



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>



Modelagem hidrológica e otimização multiobjetivo para mitigação de inundações urbanas: uma abordagem baseada na fronteira de Pareto

Edinilson de Castro Ferreira¹, Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral², Marcia M. G. Alcoforado de Moraes³

¹Doutor em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco Email: edinilsoncastro@hotmail.com (<https://orcid.org/0000-0003-2217-2359>). ²Professor titular da Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco Email: jaime.cabral@ufpe.br (<https://orcid.org/0000-0002-1348-8004>). ³Professora titular do Departamento de Economia da Universidade Federal de Pernambuco Email: marcia.alcoforado.ma@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-0713-7494>).

Article received on 20/11/2025 and accepted on 14/01/2026

RESUMO

A urbanização acelerada tem intensificado a frequência e a severidade das inundações urbanas, principalmente em bacias densamente ocupadas, evidenciando a necessidade de ferramentas que auxiliem a concepção de soluções de drenagem mais eficientes e economicamente viáveis. Neste contexto, o presente estudo propõe uma estrutura integrada de apoio à decisão para o dimensionamento de reservatórios de retenção em sistemas urbanos, voltada ao planejamento de áreas urbanas com elevada vulnerabilidade a inundações durante eventos extremos de precipitação. A metodologia combina modelagem hidrológica e hidrodinâmica com um modelo de otimização multiobjetivo implementado no GAMS, permitindo avaliar, de forma simultânea, a minimização dos custos de implantação e dos danos econômicos decorrentes das inundações. O estudo foi aplicado numa bacia urbana da cidade do Recife (Brasil), onde simulações hidrodinâmicas e análises econômicas subsidiaram a construção de funções de dano e a obtenção de conjuntos de soluções ótimas, representadas por uma Fronteiras de Pareto. Os resultados indicaram elevada sensibilidade dos custos às condições geotécnicas e ao tipo de reservatório adotado, com variações de até cinco vezes para um mesmo nível de mitigação de danos. Conclui-se que a estrutura proposta é capaz de identificar soluções que equilibram desempenho hidráulico e viabilidade econômica, oferecendo suporte técnico para gestores e planejadores na priorização de investimentos em drenagem urbana.

Palavras-chave: Drenagem urbana, Reservatórios de retenção, Simulação hidrodinâmica, Danos econômicos, Análise de *trade-offs*.

Hydrological modeling and multi-objective optimization for urban flood mitigation: a Pareto front-based approach

ABSTRACT

Accelerated urbanization has intensified the frequency and severity of urban flooding, especially in densely occupied watersheds, highlighting the need for tools that support the design of more efficient and economically viable drainage solutions. In this context, this study proposes an integrated decision-support framework for the sizing of detention reservoirs in urban systems, aimed at planning urban areas with high vulnerability to flooding during extreme precipitation events. The methodology combines hydrological and hydrodynamic modeling with a multiobjective optimization model implemented in GAMS, allowing the simultaneous minimization of implementation costs and economic damages caused by flooding. The approach was applied to an urban watershed in the city of Recife (Brazil), where hydrodynamic simulations and economic analyses supported the development of damage functions and the identification of sets of optimal solutions represented by Pareto Fronts. The results indicated high sensitivity of costs to geotechnical conditions and to the type of reservoir adopted, with variations of up to fivefold for the same level of damage mitigation. It is concluded that the proposed framework is able to identify solutions that balance hydraulic performance and economic feasibility, providing technical support for managers and planners in prioritizing investments in urban drainage.

Keywords: Urban drainage, Detention reservoirs, Hydrodynamic simulation, Economic damages, Trade-off analysis.

Introdução

A urbanização acelerada, quando não acompanhada por um planejamento integrado das

infraestruturas urbanas, provoca alterações substanciais no ciclo hidrológico, incluindo o

aumento da impermeabilização, a redução da infiltração e a intensificação do escoamento superficial. Tais modificações ampliam a magnitude e a frequência das inundações urbanas, uma vez que elevam os volumes gerados, aceleram o tempo de resposta da bacia e pressionam sistemas de drenagem frequentemente insuficientes (Xie et al., 2022). Essas transformações também intensificam a exposição de comunidades vulneráveis e ampliam os impactos socioeconômicos associados aos eventos de precipitação extrema.

Em escala global, os impactos socioeconômicos decorrentes de enchentes têm se intensificado nas últimas décadas. Entre 2000 e 2019, cerca de 1,65 bilhão de pessoas foram afetadas por inundações, representando 41% de todos os desastres naturais registrados nesse período (UNDRR; CRED, 2020).

Nos últimos anos, eventos extremos reforçam a gravidade desse cenário. Na Europa, enchentes em 2023 resultaram em perdas superiores a US\$ 10 bilhões; na Ásia, o Tufão Doksuri provocou inundações severas em áreas densamente urbanizadas, com prejuízos estimados em US\$ 25 bilhões; nos Estados Unidos, tempestades produziram danos de aproximadamente US\$ 6 bilhões; e, na Líbia, uma enchente súbita ocasionou mais de 4.300 mortes e cerca de US\$ 4 bilhões em prejuízos (Munich Re, 2024).

No Brasil, os impactos hidrológicos também são expressivos, embora seja necessário distinguir entre inundações fluviais e enchentes urbanas. As enchentes graduais, típicas de grandes bacias hidrográficas, são responsáveis por parcela substancial das perdas econômicas. Entretanto, os episódios de enchentes rápidas em áreas urbanas têm se mostrado críticos, em função da ocupação desordenada, da insuficiência da infraestrutura de drenagem e da elevada impermeabilização.

Em 2022, eventos de chuva extrema desencadearam enchentes rápidas em regiões urbanas de Minas Gerais, Bahia e Santa Catarina, acumulando prejuízos superiores a R\$ 931 milhões e afetando mais de 525 mil pessoas (Confederação Nacional de Municípios [CNM], 2023). No mesmo ano, o município de Petrópolis/RJ foi severamente impactado por enxurradas que resultaram em perdas estimadas em R\$ 665 milhões (Blaudt et al., 2023). Em Recife/PE, episódios de chuvas intensas provocaram danos em aproximadamente 68 mil residências, das quais cerca de 3 mil foram completamente destruídas (Greenpeace Brasil, 2023). Já em 2024, as enchentes no Rio Grande do Sul incluíram tanto inundações fluviais extensas quanto eventos rápidos em áreas urbanas, somando

mais de R\$ 10 bilhões em prejuízos (Federação do Comércio de Bens e de Serviços do Estado do Rio Grande do Sul [Fecomércio-RS], 2024).

Diante desse cenário, soluções contemporâneas de drenagem urbana têm buscado incorporar os impactos socioeconômicos às análises hidrológicas, integrando esses indicadores às avaliações de viabilidade técnica e financeira das intervenções. A quantificação dos benefícios econômicos relacionados à redução dos danos, bem como a avaliação dos *trade-offs* em relação aos custos de implantação, são fundamentais para subsidiar decisões e justificar investimentos em infraestrutura urbana (Zhou et al., 2024).

Nesse contexto, modelos de otimização multiobjetivo destacam-se como ferramentas eficazes de apoio à tomada de decisão, ao possibilitarem a identificação de soluções ótimas diante de objetivos conflitantes, como a minimização de custos e a redução de danos (Loucks & Van Beek, 2017). Estudos recentes têm aplicado estratégias de otimização integradas à modelagem hidrodinâmica para aprimorar projetos de drenagem e controle de inundações, indicando reduções mensuráveis nas profundidades e extensões das cheias (Liu et al., 2025).

Diversos trabalhos confirmam a relevância desse tipo de abordagem no controle de inundações urbanas. Yang et al. (2023), ao acoplar o NSGA-II ao SWMM, obtiveram reduções significativas no coeficiente de escoamento superficial e no tempo de sobrecarga do sistema, além da otimização dos custos de investimento. De forma complementar, Cioffi et al. (2022) aplicaram o NSGA-II na otimização de políticas de defesa contra inundações em áreas costeiras, incorporando custos de infraestrutura, riscos hidráulicos e incertezas climáticas.

Hosseinzadeh et al. (2023) propuseram uma estrutura integrada combinando modelagem hidrodinâmica, GIS e otimização evolutiva, testando múltiplas localizações de reservatórios e alcançando reduções de danos de até 90%. Outras contribuições incluem abordagens de otimização estrutural para melhoria do escoamento em sistemas urbanos (Zhang et al., 2024), estratégias integradas de infraestrutura verde-cinza-azul (Chen et al., 2024) e modelos multiobjetivo aplicados à operação de redes de drenagem (Sun et al., 2021).

Apesar desses avanços, grande parte dos estudos concentra-se em cenários idealizados e, em geral, não incorpora explicitamente a quantificação de danos econômicos reais como função objetivo. Além disso, são escassas as aplicações em sistemas integrados com múltiplos reservatórios de retenção, considerando simultaneamente restrições hidrológicas, condicionantes geotécnicas

e limitações espaciais típicas de bacias densamente urbanizadas no contexto brasileiro.

Diante dessa lacuna, o objetivo deste trabalho é desenvolver e aplicar uma estrutura integrada de apoio à decisão para o dimensionamento ótimo de um sistema composto por múltiplos reservatórios de retenção, combinando simulação hidrológica e otimização multiobjetivo, de modo a minimizar simultaneamente os custos de implantação e os danos econômicos associados a eventos extremos de precipitação. As variáveis de decisão incluem parâmetros geométricos dos reservatórios e das estruturas de saída, considerando restrições hidrológicas, condicionantes geotécnicas e limitações orçamentárias. A metodologia é aplicada a uma bacia densamente urbanizada do município de Recife (PE), e os resultados são analisados por meio da construção de uma Fronteira de Pareto, permitindo a avaliação dos *trade-offs* entre custos de implantação e redução dos danos econômicos.

Material e Métodos

Este estudo está estruturado em quatro etapas principais: (i) caracterização física e hidrológica da bacia hidrográfica, seguida da modelagem hidrológica e hidráulica utilizando o PCSWMM (*Personal Computer Storm Water Management Model*); (ii) identificação das áreas de inundação e estimativa dos prejuízos associados, empregando o modelo hidráulico bidimensional (2D) HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center's River Analysis System*); (iii) Desenvolvimento de um modelo de otimização multiobjetivo na plataforma GAMS (*General Algebraic Modeling System*); e (iv) Avaliação dos resultados da otimização por meio da análise da Fronteira de Pareto (FP). A Figura 1 ilustra o fluxograma das etapas do estudo e o algoritmo utilizado na otimização multiobjetivo.

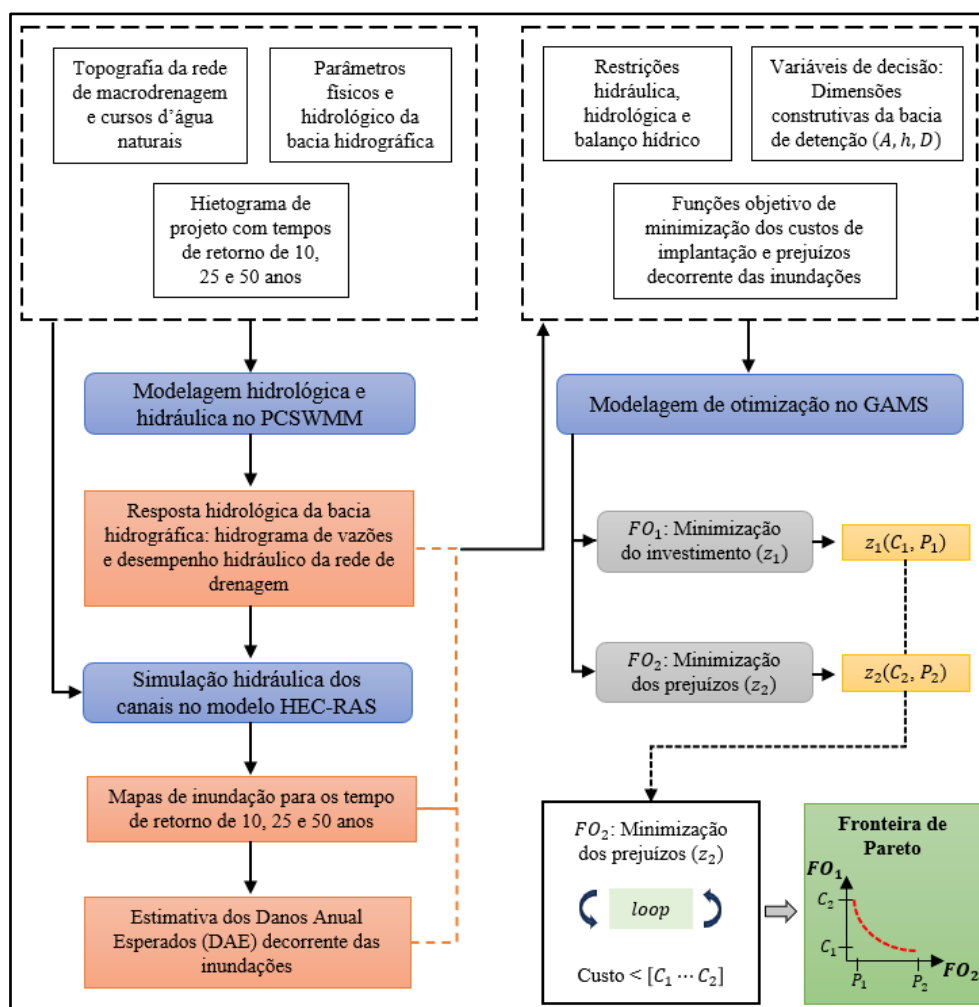


Figure 1. Fluxograma das etapas do estudo e algoritmo do modelo de otimização.

Caracterização Física e Hidrológica da Bacia Hidrográfica e Modelagem com o PCSWMM

A avaliação da resposta hidrológica da bacia hidrográfica a eventos extremos de precipitação foi realizada, considerando tempos de retorno de 10, 25 e 50 anos. Para isso, procedeu-se à caracterização física e hidrológica da bacia com o uso de um Modelo Digital de Terreno (MDT), imagens de satélite e dados da rede de canais, disponibilizados pela EMLURB (Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana da Cidade do Recife). Essas informações foram integradas para a construção do modelo hidrodinâmico no software PCSWMM, capaz de simular os processos hidrológicos e verificar o desempenho hidráulico da rede de canais.

Este estudo foi aplicado na bacia hidrográfica urbana do canal do Ibura e do riacho Moxotó, localizada na cidade do Recife. A área total da bacia é de aproximadamente 6,86 km², sendo uma das sub-bacias do rio Tejipió, um dos principais rios da cidade do Recife. O canal do Ibura, com uma extensão total de 3,27 km, tem a maior parte de sua calha revestida em concreto. Por outro lado, o riacho Moxotó, que possui uma extensão de cerca de 3,71 km, não é revestido. O riacho Moxotó recebe as águas do canal do Ibura e deságua no rio Tejipió. Ao longo desses cursos d'água, é possível observar, em alguns trechos, um

cenário de ocupação irregular, com margens ocupadas por construções ou vias marginais.

A bacia hidrográfica apresenta uma amplitude altimétrica de aproximadamente 88,47 metros. As regiões a montante possuem declividades acentuadas, o que contribui para o aumento das velocidades de escoamento na área, onde cerca de 69,17% da superfície é ocupada por construções. O tempo de concentração da bacia, calculado pela equação de Kirpich, é estimado em aproximadamente 1 hora e 16 minutos. A Figura 2 ilustra o mapa da bacia, destacando sua localização geográfica, os cursos d'água e a altimetria.

A delimitação da bacia foi realizada utilizando técnicas de geoprocessamento em ambiente SIG (Sistema de Informações Geográficas), resultando na identificação de sub-bacias com exutórios nos principais cursos d'água. A Figura 3 apresenta os usos e ocupações do solo, bem como a divisão das sub-bacias.

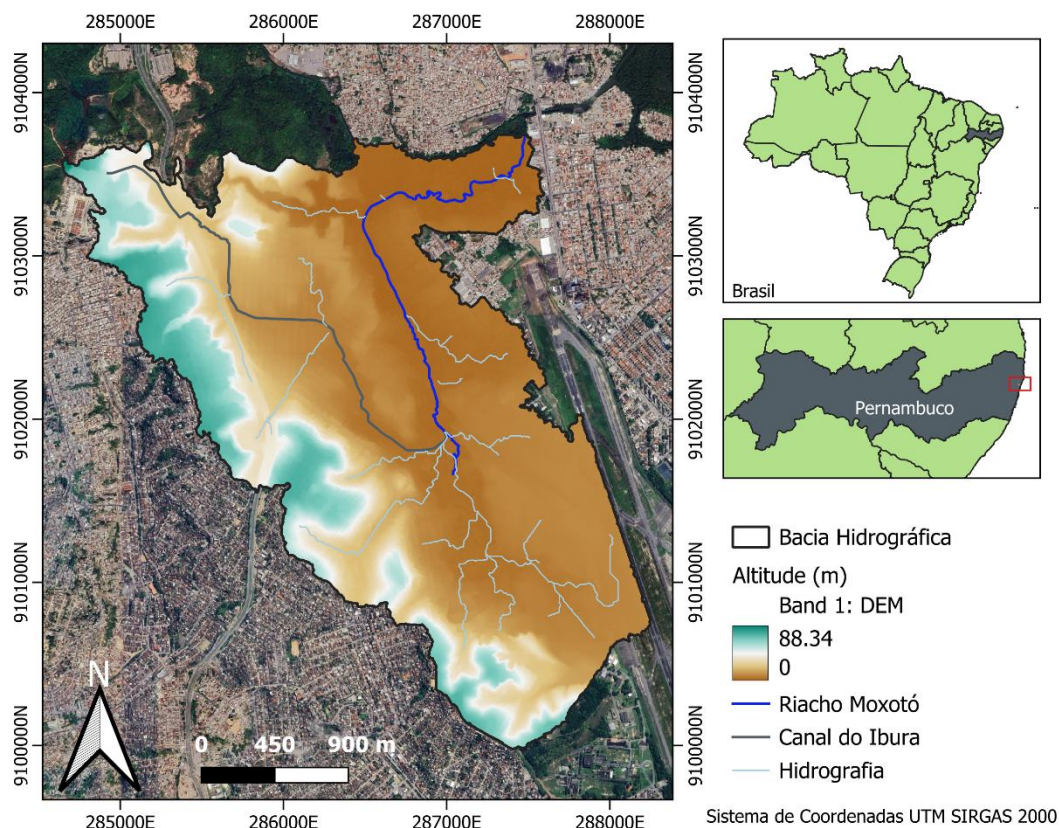


Figure 2. Área de estudo incluindo a localização da bacia hidrográfica, os cursos d'água e altimetria.

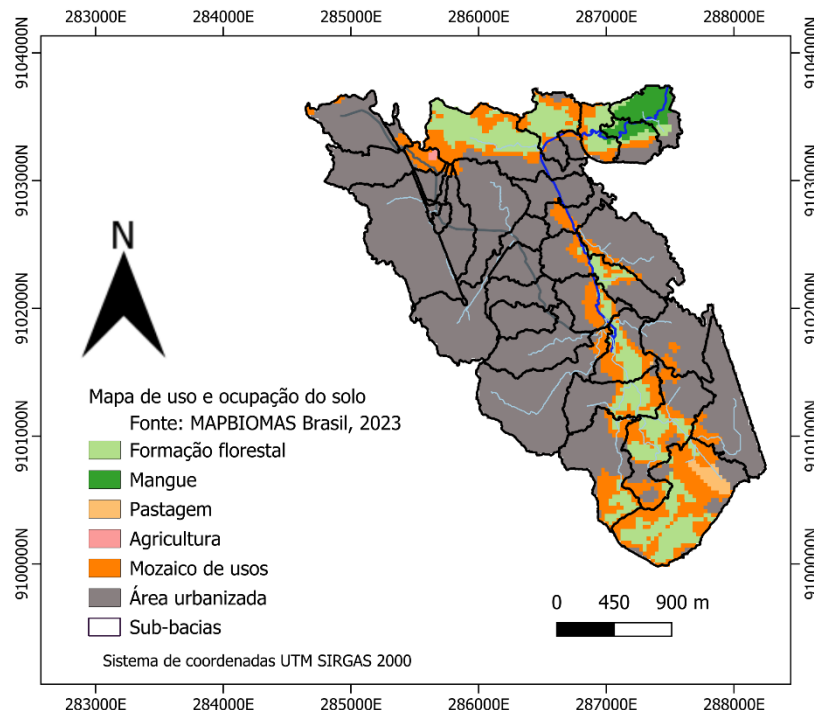


Figure 3. Mapa de uso e ocupação do solo da bacia e as sub-bacias.

Na região mais baixa da bacia, o riacho Moxotó cruza a Avenida Dois Rios, uma via arterial de grande relevância para a cidade, que enfrenta recorrentes episódios de inundação. Essas enchentes geram prejuízos consideráveis, transtornos à população local e interrompem o tráfego na avenida. A situação é ainda mais crítica devido à vulnerabilidade social dos moradores da área, o que agrava os impactos econômicos.

A precipitação de projeto foi calculada utilizando a equação da chuva proposta no Manual de Drenagem e Manejo das Águas Pluviais do Recife (Alencar et al., 2016). A duração da precipitação foi definida como equivalente ao tempo de concentração, sendo sua distribuição temporal dividida em blocos de chuva, conforme a metodologia de Huff (1967), utilizando o padrão de distribuição do 2º quartil.

O modelo PCSWMM, disponível comercialmente, foi desenvolvido em 1984 pelo CHI (*Computational Hydraulics International*), Canadá. O PCSWMM é capaz de combinar todos os mecanismos do tradicional modelo hidrodinâmico SWMM (*Storm Water Management Model*), em sua versão 5, com um ambiente SIG para modelagem de águas pluviais, águas residuais e bacias hidrográficas em áreas urbanas e rurais (CHI, 2020). O SWMM foi criado em 1971 nos EUA pela Agência de Proteção Ambiental (*Environmental Protection Agency - EPA*) e desde então foi sendo atualizado continuamente

(Rossman & Huber, 2016). O modelo PCSWMM possui ferramentas para modelagem de rios, análise de controle em tempo real, gerenciamento de séries temporais, suporte a Modelos Digital de Elevação (MDE), visualização do Google Earth, além de executar as ferramentas hidrológica e hidráulica do SWMM. No modelo é possível representar a variabilidade espacial das propriedades das sub-bacias hidrográficas, onde cada uma delas recebe entradas de chuva e gera escoamento com base nos parâmetros atribuídos, como área, declividade média, largura superficial de escoamento, taxas de impermeabilização do solo, rugosidade superficial e profundidades de armazenamento.

O cálculo do volume total escoado, das vazões máximas e dos hidrogramas resultantes das chuvas de projeto foi realizado utilizando o modelo de infiltração baseado no *Curve Number* (CN) disponível no PCSWMM, derivado do método SCS-CN, atualmente NRCS. Neste estudo foram adotados os valores de CN obtidos no Manual de Drenagem e Manejo das Águas Pluviais do Recife, que apresenta valores estimados para cada sub-bacia urbana da cidade, a partir de levantamentos do uso e ocupação do solo. Para as sub-bacias do riacho Moxotó é estabelecido um valor de CN de 88,55 e as sub-bacias do canal do Ibura de 92,49.

A rede de macrodrenagem foi representada com base em seções transversais, levantadas ao longo dos cursos d'água com espaçamento médio de 100 m. Para os trechos revestidos em concreto,

adotou-se coeficiente de Manning de 0,015, enquanto para trechos em solo natural o valor foi 0,020.

As bacias de retenção, parte central da metodologia, foram representadas no PCSWMM utilizando os recursos *Storage Units*, acoplados a *Orifices* (tubulações de fundo) e *Weirs* (vertedores). Foram estabelecidos seis locais com potenciais para implantação de reservatórios, considerando existência de áreas livres ou subutilizadas, condições topográficas adequadas e capacidade de controle das vazões afluentes de suas respectivas sub-bacias a montante.

Em cada local, foram simuladas diferentes combinações de volume, profundidade e diâmetro de saída, de forma a gerar hidrogramas amortecidos em resposta às chuvas de projeto. Esses resultados serviram posteriormente de base para a construção de relações entre volume de armazenamento e danos residuais por inundação, que seriam incorporadas ao modelo de otimização multiobjetivo no GAMS.

Delimitação das áreas de Inundação e Estimativa dos Prejuízos

As simulações hidráulicas para a identificação das manchas de inundação foram realizadas no modelo hidráulico HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center's River Analysis System*), ferramenta amplamente utilizada para a simulação de fluxos em rios, canais e outros sistemas hidráulicos. Desenvolvido pelo *U.S. Army Corps of Engineers*, o HEC-RAS é capaz de realizar análises detalhadas de escoamentos unidimensionais (1D) e bidimensionais (2D), permitindo a avaliação do comportamento dos fluxos em diferentes condições hidráulicas. Para a simulação 2D, o software resolve as equações de *Saint Venant* em sua forma completa, além das equações de Ondas de Difusão (Brunner, 2020).

O Modelo Digital do Terreno (MDT), utilizado como base para as simulações, possui resolução espacial de 1 metro, obtido através do programa Pernambuco Tridimensional, responsável pelo perfilamento a laser de todo o território do Estado (disponível em: <http://www.pe3d.pe.gov.br/>). No perímetro da simulação, foi definida uma poligonal na calha principal do riacho, com células quadrangulares de 0,50 metro, e outra nas margens, com células de 10 metros. O coeficiente de Manning foi estabelecido em 0,06, com base em outros modelos previamente calibrados para áreas urbanas na cidade do Recife. A estrutura geométrica da rede canais também considerou a presença do bueiro existente no

cruzamento do riacho Moxotó com a Avenida Dois Rios.

Os prejuízos decorrentes das inundações foram estimados utilizando o método do prejuízo agregado, descrito na Equação 1, que assume um crescimento linear dos danos econômicos à medida que aumenta o nível médio da inundação (Gnan et al., 2022).

$$C_D = K_D \cdot h \cdot M \cdot U \cdot A \quad (1)$$

Onde, C_D é o dano total provocado pela inundação; K_D é um índice de dano de enchente, em unidades monetárias por unidade de profundidade de inundação, estimado em 0,052; h é a profundidade média de inundação (m); M é o valor de mercado das edificações por unidade de área (\$/m²); U é a proporção de ocupação, ou seja, proporção de inundação em áreas desenvolvida pela área total inundada; e A é a área total inundada.

Reconhece-se que essa equação possui caráter aproximado e pode apresentar limitações dimensionais e de aderência local. No entanto, sua adoção neste estudo se justifica pelo propósito central de propor uma estrutura metodológica replicável, priorizando a comparação entre cenários e a análise dos efeitos relativos da reservação.

Desenvolvimento do Modelo de Otimização Multiobjetivo na Plataforma GAMS

O modelo de otimização desenvolvido foi projetado para identificar soluções ótimas para as variáveis de decisão relacionadas às características geométricas das bacias de retenção, como profundidade, área e diâmetro de saída. Esse modelo se constitui em um problema de programação não-linear, que envolve duas funções objetivo conflitantes. A primeira função objetivo (FO1) visa minimizar os custos de implantação de um sistema com múltiplos reservatórios distribuídos em uma bacia urbana, enquanto a segunda função objetivo (FO2) busca minimizar a estimativa de prejuízos resultantes das inundações.

As formulações matemáticas das funções objetivo de cada cenário e suas respectivas restrições são apresentadas a seguir:

Função Objetivo 1 (FO1):

$$z_1 = \sum_{i=1}^n \left(C_{unit_i} V_{arm_{i,j}} + C_{desap} A_{i,j} \right) \text{ para cada } j \quad (2)$$

Função Objetivo 2 (FO2):

$$z_2 = \sum_{i=1}^n \left(-a_j \ln(V_{arm_{i,j}}) + b_j \right) \text{ para cada } j$$

(3)

Sujeito a

$$V_{arm_{i,j}} = A_{i,j} H_{i,j} \quad (4)$$

$$V_{arm_{i,j}} > (Q_{af_{i,j}} - Q_{ef_{i,j}}) t_i \quad (5)$$

$$Q_{ef_{i,j}} = C_o \left(\frac{\pi D_{i,j}^2}{4} \right) \sqrt{2gH_{i,j}} \quad (6)$$

$$h_{i,j} > 3D_{i,j} \quad (7)$$

$$Q_{ef_{i,j}} \leq Q_{rest_i} \quad (8)$$

Bacia de detenção aberta:

$$C_{unit_i} = 35,68 \cdot (1 + R_i)^{0,254} \quad (9)$$

Bacia de detenção fechada:

$$C_{unit_i} = 256,45 \cdot (1 + R_i)^{0,064} \quad (10)$$

Onde, i varia de 1 a n , representando o número de locais com potencial para a implantação de um reservatório de detenção; j corresponde ao tempo de retorno avaliado ($j=[10,25,50 \text{ anos}]$); C_{unit_i} é o custo unitário da bacia de detenção (R\$/m³), função da incidência de rocha no solo (R_i) no local i , e se a bacia é aberta ou é fechada com laje em concreto armado, conforme as Equações 9 e 10 (Tucci; Cruz, 2007); $V_{arm_{i,j}}$ é o volume de armazenamento do reservatório de detenção (m³); C_{desap} é o custo unitário de desapropriação estimado para a região (R\$/m²); $A_{i,j}$, $H_{i,j}$ e $D_{i,j}$ são a área (m²), a profundidade (m) e o diâmetro (m) da estrutura de saída do reservatório; $Q_{af_{i,j}}$ e $Q_{ef_{i,j}}$ são as vazões máximas afluente e efluente (m³/s) do reservatório; a_j e b_j são coeficientes da equação do prejuízo econômico decorrente da inundação com período de retorno j ; t_i é o tempo de concentração da bacia de contribuição do local i ; Q_{rest_i} é a vazão restrição (m³/s), definida como a vazão correspondente às condições de pré-urbanização no local i ; C_o é o coeficiente de descarga da vazão pelo orifício de saída do reservatório, estabelecido em 0,65.

As variáveis de decisão do modelo de otimização, definidas individualmente para cada tempo de retorno j , incluem o volume de armazenamento das bacias de detenção ($V_{arm_1} \dots V_{arm_n}$), que é função da área em planta ($A_1 \dots A_n$) e da profundidade ($H_1 \dots H_n$), conforme expresso na Equação 4. Além disso, consideram-se as vazões efluentes máximas ($Q_{ef_1} \dots Q_{ef_n}$) dependem do diâmetro ($D_1 \dots D_n$) do conduto de saída e de sua carga hidráulica (H), de acordo com a Equação 6, que representa a formulação clássica de descarga por orifício sob carga.

A Equação 5 expressa o Método do Hidrograma da Fórmula Racional, utilizado para o dimensionamento de bacias de detenção, estabelecendo o volume mínimo necessário para

reservação com base nas vazões máximas afluente e efluente, e restrita à condição de pré-urbanização da bacia (Equação 8). A vazão de restrição foi estimada a partir de simulações hidrológicas, considerando uma condição de uso e ocupação do solo sem o impacto das construções.

O modelo de otimização descrito foi estruturado na plataforma de programação GAMS (*General Algebraic Modeling System*), a qual consiste em um sistema de modelagem de alto nível para problemas de programação matemática. A plataforma possui três componentes principais: (i) Linguagem Algébrica, que permite a modelagem de sistemas complexos; (ii) Compilador, que traduz as informações para o formato aceito pelo solver; e (iii) *Solvers*, selecionável pelo usuário, resolvem as equações e disponibilizam os resultados (Rosenthal, 2023). Esse estudo utilizou o solver CONOPT, desenvolvido pela *ARKI Consulting and Development*, que é um algoritmo baseado em GRG (Gradiente Reduzido Generalizado) projetado especificamente para grandes problemas de programação não-linear (NLP).

Os modelos de otimização desenvolvidos no GAMS tradicionalmente seguem o conceito de otimização monoobjetiva e estática. No entanto, é possível expandir essa estrutura para criar modelos multiobjetivo e dinâmicos, incorporando funções-objetivo adicionais como restrições e definindo variáveis de decisão para diferentes períodos de retorno. Neste estudo, o GAMS foi utilizado para explorar soluções ótimas que consideram múltiplos critérios de otimização, adotando uma abordagem multiobjetivo, conforme descrito na próxima seção.

Construção da Fronteira de Pareto

Como os objetivos z_1 (custos) e z_2 (danos) são conflitantes, foi construída uma Fronteira de Pareto para identificar o conjunto de soluções não dominadas, isto é, soluções em que não é possível reduzir um objetivo sem aumentar o outro.

A Fronteira de Pareto foi obtida por meio de programação paramétrica no GAMS, seguindo uma abordagem do tipo ε -constraint, em que uma das funções objetivo é otimizada enquanto a outra é imposta como restrição dentro de um intervalo de valores admissíveis (Arora, 2012).

Inicialmente foram realizadas duas otimizações:

- Minimização de z_1 (custo), obtendo-se o ponto (C_1, P_1), onde C_1 é o custo mínimo e P_1 o dano associado.
- Minimização de z_2 (dano), obtendo-se o ponto (C_2, P_2), onde

P_2 é o dano mínimo e C_2 o custo associado.

Esses pontos definem os limites do intervalo explorado na varredura paramétrica.

Em seguida, escolheu-se uma função objetivo como principal (por exemplo, minimizar z_2) e impôs-se um limite para a outra (por exemplo, $z_1 \leq C^*$), variando-se gradualmente esses limites entre o C_1 e C_2 . Para cada valor de C^* , o modelo gera uma solução ótima viável, resultando em um conjunto de pares (z_1, z_2) que constitui a Fronteira de Pareto.

De forma geral, essa estratégia pode ser representada por:

$$\text{Minimize } z_2 \quad (11)$$

Sujeito a:

$$z_1 \leq z_1^* + \varepsilon \quad (12)$$

Onde z_1^* é um valor de referência e ε é incrementado para obter soluções alternativas.

A Fronteira de Pareto foi construída para tempos de retorno de 10, 25 e 50 anos, considerando três condições de implantação: (i) solo sem incidência de rocha, (ii) solo com 50% de rocha e (iii) reservatórios fechados. Esses cenários foram adotados para representar incertezas geotécnicas e condicionantes de implantação que impactam diretamente os custos.

Resultados e discussão

O mapeamento das áreas suscetíveis a inundações nas margens do riacho Moxotó, em seu trecho inferior, foi realizado com base em eventos de precipitação para tempos de retorno de 10, 25 e 50 anos, correspondendo a chuvas totais de 68,64

mm, 80,00 mm e 89,82 mm, respectivamente, considerando a duração igual ao tempo de concentração da bacia. A modelagem hidrológica a montante da área de inundação mapeada indicou vazões máximas de 9,62 m³/s, 12,04 m³/s e 13,60 m³/s para esses tempos de retorno, respectivamente. Com essas vazões, foram elaborados os mapas de inundação mostrados na Figura 4, que exibem as áreas de risco de inundação para os tempos de retorno analisados.

Embora as áreas afetadas sejam aproximadamente semelhantes nos três cenários, observa-se uma diferença nas profundidades máximas alcançadas. Para o cenário de 50 anos de tempo de retorno, a profundidade máxima da inundação atinge 1,914 metros.

Aplicações recentes do HEC-RAS 2D em Recife demonstram sua capacidade de apoiar análises de inundação urbana sob chuvas intensas e discutir suas implicações, conforme apresentado em Marengo et al. (2023).

A relação entre as perdas econômicas e a probabilidade anual de excedência ($AEP = 1/TR$), apresentada na Figura 5, representa a base para a quantificação do risco de inundações, uma vez que expressa como os danos variam em função da frequência de ocorrência dos eventos. O risco pode ser quantificado por meio da integração dessa curva, resultando no Dano Anual Esperado (*Expected Annual Damage* – EAD), indicador frequentemente utilizado em estudos de avaliação econômica de inundações. Os resultados mostram-se compatíveis com metodologias empregadas em estudos de risco hidrológico e avaliação econômica de inundações, conforme discutido por Gnan et al. (2022).

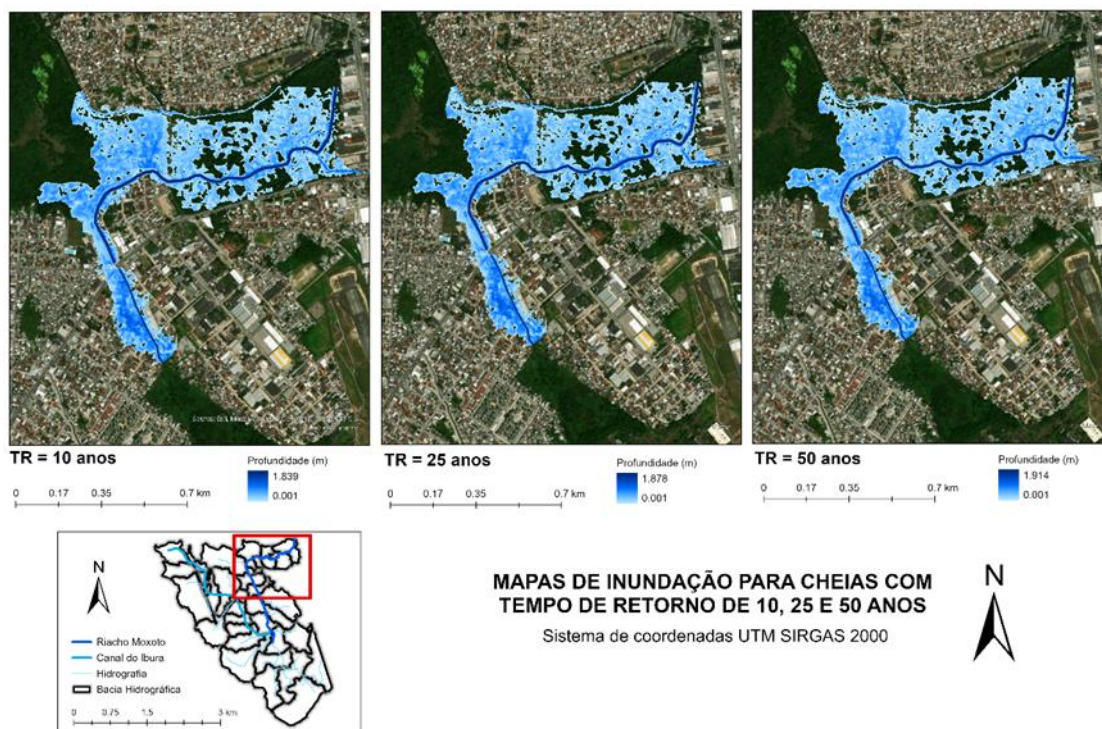


Figure 4. Mapas de inundação para cheia com tempo de retorno de 10, 25 e 50 anos no riacho Moxotó.

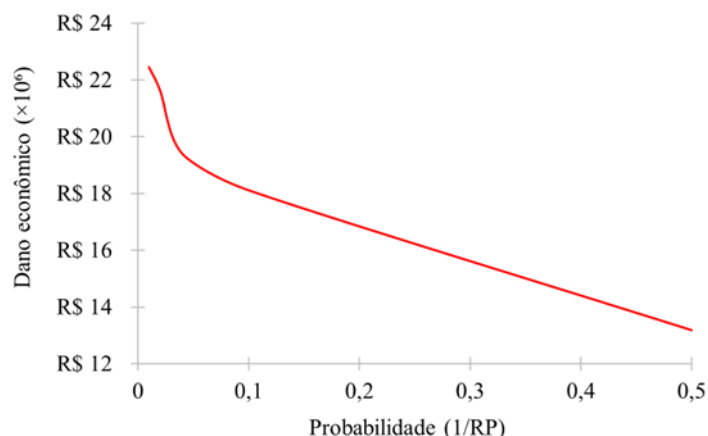


Figure 5. Relação entre as probabilidades de ocorrência das cheias e os danos econômicos provenientes das inundações.

A Figura 6 apresenta a localização proposta dos reservatórios, juntamente com as sub-bacias cuja contribuição será por eles controlada.

Os resultados das simulações permitiram obter relações funcionais entre os danos econômicos residuais e o volume de armazenamento do sistema de reservatórios de detenção.

A partir dessas análises, foram ajustadas equações que expressam os danos em função da capacidade volumétrica disponível no sistema, constituindo numa das funções objetivo do modelo de otimização. As relações obtidas para os tempos de retorno de 10, 25 e 50 anos são apresentadas nas Equações 13, 14 e 15, respectivamente.

$$P = -121255 \times \ln(V_{arm}) + 2844937 \quad (13)$$

$$P = -33114 \cdot \ln(V_{arm}) + 1097516 \quad (14)$$

$$P = -33114 \cdot \ln(V_{arm}) + 1097516 \quad (15)$$

Onde, P representa o Dano Econômico Esperado (R\$) e V_{arm} é volume total de armazenamento dos reservatórios.

Essas relações confirmam evidências já apontadas na literatura de drenagem urbana, segundo as quais o aumento da capacidade de detenção promove reduções nos picos de vazão, nos volumes escoados e nas profundidades de inundação, que são variáveis diretamente relacionadas com a magnitude dos prejuízos econômicos, conforme mostrada em Lima Neto et al., 2024 e Dias et al., 2025.

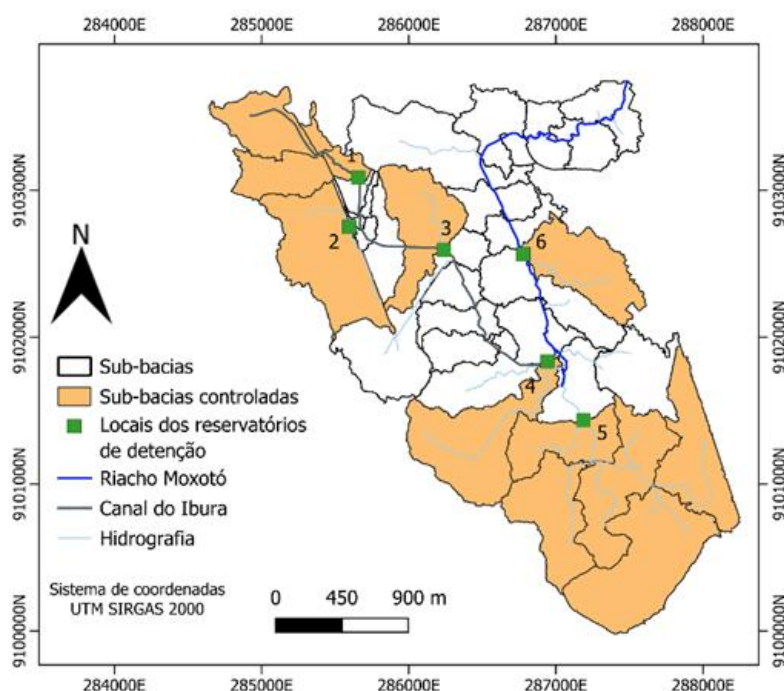


Figure 6. Bacia hidrográfica com a localização proposta para os reservatórios de detenção e as sub-bacias controladas.

Fronteira de Pareto das soluções segundo os dois objetivos conflitantes

A Figura 7 apresenta as Fronteiras de Pareto para todas as condições citadas acima, considerando cenários de precipitação com tempo de retorno de 10, 25 e 50 anos.

O formato das Fronteiras de Pareto evidencia retornos decrescentes, onde, após um determinado nível de investimento, reduções adicionais de danos tornam-se cada vez menores. Sendo esse comportamento típico em problemas de mitigação de inundação, nos quais os custos de implantação competem com benefícios hidráulicos e econômicos, gerando um conjunto de soluções não dominadas que requer escolha por parte do decisor. Resultados semelhantes são apresentados em Ngamalieu-Nengoue, Iglesias-Rey & Martínez-Solano (2019) que combinam modelagem hidrológico-hidráulica e otimização para equilibrar custos e perdas associadas a alagamentos.

Neste trabalho, a inclusão de condicionantes geotécnicas e tipologia construtiva desloca a FP, ampliando os custos necessários para atingir níveis equivalentes de mitigação, o que tem implicações diretas para priorização de investimentos.

Para TR = 10 anos, a presença de 50% de rocha no subsolo eleva os custos em R\$

3.609.649,90, correspondendo a um aumento de aproximadamente 137% em relação ao cenário sem rocha. A adoção de uma bacia de detenção fechada produz um impacto ainda mais expressivo, com acréscimo de R\$ 13.025.345,00, o que representa um aumento de cerca de 497% para alcançar o mesmo nível de redução de danos.

Na análise para TR = 25 anos, as diferenças tornam-se ainda mais pronunciadas. O cenário com 50% de rocha apresenta custos R\$ 6.106.797,10 superiores ao cenário sem rocha, equivalente a um aumento de cerca de 146%. Para a bacia de detenção fechada, o custo adicional atinge R\$ 19.836.630,10, correspondendo a um aumento aproximado de 475%, considerando danos equivalentes.

Para TR = 50 anos, associado aos eventos mais severos do estudo, os custos se intensificam substancialmente em todos os cenários. A presença de 50% de rocha implica um acréscimo de R\$ 10.651.226,00, representando aumento de aproximadamente 138% em relação ao cenário sem rocha. A bacia de detenção fechada apresenta o maior impacto econômico, com incremento de R\$ 38.434.716,00, equivalente a cerca de 497% para o mesmo patamar de mitigação de danos.

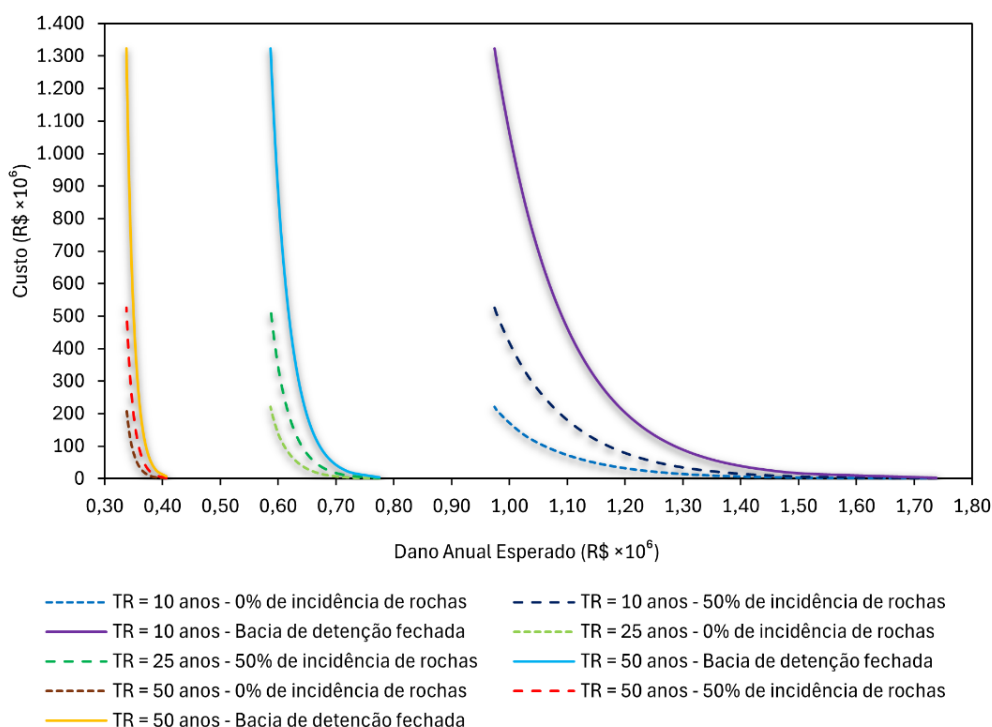


Figure 7. Fronteiras de Pareto considerando no modelo de otimização chuvas com tempo de recorrência de 10, 25 e 50 anos.

As variáveis de decisão ao longo da fronteira de Pareto

As Figuras 8, 9 e 10 apresentam as variáveis de decisão ao longo da Fronteira de Pareto para o tempo de retorno de 25 anos, considerando, respectivamente, os cenários sem incidência de rocha, com 50% de incidência e com bacias de detenção fechadas. As variáveis são analisadas em função dos custos de implantação, correspondendo aos mesmos pontos que compõem as soluções ótimas da FP.

De modo geral, a altura (H) dos reservatórios manteve-se praticamente constante ao longo da Fronteira de Pareto, indicando baixa sensibilidade dessa variável no processo de otimização. A altura foi limitada entre 1 m e 10 m, intervalo considerado tecnicamente adequado em termos construtivos. Observa-se que os reservatórios 3, 4 e 6 atingiram o valor máximo de 10 m, caracterizando o alcance do limite superior imposto pelo modelo. O reservatório 2, por sua vez, apresentou altura de 1,39 m, mantendo-se acima do limite inferior, porém com valor relativamente baixo.

Em contraste, a área (A) dos reservatórios foi o principal parâmetro ajustado ao longo da Fronteira de Pareto. O modelo ampliou progressivamente as áreas para compensar a constância das alturas e, assim, aumentar o volume de armazenamento necessário à redução dos danos. Esse comportamento é evidente nas variações

observadas entre os diferentes cenários geotécnicos e tipologias construtivas, confirmando que a expansão em planta constituiu a principal variável de ajuste volumétrico.

O diâmetro (D) dos tubos de saída também apresentou baixa variabilidade, mantendo-se relativamente constante ao longo da Fronteira de Pareto, com apenas pequenos ajustes pontuais. Os diâmetros foram limitados entre 0,15 m e 0,50 m, sendo adotado o valor mínimo de 0,15 m nos reservatórios 1, 2 e 5. Nos reservatórios 4 e 6, os diâmetros atingiram 0,27 m e 0,26 m, respectivamente, ainda distantes do limite superior. Esses resultados indicam que o controle das vazões efluentes foi predominantemente condicionado pela restrição de vazão de pré-urbanização, não sendo necessárias variações expressivas nessa variável para atender aos objetivos do modelo.

De forma integrada, os resultados mostram que o ajuste das soluções ao longo da Fronteira de Pareto ocorreu predominantemente por meio da variação das áreas ocupadas pelas bacias, enquanto as alturas e os diâmetros de saída permaneceram limitados por condicionantes construtivas e hidráulicas.

Yang et al. (2023) também investigaram a otimização dos volumes de reservatórios de detenção, empregando uma abordagem baseada em modelos substitutos (*surrogate-based optimization*). Os resultados obtidos demonstram que o volume de armazenamento constitui uma das

variáveis de maior influência na conformação da Fronteira de Pareto em problemas de gerenciamento de águas pluviais.

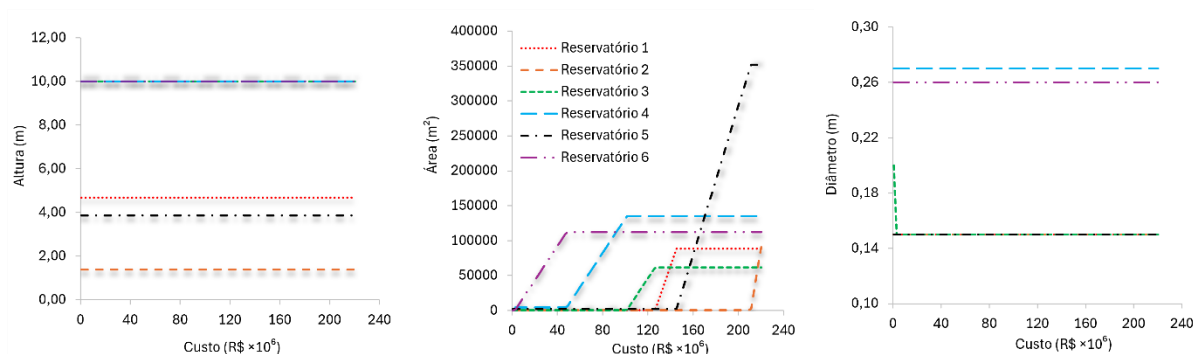


Figure 8. Variáveis de decisão ao longo da Fronteira de Pareto (FP) para a condição sem incidência de rochas e tempo de retorno de 25 anos.

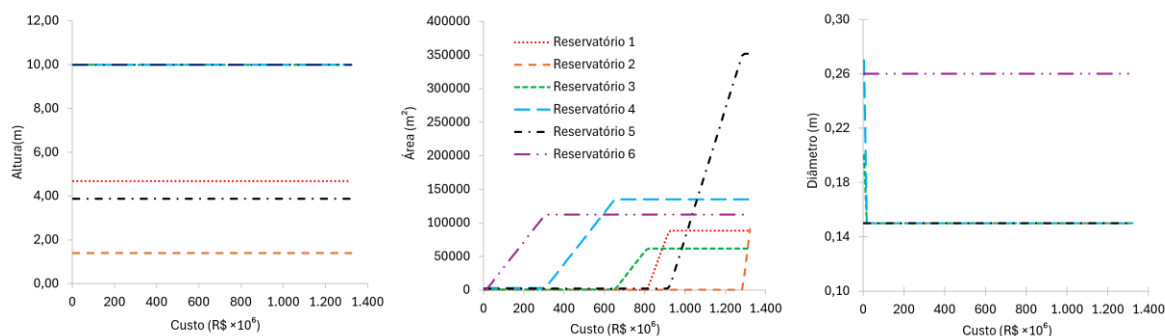


Figure 9. Variáveis de decisão ao longo da Fronteira de Pareto (FP) para a condição com 50% de incidência de rochas e tempo de retorno de 25 anos.

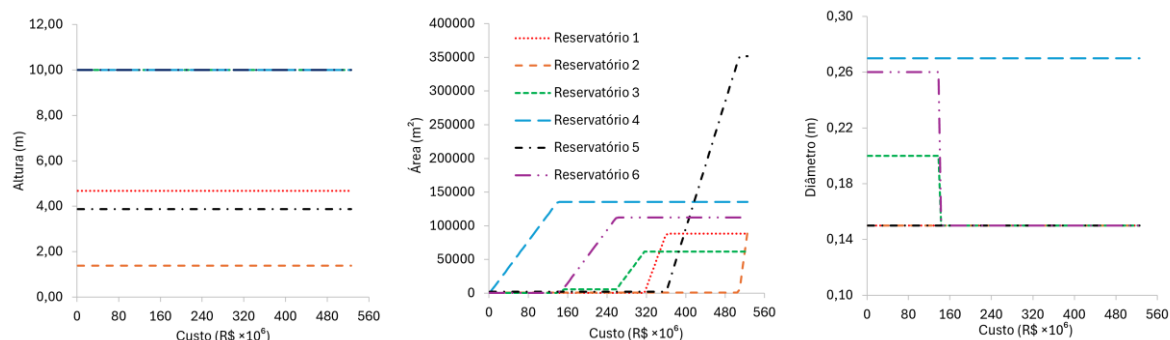


Figure 10. Variáveis de decisão ao longo da Fronteira de Pareto (FP) para a condição de bacias de detenção fechadas e tempo de retorno de 25 anos.

Taxa de variação e pontos de inflexão

Para aprofundar a análise dos *trade-offs* entre custos de implantação e redução de danos, foi avaliada a taxa de variação $\Delta\text{Custo}/\Delta\text{Danos}$ entre soluções adjacentes ao longo da Fronteira de

Pareto, permitindo estimar o custo incremental em relação à mitigação adicional dos prejuízos. Essa análise foi realizada para o cenário com tempo de retorno de 25 anos, cujos resultados são apresentados na Figura 11, considerando as três condições supracitadas: 0% de rocha, 50% de rocha e bacias de detenção fechadas.

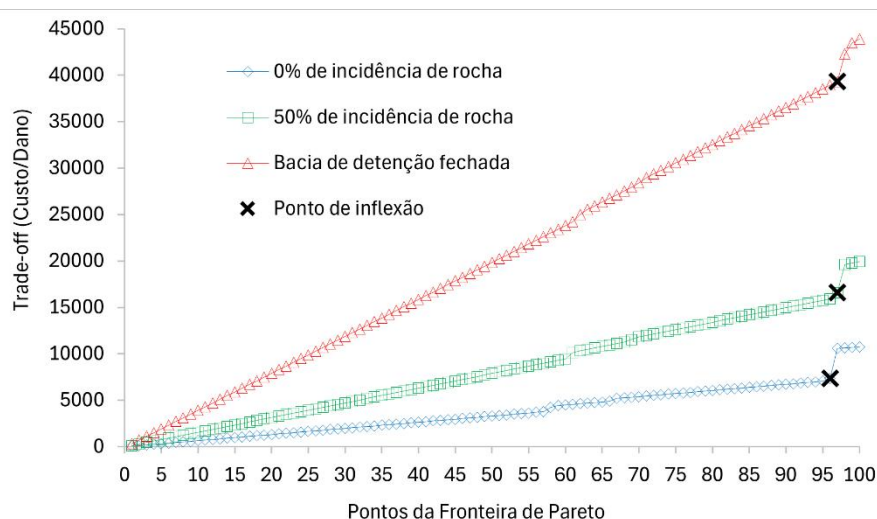


Figure 11. *Trade-offs* ($\Delta\text{Custo}/\Delta\text{Dano}$) para TR=25 anos.

As curvas indicam que, no cenário sem incidência de rocha, os primeiros incrementos de mitigação apresentam baixa inclinação, indicando maior eficiência econômica inicial. À medida que se avança ao longo da Fronteira de Pareto, a inclinação aumenta, evidenciando retornos decrescentes. Para o cenário com 50% de rocha, observa-se inclinação inicial mais elevada e crescimento mais acentuado, indicando maior custo marginal desde os primeiros níveis de mitigação. Já o cenário de bacias fechadas apresenta as maiores inclinações em toda a extensão da curva, caracterizando um contexto de elevados custos incrementais.

A identificação dos pontos de inflexão permitiu delimitar regiões de mudança significativa no comportamento das curvas. O ponto de inflexão no cenário sem rocha ocorre em 7.340,06 R\$/R\$, enquanto no cenário com 50% de rocha esse valor se eleva para 16.602,13 R\$/R\$. Para as bacias fechadas, o ponto de inflexão atinge 39.310,07 R\$/R\$, evidenciando que, nesse caso, cada unidade adicional de redução de danos passa a demandar investimentos maiores.

Esses resultados indicam que, embora todos os cenários apresentem perda progressiva de eficiência econômica após os pontos de inflexão, o efeito é mais pronunciado para bacias fechadas. Do ponto de vista do planejamento, tais pontos podem ser interpretados como limiares econômicos de projeto, a partir dos quais os benefícios marginais de mitigação passam a ser superados pelos custos adicionais.

A verificação de pontos de inflexão em Fronteiras de Pareto como instrumentos de apoio à decisão foi enfatizada por Proença & Oliveira, 2020, que demonstram que regiões de “joelho” da curva representam regiões importante por

concentrarem os melhores compromissos entre eficiência econômica e desempenho dos sistemas avaliados.

Conclusões

Este estudo desenvolveu e aplicou uma estrutura integrada de apoio à decisão para o planejamento de sistemas de drenagem urbana, combinando modelagem hidrológica e hidrodinâmica com otimização multiobjetivo. A aplicação na bacia do riacho Moxotó, em Recife (PE), permitiu verificar a suscetibilidade a inundações, estimar danos econômicos e avaliar alternativas de mitigação baseadas na implantação de reservatórios de detenção distribuídos.

As simulações hidráulicas indicaram a que os eventos extremos na área de estudo, podem apresentar profundidades máximas de inundação de até 1,914 m para o tempo de retorno de 50 anos. As Fronteiras de Pareto obtidas para TR = 10, 25 e 50 anos demonstraram que reduções adicionais de danos passam a exigir aumentos gradativamente desproporcionais nos custos de implantação.

Os resultados indicaram forte sensibilidade dos custos às condições geotécnicas e ao tipo de reservatório. A presença de 50% de rocha implicou elevações de custo da ordem de 137% a 146%, enquanto a adoção de bacias fechadas resultou em aumentos ainda mais expressivos, entre 475% e 497%, para níveis equivalentes de mitigação. Esses achados evidenciam que fatores construtivos podem deslocar significativamente o equilíbrio entre os custos e os benefícios das soluções.

A análise das variáveis de decisão mostrou que o modelo privilegiou o ajuste da área em planta como principal mecanismo de otimização, mantendo alturas e diâmetros de saída com

pequenas variações, de modo a respeitar as condições hidráulicas de pré-urbanização. Além disso, a identificação de pontos de inflexão nas Fronteiras de Pareto mostrou-se como um instrumento importante de apoio à decisão, ao identificar limiares a partir dos quais os ganhos adicionais de mitigação passam a demandar investimentos substancialmente maiores.

Como principal contribuição, o estudo demonstra o potencial de integrar simulação hidrológico-hidráulica, estimativa de danos econômicos e otimização multiobjetivo em um único arcabouço quantitativo, capaz de subsidiar decisões técnicas e econômicas no planejamento da drenagem urbana. Como perspectivas futuras, recomenda-se avaliação de soluções envolvendo infraestrutura cinza e verde, a consideração de cenários de mudanças climáticas e a inclusão de indicadores sociais e ambientais.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro concedido por meio da bolsa de doutorado, fundamental para a realização deste trabalho. Agradecem também à Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), pelo suporte institucional e pela infraestrutura disponibilizada ao longo do desenvolvimento da pesquisa.

Referências

- Alencar, A. V., Lafayette, F. B., Batista Filho, G., Silva, P. O., & Vasconcelos, R. F. A. (2016). *Manual de drenagem e manejo das águas pluviais do Recife*. Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana – EMLURB.
- Arora, J. S. (2012). Multi-objective optimum design concepts and methods. In J. S. Arora (Ed.), *Introduction to optimum design* (3rd ed., pp. 657–679). *Academic Press*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381375-6.00017-6>
- Blaudt, L. M., Alvarenga, T. W., & Garin, Y. (2023). Desastre ocorrido em Petrópolis no verão de 2022: Aspectos gerais e dados da Defesa Civil. *Geociências (UNESP)*, 41(4), 59–71
- Brunner, G. W. (2020). HEC-RAS: River analysis system hydraulic reference manual. *U.S. Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center*.
- Chen, J., Wang, S., & Wu, R. (2024). Optimization of the integrated green gray–blue system to deal with urban flood under multi-objective decision-making. *Water Science & Technology*, 89(2), 434–450. <https://doi.org/10.2166/wst.2023.411>
- CHI. (2020). PCSWMM User's Manual. *Computational Hydraulics International*.
- Cioffi, F., De Bonis Trapella, A., Giannini, M., & Lall, U. (2022). A flood risk management model to identify optimal defence policies in coastal areas considering uncertainties in climate projections. *Water*, 14(1481). <https://doi.org/10.3390/w14091481>
- Confederação Nacional de Municípios. (2023). *Danos e prejuízos causados por desastres no Brasil entre 2013 a 2023*. https://cnm.org.br/storage/biblioteca/2022/Estudos_tecnicos/202204_ET_DEF_Danos_Prejuizos_Causados_Desastres2023.pdf
- Dias, M. L., et al. (2025). Evaluating the performance of on-site stormwater detention based on the technical guidelines for developing stormwater projects in Belo Horizonte, MG, Brazil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 30, e025004. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.302520250042>
- Federação do Comércio de Bens e de Serviços do Estado do Rio Grande do Sul. (2024, 20 de maio). *Perdas patrimoniais de empresas gaúchas podem chegar a R\$ 10 bilhões em razão das enchentes*. Correio do Povo
- Gnan, E., Friedland, C. J., Rahim, M. A., Mostafiz, R. B., Rohli, R. V., Orooji, F., & Taghinezhad, A. (2022). Improved building-specific flood risk assessment and implications of depth-damage function selection. *Frontiers in Water*, 4, 919726. DOI: 10.3389/frwa.2022.919726
- Greenpeace Brasil. (2023, 29 de maio). *Um ano das chuvas em Recife: Tragédia pode voltar a ocorrer se não houver ação do poder público*. <https://www.greenpeace.org/brasil/imprensa/um-ano-das-chuvas-em-recife-tragedia-pode-voltar-a-ocorrer-se-nao-houver-acao-do-poder-publico/>
- Hosseinzadeh, A., Behzadian, K., Rossi, P., Karami, M., Ardeshtir, A., & Haghighi, A. T. (2023). A new multi-criteria framework to identify optimal detention ponds in urban drainage systems. *Journal of Flood Risk Management*, 16(2), e12890. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12890>
- Huff, F. A. (1967). Time distribution of rainfall in heavy storms. *Water Resources Research*, 3(4), 1007–1019
- Liu, Y., Zang, W., Li, B., Chai, F., & Liu, X. (2025). Urban flood model-driven optimization

- of flood control and drainage engineering solutions. *Water*, 17(11), 1705. <https://doi.org/10.3390/w17111705>
- Loucks, D. P., & Van Beek, E. (2017). Water resource systems planning and management. *Springer*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-44234-1>
- Marengo, J. A., Alcântara, E., Cunha, A. P., Seluchi, M., Nobre, C. A., Dolif, G., Gonçalves, D., Assis Dias, M., Cuartas, L. A., Bender, F., Ramos, A. M., Mantovani, J. R., Alvalá, R. C., & Moraes, O. L. (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>
- Munich Reinsurance Company. (2024). *Natural disasters in 2023: Munich Re NatCatSERVICE Full Year Factsheet*. Munich
- Ngamaliu-Nengoué, U. A., Martínez-Solano, F. J., Iglesias-Rey, P. L., & Mora-Meliá, D. (2019). Multi-objective optimization for urban drainage or sewer networks rehabilitation through pipes substitution and storage tanks installation. *Water*, 11(5), 935. <https://doi.org/10.3390/w11050935>
- Proença, L. M., & Oliveira, F. H. (2020). Knee points in Pareto fronts: understanding trade-offs in multi-objective optimization. *Mathematics*, 8(10), 1651. <https://doi.org/10.3390/math8101651>
- Rosenthal, R. E. (2023). *GAMS: A user's guide*. GAMS Development Corporation.
- Rossmann, L. A., & Huber, W. C. (2016). *Storm Water Management Model Reference Manual Volume I – Hydrology (Revised)*. U.S. Environmental Protection Agency.
- Sun, L., Zhang, Y., & Zhang, X. (2021). Multi-objective optimization of urban drainage systems considering economic cost and environmental impact. *Journal of Cleaner Production*, 292, 125988. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125988>
- Tucci, C., & Cruz, M. (2007). Otimização das obras de controle de cheias em uma bacia urbana. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 12(2), 63–80. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v12n2.p63-80>
- UNDRR & CRED. (2020). *The human cost of disasters: An overview of the last 20 years (2000–2019)*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction
- Lima Neto, V. de S., Tavares, P. R. L., Castro, M. A. H. de, & Cabral, J. J. da S. P. (2024). Análise da implantação de reservatórios de retenção em lotes urbanos. *Revista de Geociências do Nordeste*, 10(1). <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2024v10n1ID34911>
- Xie, X., Liao, W., Zhang, K., & Zhang, H. (2022). Urbanization and its impact on runoff generation: A review. *Journal of Hydrology*, 610, 127964
- Yang, B., Zhang, T., Li, J., Feng, P., & Miao, Y. (2023). Optimal designs of LID based on LID experiments and SWMM for a small-scale community in Tianjin, north China. *Journal of Environmental Management*, 334, 117442
- Yang, Y., Xin, Y., & Li, J. (2023). Surrogate-based multiobjective optimization of detention pond volume in sponge city. *Water*, 15(15), 2705. <https://doi.org/10.3390/w15152705>
- Zhang, Y., Wang, E., & Gong, Y. (2024). A structural optimization of urban drainage systems: An optimization approach for mitigating urban floods. *Water*, 16(1696). <https://doi.org/10.3390/w16121696>
- Zhou, K., et al. (2024). Urban flood risk management needs nature-based solutions. *Nature Sustainability*, 7, 250–262. <https://doi.org/10.1038/s42949-024-00162-z>