desenvolvimento sustentável. Dentre as análises realizadas, identificou-se por exemplo que em Phoenix e Atlanta, toda a cidade está dentro da planície de inundação de 500 anos. Em Baltimore e Nova York, as áreas com maior pontuação no indicador de vulnerabilidade social estão localizadas em comunidades mais densas em geral. Em Portland, a área com vulnerabilidade relativamente baixa está nas áreas sudeste e sudoeste atribuída devido à alta presença de espaços verdes com superfícies permeáveis. Em Miami, a vulnerabilidade social é maior em partes dos bairros no centro de Miami ao longo do Miami River e do Little River (Chang *et al*, 2021, Iwaniec *et al*, 2020).

Houngpè *et al.*, (2022) determinaram o nível de vulnerabilidade presente e vulnerabilidade futura a riscos de inundação na Bacia do Rio Ouémé na saída de Bonou usando uma abordagem estatística de modelagem múltipla. Os resultados indicam que a bacia em análise é muito vulnerável aos impactos adversos das mudanças climáticas. (Zhu *et al.*, 2023) por exemplo utiliza o modelo PSR-SENCE considera que as inundações urbanas exercem pressão sobre o meio ambiente e afetam sua qualidade e quantidade de recursos naturais, econômicos e sociais; e a sociedade responde a essas mudanças por meio de políticas naturais, econômicas e por meio de mudanças de consciência e comportamento, obtendo os fatores mais críticos para a resiliência a inundações urbanas na China.

Os Indicadores Brasileiros de Risco de Desastres (DRIB-Índice) propostos por Almeida *et al.* (2020) serviram como uma ferramenta para ajudar a avaliar 32 indicadores que incluem diferentes níveis de exposição, vulnerabilidade e riscos no Brasil (Almeida *et al.*, 2020). O DRIB visa capturar e medir quatro componentes principais: exposição a desastres naturais, susceptibilidade das comunidades expostas, capacidade de enfrentamento e capacidade de adaptação. O DRIB-Índice mostrou alto nível de vulnerabilidade e baixa capacidade de enfrentamento e adaptação às mudanças socioambientais impostas por desastres e mudanças climáticas para diversas cidades das regiões Norte (Amazônia) e Nordeste do Brasil. De fato, alguns lugares na região amazônica foram

identificados pelo índice como sendo muito expostos a riscos múltiplos, como deslizamentos de terra, inundações, inundações repentinas e secas.

Miguez e Veról (2017) desenvolveram uma ferramenta chamada Índice Integrado de Resiliência a Inundações (FResI), com o objetivo de incluir uma medida de resiliência no processo de tomada de decisão, para comparar diferentes conceitos de design para alternativas de controle de inundações.

Moura Rezende *et al.*, (2019) desenvolveram um índice para auxiliar o planejamento e desenho de soluções de drenagem urbana, adotando uma metodologia que parte dos conceitos básicos de gestão de riscos e evolui para consolidar um Índice de Resiliência – UFRI, que se baseia no índice apresentado como S-FRESI (Tebaldi *et al.*, 2015; Bertilsson *et al.*, 2019). O autor conclui que a abordagem baseada na resiliência prioriza medidas adaptativas que visam harmonizar a relação entre a cidade e o ciclo da água, uma vez que o conceito de resiliência depende não apenas da capacidade de resposta do sistema, mas também da sua capacidade de absorver e coexistir com os impactos negativos das cheias, permitindo uma estratégia adaptativa.

Cerbaro *et al.*, (2022) procuraram desenvolver e aplicar um novo método (VIFOR) para avaliar a vulnerabilidade e resiliência a inundações nas áreas urbanas de duas cidades na Amazônia brasileira usando principalmente observações derivadas de Google Street View (GSV). O VIFOR inclui uma análise de risco de desastres em escala local e microescala. Com base no conjunto de 45 indicadores abrangendo as dimensões de exposição, susceptibilidade e adaptação, foi possível identificar diferenças em vulnerabilidade e resiliência, e estas foram especialmente aparentes em termos de diferenças entre áreas mais pobres e mais ricas das cidades.

Tayyab *et al.*, (2021) desenvolveu um modelo de avaliação de resiliência urbana baseado em GIS para entender a resiliência no Paquistão. Dessa forma, propuseram um modelo de resiliência a inundações urbanas (UFRI), que incorpora quatro fatores principais – risco de inundação urbana, exposição, susceptibilidade e capacidade de enfrentamento em duas partes, ou seja, susceptibilidade e capacidade de enfrentamento.

Diante de diversos índices que também podem ser associados com a temática apresentada, Veról *et al.*, (2019) propõe um índice multicritério, denominado Índice de Restauração Fluvial Urbana (URRIx), como informação complementar para a tomada de decisão, pretendendo avaliar e internalizar no processo de projeto a (eventual) melhoria ambiental de bacias hidrográficas urbanas no processo de projeto relacionado com intervenções na área. Este índice considera os conceitos da abordagem de restauração fluvial em sua composição.

Miranda *et al.*, (2023) concluíram que o índice PhySFI pode ser usado como uma ferramenta para avaliações de susceptibilidade a inundações destinadas a apoiar o planejamento e

desenvolvimento urbano e compreende a gestão do risco de inundações, que devem ser associadas com análises de perigos, risco e resiliência.

O Índice de Hashimoto, proposto por Hashimoto et al. (1982), é amplamente utilizado na avaliação da resiliência de sistemas hídricos e caracteriza-se como a razão entre o número de recuperações bem-sucedidas de um sistema e o número total de falhas ocorridas, representando a capacidade do sistema de retornar a condições satisfatórias após eventos adversos. Esse índice, de natureza probabilística, tem sido empregado em estudos recentes como ferramenta para apoiar o planejamento adaptativo frente às mudanças climáticas.

Asefa et al. (2014), por exemplo, aplicaram os índices de confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade (RRV), incluindo o Índice de Hashimoto, para avaliar o desempenho de sistemas de recursos hídricos sob diferentes cenários climáticos simulados. De forma semelhante, Roach et al. (2018) incorporaram o índice como um dos critérios centrais em uma abordagem de otimização multiobjetivo, com o objetivo de identificar estratégias robustas de adaptação para sistemas de abastecimento de água diante de incertezas profundas.

Nesse contexto de avaliação da resiliência urbana a inundações, foram apresentados diversos modelos e índices que foram desenvolvidos para mensurar a vulnerabilidade em escalas diferentes. No entanto, a escolha do modelo mais adequado para a área de estudo em questão se mostrou um desafio importante. Após uma análise minuciosa, foi decidido que o Modelo UFRI se alinha de maneira mais adequada com as necessidades desta pesquisa, o que o torna a escolha apropriada para a análise. Este modelo incorpora elementos essenciais, como risco de inundação urbana, exposição, susceptibilidade e capacidade de enfrentamento, oferecendo uma abordagem abrangente para avaliar a resiliência a inundações.

3. METODOLOGIA DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO

A Análise Multicritério (AMC) representa uma ferramenta essencial para facilitar o processo de tomada de decisão, permitindo a avaliação de variáveis qualitativas e quantitativas. Ela é particularmente útil em situações que envolvem discussões direcionadas e a consideração de múltiplos pontos de vista provenientes de diversas áreas do conhecimento. Neste estudo, aplica-se a metodologia correspondente ao Processo Analítico Hierárquico (Analytic Hierarchy Process - AHP) com o propósito de aprimorar a seleção dos indicadores que irão compor o índice para o modelo de resiliência de inundações urbanas.

A metodologia AHP é uma abordagem matemática utilizada para caracterizar problemas complexos, com um número variável de fatores. Uma vez que todos os fatores são hierarquicamente

ordenados, uma matriz de comparação pareada é construída para permitir uma comparação significativa entre as avaliações dos fatores (Ikirri *et al.*, 2022).

O método AHP tem sido amplamente utilizado, como uma ferramenta para análise de tomada de decisão multicritério e tem sido amplamente adotado na gestão de águas pluviais urbanas (Qi *et al.*, 2022). Adicionalmente, como exemplo de aplicação, esse método foi usado para analisar a susceptibilidade a inundações repentinas na zona úmida do nordeste de Bangladesh, integrado com sensoriamento remoto e sistema de informação geográfica (Haque *et al.*, 2021). Dessa forma, a abordagem apresentou-se útil na identificação e previsão dos locais suscetíveis, ajudando ainda mais os formuladores de políticas na mitigação de riscos e no planejamento da tomada de decisões. Essa metodologia também é amplamente utilizada para o gerenciamento de risco, conforme pode ser observado em Ghosh *et al.* (2018), Chen *et al.* (2011), Zou *et al.* (2013).

Skouloudis *et al.*, (2023) por exemplo aplicou a metodologia AHP nos processos de tomada de decisão com a ajuda de um painel de 12 especialistas (composto por acadêmicos/pesquisadores, consultores de gestão de sustentabilidade e auditores de continuidade de negócios), para obter a priorização dos fatores de capacidade de resiliência. (Ikirri *et al.*, 2022) utilizou a plataforma GIS e o AHP para analisar as zonas de planície de inundação na bacia hidrográfica de Taguenit Wadi, Lakhssas, Marrocos, combinando sete parâmetros que influenciam fenômenos extremos.

Basu *et al.*, (2023) também aplica o método de tomada de decisão com hierarquia analítica (AHP) e assim utiliza como fundamento para a estatística de índice de vulnerabilidade a inundações no município de Nabadwip, Bengala Ocidental na Índia. (Shuaibu *et al.*, 2022) desenvolveu um mapa espacial de avaliação de risco de inundação da bacia do rio Hadejia. A distribuição espacial das zonas de risco de inundação da bacia do rio Hadejia foi mapeada usando o método Analytic Hierarchy Process (AHP) integrado a um Sistema de Informação Geográfica (GIS) para reduzir o risco e a vulnerabilidade associados às inundações.

A aplicação deste método normalmente é realizada dentro de um ambiente de software de Sistema de Informação Geográfica (GIS), que fornece as ferramentas necessárias para manipular e incorporar dados de sensoriamento remoto como entradas necessárias para este método e a produção de mapa de resultados, conforme realizado por Serdar *et al.*, (2022). Portanto, esse método (AHP) será utilizado para atribuir pesos a cada critério referente a resiliência a inundações urbanas.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

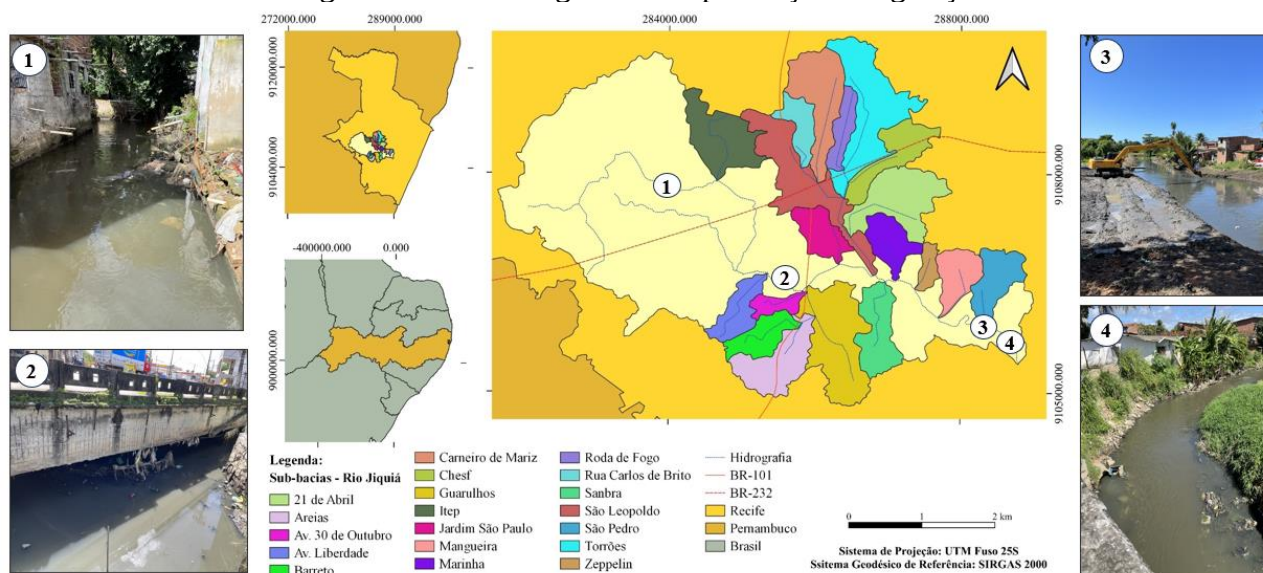
O município do Recife é constituído principalmente pelas bacias dos rios Capibaribe, Beberibe e Tejipió. Por sua vez, a bacia do rio Jiquiá, afluente do rio Tejipió, é uma área de grande

importância socioambiental, pois abriga diversas comunidades que dependem diretamente dos recursos naturais da região. Além disso, é uma área de grande potencial para a implantação de projetos de revitalização e recuperação ambiental, como a implantação de parques lineares e a recuperação de áreas degradadas.

A bacia do rio Jiquiá (Figura 1), tem área em torno de 20,38 km², e recebe drenagem da região do Curado e do Jardim Botânico, em seu trecho superior, pela sua margem direita. Pela sua margem esquerda, recebe vários pequenos afluentes que drenam parte da Cidade Universitária, Ceasa, San Martin, Jiquiá e Mangueira e, por meio do Canal Torrões, recebe os efluentes da Estação de Tratamento de Esgotos do bairro Roda de Fogo da Compesa.

O rio Jiquiá, objeto de proposta para esse estudo, tem 6,5 km de extensão, com 20 afluentes, totalizando cerca de 24 km, que possuem sub-bacias específicas, exemplificadas na Figura 1. Diversos trechos apresentam problemas de ocupação irregular e de alagamento, neste caso, especialmente entre a BR-232 e a BR-101, onde as cotas das margens são baixas, além do trecho entre a BR-101 e a Av. Recife, em Jardim São Paulo, e nas proximidades da Rua São Miguel, no bairro do Jiquiá.

Figura 1 - Localização da Bacia do Rio Jiquiá, no município de Recife-PE, com destaque para quatro trechos ilustrativos: (1) Estreitamento das margens em função de ocupações irregulares; (2) Destinação inadequada de resíduos sólidos ao longo do curso do rio; (3) e (4) Trechos com maior largura e taludes marginais com presença de vegetação.



Fonte: A Autora (2025).

O trecho inicial do Rio Jiquiá, tem sua nascente no bairro da Várzea, recebendo a drenagem da região do Curado e do Jardim Botânico. Desde a sua nascente até a BR 232 é protegido por lei, visto que se encontra em uma Unidade de Conservação, de acordo com o Plano Municipal de

Drenagem e Manejo de Águas Pluviais do Recife (PMDR). Esse trecho é composto em sua grande maioria de áreas naturais, com vegetação densa.

Apesar da importância do rio Jiquiá em relação a drenagem e à conservação de diversos remanescentes naturais, encontra-se afetado por situações adversas ao próprio funcionamento, conservação e integração com a cidade. São observados inúmeros focos de ocupação irregular ao longo de suas margens. O rio Jiquiá possui calha estreita, cuja largura ultrapassa os 10 m apenas nas imediações de seu deságue, com ocupações que chegam até a encobrir a calha do rio.

A cidade possui vários assentamentos ilegais, muitos deles localizados ao longo das margens dos rios, que associados com a infraestrutura da cidade, combinado com outros efeitos, contribui consideravelmente para as inundações. O trecho do rio Jiquiá que atravessa o município possui suas margens ocupadas em mais de 90%. Os principais focos de alagamentos ocorrem com mais frequência entre a rodovia BR-101 e a Av. Recife, em Jardim São Paulo, e nas proximidades da Rua São Miguel, no bairro do Jiquiá (PMDR,2016). Nesses locais, os escoamentos são prejudicados por estrangulamentos em sua seção provocados por ocupação indevida de suas margens, eliminando a interação do rio com as várzeas.

Vale ressaltar que essa presença de vegetação é comum as margens e leitos dos rios e canais não revestidos da cidade, em razão do lançamento de esgotos sanitários nesses cursos d'água. A descarga de esgotos, com ligações ilegais e resíduos sólidos com destino incorreto e diretamente para o leito do rio, foram observados em diversos trechos com as visitas de campo. A falta de gestão adequada de esgotos e resíduos sólidos amplia o risco de inundações, contribuindo para a contaminação e disseminação de doenças transmitidas pela água.

Somam-se ainda, a essas adversidades, a erradicação de vegetação ciliar com ocorrência de assoreamento em alguns pontos, e o estreitamento das calhas por estruturas urbanas, como apresentado anteriormente. Em um contexto abrangente e atual, o rio Jiquiá, embora possua notável riqueza e diversidade ambiental, está sujeito a estados de degradação progressiva, com impactos adversos no equilíbrio da biodiversidade, na estética urbana-paisagística e na utilidade de suas águas para a comunidade local.

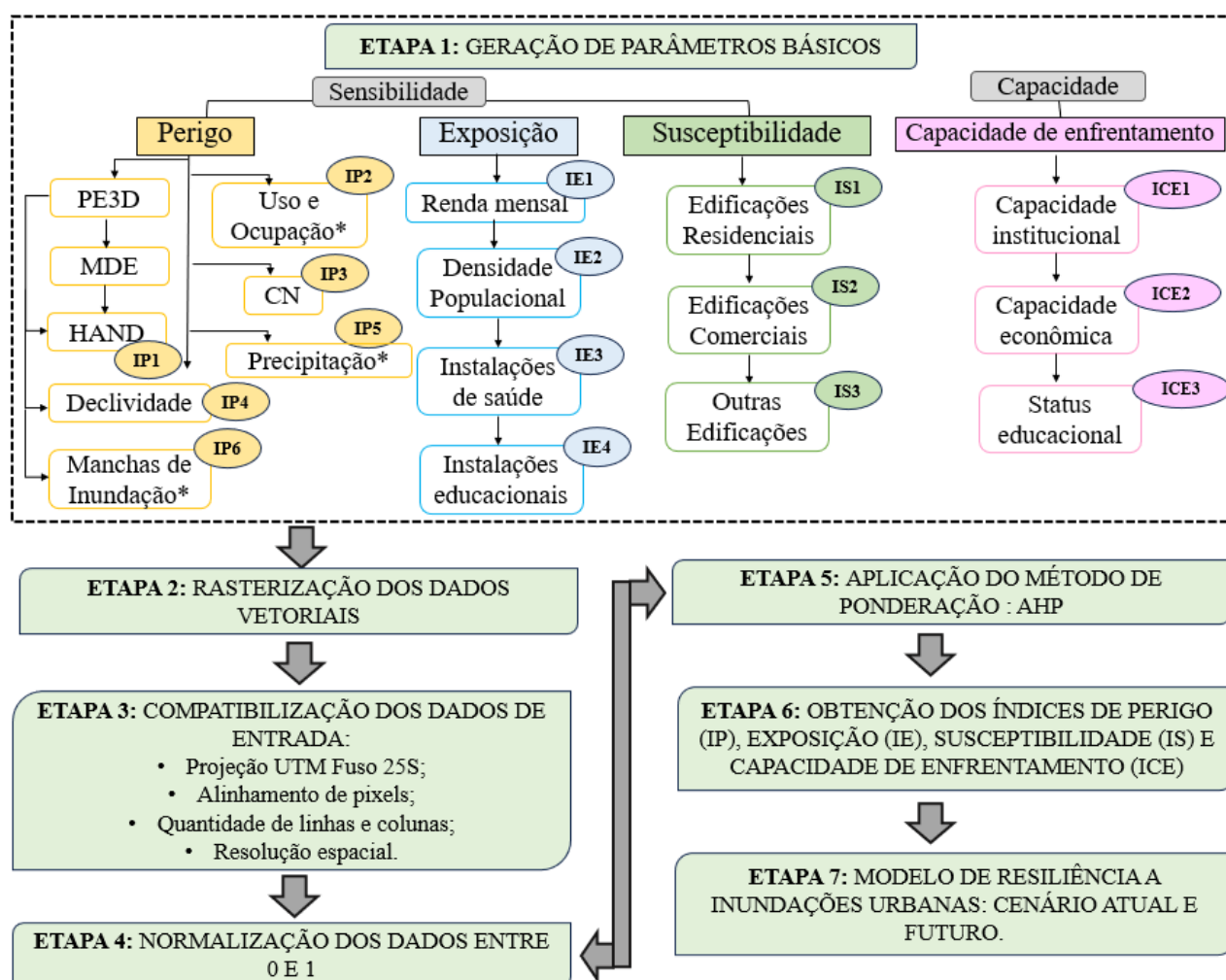
O trecho localizado em uma das margens do Parque Científico e Cultural do Jiquiá, que atualmente é considerada como uma Unidade de Conservação da Natureza (UCN) no município de Recife possui na outra margem, ocupações urbanas. A descarga de esgotos e resíduos sólidos também foi observado nesse trecho, especialmente decorrente das contribuições das vias e população local.

O trecho final do rio Jiquiá, possui um subtrecho com ocupações nas margens, e as demais ocupações em área de mangue, assim como nas proximidades da sua foz, na confluência com o Rio Tejipió.

4.2 MODELO DE RESILIÊNCIA A INUNDAÇÕES URBANAS: UFRI

O modelo UFRI (Tayyab *et al.*, 2021) utilizado neste estudo é baseado na sensibilidade e capacidade de enfrentamento às inundações urbanas, composto por 7 etapas distintas considerando os principais fatores e sua hierarquia, conforme pode ser observado no esquema ilustrativo na Figura 2. Este modelo engloba quatro fatores essenciais, que são o perigo de inundação, a exposição, a susceptibilidade e a capacidade de enfrentamento. O índice de Perigo será avaliado tanto para as condições do cenário atual quanto do cenário futuro. Os demais índices não foram analisados para o cenário futuro devido à dificuldade de estimar esses parâmetros de forma adequada, o que aumentaria significativamente as incertezas das previsões.

Figura 2 - Fluxograma de pesquisa e análise do estudo.
MODELO DE RESILIÊNCIA A INUNDAÇÕES URBANAS (UFRI)



* Os elementos Uso e Ocupação, Precipitação e Manchas de Inundação foram analisados no cenário atual e futuro.

Fonte: A autora (2025) a partir de Tayyab *et al.*, 2021.

A primeira parte do índice é composta por três fatores: perigo, exposição e susceptibilidade (IP, IE, IS), que representam a sensibilidade. Enquanto a segunda parte é destinada a avaliar a capacidade de enfrentamento (ICE). As interpretações para as partes um e dois do índice são abordadas na Equação 1 e Equação 2, respectivamente.

$$\text{Parte 1} = [1 - (I_P * I_E * I_S)] \quad \text{Equação 1}$$

$$\text{Parte 2} = [1 - I_{CE}] \quad \text{Equação 2}$$

Ao combinar as duas partes, o índice UFRI é representado na Equação 3, a seguir.

$$\text{UFRI} = [1 - (I_P * I_E * I_S)] * m_1 + [1 - I_{CE}] * m_2 \quad \text{Equação 3}$$

No presente estudo, o foco foi avaliar a eficácia dos indicadores e da fórmula como um todo. Para isso, a segunda parte da equação proposta foi tratada com igual peso, ou seja, $m_1 = m_2 = 0,5$. Isso significa que cada um dos quatro indicadores - IP, IE, IS e ICE - foi submetido a uma ponderação utilizando o método AHP, resultando em um valor do produto para cada um deles.

Os valores do índice de resiliência UFRI variam entre 0 e 1, sendo que valores mais altos indicam menor resiliência. Na escala original adotada neste estudo, as classes de resiliência foram definidas de forma inversamente proporcional ao valor do raster, ou seja, quanto maior o valor, menor a resiliência. Assim, áreas com alta resiliência receberam o valor 0,25, enquanto áreas com resiliência média foram atribuídas ao valor 0,50. Já as áreas de baixa resiliência e muito baixa resiliência foram representadas por valores mais altos, 0,75 e 1,00, respectivamente.

No entanto, como os valores observados neste estudo variaram entre valores entre 0,5 e 1,0, foi realizada uma nova subdivisão com o objetivo de melhorar a visualização e interpretação dos dados no índice UFRI, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação do índice de Resiliência

Nível de Resiliência	Muito alto	Alto	Médio	Médio – Baixo	Baixo	Baixo – Muito Baixo	Muito Baixo
Valores	0,0 – 0,25	0,26 – 0,50	0,51 – 0,60	0,61 – 0,70	0,70 – 0,80	0,80 - 0,90	0,91 – 1,0

Fonte: A Autora (2025).

Para assegurar a comparabilidade entre variáveis com diferentes unidades e escalas, todos os dados foram normalizados utilizando a técnica Min-Max, que consiste no reescalonamento dos valores para o intervalo de 0 a 1. A Equação 4 utilizada é dada por:

$$x_i^{norm} = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad \text{Equação 4}$$

Onde: x_i representa o valor original da variável para a observação i ; x_{min} é o menor valor da variável no conjunto de dados; x_{max} é o maior valor da variável no conjunto de dados; x_i^{norm} é o valor normalizado correspondente, pertencente ao intervalo de 0 a 1.

4.3 GERAÇÃO DE PARÂMETROS BÁSICOS

Para auxiliar na definição dos parâmetros básicos, serão definidos conceitos importantes, considerados no presente estudo, de acordo com o Painel Internacional sobre Mudanças Climáticas (IPCC) (IPCC, 2022):

- **Risco:** resulta da interação de perigos, exposição e vulnerabilidade.
- **Perigo:** é qualquer fenômeno físico (por exemplo, aumento da erosão costeira, frequência e intensidade de tempestades costeiras, deslizamentos de terra, inundações, temperaturas extremas do ar, etc.) com potencial para causar danos e perdas aos sistemas naturais e humanos.
- **Exposição:** é a presença de pessoas, animais, meios de subsistência, ecossistemas, infraestruturas e ativos em geral que podem ser afetados adversamente por desastres naturais relacionados ao clima.
- **Vulnerabilidade:** engloba os aspectos de susceptibilidade e capacidade adaptativa.
- **Capacidade de adaptação:** implica a capacidade dos sistemas humano, ambiental, dos ecossistemas e socioeconômicos de lidar com o impacto das mudanças climáticas, de se ajustar às suas consequências adversas ou de aproveitar as oportunidades potenciais.
- **Susceptibilidade:** é a capacidade de um sistema ser afetado adversamente ou benéficamente pelos efeitos de perigos relacionados ao clima.

4.3.1 Cálculo do Índice de Perigo de inundação

As inundações, são eventos naturais devastadores e exercem impacto significativo no desenvolvimento de regiões. Globalmente, as inundações resultam em um elevado número de óbitos e consideráveis danos materiais. O nível de perigo associado a inundações é determinado pela gravidade das inundações, influenciado por diversos elementos, como a sua extensão, profundidade, velocidade, grau de isolamento, taxa de elevação da água e duração. Além disso, a topografia do local e as ações de gerenciamento de emergência desempenham um papel crítico. No presente estudo, avaliamos os riscos de inundação por meio de seis elementos (modelo *hand*, uso e ocupação do solo, CN, declividade, precipitação e manchas de inundação), os quais serão detalhadamente discutidos a seguir. Os elementos Uso e Ocupação, Precipitação e Manchas de Inundação foram analisados no cenário atual e futuro.

a) IP 01: Modelo Hand (Height Above the Nearest Drainage ou Altura Acima da Drenagem mais Próxima)

O modelo HAND é um descritor de terreno hidrogeomorfológico que calcula a diferença de elevação entre cada ponto (pixel) em uma área e o ponto mais próximo da rede de drenagem à qual

ele se conecta. Assim, é possível identificar áreas com menor elevação em relação aos rios e canais, baseado nas direções de fluxo e na rede de drenagem extraídas do Modelo Digital de Elevação (MDE).

Para análise do item, foram utilizados os dados do programa Pernambuco Tridimensional (PE 3D), baseados na tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*), na escala 1:1000, com erro aceitável de altimetria inferior a 10cm, alterado de acordo com o cadastro dos rios e riachos, conforme ilustrado na Figura 3a – Parte 1.

b) IP 02: Uso e ocupação do solo

A análise do uso e cobertura do solo desempenha um papel fundamental na avaliação dos riscos de inundação, pois a urbanização tem um impacto significativo no aumento do escoamento superficial. Dessa maneira, a partir da coleção do MapBiomas foram obtidos os dados de cobertura e uso do solo, considerando um cenário atual (2020) e cenário futuro (2080), conforme ilustrado na Figura 3b – Parte 2. A projeção do uso e ocupação do solo para o cenário futuro foi elaborada com base nos resultados obtidos no Artigo 3.

c) IP 03: CN

O parâmetro *CN*, também conhecido como Curve Number (número de escoamento da bacia hidrográfica), é uma medida adimensional com valores variando de 0 a 100, que reflete as características da camada superficial do solo, que podem variar desde altamente permeáveis até completamente impermeáveis. O *CN* foi obtido a partir da base de dados otocodificada disponibilizada pela Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA), apresentado na Figura 3c – Parte 1.

d) IP 04: Declividade

Em estudos relacionados a inundações, a declividade do terreno desempenha um papel importante, uma vez que influencia diretamente no direcionamento e volume do fluxo de água superficial, exercendo um controle sobre o escoamento das águas.

A partir dos dados de elevação da área, foi obtido a declividade média apresentada na Figura 3d – Parte 1. Para classificação das declividades na bacia foram utilizados seis intervalos distintos de classes, com base no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2009), conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação da declividade

Declividade (%)	0 – 3	3 – 8	8 – 20	20 – 45	45 – 75	> 75
Discriminação	Relevo Plano	Relevo Suave Ondulado	Relevo Ondulado	Relevo Forte Ondulado	Relevo Montanhoso	Relevo Escarpado

Fonte: Adaptado Embrapa (2009).

e) IP 05: Precipitação

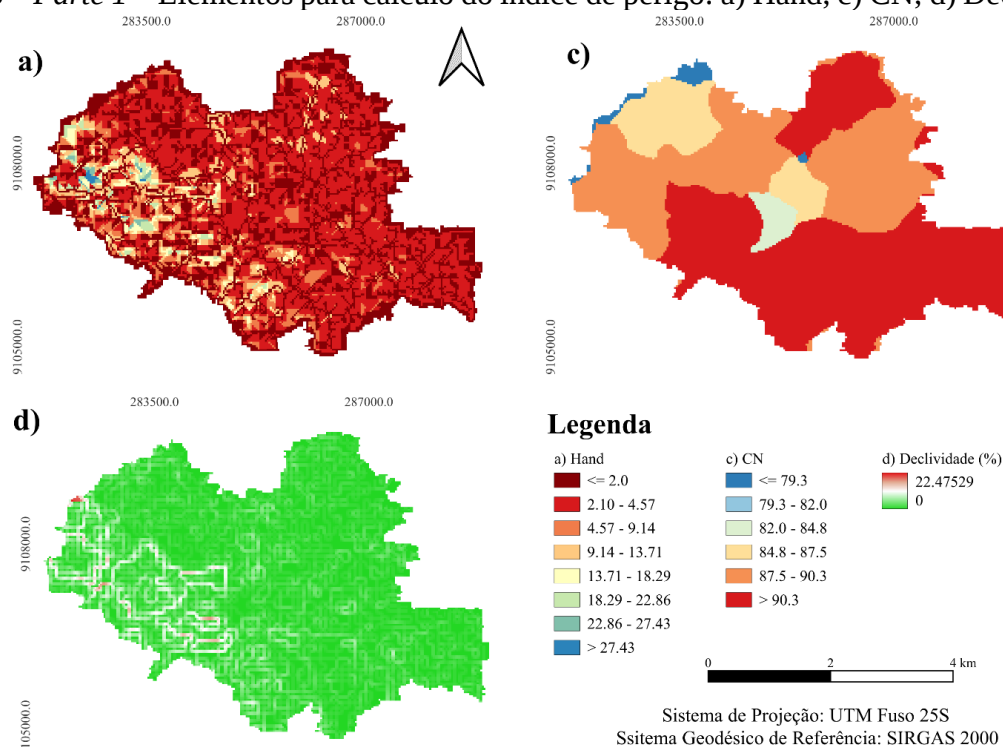
A análise de precipitação para o cenário atual na bacia do Rio Jiquiá foi realizada a partir dos dados de precipitação da estação climatológica convencional do posto Recife – Curado – Cód. OMM: 82900, operada pelo INMET, para o período entre 1962 e 2020, atualmente substituído por outro posto de operação da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC). O posto possui coordenadas de -34,959239° (longitude) e -8,05928° (latitude), e altitude de 11,3 m, situado no perímetro urbano com baixa taxa de ocupação no bairro do Curado, representado na Figura 3e – Parte 2.

Com base na caracterização da precipitação nos cenários presente e futuro, foi selecionado o índice climático Rx5Day. Embora seus valores apresentem distribuição espacial relativamente homogênea, esse índice representa a intensidade máxima de precipitação acumulada em cinco dias consecutivos, sendo um importante indicador de eventos extremos e potencial desencadeador de inundações. Para o cenário futuro, os dados pluviométricos foram obtidos a partir dos resultados do Artigo 2, utilizando projeções do modelo climático MIROC6 (CMIP6), no cenário de médio prazo.

f) IP 06: Manchas de inundação

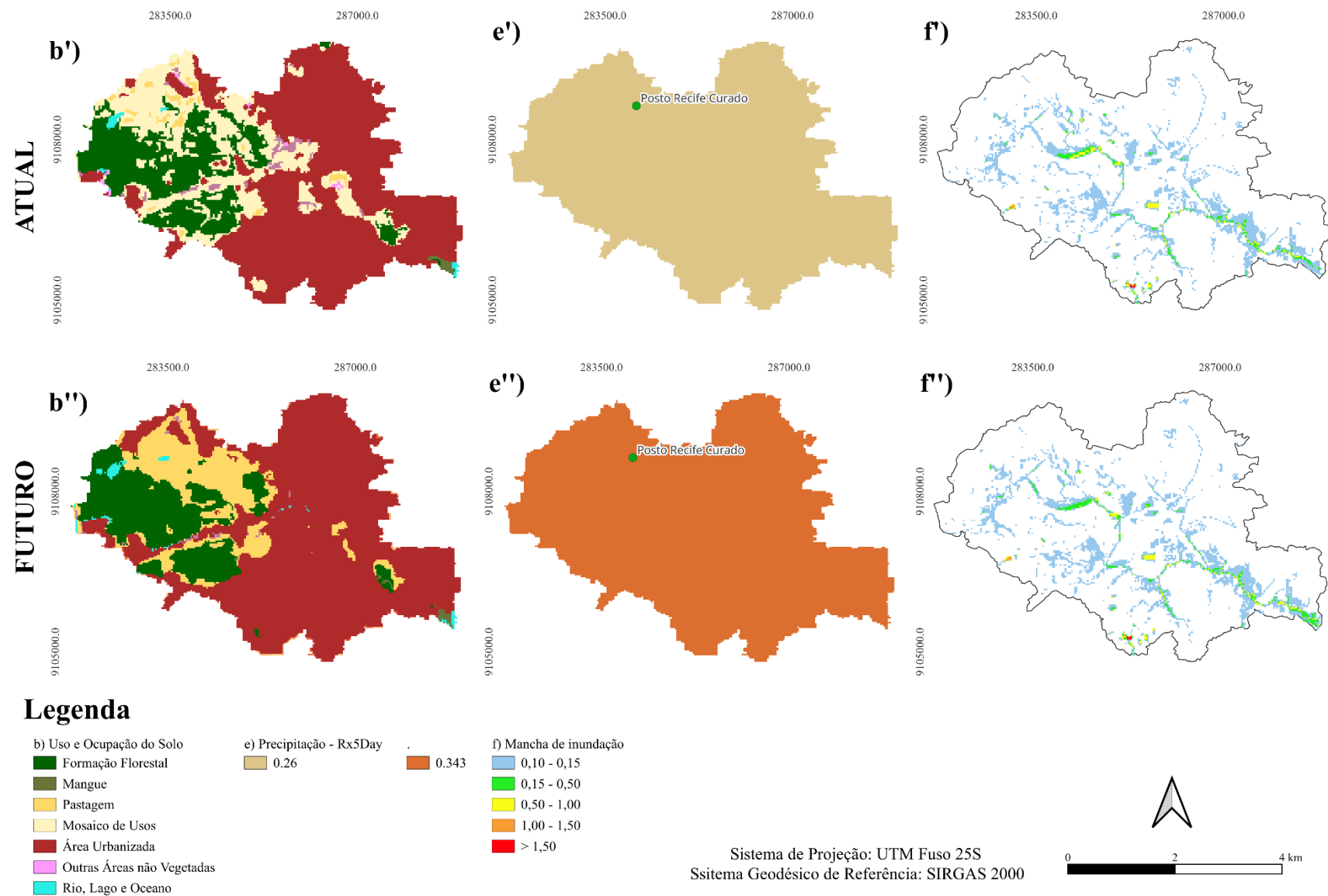
As informações relativas aos danos por inundação foram consideradas a partir dos resultados de profundidades gerados pelo modelo hidrodinâmico simulado no software HEC-RAS, considerando um tempo de retorno de 25 anos no cenário atual e futuro de uso e ocupação do solo e precipitação, conforme apresentado na Figura 3f – Parte 2.

Figura 3 – Parte 1 – Elementos para cálculo do índice de perigo: a) Hand; c) CN; d) Declividade (%).



Fonte: A autora (2025) a partir de (a e d) PE3D; (c) ANA.

Figura 3 – Parte 2 – Elementos para cálculo do índice de perigo: b) Uso e cobertura do solo; e) Precipitação; f) Manchas de inundação.



Fonte: A autora (2025) a partir de (b) MapBiomas; e) APAC.

4.3.2 Cálculo do Índice de Exposição

A exposição pode ser definida como a proximidade das pessoas, propriedades, sistemas ou outros elementos em relação às zonas de risco, tornando-os suscetíveis a possíveis perdas em caso de desastres. Em outras palavras, a exposição quantifica o grau de vulnerabilidade da comunidade a eventos ambientais catastróficos. Neste estudo, foram utilizados quatro elementos distintos (receita média mensal, densidade populacional, instalações de saúde e educacionais) para mensurar a exposição. A seguir serão descritos os elementos considerados para obtenção do índice de exposição.

a) IE 01: Receita média mensal

Os dados de renda média mensal para a área em estudo foram obtidos a partir da Base de informações por setor censitário do Censo Demográfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010). Após a obtenção dos dados, foram realizadas análises no software QGIS e, subsequentemente, divididos em 7 categorias, conforme ilustrado na Figura 4a.

b) IE 02: Densidade populacional

A densidade populacional da área de estudo também foi analisada para o ano de 2010, a partir dos dados do Censo Demográfico do IBGE, caracterizada como relativamente alta. A maior população reflete a presença de mais áreas com superfícies pavimentadas nas cidades, o que diminui a taxa de infiltração da precipitação. Assim, o mapa temático de densidade populacional foi realizado classificando os dados obtidos em cinco categorias, conforme representado na Figura 4b.

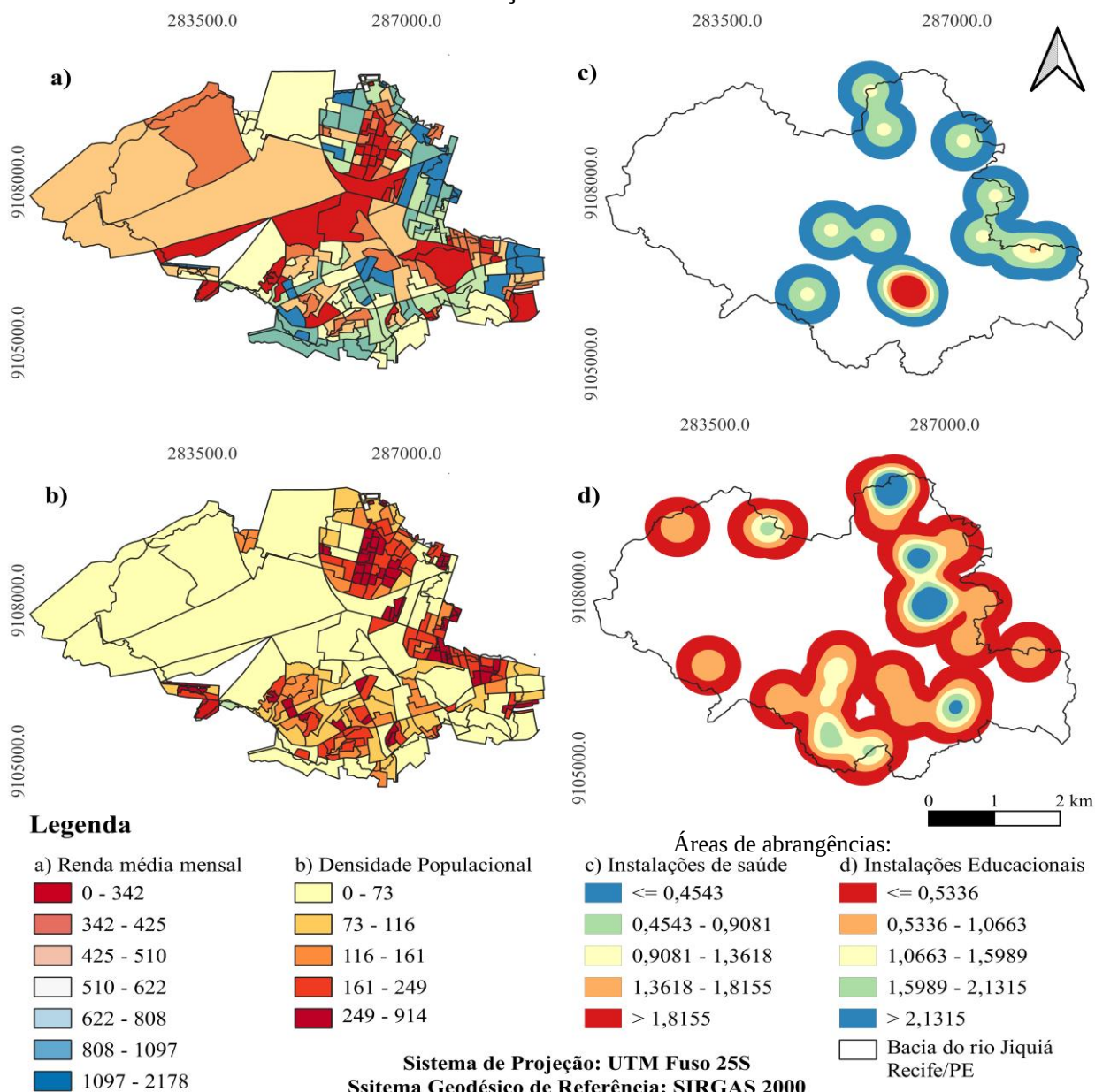
c) IE 03: Instalações de saúde

Os estabelecimentos de saúde desempenham um papel fundamental na avaliação da exposição de uma comunidade aos impactos de desastres. Para este estudo, os dados de localização das unidades de saúde foram obtidos do portal ESIG – Sistema de Informação Geográfica do município do Recife-PE, analisados no software QGIS, como representado na Figura 4c.

d) IE 04: Instalações educacionais

A presença de instituições educacionais em uma comunidade pode servir como locais de abrigo ou centros de evacuação em situações de desastre (Hoque *et al.*, 2019). Portanto, o maior (menor) número de instituições educacionais reflete a disponibilidade máxima (mínima) de locais de abrigo em uma comunidade, o que influencia o nível de exposição da mesma. Neste estudo, os dados relativos às instituições educacionais foram adquiridos do portal ESIG, posteriormente processados no software QGIS, conforme ilustrado na Figura 4d.

Figura 4 - Elementos para cálculo do índice de exposição: a) Renda média mensal; b) Densidade Populacional; c) Áreas de abrangência das Instalações de saúde; d) Áreas de abrangência das Instalações Educacionais.

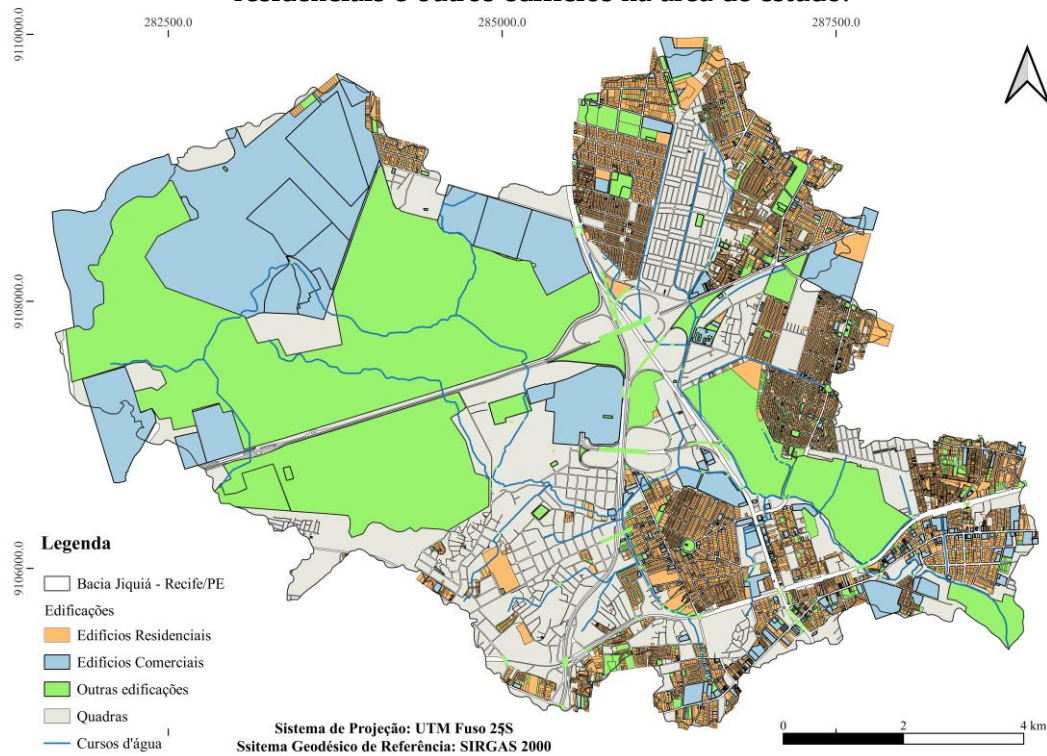


Fonte: A autora a partir de (a e b) IBGE; (c e d) ESIG.

4.3.3 Cálculo do Índice de Susceptibilidade a inundações

Edifícios comerciais (IS01), edifícios residenciais (IS02) e outras estruturas governamentais (IS03) são elementos que podem ser suscetíveis, revelando a susceptibilidade a inundações na área de estudo. Este estudo buscou identificar edifícios comerciais, edifícios residenciais e infraestrutura governamental, incluindo pontes, estradas, prédios do governo, bibliotecas públicas e parques, a fim de identificar a susceptibilidade às inundações (Figura 5). Os dados foram coletados junto ao portal ESIG e submetidos a análise no software QGis.

Figura 5 - Elementos para cálculo do índice de susceptibilidade: Edifícios comerciais, edifícios residenciais e outros edifícios na área de estudo.



Fonte: A autora a partir de ESIG.

4.3.4 Cálculo do Índice de Capacidade de enfrentamento

A avaliação da vulnerabilidade compreende um componente importante denominada capacidade adaptativa ou de enfrentamento. A capacidade de enfrentamento se refere às ações e medidas adotadas por indivíduos antes, durante ou após eventos de inundação, com o intuito de mitigar os impactos adversos. Conforme destacado por (Kienberger *et al.*, 2023), a capacidade adaptativa é intrinsecamente relacionada à capacidade social e à resiliência. Da mesma forma, a capacidade de enfrentamento está associada à capacidade da sociedade de reagir a ameaças por meio da utilização de habilidades e recursos disponíveis. O conceito de enfrentamento pode ser entendido como uma resposta imediata, positiva e eficaz às inundações. Para avaliar a capacidade de enfrentamento, empregamos os três seguintes elementos (capacidade econômica e institucional e status educacional), representadas na Figura 6. A seguir serão descritos os elementos considerados para obtenção do índice de capacidade de enfrentamento.

a) ICE 01: Capacidade econômica

Um aspecto importante da resiliência urbana à inundação é seu status econômico, que fortalece as capacidades econômicas da cidade (Zhu *et al.*, 2023). O componente da capacidade econômica pode abordar os indicadores econômicos e financeiros, ou fatores relacionados tais como o tamanho e a propriedade da habitação, o tipo de emprego e outras informações. Uma alta capacidade

econômica é um fator que pode ampliar a habilidade de uma comunidade para enfrentar os impactos de desastres de maneira mais eficaz.

Para a análise da capacidade econômica neste trabalho, foi considerado o índice *IVS Renda e Trabalho*, que reúne indicadores relativos à insuficiência da renda atual e a outros fatores que contribuem para a insegurança econômica. Entre esses fatores, destacam-se: a desocupação de adultos, a informalidade no trabalho entre adultos com baixa escolaridade, a dependência da renda de pessoas idosas e a presença de trabalho infantil. Os dados foram obtidos a partir do banco de dados do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA).

b) ICE 02: Capacidade institucional

A capacidade institucional refere-se ao papel das autoridades e agências responsáveis pela gestão de desastres relacionados a inundações. Essa dimensão pode abranger diversos aspectos, como o alcance das ações institucionais, os tipos de medidas adotadas para conscientização pública, recuperação e capacitação, programas de redução de riscos, sistemas de alerta de enchentes, treinamentos de mitigação e primeiros socorros, ações de restauração de meios de subsistência, saneamento da água e manutenção da higiene, além do suporte oferecido por órgãos governamentais ou organizações não governamentais.

No entanto, devido à limitação na disponibilidade de dados, este estudo considerou como indicador da capacidade institucional a presença de Unidades de Conservação da Natureza (UCNs), conforme definidas pela *Lei nº 18.014/2014*, que institui o Sistema Municipal de Unidades Protegidas (SMUP). Também foram analisados dados da Defesa Civil entre 2013 e 2023. Contudo, como a área de estudo apresenta relevo predominantemente plano e a maioria das ocorrências atendidas concentra-se em áreas de morros, esses registros não se mostraram representativos para a análise da região em questão.

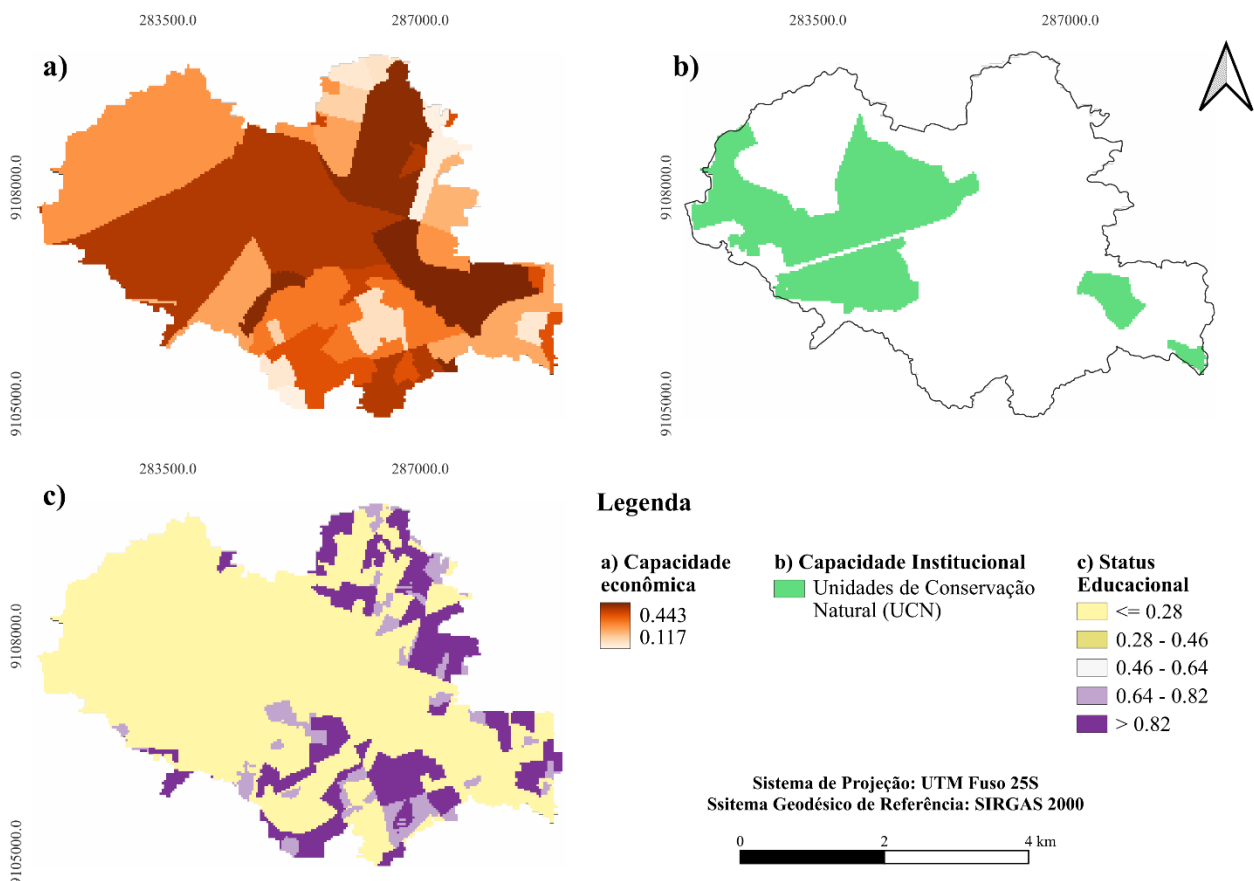
c) ICE 03: Status educacional

Diversos estudos têm demonstrado que níveis mais elevados de escolaridade estão diretamente associados a uma maior capacidade de enfrentamento em situações de desastre, quando comparados a indivíduos com menor nível educacional. Quanto maior o nível educacional dos moradores de uma comunidade, mais científica e eficientemente a comunidade pode lidar com eventos de desastres (Cutter *et al.*, 2003).

Para avaliar o nível educacional da população na área de estudo, foram utilizados os dados dos setores censitários referentes à quantidade de pessoas alfabetizadas com 5 anos de idade ou mais, conforme registrado na planilha Pessoa01_PE, com base nos dados do Censo Demográfico de 2010, disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Embora a alfabetização seja um indicador básico, ela fornece uma noção inicial da capacidade da população de compreender informações essenciais em situações de risco, como alertas, orientações de evacuação e medidas preventivas. Vale destacar que os dados do Censo de 2022 foram, até o momento, disponibilizados apenas de forma parcial, não contemplando as informações necessárias para esta análise.

Figura 6 - Elementos para cálculo do índice de capacidade de enfrentamento: a) Capacidade econômica; b) Capacidade institucional; c) Status educacional.



Fonte: A autora (2025) a partir de (a) IPEA; (b) PMDR; (c) IBGE.

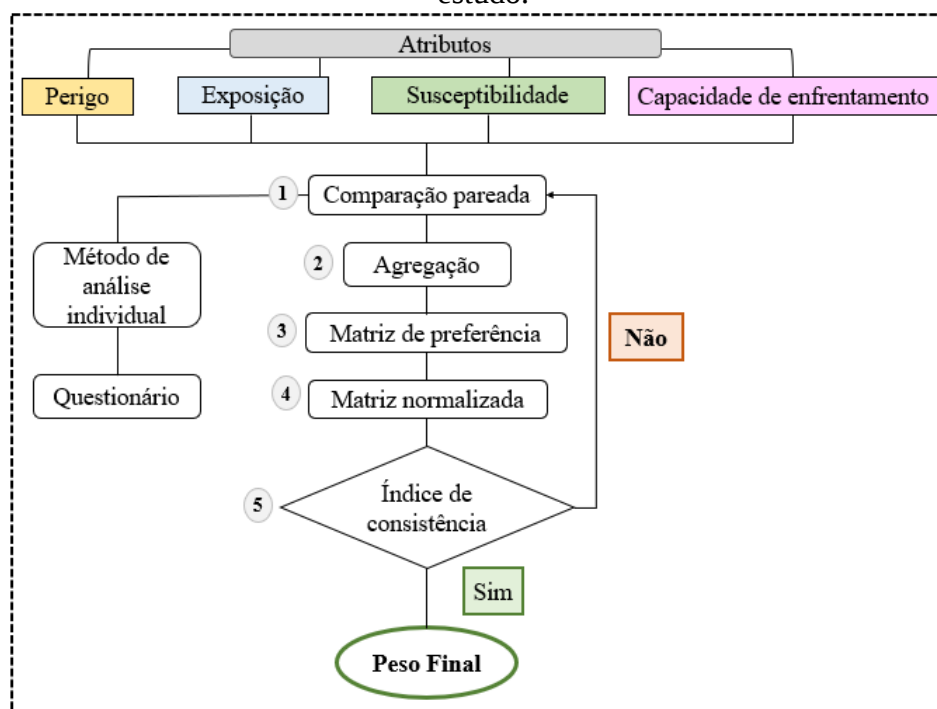
4.4 ANÁLISE DO PROCESSO DE HIERARQUIA ANALÍTICA (AHP)

O Método de Processo Analítico Hierárquico (Analytic Hierarchy Process - AHP), desenvolvido por Tomas L. Saaty em 1972, fundamenta-se na premissa de definir dimensões que são subdivididas em variáveis, proporcionando assistência no processo de tomada de decisão. Após a determinação desses parâmetros, são conduzidas comparações diretas entre as dimensões e entre as variáveis dentro de cada dimensão, com o objetivo de estabelecer pesos que reflitam sua importância no contexto do projeto.

A atribuição dos graus de importância é realizada por meio da Escala Fundamental proposta por Saaty (2008), que varia de 1 a 9, representando níveis crescentes de importância entre os critérios — desde importância igual (1) até importância extrema (9). Com base nessa escala, aplica-se a comparação par a par, permitindo determinar o peso relativo de cada critério na análise.

Para a aplicação da AHP também é necessária a estruturação da hierarquia de decisão com escolha das dimensões e das variáveis vinculadas a dimensão que são relevantes para o problema. O processo AHP é composto por cinco etapas distintas (Figura 7): (1) a comparação em pares dos critérios com as opiniões dos especialistas, (2) a agregação das opiniões dos especialistas, (3) a criação da matriz de importância, (4) a normalização da matriz de importância, e (5) o cálculo da razão de consistência para cada critério.

Figura 7 - Processo hierárquico analítico (AHP) como método de ponderação para o presente estudo.



Fonte: A autora (2025) a partir de Tayyab *et al.* (2021).

4.4.1 Atribuição de níveis de importância para cada dimensão e variável

Após a definição das dimensões e suas variáveis, será realizada a atribuição de pesos para hierarquização entre as dimensões e entre as variáveis de uma mesma dimensão.

Assim, é necessária a definição do nível de importância entre as dimensões e entre as variáveis dentro de cada dimensão, estabelecendo comparações par a par neste estudo. Para aprimorar o processo de comparação par a par, a Escala Fundamental de Saaty (2008), foi adaptada, de forma que os graus de relevância utilizados foram definidos na Tabela 3.

Tabela 3 - Escala de comparação par a par considerada no presente estudo.

7	3	1	1/3	1/7
Muito mais relevante	Mais relevante	Igualmente relevante	Menos relevante	Muito menos relevante

Fonte: Adaptado de Saaty (2008).

4.4.2 Matriz de importância, Matriz de Importância Normalizada e Prioridade Média Local

A etapa de comparação par a par entre os critérios é fundamental neste estudo, pois permite atribuir os valores relativos de importância a cada critério com base em julgamentos especializados. Considerando a escala de comparação apresentada na Tabela 3. Foram realizadas entrevistas individuais com sete especialistas, com atuação consolidada em modelagens aplicadas à área de interesse, perfis multidisciplinares que envolvem vínculos com universidades, empresas privadas e órgãos públicos, por meio de um questionário aplicado via *Google Forms*, visando uma compreensão mais precisa da relação de importância entre os critérios. A pesquisa foi devidamente aprovada pelo Comitê de Ética. Os valores finais atribuídos a cada critério, avaliados separadamente, estão apresentados na Tabela 4.

A Matriz de Importância Normalizada é obtida a partir a divisão entre o somatório total por dimensão/variável pela nota estabelecida na comparação par a par referente. E a prioridade Média Local (PML), cujo resultado demonstra o domínio de um critério (dimensão/variável) sobre o outro, é obtida pelas médias das colunas com os números normalizados.

No índice de perigo, os critérios de precipitação e manchas de inundação foram os que obtiveram maior peso, enquanto o CN recebeu a menor ponderação. Para o índice de exposição, a densidade populacional foi considerada o critério mais relevante, seguida pela renda mensal. Já as instalações educacionais e de saúde receberam pesos moderados e equivalentes. No que se refere ao índice de susceptibilidade, os edifícios residenciais apresentaram a maior importância, enquanto as edificações comerciais e outros tipos de construções obtiveram pesos iguais e inferiores. Por fim, no índice relacionado à capacidade de enfrentamento, destacou-se a capacidade institucional como o critério mais relevante.

Tabela 4 – Matriz de comparação par a par para os índices analisados e pesos.

Matriz De Importância							Matriz De Importância Normalizada							
							Índice de Perigo							
Dimensões	IP1	IP2	IP3	IP4	IP5	IP6	Dimensões	IP1	IP2	IP3	IP4	IP5	IP6	PML
IP1	1	1,00	3,00	0,33	1,00	0,33	IP1	0,11	0,14	0,19	0,04	0,25	0,08	13,37%
IP2	1,00	1	3,00	1,00	0,33	1,00	IP2	0,11	0,14	0,19	0,12	0,08	0,25	14,66%
IP3	0,33	0,33	1	0,33	0,33	0,33	IP3	0,04	0,05	0,06	0,04	0,08	0,08	5,81%
IP4	3,03	1,00	3,00	1	0,33	0,33	IP4	0,32	0,14	0,19	0,12	0,08	0,08	15,49%
IP5	1,00	3,00	3,00	3,00	1	1,00	IP5	0,11	0,41	0,19	0,35	0,25	0,25	25,83%
IP6	3,00	1,00	3,00	3,00	1,00	1	IP6	0,32	0,14	0,19	0,35	0,25	0,25	24,84%

Índice de Exposição

Dimensões	IE1	IE2	IE3	IE4
IE1	1	0,33	3,00	3,00
IE2	3,00	1	3,00	3,00
IE3	0,33	0,33	1	1,00
IE4	0,33	0,33	1,00	1
TOTAL	4,67	2,00	8,00	8,00

Dimensões	IE1	IE2	IE3	IE4	PML
IE1	0,21	0,17	0,38	0,38	28,27%
IE2	0,64	0,50	0,38	0,38	47,32%
IE3	0,07	0,17	0,13	0,13	12,20%
IE4	0,07	0,17	0,13	0,13	12,20%

Índice de Susceptibilidade

Dimensões	IS1	IS2	IS3
IS1	1	3,00	3,00
IS2	0,33	1	1,00
IS3	0,33	1,00	1
TOTAL	1,667	5,00	5,00

Dimensões	IS1	IS2	IS3	PML
IS1	0,60	0,60	0,60	60,00%
IS2	0,20	0,20	0,20	20,00%
IS3	0,20	0,20	0,20	20,00%

Índice de Capacidade de Enfrentamento

Dimensões	ICE1	ICE2	ICE3
ICE1	1	0,33	1,00
ICE2	3,00	1	3,00
ICE3	1,00	0,33	1
TOTAL	5,000	1,67	5,00

Dimensões	ICE1	ICE2	ICE3	PML
ICE1	0,20	0,20	0,20	20,00%
ICE2	0,60	0,60	0,60	60,00%
ICE3	0,20	0,20	0,20	20,00%

Fonte: A autora (2025).

4.4.3 Avaliação da Consistência

Neste tópico, são apresentados os resultados referentes ao grau de consistência na atribuição da importância relativa entre as dimensões e variáveis.

O índice de consistência é calculado para cada matriz através da expressão apresentada na Equação 5, a seguir:

$$IC = \frac{l_{max} - n}{(-1)} \quad \text{Equação 5}$$

Onde, n corresponde à dimensão da matriz; l_{max} é o autovalor máximo³, encontrado a partir da multiplicação da matriz original pelo autovetor máximo, que corresponde ao vetor da PML.

De posse do índice de consistência é calculada a Razão de Consistência através da expressão apresentada na Equação 6, sendo uma função do valor de IC e do Índice Randômico – IR que varia de acordo com a ordem da matriz (Tabela 5).

$$\text{Razão de Consistência} = \frac{IC}{\text{Índice Randômico (IR) para } n} \quad \text{Equação 6}$$

Onde, IC é o índice de consistência; IR é o índice randômico, que varia de acordo com a ordem da matriz conforme apresentado na (Tabela 4).

Tabela 5 - Índice Randômico (IR).

Ordem da Matriz	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
IR	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

Fonte: Saaty (2008).

³ O autovalor máximo representa o maior valor característico de uma matriz quadrada, utilizado no método AHP para avaliar a consistência dos julgamentos. Ele é obtido a partir da multiplicação da matriz original pelo autovetor correspondente e indica o grau de coerência da matriz, sendo igual a "n" em situações de total consistência.

Para aplicação da metodologia AHP, foi adotado um critério de consenso entre os especialistas entrevistados. As respostas foram inicialmente analisadas considerando a opção mais recorrente entre os participantes. Em seguida, foi realizada a verificação de consistência, conforme proposto por Saaty. Nos casos em que o nível de consistência não foi atingido, recorreu-se à matriz de um especialista sênior, cuja experiência e domínio sobre o tema justificam sua adoção como referência técnica. Após a realização das etapas anteriores, a Tabela 6 apresenta os índices de consistência obtidos para cada dimensão.

Tabela 6 – Razão de consistência para área de estudo.

Índice	Perigo	Exposição	Susceptibilidade	Capacidade de Enfrentamento
Razão de Consistência	9,21%	5,71%	0,0%	0,0%

Fonte: A Autora (2025).

É relevante destacar que, caso a razão de consistência seja inferior a 10%, a ponderação é considerada consistente, de acordo com a metodologia AHP. Porém, se o resultado for superior a esse limite, é recomendável realizar uma reavaliação dos graus de importância relativos entre os fatores analisados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo UFRI, aplicado neste estudo com o objetivo de avaliar a resiliência urbana frente a inundações, é estruturado em duas dimensões principais: sensibilidade e capacidade de enfrentamento, conforme apresentado na Figura 2. A primeira parte, referente à sensibilidade é avaliada por meio de três componentes principais: perigo, exposição e susceptibilidade. E a segunda parte, corresponde a capacidade de enfrentamento da comunidade para resistir, responder e se recuperar dos impactos de inundações. Todos esses fatores foram espacializados, ponderados a partir do método AHP, utilizando ferramentas de geoprocessamento e linguagem *Python*, possibilitando assim a geração dos mapas temáticos de cada índice.

5.1 SENSIBILIDADE

Dentro do contexto da resiliência a inundações urbanas, a primeira parte do modelo, conforme expresso na Equação 1, tem como objetivo representar o grau de sensibilidade da área de estudo em relação a esses eventos. Ela combina as dimensões de perigo (IP), exposição (IE) e susceptibilidade (IS) para avaliar o impacto que as inundações podem ter na área de estudo, semelhante à definição de risco. Quando considerada isoladamente, essa parte da equação oferece uma medida da sensibilidade da comunidade às inundações.

O índice de Perigo (IP) foi determinado a partir de seis elementos (modelo *hand*, uso e cobertura do solo, CN, declividade, precipitação e manchas de inundação), apresentados na Figura 3

e 4. O modelo *HAND*, mostra que as áreas com valores mais baixos (tons mais escuros) possuem menor elevação em relação ao curso d'água, portanto estão mais propensas ao acúmulo de água, sugerindo a intensificação da magnitude das inundações nas áreas baixas.

O uso e ocupação do solo em 2020, destaca a presença de grandes áreas urbanizadas e pavimentadas, especialmente na porção nordeste, que reduzem a infiltração e aumentam o escoamento superficial. Para a projeção do uso e ocupação do solo em 2080, destaca-se a expansão das áreas urbanas, refletindo o avanço da urbanização impulsionado por pressões demográficas, expansão econômica e desenvolvimento de infraestrutura.

Os valores de CN, indicador diretamente relacionado ao potencial de escoamento, são relativamente altos em toda a área de estudo. As áreas com CN mais altos (em vermelho) indicam maior impermeabilização e, portanto, maior risco de geração de escoamento superficial. Esses locais coincidem com zonas de urbanização intensa.

A declividade do terreno varia entre 0 e 22%, com a maior parte da área em baixa declividade (em verde claro). As partes baixas da região que engloba áreas planas e com declive moderada apresentam maior vulnerabilidade a inundações, em contraste com as áreas de elevada altitude e declive acentuado. A inclinação do terreno pode afetar a velocidade com que a água flui e a quantidade de água que pode ser absorvida pelo solo, o que pode afetar o risco de inundações. Em áreas com declives acentuados, a água pode fluir mais rapidamente, aumentando o risco de erosão nas encostas e inundações nas partes baixas. É importante notar que estas áreas planas são particularmente mais suscetíveis a inundações.

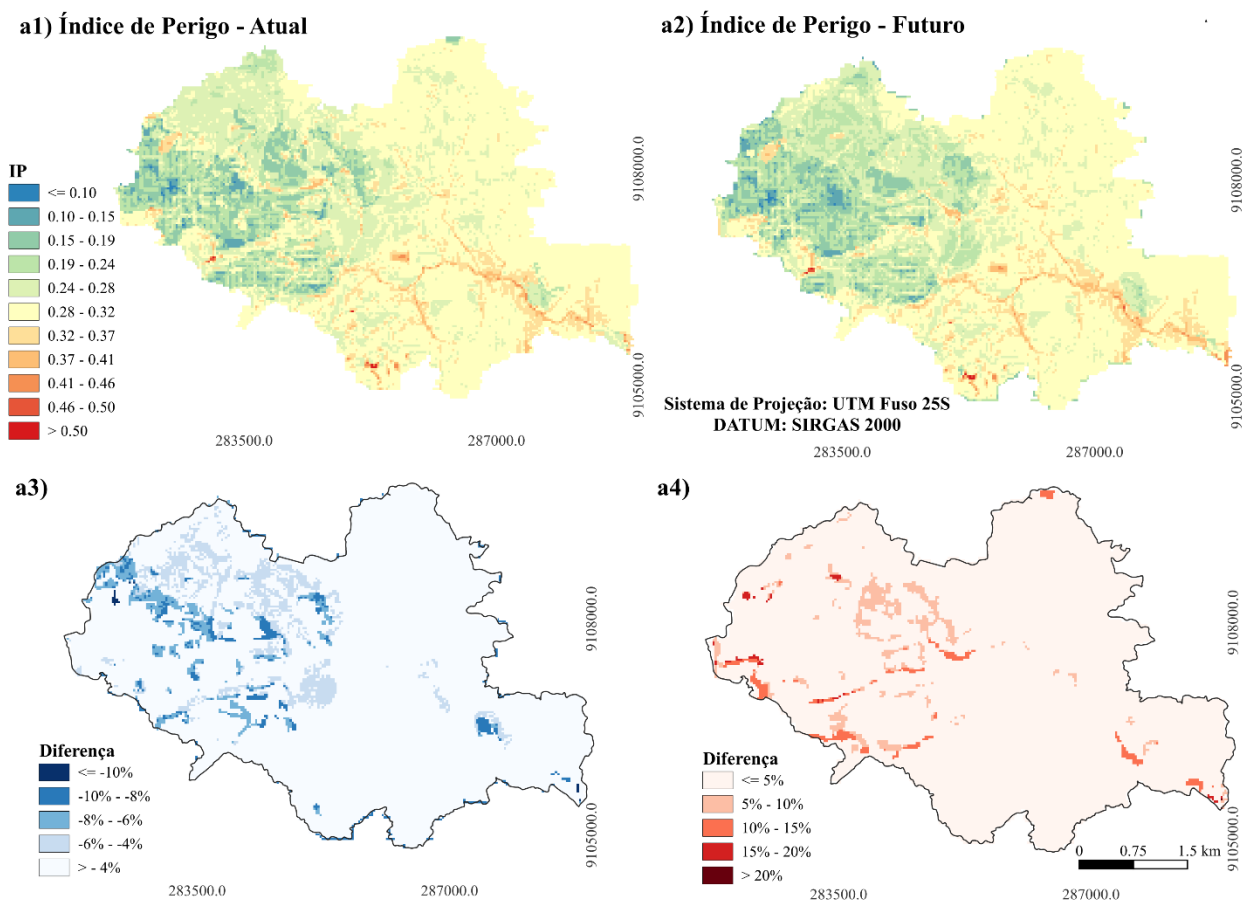
Em relação aos dados de precipitação, o regime pluviométrico de Recife revela uma característica sazonal em suas precipitações ao longo do ano. A precipitação média anual na cidade é de aproximadamente 2300 mm. O quadrimestre mais chuvoso ocorre entre os meses de abril a julho, com os meses de junho e julho destacando-se como os mais chuvosos. Por outro lado, os meses de outubro e novembro são os mais secos, com menores valores de precipitação. Essa sazonalidade nas chuvas sugere um regime pluviométrico caracterizado por uma estação chuvosa mais intensa durante a metade do ano, seguida por uma estação seca no final do ano e início do ano seguinte.

A máxima precipitação em cinco dias consecutivos (RX5day) apresenta um aumento significativo para a área de estudo nos cenários futuros de curto, médio e longo prazo, tanto no cenário intermediário de emissões (SSP2-4.5) quanto, de forma ainda mais acentuada, no cenário de altas emissões (SSP5-8.5). Esse padrão é observado em todos os períodos e cenários analisados, indicando uma tendência de intensificação dos eventos de precipitação acumulada em cinco dias. De forma similar, o PBMC (2016) identificou uma leve tendência de aumento nas chuvas intensas em Recife, representadas pelos índices RX1day e RX5day.

Por fim, em relação as manchas de inundação, derivadas da modelagem hidrodinâmica realizada, as áreas em vermelho apontam maior frequência e intensidade de alagamentos. Essas regiões estão geralmente associadas a zonas de baixa elevação, alta densidade urbana e maior impermeabilidade do solo.

A integração dessas variáveis no ambiente SIG, ponderadas por meio do método AHP, permitiram gerar o índice de perigo de inundação, apresentado na Figura 8 (a1) e (a2), para o cenário atual e futuro, respectivamente, além das respectivas variações percentuais entre esses cenários (a3 e a4). Para ambos os cenários, a análise espacial indica que a porção nordeste da bacia concentra as áreas com maior potencial de risco, especialmente nas proximidades dos cursos d'água, enquanto o sudoeste apresenta menor risco, provavelmente associada ao uso e cobertura do solo mais diversificado com presença de florestas e outros usos.

Figura 8- Índice de Perigo para a bacia do Rio Jiquiá-PE.



Fonte: A autora (2025).

Essa intensificação para o cenário futuro está relacionada, principalmente, ao aumento da intensidade de eventos extremos de precipitação (Rx5Day) e à expansão urbana sobre áreas potencialmente mais vulneráveis. As diferenças percentuais negativas (a3) indicam redução do IP em

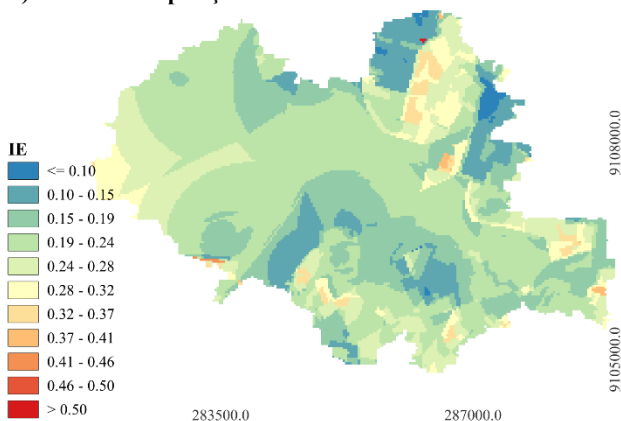
algumas regiões, possivelmente associadas a mudanças na cobertura do solo. Por outro lado, o mapa de diferenças positivas (a4) revela um padrão mais expressivo e espacialmente contínuo de aumento do IP, sobretudo nas áreas próximas aos cursos d'água, sinalizando áreas críticas que demandam atenção em estratégias de adaptação e planejamento territorial. A análise conjunta evidencia que, mesmo com certa estabilidade na distribuição espacial do índice, o cenário futuro aponta para o agravamento das condições de risco em setores específicos da bacia.

Esses resultados corroboram com a literatura, evidenciando que a combinação de alta urbanização (resultando em mais áreas impermeáveis e maior escoamento), baixas declividades (dificultando a drenagem) e maiores precipitações (aumentando o volume de água) cria condições propícias para a ocorrência e maior perigo de inundações em áreas urbanas (Zhu *et al.*, 2023; Wijayawardana *et al.*, 2023).

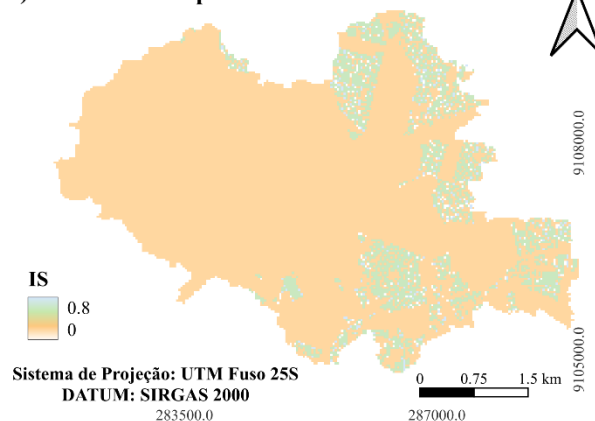
O índice de exposição está relacionado à probabilidade de que a área de estudo seja afetada, direta ou indiretamente, por eventos de inundação. Neste estudo, a exposição foi avaliada com base em quatro elementos: renda anual, densidade populacional, número de estabelecimentos de saúde e de ensino (Figura 3), que combinados geram o índice de exposição apresentado na Figura 9 (b).

Figura 9 - Índice de Exposição e Susceptibilidade para a bacia do Rio Jiquiá-PE.

b) Índice de Exposição



c) Índice de Susceptibilidade



Fonte: A autora (2025).

A análise dos dados revela que a área apresenta baixo nível de renda e alta densidade populacional. Nesse contexto, a densidade populacional surge como um fator determinante para o aumento da exposição ao risco, uma vez que quanto maior a concentração de pessoas em uma determinada área, maior a vulnerabilidade ao risco de inundações. Essa realidade é ainda mais preocupante quando se considera a presença de grupos vulneráveis, como crianças menores de 14 anos e idosos acima de 65 anos, que são mais propensos a sofrer com os impactos físicos e emocionais causados por eventos extremos (Yang *et al.*, 2022).

O estudo sobre a resiliência urbana em Luján (Argentina) reforça essa perspectiva ao demonstrar que áreas periféricas, com condições socioeconômicas desfavoráveis e situadas próximas a cursos d'água, apresentaram níveis elevados de vulnerabilidade a inundações. Assim, as áreas com menor renda podem levar a uma menor capacidade de resistir, absorver, adaptar-se e recuperar-se dos efeitos de um perigo (Principi, 2020).

Além disso, observa-se a presença reduzida de instituições educacionais e unidades de saúde, o que aumenta a vulnerabilidade da população local. Essa combinação de fatores aponta para uma baixa conscientização sobre os riscos de inundação, o que contribui para intensificar a exposição das comunidades aos impactos desses eventos.

A educação aumenta a capacidade dos cidadãos de agir de forma autônoma em face do risco de inundações (Ro e Garfin, 2023). Isso significa que, ao entenderem os riscos e as medidas a serem tomadas, os indivíduos podem se proteger e minimizar os danos.

Já a presença de instalações de saúde adequadas pode reduzir a perda de vidas por meio de tratamento oportuno e eficaz. O número de hospitais e abrigos pode ser usado para avaliar a capacidade de uma comunidade para lidar com eventos de emergência (Cutter *et al.*, 2008; Liao *et al.*, 2012). Em contraposição, a escassez de unidades de saúde em uma comunidade aumenta a dificuldade da comunidade de se recuperar de desastres.

Em relação a susceptibilidade, foram considerados os elementos: edificações residenciais, comerciais e outras instituições, que podem incluir pontes, estradas, prédios do governo, bibliotecas públicas e parques, com índice obtido apresentado na Figura 10c. Embora todos os tipos de uso possam ser afetados por eventos extremos, neste estudo destaca-se a indicação de maior peso para edificações residenciais, por compreender que os impactos sobre elas têm consequências mais diretas e significativas para as comunidades locais.

As inundações nessas áreas residenciais costumam acarretar perda de bens materiais, interrupção da rotina familiar e, em muitos casos, deslocamento forçado de moradores durante a madrugada ou em momentos de vulnerabilidade. Situações como essa afetam especialmente famílias de baixa renda, que muitas vezes não possuem alternativas imediatas de abrigo ou recuperação de suas perdas. Assim, a presença significativa de moradias em zonas baixas, combinada à alta precipitação e à fragilidade da infraestrutura urbana, contribui diretamente para o aumento da susceptibilidade da região analisada.

Observa-se que determinadas regiões localizadas no norte e nordeste da área de estudo apresentam uma sobreposição de valores médios de exposição e perigo, destacando-se em tons quentes, o que representa maior risco de impacto em caso de eventos hidrológicos extremos. Nessas

mesmas regiões, indica-se a presença de média suscetibilidade, em virtude da ocupação por outras edificações.

Já na porção sudoeste, verifica-se um cenário com valores menores de índice de exposição e menor perigo associado, embora a susceptibilidade física ainda seja moderada a alta. Isso sugere que, mesmo com menor presença populacional ou infraestrutura, a ocupação de áreas suscetíveis, representa um fator de atenção, especialmente se houver expansão urbana futura sem planejamento.

As áreas mais próximas aos cursos d'água, indicam zonas críticas onde o risco de inundação é potencializado tanto pela presença de elementos expostos (população, infraestrutura) quanto pela localização em áreas naturalmente mais suscetíveis e sujeitas a eventos extremos.

É possível verificar que a vulnerabilidade além de estar correlacionada com a frequência/intensidade dos eventos, também considera como o território é ocupado. Nesses casos, a urbanização desordenada e a concentração de moradores em zonas específicas podem criar um maior índice de perigo mesmo em áreas consideradas menos propensas a inundações.

Portanto, a avaliação do risco em estudos relacionados a inundações demanda uma abordagem holística, que leve em consideração todos os componentes inerentes a esse risco. Isso implica avaliar a exposição ao perigo e, igualmente importante, a vulnerabilidade, esta última influenciada por uma série de fatores socioeconômicos e demográficos (Paranunzio *et al.*, 2022).

5.2 CAPACIDADE DE ENFRENTAMENTO

Na segunda parte do modelo, o índice de capacidade de enfrentamento foi obtido a partir da Equação 2 com os pesos definidos na Tabela 4. A capacidade de enfrentamento pode ser definida, como a habilidade de um sistema, seja ele uma comunidade, uma cidade ou um indivíduo, de lidar com perturbações, choques ou eventos adversos, mantendo suas funções essenciais e a capacidade de se adaptar e se recuperar.

Para analisar a capacidade de enfrentamento, foram analisados os elementos: capacidade econômica, institucional e status educacional. Esses elementos contribuem para a redução da vulnerabilidade e para o fortalecimento da capacidade das comunidades em lidar com as consequências das inundações.

A capacidade econômica reflete a disponibilidade de recursos financeiros da população, que influencia diretamente sua capacidade de se preparar para eventos extremos, responder a eles e se recuperar depois. Conforme apresentado anteriormente na Figura 7 (a), as regiões com valores mais altos (acima de 0,4) tendem a apresentar maior resiliência, enquanto as classes com valores menores estão mais vulneráveis economicamente.

Hamidi *et al.*, (2022) verificou que os domicílios com alta exposição a enchentes também possuem fraca capacidade econômica, e, portanto, apresentam baixos valores de resiliência para os indicadores de fontes de renda secundária e capacidade financeira para se recuperar. Isso ocorre principalmente porque as pessoas com menor capacidade econômica são muitas vezes forçadas a residir perto de rios em zonas de risco de inundação, onde a terra é comparativamente mais barata e, portanto, pode sofrer inundações mais frequentes.

Juntamente com as características geográficas e físicas das comunidades, as características socioeconômicas também determinam os riscos de inundação, afetando a exposição às inundações e os níveis de capacidade de enfrentamento das comunidades (Begg *et al.*, 2021).

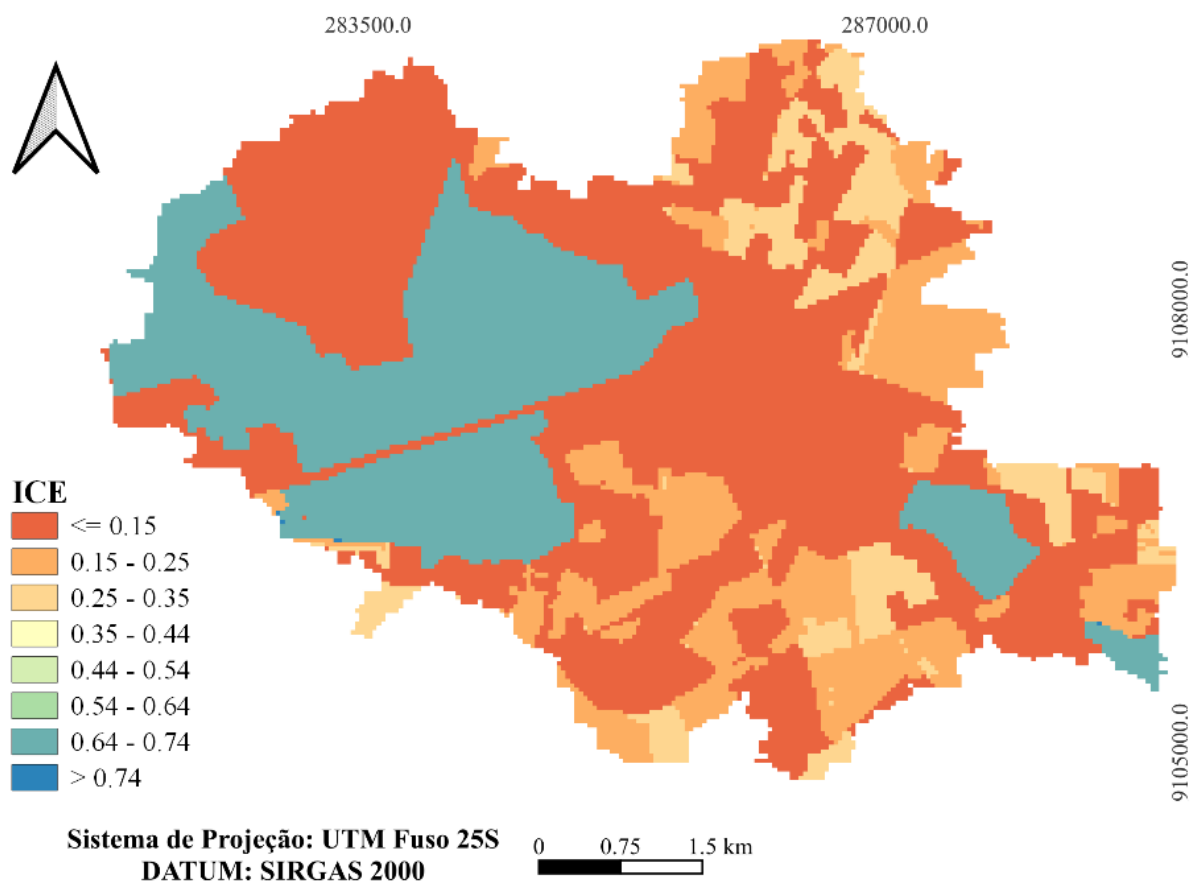
Para a capacidade institucional, neste estudo caracterizadas pelas Unidades de Conservação Natural, indica-se a presença de gestão ambiental formalizada, podendo representar infraestrutura de governança e capacidade institucional para implementar ações de adaptação ou mitigação. Destaca-se o programa “Recife Cidade Parque”, que objetiva estruturar a cidade através de parques reconectados às áreas verdes e com caminhos arborizados, ampliando a cobertura vegetal da cidade dos atuais 1,2 m² por habitante (estimativa do Projeto Parque Capibaribe) para 20 m² por habitante em 2037. Assim, espera-se que o Recife será um grande parque de convivência social com qualidade ambiental e qualidade de vida, contribuindo, portanto, para aumentar a sua capacidade de enfrentamento e conseqüentemente, a resiliência.

A educação está diretamente relacionada à capacidade adaptativa individual e coletiva. Assim, áreas com maior status educacional tendem a ter população mais informada, com maior potencial de engajamento em ações preventivas e maior compreensão de riscos. O analfabetismo afeta a capacidade da população de buscar a conscientização sobre os riscos de inundação, entender as medidas de precaução e adotar medidas preventivas e mitigadoras, o que acaba tornando-a mais suscetível aos impactos dos riscos de inundação (Hamidi *et al.*, 2022, Hamidi *et al.*, 2020). A capacidade de enfrentamento de uma comunidade requer conscientização contínua da população, daí a inclusão da taxa de alfabetização, observado por Langkulsen *et al.*, (2022).

É observado que a educação desempenha um papel importante na capacidade de adaptação das famílias às inundações. Aumentar o nível de educação dos membros da família pode aumentar sua capacidade de abordar, interpretar e usar informações de adaptação (Jiao *et al.*, 2020). Famílias com educação superior têm maior probabilidade de diversificar seus meios de subsistência para se adaptar às mudanças climáticas. Portanto, melhorar o acesso à educação formal (de melhor qualidade) é uma forma de aumentar a capacidade de enfrentamento e adaptação, pois melhora a capacidade das famílias de lidar com desastres (Ahmadi *et al.*, 2022).

Os resultados apresentados na Figura 10 evidenciam que grande parte da porção central e sudoeste da área de estudo apresentam baixa capacidade de enfrentamento (valores menores que 0,15). Isso sugere que essas regiões enfrentam condições piores para responder a eventos extremos. As áreas com a presença de UCNs, apresentam os melhores índices (acima de 0,70), especialmente em decorrência do maior peso atribuído a capacidade institucional. Nesse caso, a presença de áreas de conservação também está associada a possíveis benefícios ambientais indiretos, como a retenção de água e o controle de inundações.

Figura 10 - Índice de Capacidade de Enfrentamento para a bacia do Rio Jiquiá-PE.



Fonte: A autora (2025).

O enfrentamento a inundações requer uma abordagem integrada que envolva ações em múltiplos níveis. Entre as principais estratégias destacam-se: o fortalecimento da capacidade adaptativa institucional, através da implementação de organizações públicas locais e eficazes; estímulo à ação autônoma dos cidadãos por meio de planos e orientações claras (Ro e Garfin, 2023); o investimento combinado em medidas estruturais e não estruturais (Karrasch *et al.*, 2021).

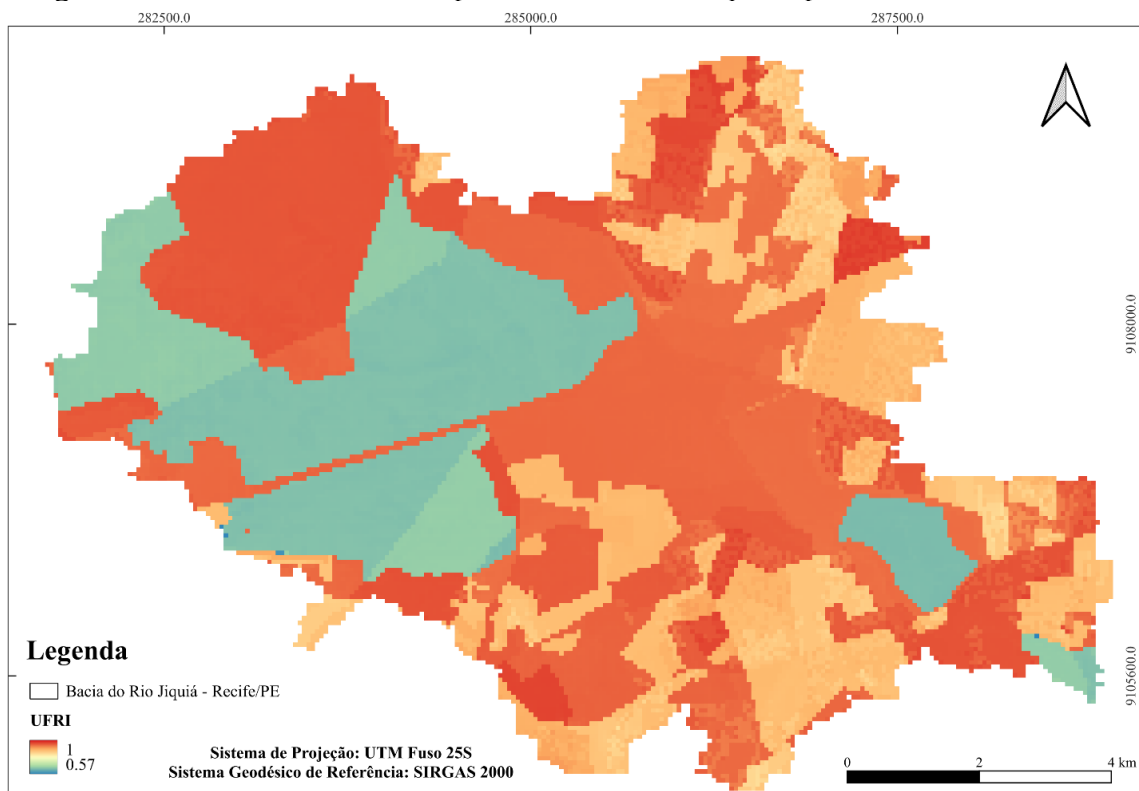
Também é essencial considerar a vulnerabilidade socioeconômica das populações afetadas, integrar a resiliência ao planejamento urbano (Ro e Garfin, 2023), incentivar mecanismos de

resiliência econômica, como poupança e seguros (Guragain e Doneys, 2022), e adotar soluções baseadas na natureza (SbN) (Mukherjee *et al.*, 2022), como a revitalização de rios urbanos. A gestão sustentável de bacias hidrográficas completa esse conjunto de ações, envolvendo a proteção das zonas ripárias, o controle da poluição e a implementação de práticas de manejo sustentável do solo, restauração das áreas de Preservação Permanente (Belluta *et al.*, 2020), exigindo coordenação entre governo, sociedade civil e setor privado para uma resposta eficaz e sustentável aos riscos de inundação.

5.3 RESILIÊNCIA A INUNDAÇÕES URBANAS

Para a geração do mapa final de resiliência, utilizou-se a linguagem *Python* para sobrepor os arquivos raster e aplicar a Equação 3, resultando em uma nova camada raster que representa a combinação das informações dos parâmetros básicos. Os mapas ponderados de perigo, exposição, suscetibilidade e capacidade de enfrentamento foram reclassificados, por meio de ferramentas de geoprocessamento, gerando o índice de resiliência a inundações urbanas UFRI, apresentado na Figura 11 a seguir.

Figura 11 - Índice de Resiliência para a bacia do rio Jiquiá a partir do modelo UFRI.



Fonte: A autora (2025).

O índice UFRI aplicado à Bacia do rio Jiquiá revela que os padrões espaciais de resiliência variam consideravelmente. As áreas centrais e porções ao sudoeste da bacia apresentam os menores

valores do índice, correspondendo às zonas de média resiliência, que somam uma pequena parcela da área total. Essas regiões estão associadas a uma maior capacidade de enfrentamento em decorrência da presença de UCNs, aliada a níveis relativamente menores de exposição e susceptibilidade.

Contudo, grande parte das regiões norte, nordeste e leste da bacia apresenta valores elevados de índice UFRI (acima de 0,80), indicando resiliência baixa a muito baixa. Essas áreas abrangem uma porção significativa da bacia e refletem altos níveis de exposição e susceptibilidade, além de uma capacidade de enfrentamento limitada frente a eventos de inundação urbana.

As zonas intermediárias (com valores entre 0,65 e 0,80), representam resiliência média-baixa e baixa, distribuindo-se de forma mais fragmentada, especialmente ao longo das transições entre as áreas mais resilientes e as menos resilientes. Essa distribuição espacial evidencia a vulnerabilidade da área, que pode ser crucial para o planejamento de ações direcionadas de mitigação e adaptação.

Assim, os elevados valores do índice de resiliência em determinadas áreas da região de estudo indicam baixa resiliência. Esse cenário é resultado da baixa capacidade de enfrentamento, associada a um alto grau de perigo, exposição e suscetibilidade, indicando que essas áreas não estão suficientemente preparadas para resistir adequadamente às inundações urbanas.

A Tabela 7 a seguir apresenta a quantificação das áreas por classe de resiliência, indicando que não existem áreas com a classe de resiliência Muito Alto-Alto, indicando que mais de 70% da bacia encontra-se em classe Baixo-Muito Baixo e Muito Baixo.

Tabela 7 - Quantificação de Áreas de resiliência por classificação.

Classe	Muito Alto	Alto	Médio	Médio-Baixo	Baixo	Baixo - Muito Baixo	Muito Baixo
Intervalo	0,0 – 0,25	0,25 – 0,50	0,50 – 0,60	0,60 – 0,70	0,70 – 0,80	0,80 – 0,90	0,90 – 1,00
Área (km²)	0	0	0,04	5,47	0	4,95	10,08

Fonte: A autora (2025).

Portanto, pode-se verificar que em termos de resiliência, um maior rendimento econômico está frequentemente associado a uma melhor capacidade de recuperação. Quando uma comunidade possui recursos financeiros substanciais, a sua capacidade de se recuperar de eventos adversos, como inundações, tende a ser mais robusta. Além disso, a capacidade de adaptação desempenha um papel significativo. Com uma capacidade limitada de adaptação, a comunidade pode considerar a assistência financeira e o nível de educação da comunidade como recursos valiosos para enfrentar as futuras inundações.

É importante observar que a resiliência não depende apenas da renda, mas também de fatores como o planejamento para desastres, acesso a recursos emergenciais e a resposta eficaz da

comunidade. Assim, a combinação de bom planejamento, capacidade adaptativa, recursos financeiros e educação pode fortalecer significativamente a resiliência de uma comunidade diante de desastres naturais, como as inundações.

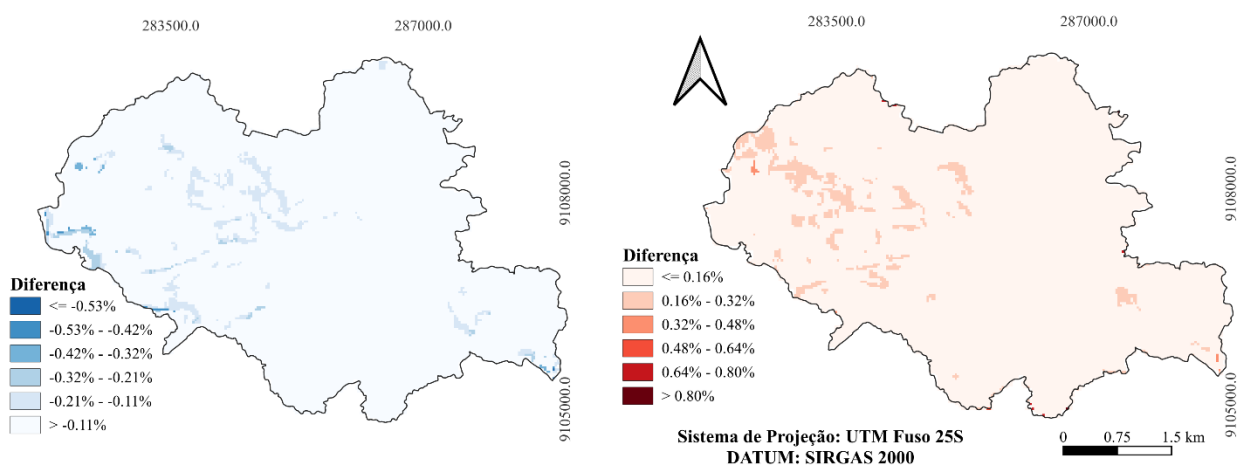
Dessa forma, o índice UFRI, se mostra uma ferramenta estratégica para a avaliação da resiliência urbana em situações de inundação, fornecendo informações sobre como diferentes comunidades ou localidades respondem a eventos adversos e destacando a importância de fortalecer a capacidade de enfrentamento em busca de uma maior resiliência.

Além disso, a identificação de escalas espaciais mais vulneráveis às inundações e das regiões onde essa vulnerabilidade pode ser mais facilmente reduzida oferece suporte aos tomadores de decisão, facilitando a priorização de medidas de proteção em níveis local e regional (Babanawo *et al.*, 2022).

Enfrentar esse desafio exige a integração de dados provenientes de diferentes áreas do conhecimento, o que é essencial no desenvolvimento de índices de vulnerabilidade. Dados secundários conseguem refletir as dimensões sociais e econômicas da resiliência a riscos hidrometeorológicos, podendo ser coletados a partir de diferentes departamentos, ministérios, órgãos públicos (Langkulsen *et al.*, 2022).

O índice UFRI também foi analisado para o cenário futuro. No entanto, como apenas o índice de perigo foi atualizado nesse contexto, o resultado final do UFRI não apresentou variações significativas. A Figura 12 mostra que as diferenças foram inferiores a 1%, tanto em termos de aumento quanto de redução da resiliência. Essa limitação decorre da elevada complexidade envolvida na projeção dos demais índices componentes do UFRI para cenários futuros, o que poderia introduzir incertezas significativas na análise.

Figura 12 – Diferença espacializada para o UFRI no cenário futuro.



Fonte: A autora (2025).

A Tabela 8 a seguir apresenta um conjunto de técnicas de drenagem urbana sustentável propostas para Recife que podem contribuir com a formação de cidades mais resilientes. Essas soluções, baseadas nos princípios da infraestrutura verde e azul, podem ser implementadas de forma integrada ao território urbano, contribuindo para o aumento da capacidade de enfrentamento das comunidades mais expostas e sensíveis aos riscos hidrometeorológicos.

Além das intervenções físicas, propõe-se também a colaboração ativa com a comunidade local, como parte fundamental do processo, visando o desenvolvimento de medidas eficazes, participativas e economicamente viáveis para a prevenção e mitigação de inundações nas regiões menos resilientes e altamente expostas dentro da área de estudo.

Tabela 8 – Técnicas compensatórias propostas como solução para uma cidade resiliente.

Técnica compensatória proposta	Contribuições	Recomendações
Pavimento Permeável (Coutinho, 2011; Marinho, 2018; Ferreira, 2017; Silva, 2022).	- Aumento das taxas de infiltração da camada de revestimento, resultando em respostas rápidas aos incrementos de precipitação; - Avaliação do desempenho hidrodinâmico em escala real, a fim de contribuir com a implantação real; - Caracterização do solo da área experimental; - Monitoramento dos níveis de água na área local e no pavimento permeável;	- Normativas com implementação de metodologias de dimensionamento; - Aplicação em larga escala desse tipo de solução sustentável. - Determinar a capacidade máxima de volume de acumulação do pavimento permeável; - Estudar o impacto do processo de colmatação no sistema e manutenção necessária.
Microrreservatórios de retenção em Lote (Ferreira, 2017).	- Aplicação de infraestruturas de baixo impacto aplicadas em uma bacia urbana, considerando microrreservatórios de retenção em lote	- Incentivo a aplicação de dispositivos de baixo impacto, como telhado verde, bacia de infiltração, trincheiras e valas de infiltração, entre outras.
Bacia de Detenção (Medeiros, 2022; Oliveira, 2017; Ferreira, 2017; Parisi, 2019).	- Aplicação de reservatório de retenção para controle de inundações e avaliação dos impactos no escoamento; - Compatibilização das áreas de inundação com o uso social da intervenção proposta, incentivando a participação de outras especialidades da comunidade local;	- Incentivo de parque ecológico, proporcionando benefícios socioambientais para o local, proporcionando uma área preservada para a população, promovendo a conscientização do riacho e mata ciliar local
Trincheira de Infiltração (Bezerra, 2018; Souza, 2018; Melo, 2015; Melo <i>et al</i> , 2016);	- Contribuição com a retenção e infiltração; - Constatação da importância econômica, social e ambiental das técnicas compensatórias em relação aos sistemas convencionais de drenagem.	- Realizar análises de qualidade de água a fim de verificar as contribuições para as águas subterrâneas.
Biovaletas (Santana, 2023)	- Avaliação da taxa de infiltração em campo; - Aplicação da técnica compensatória de biovaleta no SWMM;	- Analisar o uso combinado da biovaleta com outras técnicas compensatórias; - Analisar a biovaleta, como sistema de biorretenção a fim de possibilitar melhorias na qualidade da água subterrânea.
Telhados verdes (Kozmhinsky, 2018; Souza, 2019; Vilarim, 2022; Moura, 2023)	- Monitoramento do telhado verde existente, para análise de benefícios na temperatura e umidade relativa do ar; - Comparação com protótipo de telhado verde existente com indicação de retenção de 26,79% de todo volume precipitado; - Construção de telhado verde de baixo custo que seria destinado ao descarte para a sua	- Avaliar os efeitos dos telhados verdes e seus efeitos sobre o ambiente. - Aplicações em outras localidades e disseminação da técnica; - Análise dos custos de implantação, manutenção, acréscimo estrutural e comparação de coberturas vegetais nativas.

Técnica compensatória proposta	Contribuições	Recomendações
	reutilização, a fim de manter a sustentabilidade da técnica e seu valor de aquisição, montagem e manutenção acessível para famílias de baixa renda - Avaliação de parâmetros de mobilização de sedimentos e durabilidade do telhado verde;	- Incentivo para instalação de telhado verde composto por garrafas PET em escala real, em toda a superfície de uma cobertura familiar e o dimensionamento dos custos total com sua instalação e os impactos sociais e financeiros na família que o utiliza.
Jardim de Chuva (Barros, 2021; Barros et al, 2024; Parisi, 2019; Melo et al, 2014)	- Implantação de jardim de chuva no campo experimental; - Desempenho hidráulico e hidrológico da técnica compensatória jardim de chuva.	- Contemplar a modelagem ou a observação do funcionamento de sistemas de infiltração, considerando chuvas de projeto distribuídas no tempo; - Avaliação a longo prazo do desempenho hidrológico da técnica.

Fonte: A autora (2025).

6. CONCLUSÕES

A aplicação do modelo UFRI na bacia do rio Jiquiá permitiu identificar espacialmente os diferentes níveis de resiliência urbana frente a inundações, revelando que grande parte da área estudada se encontra em situação de vulnerabilidade. Os resultados evidenciam que regiões com alta densidade populacional, baixa renda e deficiências na infraestrutura apresentam os menores níveis de resiliência, o que reforça a importância de políticas públicas que integrem ações estruturais e não estruturais no enfrentamento a desastres naturais. Para o cenário futuro, evidencia-se o aumento no índice de perigo, mas que não foi expressivo para o índice final.

A utilização da metodologia AHP, aliada a ferramentas de geoprocessamento, demonstrou ser uma abordagem satisfatória e replicável, capaz de integrar múltiplos fatores e apoiar a tomada de decisão com base em evidências espaciais. Além disso, o estudo destaca o papel da capacidade institucional e da educação como componentes fundamentais para o fortalecimento da resiliência, apontando para a necessidade de investimentos em áreas prioritárias, como gestão ambiental, planejamento urbano e educação da população.

A proposta de uso de modelos multicritério e indicadores geoespaciais representa uma importante contribuição para o planejamento urbano resiliente, sendo particularmente relevante em cidades como Recife, que enfrentam desafios históricos relacionados à ocupação elevada e irregular, déficit de infraestrutura, vulnerabilidade social, falta de mecanismo avançado de alerta precoce, baixa conscientização pública.

Portanto, é fundamental adotar uma abordagem integrada, que contemple tanto medidas estruturais quanto estratégias não estruturais para o enfrentamento dos riscos hidrológicos. Isso inclui a implementação de técnicas compensatórias, o fortalecimento da capacidade institucional e

comunitária, e o estímulo ao planejamento urbano adaptativo, promovendo cidades mais resilientes, inclusivas e preparadas para lidar com os impactos das mudanças climáticas.

Além disso, a ampliação do acesso à educação, o fortalecimento da governança local e o incentivo à participação ativa da comunidade são elementos centrais para promover uma resiliência sistêmica e duradoura, capaz de transformar vulnerabilidades em oportunidades de adaptação e inovação urbana.

REFERÊNCIAS

- ABDRABO, K. I., KANTOUSH, S. A., ESMAIEL, A., SABER, M., SUMI, T., ALMAMARI, M., ELBOSHY, B., E GHONIEM, S. (2023). An integrated indicator-based approach for constructing an urban flood vulnerability index as an urban decision-making tool using the PCA and AHP techniques: A case study of Alexandria, Egypt. *Urban Climate*, 48. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101426>.
- AHMADI, S., MOVAHED, R. G., GHOLAMREZAIE, S., E RAHIMIAN, M. (2022). Assessing the Vulnerability of Rural Households to Floods at Pol-e Dokhtar Region in Iran. *Sustainability (Switzerland)*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/su14020762>
- ALMEIDA, L.Q.D.; ARAUJO, A.M.S.D.; WELLE, T.; BIRKMANN, J. (2020). DRIB Index 2020: Validating and enhancing disaster risk indicators in Brazil. *Int. J. Disaster Risk Reduct*, 42, 101346
- ALMEIDA, M. D. C., TELHADO, M. J., MORAIS, M., E BARREIRO, J. (2021). Multisector risk identification to assess resilience to flooding. *Climate*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/cli9050073>
- ASEFA, T.; KEMPER, T.; BRILL, E.; SMITH, J. (2014). A probabilistic framework for balancing reliability, resilience, and vulnerability: application to the Sacramento Water Supply System. *Water Resources Research*, v. 50, n. 7, p. 5912–5924. <https://doi.org/10.1002/2013WR014191>
- BABANAWO, D., MATTAH, P. A. D., AGBLORTI, S. K. M., BREMPONG, E. K., MATTAH, M. M., E AHETO, D. W. (2022). Local Indicator-Based Flood Vulnerability Indices and Predictors of Relocation in the Ketu South Municipal Area of Ghana. *Sustainability (Switzerland)*, 14(9). <https://doi.org/10.3390/su14095698>
- BARROS, E. N. (2021). Jardim de chuva: técnica em manejo de águas pluviais urbanas, alternativa mitigatória de alagamentos no espaço interno da Poli. Dissertação de Mestrado – Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 167p.
- BARROS, E. N., CABRAL, J. J. DA S. P., PALECHOR, E. U. L., TAVARES, P. R. L., MENEZES, L. A. A., E SILVA JUNIOR, M. A. B. (2024). Jardins de chuva para mitigação dos alagamentos urbanos: análise de um projeto piloto. *Revista Brasileira De Geografia Física*, 17(2), 1396–1411. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.2.p1396-1411>
- BASU, T., MONDAL, B. K., ABDELRAHMAN, K., FNAIS, M. S., E PRAHARAJ, S. (2023). Assessing Urban Flood Hazard Vulnerability Using Multi-Criteria Decision Making and Geospatial Techniques in Nabadwip Municipality, West Bengal in India. *Atmosphere*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/atmos14040669>

- BEGG, S. S., DE RAMON N'YEURT, A., E IESE, V. (2021). Integrated flood vulnerability assessment of villages in the Waimanu River Catchment in the South Pacific: the case of Viti Levu, Fiji. *Regional Environmental Change*, 21(3). <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01824-9>.
- BEHANZIN, I.D.; THIEL, M.; SZARZYNSKI, J.; BOKO, M. (2016). GIS-Based Mapping of Flood Vulnerability and Risk in the Bénin Niger River Valley. *Int. J. Geomat. Geosci*, 6, 1653–1669.
- BELLUTA, I.; VIEIRA, J.C.S.; RALL, V.L.M.; OLIVEIRA, V.A.; DOYAMA, J.T. (2020). Capacidade de resiliência de um rio urbano e suas implicações no desenvolvimento urbano do município de Botucatu (SP). *R. gest. sust. ambient.*, Florianópolis, v. 9, n. 1, p. 119-143, jan/mar. DOI: 10.19177/rgsa.v9e12020119-143
- BERTILSSON, L., WIKLUND, K., DE MOURA TEBALDI, I., REZENDE, O. M., VERÓL, A. P., E MIGUEZ, M. G. (2019). Urban flood resilience – A multi-criteria index to integrate flood resilience into urban planning. *Journal of Hydrology*, 573, 970–982. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.06.052>
- BEZERRA, P. H. L. (2018). Dinâmica da água em trincheira de infiltração em lote urbano. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Pernambuco. 87p.
- BOKJIN RO, GREGG GARFIN. (2023). Building urban flood resilience through institutional adaptive capacity: A case study of Seoul, South Korea. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Volume 85, 103474, ISSN 2212-4209. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.103474>.
- CERBARO, M., MORSE, S., MURPHY, R., MIDDLEMISS, S., E MICHELAKIS, D. (2022). Assessing Urban Vulnerability to Flooding: A Framework to Measure Resilience Using Remote Sensing Approaches. *Sustainability (Switzerland)*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/su14042276>
- CHANG, H., PALLATHADKA, A., SAUER, J., GRIMM, N. B., ZIMMERMAN, R., CHENG, C., IWANIEC, D. M., KIM, Y., LLOYD, R., MCPHEARSON, T., ROSENZWEIG, B., TROXLER, T., WELTY, C., BRENNER, R., E HERREROS-CANTIS, P. (2021). Assessment of urban flood vulnerability using the social-ecological-technological systems framework in six US cities. *Sustainable Cities and Society*, 68. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102786>
- CHEN, Y.-R.; YEH, C.-H.; YU, B. (2011). Integrated application of the analytic hierarchy process and the geographic information system for flood risk assessment and flood plain management in Taiwan. *Nat. Hazards*, 59, 1261–1276.
- CHIKOORE, H., BOPAPE, M. J. M., NDARANA, T., MUOFHE, T. P., GIJBEN, M., MUNYAI, R. B., MANYANYA, T. C., E MAISHA, R. (2021). Synoptic structure of a sub-daily extreme precipitation and flood event in Thohoyandou, north-eastern South Africa. *Weather and Climate Extremes*, 33. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100327>
- CIAN, F., GIUPPONI, C., E MARCONCINI, M. (2021). Integration of earth observation and census data for mapping a multi-temporal flood vulnerability index: a case study on Northeast Italy. *Natural Hazards*, 106(3), 2163–2184. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04535-w>
- COUTINHO, A. P. (2013). Pavimento permeável como técnica compensatória na drenagem urbana da cidade do Recife. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Pernambuco. 132p.

- CUTTER, S. A. (2008). Framework for Measuring Coastal Hazard Resilience in New Jersey Communities; White Paper for the Urban Coast Institute: West Long Branch, NJ, USA. Disponível em: <https://www.co.monmouth.nj.us/documents/104/CoastalHazardResilientCommunities.pdf>
- CUTTER, S.L.; BRYAN, B.J.; SHIRLEY, W.L. (2003). Social Vulnerability to Environmental Hazards. *Soc. Sci. Quart.*, 84, 242–261.
- EMBRAPA SOLOS. Sistema de Classificação de Solos do Brasil. 2009. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Recife-PE. Disponível em: <https://www.embrapa.br/solos/sibcs>
- EMLURB - Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana. (2016). Plano Diretor de Drenagem e Manejo das Águas Urbanas do Recife: Relatório do diagnóstico do sistema de drenagem existente. ABF Engenharia LTDA, Recife, 333p.
- ESIG – Sistema de Informação Geográfica do município do Recife-PE. ESIG Zoneamento Lei Complementar nº 02 de 24/04/2021. Disponível em: <https://esigportal2.recife.pe.gov.br/portal/apps/sites/#/esig>
- FERREIRA, E. C. (2017). Modelagem computacional com aplicação de técnicas de desenvolvimento de baixo impacto na bacia urbana do riacho Moxotó na cidade de Recife/PE. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Pernambuco. 90p.
- GHOSH, A.; KAR, S.K. (2018). Application of analytical hierarchy process (AHP) for flood risk assessment: A case study in Malda district of West Bengal, India. *Nat. Hazards*, 94, 349–368.
- GURAGAIN, U.P.; DONEYS, P. (2022). Social, Economic, Environmental, and Physical Vulnerability Assessment: An Index-Based Gender Analysis of Flood Prone Areas of Koshi River Basin in Nepal. *Sustainability*, 14, 10423. <https://doi.org/10.3390/su141610423>
- HAGOS, Y. G., ANDUALEM, T. G., YIBELTAL, M., E MENGIE, M. A. (2022). Flood hazard assessment and mapping using GIS integrated with multi-criteria decision analysis in upper Awash River basin, Ethiopia. *Applied Water Science*, 12(7). <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01674-8>
- HAMIDI, A. R., JING, L., SHAHAB, M., AZAM, K., TARIQ, M. A. U. R., E NG, A. W. M. (2022). Flood Exposure and Social Vulnerability Analysis in Rural Areas of Developing Countries: An Empirical Study of Charsadda District, Pakistan. *Water (Switzerland)*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/w14071176>
- HAMIDI, A. R., WANG, J., GUO, S., E ZENG, Z. (2020). Flood vulnerability assessment using MOVE framework: a case study of the northern part of district Peshawar, Pakistan. *Natural Hazards*, 101(2), 385–408. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03878-0>
- HAQUE, M.N.; SIDDIKA, S.; SRESTO, M.A.; SAROAR, M.M.; SHABAB, K.R. (2021). Geo-spatial analysis for flash flood susceptibility mapping in the North-East Haor (Wetland) Region in Bangladesh. *Earth Syst. Environ*, 5, 365–384
- HARRISON, C. G., E WILLIAMS, P. R. (2016). A systems approach to natural disaster resilience. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 65, 11–31. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2016.02.008>
- HASHIMOTO, T.; STEDINGER, J. R.; LOUCKS, D. P. (1982). Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resources Research*, v. 18, n. 1, p. 14–20. <https://doi.org/10.1029/WR018i001p00014>

- HEWAWASAM, V., E MATSUI, K. (2022). Assessing Community Perceptions on Urban Flood Resilience in Sri Lanka. *Geosciences* (Switzerland), 12(11). <https://doi.org/10.3390/geosciences12110406>
- HOQ, M. S., RAHA, S. K., E HOSSAIN, M. I. (2021). Livelihood Vulnerability to Flood Hazard: Understanding from the Flood-prone Haor Ecosystem of Bangladesh. *Environmental Management*, 67(3), 532–552. <https://doi.org/10.1007/s00267-021-01441-6>
- HOQUE, M. A. A., TASFIA, S., AHMED, N., E PRADHAN, B. (2019). Assessing spatial flood vulnerability at kalapara upazila in Bangladesh using an analytic hierarchy process. *Sensors* (Switzerland), 19(6). <https://doi.org/10.3390/s19061302>
- HOUNKPÈ, J., BADOU, D. F., AHOUANSON, D. M. M., TOTIN, E., E SINTONDI, L. O. C. (2022). Assessing observed and projected flood vulnerability under climate change using multi-modeling statistical approaches in the Ouémé River Basin, Benin (West Africa). *Regional Environmental Change*, 22(4). <https://doi.org/10.1007/s10113-022-01957-5>
- IKIRRI, M., FAIK, F., ECHOGDALI, F. Z., ANTUNES, I. M. H. R., ABIOUI, M., ABDELRAHMAN, K., FNAIS, M. S., WANAIM, A., ID-BELQAS, M., BOUTALEB, S., SAJINKUMAR, K. S., E QUESADA-ROMÁN, A. (2022). Flood Hazard Index Application in Arid Catchments: Case of the Taguenit Wadi Watershed, Lakhssas, Morocco. *Land*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/land11081178>
- IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844. Disponível em: https://report.ipcc.ch/ar6/wg2/IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf. Acesso em: novembro/2023.
- IWANIEC, D. M., COOK, E. M., DAVIDSON, M. J., BERBÉS-BLÁZQUEZ, M., E GRIMM, N. B. (2020). Integrating existing climate adaptation planning into future visions: A strategic scenario for the central Arizona–Phoenix region. *Landscape and Urban Planning*, 200. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103820>
- JIAO, X.; ZHENG, Y.; LIU, Z. (2020). Three-stage quantitative approach of understanding household adaptation decisions in rural Cambodia. *Int. J. Clim. Chang. Strateg. Manag.*, 12, 39–58.
- KARRASCH, L., RESTEMEYER, B., E KLENKE, T. (2021). The ‘Flood Resilience Rose’: A management tool to promote transformation towards flood resilience. *Journal of Flood Risk Management*, 14, e12726. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12726>
- KIENBERGER, S., CONTRERAS, D., E LANG, S.. (2010). Regions of vulnerability: Spatial modelling of different conceptual approaches. <http://www.brahmatwinn.uni-jena.de/> Disponível em: https://gis2010.org/pdfs/paper_241.pdf
- KOZMHINSKY, M. (2018). Avaliação de fatores climatológicos no telhado verde de edificação no bairro do Recife. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal Rural de Pernambuco, 68p.
- LANGKULSEN, U., RWODZI, D. T., CHEEWINSIRIWAT, P., NAKHAPAKORN, K., E MOSES, C. (2022). Socio-Economic Resilience to Floods in Coastal Areas of Thailand. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(12). <https://doi.org/10.3390/ijerph19127316>

- LI, Z., ZHANG, X., MA, Y., FENG, C., E HAJIYEV, A. (2019). A multi-criteria decision making method for urban flood resilience evaluation with hybrid uncertainties. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 36. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2019.101140>
- LIAO, K.; KUEI, H. (2012). A Theory on Urban Resilience to Floods—A Basis for Alternative Planning Practices. *Ecol. Soc.*, 17, 48.
- MARINHO, M. N. (2018). Experimentação e simulação da infiltração da água pluvial em um pavimento permeável. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Pernambuco. 128p.
- MEDEIROS, E. L. C. (2022). Modelagem computacional do Riacho Sítio dos Pintos no Recife/PE incluindo os efeitos de técnicas compensatórias. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Pernambuco. 112p.
- MELO, T. (2015). Avaliação hidrodinâmica de trincheira de infiltração no manejo das águas pluviais urbanas. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Pernambuco. 136p.
- MELO, T. DOS A. T. DE; COUTINHO, A. P.; CABRAL, J. J. DA S. P.; ANTONINO, A. C. D.; CIRILO, J. A. (2014). Jardim de chuva: sistema de biorretenção para o manejo das águas pluviais urbanas. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 147-165. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
- MELO, T. DOS A. T. DE; COUTINHO, A. P.; SANTOS, J. B. F. DOS; CABRAL, J. J. DA S. P.; ANTONINO, A. C. D.; LASSABATERE, L. Trincheira de infiltração como técnica compensatória no manejo das águas pluviais urbanas. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 16, n. 3, p. 53-72, jul./set. 2016. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212016000300092>
- MIGUEZ, M. G., E VERÓL, A. P. (2017). A catchment scale Integrated Flood Resilience Index to support decision making in urban flood control design. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 44(5), 925-946. <https://doi.org/10.1177/0265813516655799>.
- MIRANDA, F., FRANCO, A. B., REZENDE, O., DA COSTA, B. B. F., NAJJAR, M., HADDAD, A. N., E MIGUEZ, M. (2023). A GIS-Based Index of Physical Susceptibility to Flooding as a Tool for Flood Risk Management. *Land*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/land12071408>.
- MOURA REZENDE, O., RIBEIRO DA CRUZ DE FRANCO, A. B., BELEÑO DE OLIVEIRA, A. K., PITZER JACOB, A. C., E GOMES MIGUEZ, M. (2019). A framework to introduce urban flood resilience into the design of flood control alternatives. *Journal of Hydrology*, 576, 478–493. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.063>
- PADHAN, N., E MADHESWARAN, S. (2023). An integrated assessment of vulnerability to floods in coastal Odisha: a district-level analysis. *Natural Hazards*, 115(3), 2351–2382. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05641-z>
- PAN, W., YAN, M., ZHAO, Z., E GULZAR, M. A. (2023). Flood Risk Assessment and Management in Urban Communities: The Case of Communities in Wuhan. *Land*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/land12010112>
- PARANUNZIO, R., GUERRINI, M., DWYER, E., ALEXANDER, P. J., E O'DWYER, B. (2022). Assessing Coastal Flood Risk in a Changing Climate for Dublin, Ireland. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/jmse10111715>

- PARISI, S. A. (2019). Análise da capacidade de infiltração para atenuação de alagamento em um ponto crítico na cidade do Recife. Dissertação de Mestrado – Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 151p
- PE3D - Pernambuco Tridimensional. Mapeamento do Território Pernambucano. Agência Pernambucana de Águas e Climas – APAC, 2023.
- PRINCIPI, N. (2020). Evaluación espacial de la resiliencia urbana frente a inundaciones en Luján (Buenos Aires, Argentina). Boletín geográfico, 42(2), 109-126.
- QI, W., MA, C., XU, H., ZHAO, K., E CHEN, Z. (2022). A comprehensive analysis method of spatial prioritization for urban flood management based on source tracking. In Ecological Indicators (Vol. 135). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108565>.
- ROACH, T.; RISTROPH, E.; SINGH, R.; MISHRA, A. (2018). A resilience-based approach to the planning of water resources systems under deep uncertainty. Water Resources Management, v. 32, p. 5071–5086. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-1914-8>
- SAATY, T. L. (1972). An Eigenvalue Allocation Model in Contingency Planning. University of Pennsylvania 19: 72.
- SAATY, T. L. (2008). Relative Measurement and Its Generalization in Decision Making-Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors The Analytic Hierarchy/Network Process (To the Memory of my Beloved Friend Professor Sixto Rios Garcia). Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas Físicas y Naturales Serie a-Matemáticas, 102(2): 251-318.
- SANTANA, K. C. S. (2023). Simulação do uso de biovaletas para retardar o escoamento superficial. Dissertação de Mestrado – Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 166p.
- SERDAR, M. Z., AJJUR, S. B., E AL-GHAMDI, S. G. (2022). Flood Susceptibility Assessment in Arid Areas: A Case Study of Qatar. Sustainability (Switzerland), 14(15). <https://doi.org/10.3390/su14159792>
- SHUAIBU, A., HOUNKPÈ, J., BOSSA, Y. A., E KALIN, R. M. (2022). Flood Risk Assessment and Mapping in the Hadejia River Basin, Nigeria, Using Hydro-Geomorphologic Approach and Multi-Criterion Decision-Making Method. Water (Switzerland), 14(22). <https://doi.org/10.3390/w14223709>
- SILVA, A. K. B. DA. (2022). Análise do desempenho de estruturas de pavimentos permeáveis implantadas no estacionamento da Escola Politécnica (POLI-UPE). Dissertação de Mestrado – Universidade de Pernambuco, 172p.
- SKOULLOUDIS, A., LEAL FILHO, W., VOUIROS, P., EVANGELINOS, K., NIKOLAOU, I., DELIGIANNAKIS, G., E TSALIS, T. (2023). Assessing Greek small and medium-sized enterprises' flood resilience capacity: Index development and application. Journal of Flood Risk Management, 16(1). <https://doi.org/10.1111/jfr3.12858>
- SOUZA, A. C. L. A. (2019). Avaliação do escoamento superficial após a implementação de telhados verdes em Recife-PE. Dissertação de Mestrado – Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 71p.

- SOUZA, V. G. A. (2018). Implantação, monitoramento e simulação de uma trincheira de infiltração em uma bacia urbana na cidade do Recife. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Pernambuco. 117p.
- SUN, R., SHI, S., REHEMAN, Y., E LI, S. (2022). Measurement of urban flood resilience using a quantitative model based on the correlation of vulnerability and resilience. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 82, 103344. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103344>
- TAYYAB, M., ZHANG, J., HUSSAIN, M., ULLAH, S., LIU, X., KHAN, S. N., BAIG, M. A., HASSAN, W., E AL-SHAIBAH, B. (2021). Gis-based urban flood resilience assessment using urban flood resilience model: A case study of peshawar city, khyber pakhtunkhwa, pakistan. *Remote Sensing*, 13(10). <https://doi.org/10.3390/rs13101864>
- TEBALDI, I., MIGUEZ, M., BATTEMARCO, B.O., REZENDE, O.M., VERÓL, A.P., (2015). Resilience index for flood events: Joana river catchment study case, Rio de Janeiro, RJ. XXI Simpósio Bras. Recur. Hídricos 1–8.
- VERÓL, A. P., BATTEMARCO, B. P., MERLO, M. L., MACHADO, A. C. M., HADDAD, A. N., E MIGUEZ, M. G. (2019). The urban river restoration index (URRIX) - A supportive tool to assess fluvial environment improvement in urban flood control projects. *Journal of Cleaner Production*, 239, 118058. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118058>
- VILARIM, M. B. (2022). Desempenho térmico de telhado verde de baixo custo em região de clima tropical úmido. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Pernambuco. 139p.
- WANG, L., CUI, S., LI, Y., HUANG, H., MANANDHAR, B., NITIVATTANANON, V., FANG, X., E HUANG, W. (2022). A review of the flood management: from flood control to flood resilience. In *Heliyon* (Vol. 8, Issue 11). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11763>
- WANG, P., LI, Y., E ZHANG, Y. (2021). An urban system perspective on urban flood resilience using SEM: evidence from Nanjing city, China. *Natural Hazards*, 109(3), 2575–2599. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04933-0>
- WANG, Y., MENG, F., LIU, H., ZHANG, C., E FU, G. (2019). Assessing catchment scale flood resilience of urban areas using a grid cell based metric. *Water Research*, 163. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.114852>
- WICKRAMASINGHE, D.; CHOWDHOOREE, I.; CHIMI, C.; POUDEL, S.; MISHRA, B.; ALI, Z.F.; SHAW, R. (2022). Nature-Based Resilience: Experiences of Five Cities from South Asia. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 19, 11846. <https://doi.org/10.3390/ijerph191911846>
- WIJAYAWARDANA, N.; ABENAYAKE, C.; JAYASINGHE, A.; DIAS, N. (2023). An Urban Density-Based Runoff Simulation Framework to Envisage Flood Resilience of Cities. *Urban Sci.*, 7, 17. <https://doi.org/10.3390/urbansci7010017>
- WU, C. F., CHEN, S. H., CHENG, C., E TRAC, L. V. T. (2021). Climate justice planning in global south: Applying a coupled nature-human flood risk assessment framework in a case for ho chi minh city, Vietnam. *Water (Switzerland)*, 13(15). <https://doi.org/10.3390/w13152021>
- WU, T. (2021). Quantifying coastal flood vulnerability for climate adaptation policy using principal component analysis. *Ecological Indicators*, 129. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108006>

YANG, F.; XIONG, S.; OU, J.; ZHAO, Z.; LEI, T. (2022). Human Settlement Resilience Zoning and Optimizing Strategies for River-Network Cities under Flood Risk Management Objectives: Taking Yueyang City as an Example. *Sustainability*, 14, 9595. <https://doi.org/10.3390/su14159595>

ZHENG, J., E HUANG, G. (2023). Integrating resilience into an urban flood risk assessment framework: a case study of the Minzhi region, Shenzhen City. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 37(3), 1183–1197. <https://doi.org/10.1007/s00477-022-02325-9>

ZHU, S., LI, D., FENG, H., E ZHANG, N. (2023). The influencing factors and mechanisms for urban flood resilience in China: From the perspective of social-economic-natural complex ecosystem. *Ecological Indicators*, 147. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.109959>

ZHU, S., LI, D., HUANG, G., CHHIPI-SHRESTHA, G., NAHIDUZZAMAN, K. M., HEWAGE, K., SADIG, R. (2021). Enhancing urban flood resilience: A holistic framework incorporating historic worst flood to Yangtze River Delta, China. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 61. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102355>

ZOU, Q.; ZHOU, J.; ZHOU, C.; SONG, L.; GUO, J. (2013). Comprehensive flood risk assessment based on set pair analysis-variable fuzzy sets model and fuzzy AHP. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess*, 27, 525–546.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta tese combinou análise institucional, projeções climáticas, modelagem preditiva de uso do solo, simulação hidrodinâmica e um índice especializado de resiliência para avaliar, de forma abrangente e integrada, a vulnerabilidade do Recife às inundações, com ênfase na bacia do rio Jiquiá.

O diagnóstico inicial revelou que a resiliência urbana em Recife precisa de uma abordagem integrada para lidar com o risco de inundações, combinando três frentes de resiliência: engenharia, ecológica e socioecológica. A participação da população articulada com o poder público e privado integrada com a pesquisa contínua e capacitação técnica são fundamentais para garantir a resiliência da cidade e auxiliar também a adaptar-se e prosperar diante das mudanças climáticas e da urbanização acelerada.

Ao avaliar as mudanças climáticas, foram selecionados modelos climáticos globais do CMIP6, realizada a correção de viés com o Método *Quantile Mapping* e com auxílio de índices estatísticos, selecionado o modelo MIROC6. Assim, foram atualizadas as curvas IDF em diferentes cenários de tempo (curto, médio e longo prazo). Os resultados indicam redução significativa na precipitação total anual, especialmente no cenário mais pessimista (SSP5-8.5), onde a redução pode chegar a 31% em comparação aos dados históricos. Além disso, observa-se uma tendência de diminuição na frequência e intensidade das chuvas intensas diárias, enquanto eventos de precipitação extrema em períodos de cinco dias consecutivos mostram um aumento significativo.

Esse regime de precipitação projetado, com chuvas menos frequentes, porém mais concentradas, eleva o risco de sobrecarga da drenagem urbana, como evidenciado pelas curvas IDF

atualizadas, que apontam intensidades maiores do que as que dimensionaram a infraestrutura existente. Tais resultados reforçam a necessidade de adequar sistemas de drenagem e de selecionar cuidadosamente os modelos climáticos mais representativos para orientar decisões locais em uma cidade já altamente vulnerável a extremos climáticos.

Os impactos nas inundações, estão associadas as mudanças climáticas, mas também sofrem a influência do uso e ocupação do solo. Assim, a modelagem preditiva do uso do solo para Recife, mostrou expansão urbana contínua até 2080, com relativa estabilização da cobertura florestal após 2050, e manguezais e corpos hídricos estáveis, mas sob pressão crescente, reforçando a necessidade de preservar áreas de preservação e implementar infraestrutura verde em novas frentes de expansão.

Recomenda-se atualizar a Lei de Uso do Solo para preservar zonas verdes e criar zonas de amortecimento ambiental; rever o Plano Diretor de Drenagem (2026) incorporando infraestrutura verde e azul e técnicas de drenagem urbana sustentável; assim como monitoramento da impermeabilização do solo. Essas ações são essenciais para conciliar crescimento econômico, conservação ambiental e adaptação climática, orientando um desenvolvimento urbano mais resiliente e sustentável.

Os cenários de uso de solo e mudanças climáticas foram integrados a um modelo hidrodinâmico 2D do HEC-RAS calibrado com ajustes nos valores de coeficiente de *Manning* espacializados na bacia do rio Jiquia por classe de uso do solo e redução de até 20% no valor do CN, alcançando estatísticas de desempenho bom a ótimo.

Nos cenários projetados (uso do solo 2080 × IDF futura), a área total inundada manteve-se quase constante, mas a severidade cresceu: para TR = 25 anos, as faixas de lâmina “Muito Alto” (1,0–1,5 m) e “Crítico” (> 1,5 m) aumentaram 15 % e 4,8 %; para TR = 50 anos, 21 % e 159 %; e para TR = 100 anos, 50 % e 54 %. Tais resultados confirmam que tanto a intensificação pluviométrica quanto o avanço da impermeabilização elevam o risco, exigindo revisão dinâmica do zoneamento, sistemas de drenagem resilientes, rotas de evacuação pré-definidas e integração de planos de emergência em múltiplas escalas.

Por fim, o Índice de Resiliência a Inundações (UFRI), associado a análise multicritério e geoprocessamento consolidou os índices de perigo, exposição, susceptibilidade e capacidade de enfrentamento. Mais de 70 % da bacia apresentou classes Baixo a Muito Baixo de resiliência, concentradas no norte, nordeste e leste, onde coexistem alta densidade populacional, elevada susceptibilidade física e limitada resposta institucional. A reavaliação para o cenário futuro exibiu variação inferior a 1 %, pois apenas o componente perigo foi projetado; a inclusão prospectiva dos demais componentes esbarrou em incertezas metodológicas, constituindo oportunidade para trabalhos futuros.

A abordagem integrada que envolve modelos climáticos, projeção de uso do solo, hidrodinâmica 2D e UFRI geoespacial, provou ser replicável e útil para priorizar investimentos em gestão ambiental, planejamento urbano adaptativo e mecanismos de alerta precoce, transformando vulnerabilidades históricas de Recife em oportunidades de adaptação e inovação urbana.

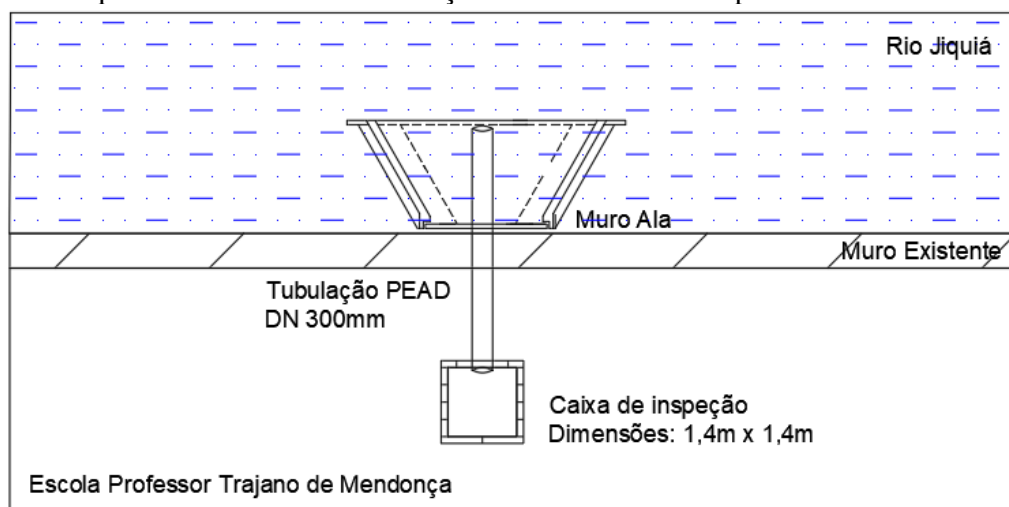
Conjuntamente, os resultados confirmam a hipótese de que o conhecimento hidrológico e hidrodinâmico, integrado a cenários climáticos, dinâmicas de uso do solo e modelagem aprimora a identificação de áreas urbanas vulneráveis e fundamenta estratégias eficazes de resiliência.

APÊNDICE A – ARTIGO 4: IMPACTOS DO USO FUTURO DO SOLO E DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA DINÂMICA DE INUNDAÇÕES EM PLANÍCIE URBANA.

Para realizar o monitoramento do nível do rio Jiquiá, com o objetivo de obter informações sobre seu comportamento em diferentes períodos (chuvoso e seco), foi instalada uma estação de monitoramento nas proximidades da calha do rio Jiquiá, nos fundos da Escola de Referência em Ensino Médio Professor Trajano de Mendonça, situada na Rua Capetinga, Jardim São Paulo, Recife – PE.

A instalação ocorreu em parceria com a Prefeitura da cidade do Recife, através da Autarquia de Manutenção e Limpeza Urbana do Recife (EMLURB), em abril de 2023. Essa estação de monitoramento consistiu na construção de um caixa de passagem com dimensões de 1,40 m x 1,40 m e 2,50m de profundidade, com comunicação com o rio através de uma tubulação PEAD – DN 300mm, entre a calha do rio e a caixa de passagem, onde foi instalado o sensor, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Esquema ilustrativo de instalação do sensor de nível para monitoramento de nível.



Fonte: A Autora (2025).

A Figura 2 ilustra a construção da caixa para instalação do equipamento Sensor Ampeq que tem o objetivo de captar os dados sobre o nível de água na caixa de inspeção e enviá-los para o Datalogger Ampeq. De acordo com as especificações do fabricante o sensor possui comprimento de 33,5 cm x 3,1 cm de diâmetro e pesa 700 gramas, com tempo de medição de 300 milisegundos. Também foi instalado a caixa de abrigo do Datalogger Ampeq, que armazena os dados medidos e envia de maneira automática a cada 10 minutos.

Figura 2 – Ilustração da caixa de construção para instalação do sensor



Fonte: A Autora (2025).

O monitoramento teve início em 28 de abril de 2023 com a instalação do sensor de nível, com possibilidade de acesso visual e download dos dados de maneira simultânea e contínua.