



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

EDUARDO LUIZ CHAVES DE MEDEIROS

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DO RIACHO SÍTIO DOS PINTOS NO
RECIFE/PE INCLUINDO OS EFEITOS DE TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS**

Recife
2022

EDUARDO LUIZ CHAVES DE MEDEIROS

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DO RIACHO SÍTIO DOS PINTOS NO
RECIFE/PE INCLUINDO OS EFEITOS DE TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS**

Dissertação 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 Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos com ênfase em Recursos Hídricos.

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

Recife

2022

Catalogação na fonte:
Bibliotecária Sandra Maria Neri Santiago, CRB

M488m Medeiros, Eduardo Luiz Chaves de.
Modelagem computacional do Riacho Sítio dos Pintos no Recife/PE incluindo os efeitos de técnicas compensatórias / Eduardo Luiz Chaves de Medeiros. – 2022.
112 f.: il., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco.
CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2022.
Inclui referências e anexos.

1. Engenharia civil. 2. Drenagem urbana. 3. Reservatório. 4. HEC-HMS. 5. Hidrologia. 6. Inundações. 7. Riacho Sítio dos Pintos – Recife (PE). I. Cabral, Jaime Joaquim da Silva Pereira (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG / 2022-63

EDUARDO LUIZ CHAVES DE MEDEIROS

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DO RIACHO SÍTIO DOS PINTOS NO
RECIFE/PE INCLUINDO OS EFEITOS DE TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS**

Dissertação 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 Mestre em Engenharia Civil. Área de Concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Aprovada em: 28/01/2022.

BANCA EXAMINADORA

Participação por videoconferência
Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Participação por videoconferência
Profa. Dra. Andreza Tacyana Felix Carvalho (Examinadora externa)
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte

Participação por videoconferência
Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo (Examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho à minha mãe Jerlene Chaves Monteiro, que sempre me incentivou e apoiou nos momentos de dificuldade, e à minha irmã Natália Francielle Monteiro Porpino, por me serviu de inspiração para toda a vida, mostrando-me que as grandes conquistas são alcançadas com bastante empenho.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me dar forças para passar por essa jornada e me mostrar o quanto sou abençoado em minha vida. Aos meus mentores espirituais, por sempre guardarem pela minha segurança e pelo meu sucesso.

À minha mãe, Jerlene Chaves Monteiro, e à minha irmã, Natália Francielle Monteiro Porpino, que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegassem a essa etapa da minha vida, sempre me incentivando a seguir em frente com muito amor. À minha avó Creusa Chaves Monteiro, à minha prima e madrinha Sharlene Fransis Monteiro Mendes e aos meus demais familiares pelo incentivo e apoio incondicional.

Aos meus amigos Júlia, Gisely, Érica, Joelithon, Fabrícia, Luttemberg, Maria Paula, Katielly, Elyson, Francisco Neto e Marcos, por serem meus cúmplices durante o mestrado, mesmo os que estavam longe, e por seguirem me mostrando que grandes laços de amor e amizade podem ser formados e mantidos eternamente. Aos meus amigos do Ceará Sadan, Anara, Raíssa, Allan e Letícia, por estarem ao meu lado, apesar da distância, por acreditarem na minha capacidade, e me incentivarem a nunca desistir de continuar.

À Danilo Feitosa, por ter sido o meu companheiro e maior suporte durante a pandemia, por sempre ter me dado forças para continuar, e seguir torcendo por mim, mesmo de longe. Tudo isso teria sido dez vezes mais difícil sem seu apoio.

Ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE, e às pessoas com quem convivi ao longo desses anos. A experiência de conviver com profissionais acadêmicos tão focados e exemplares será para sempre uma referência em minha formação acadêmica. Ao professor Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral, pelo suporte e orientação, tornando esse trabalho possível de ser realizado. E à todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta etapa da minha vida.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Agradecimento à CAPES pelo apoio das bolsas de pesquisa e pós-graduação e à Secretaria de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente pelo apoio para a pesquisa da Unidade de Conservação de Sítio dos Pintos.

RESUMO

Devido à alta taxa de urbanização, alagamentos são problemas recorrentes em Recife. A drenagem urbana é o gerenciamento das águas pluviais, visando diminuir os prejuízos causados por alagamentos, tornando o processo de urbanização mais seguro e sustentável. A revitalização de riachos contribui à melhoria da qualidade da água e do sistema de drenagem de águas pluviais, reduzindo impactos de eventos climáticos extremos. O presente estudo tem como objetivo geral realizar modelagens hidrológicas na macrodrenagem do riacho Sítio dos Pintos e do córrego da Fortuna, a fim de avaliar alternativas de controle às inundações geradas, e propor medidas de revitalização dos corpos hídricos mencionados. Utilizou-se o modelo hidrológico HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System), a partir de dados de entrada, como estudo analítico das chuvas de Recife e dados do terreno disponibilizados pelo PE3D (Pernambuco Tridimensional). As sub-bacias foram delimitadas por meio de software de geoprocessamento QGIS e de suas ferramentas, sendo possível construir o modelo hidráulico da bacia. Alternativas foram apresentadas para a revitalização do trecho do riacho e do córrego estudados, com o dimensionamento de reservatórios de detenção. Os resultados mostraram uma considerável redução do pico de vazão em todos os tempos de retorno de precipitação considerados, além de não ultrapassar a elevação máxima nos reservatórios dimensionados. No reservatório USF Sítio dos Pintos, houve redução de quase 70% do pico de vazão, e no reservatório USF Córrego da Fortuna, houve redução de mais de 72% do pico de vazão, evidenciando a viabilidade da implantação de reservatórios de detenção no riacho Sítio dos Pintos. Os projetos de revitalização se mostraram promissores para a utilização pela população das áreas de construção dos reservatórios. Ambos trariam grandes benefícios socioeconômicos para o bairro Sítio dos Pintos, proporcionando áreas recreativas para a população e diminuindo os prejuízos causados pelos danos das inundações recorrentes na área.

Palavras-chave: drenagem urbana; reservatório; HEC-HMS; Hidrologia; inundações.

ABSTRACT

Due to the high urbanization rate, flooding is a recurrent problem in Recife. Urban drainage is the management of rainwater, aiming to reduce the damage caused by flooding, making the urbanization process safer and more sustainable. The revitalization of streamlets contributes to the improvement of water quality and the rainwater drainage system, reducing impacts from extreme weather events. The present study has as general objective to carry out hydrological modeling in the macro-drainage of the riacho Sítio dos Pintos and the córrego da Fortuna, in order to evaluate alternatives to control the generated floods, and to propose measures for the revitalization of the water bodies mentioned. The HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System) hydrological model was used, based on input data, such as an analytical study of rainfall in Recife and terrain data provided by PE3D (Pernambuco Tridimensional). The sub-basins were delimited using QGIS geoprocessing software and its tools, making it possible to build the hydraulic model of the basin. Alternatives were presented for the revitalization of the stretch of streams studied, with the dimensioning of detention reservoirs. The results showed a considerable reduction in the peak flow in all precipitation return times considered, in addition to not exceeding the maximum elevation in the dimensioned reservoirs. In the USF Sítio dos Pintos reservoir, there was a reduction of almost 70% in the peak flow, and in the USF córrego da Fortuna reservoir, there was a reduction of more than 72% in the peak flow, showing the availability of implementing detention reservoirs in the riacho Sítio dos Pintos. The revitalization projects are promising for the population's use of the reservoir construction areas. Both would bring great socioeconomic benefits to the Sítio dos Pintos neighborhood, providing recreational areas for the population and reducing the harm caused by the damage of recurrent flooding in the area.

Keywords: urban drainage; reservoir; HEC-HMS; Hydrology; floods.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Características das alterações no uso do solo.....	21
Figura 2 – Presença de ocupações obstruindo a passagem natural do riacho Sítio dos Pintos e trecho com vegetação preservada, mas com cheiro e cor de esgoto devido à ocupação a montante.....	47
Figura 3 – Localização da UCN Sítio dos Pintos.....	63
Figura 4 – Localização do bairro Sítio dos Pintos em Recife.	65
Figura 5 – Imagem de satélite do bairro Sítio dos Pintos em Recife.	66
Figura 6 – Locais de Estudo do riacho Sítio dos Pontos e córrego da Fortuna.....	66
Figura 7 – Localização dos trechos da sub-bacia estudados.....	67
Figura 8 – Hietograma elaborado pelo método dos blocos alternados.	71
Figura 9 – Localização do reservatório proposto USF Sítio dos Pintos.....	72
Figura 10 – Localização do reservatório proposto USF Córrego da Fortuna.	72
Figura 11 – Curvas de nível do reservatório USF Sítio dos Pintos (a). Fotografia do local de implantação deste reservatório (b). Perímetro do reservatório USF Córrego da Fortuna (c). Fotografia do local para implantação deste reservatório (d).	74
Figura 12 – Water Square projetada em Roterdã, Holanda, com praça em situação de dias secos, de nível médio de inundação e de nível total de inundação.....	76
Figura 13 – Construção de reservatório de detenção na Praça Celso Luft, em Porto Alegre, com vistas em perspectiva do projeto e da construção do reservatório.	77
Figura 14 – Delimitação da bacia hidrográfica do riacho Sítio dos Pintos.....	80
Figura 15 – Delimitação das sub-bacias do riacho.....	80
Figura 16 – Curva Cota-Volume do reservatório USF Sítio dos Pintos.	82
Figura 17 – Hietogramas estimados para os tempos de retorno considerados no estudo: $Tr = 2$ anos (A); $Tr = 5$ anos (B); $Tr = 10$ anos (C); e $Tr = 25$ anos (D).	83
Figura 18 – Hidrogramas de vazão de entrada e saída do reservatório proposto para os tempos de retorno considerados.	84

Figura 19 – Gráficos com dados de armazenamento máximo e elevação do nível d'água máxima no reservatório com tempo de retorno de 2 anos.	85
Figura 20 – Gráficos com dados de armazenamento máximo e elevação do nível d'água máxima no reservatório com tempo de retorno de 5 anos.	86
Figura 21 – Gráficos com dados de armazenamento máximo e elevação do nível d'água máxima no reservatório com tempo de retorno de 10 anos.	86
Figura 22 – Gráficos com dados de armazenamento máximo e elevação do nível d'água máxima no reservatório com tempo de retorno de 25 anos.	87
Figura 23 – Esboço da área de lazer proposta. Praça em situação de dias secos (a). Praça em situação de nível médio de inundação (b). Praça em situação de nível total de inundação (c).	89
Figura 24 – Curva Cota-Volume do reservatório USF Córrego da Fortuna.....	90
Figura 25 – Hidrogramas de vazão de entrada e saída do reservatório proposto para os tempos de retorno considerados.	92
Figura 26 – Gráficos com dados de armazenamento máximo e elevação do nível d'água máxima no reservatório com tempo de retorno de 2 anos.	93
Figura 27 – Gráficos com dados de armazenamento máximo e elevação do nível d'água máxima no reservatório com tempo de retorno de 5 anos.	93
Figura 28 – Gráficos com dados de armazenamento máximo e elevação do nível d'água máxima no reservatório com tempo de retorno de 10 anos.	94
Figura 29 – Gráficos com dados de armazenamento máximo e elevação do nível d'água máxima no reservatório com tempo de retorno de 10 anos.	94
Figura 30 – Redução do pico de vazão de saída para tempo de retorno de 25 anos.	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados de entrada para modelagem computacional.....	74
Tabela 2 – Parâmetros de cálculo do orifício de saída dos reservatórios.....	75
Tabela 3 – Dados das sub-bacias do riacho.....	81
Tabela 4 – Dados de cota, área e volume do reservatório.....	82
Tabela 5 – Demais parâmetros resultantes da simulação hidrológica.....	87
Tabela 6 – Dados de cota, área e volume do reservatório.....	90
Tabela 7 – Demais parâmetros resultantes da simulação hidrológica.....	95
Tabela 8 – Resultado da simulação considerando os dois reservatórios.....	97

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ANE	Associação Águas do Nordeste
APA	Área de Proteção Ambiental
CML	Camara Municipal de Lisboa
CN	<i>Curve Number</i>
COHAB	Companhia de Habitação Popular
COMPESA	Companhia Pernambucana de Saneamento
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO	Demanda Biológica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EMLURB	Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana
EUA	Estados Unidos da América
FCTH	Fundação Centro Tecnológico de Hidrologia
FOSS	<i>Free and Open Source Software</i>
GESAD	Grupo de Estudos em Saneamento Descentralizado
GO	Goiás
HEC-DSS	<i>Hydrologic Engineering Center - Data Storage System</i>
HEC-HMS	<i>Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System</i>
HEC-RAS	<i>Hydrologic Engineering Center - River Analysis System</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDF	Intensidade – Duração – Frequência
IPAV	Imóvel de Proteção de Área Verde
IPPUC	Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
MDT	Modelo Digital do Terreno
ONG	Organização Não Governamental
OSGeo	<i>Open Source Geospatial Foundation</i>
PDDR	Plano Diretor de Drenagem de Recife
PE	Pernambuco
PE3D	Pernambuco Tridimensional

PEC	Padrão de Exatidão Cartográfica
PPP	Parceria Público-Privada
PSHPE	Programa de Sustentabilidade Hídrica de Pernambuco
QGIS	<i>Quantum Geographic Information System</i>
RMR	Região Metropolitana de Recife
RPA	Região Político Administrativa
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
SEMADS	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
SES	Sistema de Esgotamento Sanitário
SEUC	Sistema Estadual de Unidades de Conservação
SIG	Sistemas de Informação Geográficas
SMUP	Sistema Municipal de Unidades Protegidas
SNUC	Sistema Nacional de Unidades de Conservação
SWMM	<i>Storm Water Management Model</i>
TIF	<i>Tagged Image File</i>
UCN	Unidade de Conservação da Natureza
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UFRPE	Universidade Federal Rural de Pernambuco
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USA	<i>United States of America</i>
USACE	<i>United States of America Corps of Engineers</i>
USF	Unidade de Saúde da Família
ZEPA	Zona Especial de Proteção Ambiental

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS.....	19
2.1.	OBJETIVO GERAL.....	19
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
3.1	CICLO HIDROLÓGICO	20
3.2	PRECIPITAÇÃO.....	23
3.3	INUNDAÇÃO URBANA E SISTEMA DE DRENAGEM DE RECIFE	27
3.4	SISTEMAS DE MACRODRENAGEM E TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS	29
3.5	GEOPROCESSAMENTO.....	33
3.6	MODELAGEM HIDROLÓGICA	35
3.7	MODELO SCS CURVE NUMBER	38
3.8	MODELAGEM NO HEC-HMS	41
3.9	PLANO DE MANEJO DO RIACHO SÍTIO DOS PINTOS.....	45
3.10	ESTUDOS DE TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS APLICADAS EM RIACHOS	50
4	REVITALIZAÇÃO DE RIOS E RIACHOS: ESTUDO DE CASOS	52
4.1	RIO CHEONG GYE CHEON, SEUL, CORÉIA DO SUL.....	52
4.2	RIO TEJO, LISBOA, PORTUGAL	53
4.3	RIO TÂMISA, LONDRES, REINO UNIDO.....	55
4.4	RIO SENA, PARIS, FRANÇA.....	57
4.5	RIO PIRARUNGUAU, SÃO PAULO, BRASIL	58
4.6	PARQUE BARIGUI, CURITIBA, BRASIL	60
5	METODOLOGIA	62
5.1	ÁREA DE ESTUDO.....	62
5.2	DELIMITAÇÃO DA BACIA	67

5.3	CARACTERIZAÇÃO HIDROLÓGICA DA BACIA.....	69
5.4	MODELAGEM COMPUTACIONAL.....	71
5.5	COMPATIBILIZAÇÃO SOCIO URBANÍSTICA DOS RESERVATÓRIOS DE DETENÇÃO	75
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
6.1	CONDIÇÕES HIDRÁULICAS DAS SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS	79
6.2	RESERVATÓRIO USF SÍTIO DOS PINTOS.....	81
6.3	RESERVATÓRIO USF CÓRREGO DA FORTUNA	90
6.4	ANÁLISE COM OS DOIS RESERVATÓRIOS	96
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	98
7.1	RECOMENDAÇÕES	99
	REFERÊNCIAS.....	101
	ANEXO A – NOTA TÉCNICA COMPESA	111

1 INTRODUÇÃO

O gerenciamento das águas pluviais urbanas é de extrema importância visando diminuir os prejuízos causados por alagamentos, tornando o processo de urbanização mais seguro e sustentável. O aumento da população nas cidades leva a altas taxas de impermeabilização, o que impede a infiltração das águas pluviais no solo, aumentando os picos de vazões dos hidrogramas de escoamento superficial. O resultado de todo esse processo é a ocorrência de inundações nos grandes centros urbanos (TUCCI, 2002).

Um dos subsistemas englobados pela drenagem urbana é a macrodrenagem. Esta é a remoção do excesso de água acumulada em locais relativamente grandes, a níveis urbanos, que não pôde infiltrar-se no solo. Esse sistema corresponde a uma rede de drenagem natural, formada antes da urbanização, e é constituído por rios, riachos e córregos. A macrodrenagem pode receber águas provindas de obras que a altere ou complemente, como canais e barragens.

Por outro lado, a impermeabilização do solo e o desenvolvimento de canalização para a coleta, escoamento e disposição de águas de chuva causam grandes alterações no ciclo hidrológico, ocasionando enchentes e a permanência de locais alagados, que estão associados às cheias urbanas. Erros na concepção de projetos de drenagem, ou falhas nos seus subsistemas, além da falta de manutenção nessas estruturas após sua conclusão acarretam na incidência de cheias. Assim, os projetos de drenagem urbana devem ser desenvolvidos em conjunto com o plano de crescimento urbano das cidades.

Uma maneira de reduzir os picos de vazão que ocorrem em eventos de cheias seria o amortecimento de enchentes em reservatórios. Estudar o amortecimento de cheias é fundamental para analisar como um reservatório se comporta com relação ao seu nível máximo, diante de uma onda de cheia. Os reservatórios acumulam temporariamente uma parte do volume de água, em função de amortecer a onda de cheia, diminuindo o risco de inundações a jusante. Esta é uma das diversas funções dos reservatórios superficiais, além do controle de enchentes e regularização de vazões.

A aplicação dos métodos tradicionais de drenagem urbana, com base na rápida transferência da água a jusante, pode aumentar a frequência de alagamentos. Buscando melhores alternativas, têm-se os reservatórios de

amortecimento, que são medidas compensatórias que se fundamentam na retenção e infiltração da água, diminuindo o volume escoado (TOMINAGA, 2013). Os reservatórios, quando usados como estruturas de acumulação temporária de água, mantidos secos na estiagem, são chamados de reservatórios de detenção. Quando mantêm uma lâmina de água permanente, são chamados de reservatórios de retenção.

A capital pernambucana é formada por uma planície aluvial, tendo as ilhas, penínsulas e manguezais como suas principais características geográficas, sendo cercada por rios. Além disso, há o encontro dos rios Beberibe e Capibaribe, que deságuam no Oceano Atlântico. A cidade possui um clima quente e úmido, com elevada umidade relativa do ar e altos índices de precipitação ao longo do ano. Com relação à Região Metropolitana de Recife (RMR), há uma vasta rede de rios, riachos e canais, sendo interligados ao sistema de drenagem urbana da região.

Devido à sua alta taxa de urbanização, alagamentos são problemas recorrentes em Recife, provocados pelas águas pluviais. A variação diária do nível do mar, que altera o regime de escoamento dos riachos da cidade, combinado com o crescimento populacional não planejado, a impermeabilização do solo e os aterros realizados contribuem para a ocorrência de inundações em diversos pontos da cidade (CABRAL e ALENCAR, 2005).

Conforme o Plano Diretor de Drenagem de Recife (PDDR, 2015), alguns dos problemas recorrentes do sistema de drenagem urbana de Recife são: o uso do sistema para escoamento de rejeitos; ocupação de áreas de inundações; obstruções na macrodrenagem em virtude da presença de esgoto; galerias danificadas; e ocupação de morros e encostas, aumentando a vazão e o acúmulo de sedimentos. Um objetivo fundamental do PDDR é solucionar os problemas de inundações no sistema de macrodrenagem de Recife.

O riacho Sítio dos Pintos localiza-se no bairro Sítio dos Pintos, em Recife, e sofre pelo descarte incorreto de esgoto, assoreamento e problemas em épocas de chuvas intensas, além de ocupações irregulares das margens do riacho. Outros estudos foram feitos no riacho, com coletas de amostras de água para análises bacteriológicas e físico-químicas e acredita-se que removendo as famílias que ocupam irregularmente as margens do riacho, cessando o despejo de esgoto, o riacho poderia ser renaturalizado em cinco anos (MELO, 2018).

Segundo o Presidente da Associação Águas do Nordeste (ANE), Ricardo Braga, um projeto de manejo para a UCN Sítio dos Pintos foi apresentado aos órgãos públicos. A área da UCN tem muita vegetação, porém sua urbanização se deu sem nenhum planejamento, com a UCN Sítio dos Pintos sendo criada dentro de um bairro. Ademais, o Sítio dos Pintos possui onze olhos d'água e seis riachos, dois deles sendo afluentes do riacho Sítio dos Pintos (LINS, 2017).

A obtenção de informações geográficas e hidrológicas pode ser feita por meio de Geoprocessamento, que representa um conjunto de tecnologias capazes de coletar e tratar informações geográficas ou dados georreferenciados. Em Pernambuco, há uma ferramenta de geoprocessamento pioneira no mapeamento em 3D de seu território, o Pernambuco Tridimensional (PE3D), que permite a realização do estudo topográfico detalhado do território estadual. Além de possuir enorme potencial de utilização para as intervenções que requerem detalhamento preciso do terreno, o PE3D pode ser utilizado para o controle da expansão urbana em bases sustentáveis (PE3D, 2016).

O estudo de um sistema hidrológico visa analisar sua operação e prever suas saídas, a fim de entendê-lo e buscar diferentes resultados para diferentes simulações. Isso é possível por meio de um modelo hidrológico, que é a representação matemática de um sistema, bastante utilizado para se antecipar a eventos como o impacto da urbanização de uma bacia antes de sua ocorrência e a previsão de uma inundação em tempo real. Segundo Chow (1988), um modelo hidrológico pode ser usado para estudar o comportamento de uma bacia hidrográfica, utilizando-se dados de precipitações de projeto, com diferentes durações e frequências, e ainda prever e simular situações hipotéticas, objetivando avaliar riscos.

A urbanização das grandes cidades e seu crescimento populacional ocasiona um aumento na demanda de recursos hídricos locais, a fim de abastecer as necessidades básicas da população. Entretanto, a capacidade de recuperação natural do ecossistema é inferior aos recursos disponíveis. Além disso, como consequência do aumento do consumo de água, maior volume de esgoto é lançado nos rios, e, caso não haja tratamento adequado, ocorre a degradação do ecossistema aquático e danos à saúde pública são causados por meio de transmissão de doenças.

Existem diversos modelos matemáticos e computacionais que simulam e avaliam a qualidade da água nos cursos d'água, a fim de analisar e buscar soluções para tais problemas ambientais. Os modelos de qualidade da água são ferramentas físicas, químicas e biológicas eficientes para estimar e prever a qualidade da água de corpos hídricos (GASTALDINI, SEFFRIN e PAZ, 2002). Sua implementação computacional é feita representando diferentes processos químicos e microbiológicos que afetam a concentração de poluentes em corpos hídricos, envolvidos na sua biodegradação.

Os riachos podem ser qualificados como urbanos quando possuírem um grau maior ou menor de contato com o ambiente da cidade. Um riacho urbano possui uma função ecológica e ambiental fundamental para o meio em que se encontra. Também contribui para a drenagem das águas pluviais e microclima urbano, além de favorecer a estética local, implementando áreas de lazer aos moradores e proporcionando um local propício à educação ambiental (CABRAL, 2012).

Como medidas para a revitalização dos corpos hídricos estudados, serão propostos projetos de reservatórios de detenção nas áreas estudadas, para realizar a drenagem sustentável das águas pluviais. A revitalização de riachos compreende a gestão de ações de âmbito ecológico, hidráulico e hidrológico, onde suas funções ambientais e sociais podem ser recuperadas com relação à sua biodiversidade. Além disso, segundo Cabral (2012), contribui à melhoria da qualidade da água e do sistema de drenagem de águas pluviais, reduzindo impactos de eventos climáticos extremos.

2 OBJETIVOS

Neste capítulo, serão apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos do presente trabalho.

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente estudo tem como objetivo geral realizar modelagens hidrológicas na macrodrenagem do riacho Sítio dos Pintos e do córrego da Fortuna, a fim de avaliar a eficiência de técnicas compensatórias para o controle das inundações geradas, propondo medidas de revitalização de áreas próximas aos corpos hídricos mencionados.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obter dados do relevo para delimitar as sub-bacias, utilizando o modelo digital do terreno da bacia hidrográfica;
- Conceber o modelo do riacho Sítio dos Pintos e do córrego da Fortuna no HEC-HMS;
- Realizar simulações para estimativa das vazões geradas, considerando eventos chuvosos extremos e futuros;
- Simular a aplicação de técnicas compensatórias para controle de cheias do riacho Sítio dos Pintos e do córrego da Fortuna, por meio do modelo hidrológico HEC-HMS;
- Propor projetos de revitalização de áreas próximas ao riacho Sítio dos Pintos e ao córrego da Fortuna, visando compatibilização sócio urbanística com o reservatório de detenção.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir, será apresentada a revisão bibliográfica, analisando amplamente conceitos relacionados a drenagem urbana, hidrologia e modelagem computacional, importantes para o entendimento do estudo em questão. Foi realizada uma ampla análise das publicações correntes nesta área do conhecimento.

3.1 CICLO HIDROLÓGICO

Ciclo hidrológico é o movimento contínuo que a água faz pelo meio físico e pelos seres vivos do ecossistema global, passando através da atmosfera, hidrosfera, litosfera e biosfera. Os principais fatores que impulsionam o ciclo hidrológico são a energia solar, que aquece as águas superficiais, levando a sua evaporação, a energia eólica, que transporta o vapor d'água de um local a outro, e a força gravitacional, responsável pela precipitação, infiltração e deslocamento da água. As principais fases do ciclo hidrológico são a evaporação, precipitação, transpiração vegetal, e o escoamento, infiltração e drenagem da água (TUNDISI, 2003).

Há uma abundância de volume de água no planeta, com aproximadamente 47 mil km³ retornando aos oceanos. Porém, há uma má distribuição da água no planeta, causando problemas de disponibilidade em diversos países. Além disso, a distribuição ao longo do ano não é homogênea, desequilibrando o processo, sendo necessária a realização de ações de gestão dos recursos hídricos para enfrentar a falta ou o excesso de água. Quanto mais complexa for a economia do local, maior será a necessidade de usos aos recursos hídricos, de forma que haverá um impacto econômico, hidrológico e social ao ciclo (TUNDISI, 2003).

Com o crescimento de populações dos centros urbanos, causado pelo processo de urbanização, aumenta a demanda por recursos hídricos, especialmente em áreas com períodos de escassez de água. Conforme Tundisi (2003), a redução do volume disponível de água acarreta grandes alterações nos ciclos hidrológicos regionais. Como exemplo, a construção de grandes reservatórios de água aumenta a taxa de evaporação, e a construção de canais de drenagem produz desequilíbrios no balanço hídrico natural. Além disso, o grau de urbanização interfere no sistema de drenagem de uma região, aumentando o escoamento superficial e diminuindo o

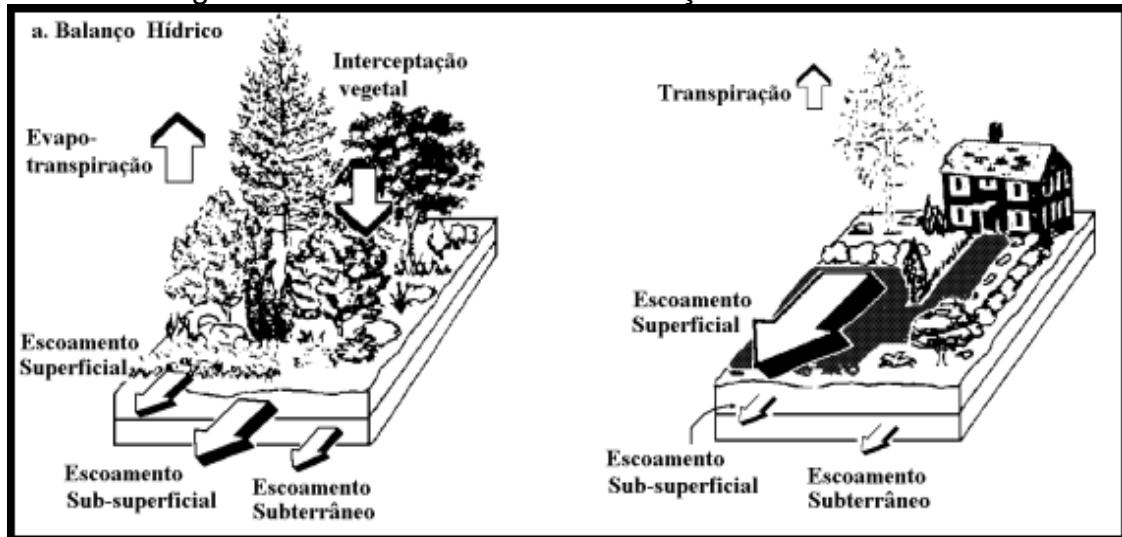
volume de água reservado nos lençóis freáticos. Todos esses fatores têm inúmeros impactos negativos à população e aos recursos hídricos.

Conforme Tucci (1997a), a alteração da cobertura vegetal devido ao desenvolvimento urbano provoca vários efeitos sobre os componentes naturais do ciclo hidrológico. A impermeabilização da cobertura do solo da bacia é um dos maiores impactos negativos no ciclo, sendo necessário a implantação de condutos para o escoamento pluvial. As principais alterações causadas são as seguintes:

- Redução da capacidade de infiltração no solo;
- Aumento do escoamento superficial. Além disso, ocorre a redução do tempo de deslocamento, devido aos condutos construídos que aumentam a velocidade do escoamento superficial, consequentemente aumentando os picos de vazão;
- Diminuição do nível do lençol freático por falta de alimentação do aquífero, em decorrência da redução da infiltração (principalmente quando a área urbana é muito extensa), reduzindo o escoamento subterrâneo;
- Redução da taxa de evapotranspiração, devido a substituição da cobertura natural do solo.

Pode ser visto na Figura 1 a caracterização do ciclo hidrológico, e as alterações no uso do solo devido à urbanização (TUCCI, 1997a).

Figura 1 – Características das alterações no uso do solo.



Fonte: Tucci (1997a).

Segundo Tucci (1997b), bacia hidrográfica é uma área de captação natural de água provinda de precipitação, composta por uma rede de drenagem, com um rio principal e seus afluentes, que escoam para um único ponto de saída, o exutório. Uma bacia é composta por um conjunto de superfícies vertentes, separadas por estruturas de relevo, como morro, picos e chapadas, sendo direcionadas pela topografia do terreno.

Os balanços de entrada de água de chuva e saída de água pelo exutório são realizados pela análise da bacia hidrográfica, sendo possível delimitá-la em bacias e sub-bacias menores, sendo conectadas pelos sistemas hídricos. A delimitação depende da escala do problema a ser solucionado, onde o tamanho ideal seria o que incorpora toda a área de interesse de estudo, conceito importante para a gestão adequada de recursos hídricos. Além disso, todas as atividades antrópicas são realizadas em uma bacia hidrográfica, sejam em áreas urbanas, industriais, agrícolas ou de preservação ambiental (PORTO e PORTO, 2008).

Os parâmetros físicos de uma bacia hidrográfica são os dados extraídos de mapas, aerofotogrametrias e imagens de satélite, que influenciam no escoamento superficial na bacia. Dentre eles, os mais importantes são: a área e forma da bacia, altitude e declividade média da bacia, densidade de drenagem, sinuosidade e relevo da bacia, e seu sistema de drenagem, formado pelo rio principal e seus afluentes.

Escoamento superficial consiste no escoamento de parcela da precipitação total pela superfície terrestre, seguindo para cursos d'água maiores e definidos. As vazões de cheias são consequência da precipitação excedente, principalmente em pequenas e urbanizadas bacias hidrográficas (TUCCI, PORTO e BARROS, 1995). A seguir, serão descritas as duas principais abordagens para o cálculo do escoamento superficial.

Primeiramente, há métodos baseados em relações empíricas que calculam a chuva excedente de forma direta, através de relações funcionais que consideram o total precipitado, o tipo de uso e ocupação do solo e a umidade excedente. São métodos facilmente aplicados, fornecendo resultados satisfatórios. Exemplos dessa classe de métodos são o método SCS Curve-Number, desenvolvido pelo Soil Conservation Service, do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, e o Método do Coeficiente de Escoamento Superficial (TUCCI, PORTO e BARROS, 1995; CANHOLI, 2015).

A segunda abordagem usada são metodologias baseadas em fórmulas de infiltração, que representam os processos físicos ocorrendo na camada superior do solo, para que seja determinada a chuva excedente. O maior empecilho na aplicação desses métodos é a escolha dos parâmetros das fórmulas usadas para cálculo da infiltração. Exemplos de métodos inclusos nesta abordagem são: o Método de Perda Inicial e Constante e o Método de Horton (TUCCI, PORTO e BARROS, 1995).

3.2 PRECIPITAÇÃO

Precipitação é a água que atinge a superfície terrestre, originada do processo de condensação da água em forma de vapor na atmosfera. A precipitação pode acontecer em várias formas físicas, como chuva, neblina, granizo, neve, entre outros. Para os estudos de hidrologia, a forma mais importante é a chuva, que produz escoamento superficial (TEIXEIRA, 2010).

A caracterização da precipitação se dá por meio de três grandezas: altura, duração e intensidade. A altura pluviométrica é o volume de chuva precipitado, medido em milímetros (mm). A duração é o período de tempo do evento de chuva, geralmente expresso em minutos ou horas. A intensidade é a grandeza que caracteriza a variabilidade temporal do evento, sendo medida geralmente em milímetros por hora (mm/h) ou milímetros por minuto (mm/min).

As precipitações são originadas do aumento de gotículas das nuvens, ocorrendo em determinadas condições de clima. Para que as gotas d'água precipitem, é preciso que o peso de seu volume seja superior as forças que as mantêm em suspensão, com uma velocidade de queda superior às forças verticais ascendentes dos movimentos atmosféricos (TEIXEIRA, 2010).

A classificação das precipitações é: chuvas frontais, orográficas e convectivas, sendo definidas segundo o fator responsável pela ascensão do ar úmido. As chuvas frontais possuem duração média e longa, ocasionadas pelos choques de massa de ar quente e frio, este sendo mais denso. O ar frio empurra a massa de ar quente para cima, resfriando-a e a fazendo condensar, produzindo chuvas.

As chuvas convectivas ocorrem quando o ar úmido é aquecido nas proximidades do solo, criando camadas de ar quente que se mantém em equilíbrio. Quando essa camada ascende, é resfriada rapidamente, condensando o vapor atmosférico, formando nuvens, precipitando. As chuvas orográficas ocorrem pela influência do relevo, quando ventos úmidos originados do oceano encontram obstáculos, como montanhas, causando sua ascensão e resfriamento, formando nuvens e possivelmente chuvas. Geralmente, são chuvas de intensidade baixa e alta duração.

Para a medição da precipitação em forma de chuva, existem pluviômetros e pluviógrafos, que possuem uma superfície circular horizontal de captação delimitada por um anel metálico e um reservatório que acumula a água que será aferida. Os pluviômetros mais simples, do tipo manual ou analógico, são lidos uma vez por dia pelo operador que registra a chuva diária. Os pluviógrafos fazem num papel o registro contínuo das alturas pluviais, que variam ao longo do tempo. No entanto, estão caindo em desuso pela dificuldade de operação e manutenção. Atualmente estão sendo cada vez mais usados os pluviômetros automáticos registradores que transformam a leitura da chuva numa informação digital e armazenam num datalogger.

Já os radares meteorológicos fazem uma estimativa da chuva baseada na emissão de pulsos de radiação eletromagnética refletidos pelas partículas de chuva na atmosfera, medindo a intensidade do sinal refletido. A refletividade, relação entre a intensidade do sinal enviado e recebido, correlaciona-se com a intensidade da chuva precipitada em determinada região (TEIXEIRA, 2010).

Para fins de projeto, a previsão de precipitações pode ser realizada com bases estatísticas, sendo a base para determinar a frequência de ocorrência de certos eventos extremos de precipitação. Segundo Tucci (2001), as intensidades máximas de precipitação podem ser calculadas pelas curvas Intensidade – Duração – Frequência (IDF), que relacionam a duração, intensidade e frequência na qual determinada precipitação pode ser igualada ou superada. É estabelecido que quanto maior for a intensidade da precipitação, menor será a sua duração, correlacionando esses dois parâmetros.

A determinação de chuvas extremas é fundamental para a elaboração de projetos de drenagem, onde as vazões podem ser obtidas indiretamente por

modelos de chuva-vazão. As equações de curvas IDF auxiliam no planejamento urbano, obtendo-se a partir delas, vazões equivalentes a eventos futuros que não podem ser obtidas por meio de séries históricas. (TUCCI, PORTO e BARROS, 1995).

Para determinar a curva IDF de uma determinada região, deve-se obter as séries anuais de precipitação, formadas pelas maiores intensidades anuais para cada duração ou séries de duração parcial, com determinado número de maiores valores de intensidade para cada duração (CARVALHO, GAZEN e SILVA, 1972). As curvas IDF em projetos são usadas em função do tempo de retorno e duração da precipitação de situações críticas.

A equação 1 indica a forma como é feito o ajuste matemático das curvas IDF. A transformação logarítmica das variáveis faz com que os valores de intensidade e duração se agrupem de forma linear, numa escala bilogarítmica (CARVALHO, GAZEN e SILVA, 1972).

$$I_{(t)} = \frac{k * T^m}{(t + b)^n} \quad (1)$$

Tempo de retorno é o tempo médio que determinado evento de precipitação é igualado ou superado. Considerando a área de drenagem urbana, leva-se em consideração a intensidade e duração do evento de precipitação. Segundo Tucci, Porto e Barros (1995), a escolha do tempo de retorno está ligada à natureza do projeto em questão e do risco envolvido, levando em consideração a segurança e estabilidade da obra. Os conceitos de frequência e de risco são intrínsecos ao conceito de tempo de retorno. As relações desses conceitos são mostradas nas equações 2 e 3.

$$F = 100 * \frac{1}{T} \quad (2)$$

$$R = 100 * [1 - (1 - \frac{1}{T})^N] \quad (3)$$

Onde: T – é o tempo de retorno, em anos;

F – é a frequência, probabilidade de ocorrência do evento por ano (%);

N – vida útil da obra, em anos;

R - risco de falha da obra (%).

Tratando-se de estudos econômicos, que visam orientar a escolha do período de retorno, Tucci, Porto e Barros (1995) ressaltaram o quanto difícil é considerar os custos e benefícios, devido à quantificação destes ser uma tarefa difícil e que não há como expressar todos os aspectos em valores monetários. Por consequência da dificuldade e da subjetividade da definição do tempo de retorno, vários autores conhecidos por trabalhos na área consideraram aceitáveis alguns valores e os fixaram para tal definição. Por exemplo, o tempo de retorno para microdrenagem pode ser de 2 anos, 5 anos ou 10 anos, e para macrodrenagem pode ser de 25 anos, 50 anos ou 100 anos.

O tempo de concentração é o tempo gasto para que a bacia toda passe contribuir para o escoamento superficial no seu exutório (SILVEIRA, 2005). Segundo Mata-Lima et. al. (2007), o tempo de concentração é o tempo de percurso da água precipitada desde o ponto cinemáticamente mais afastado da bacia hidrográfica até a seção de referência.

Segundo Farias Junior (2010), no caso de projetos de obras hidráulicas, é muito importante a estimativa do tempo de concentração para definir chuvas críticas e vazões máximas, determinando-o tem influência indireta na concepção de sistemas de alertas de cheias, que objetivam prever desastres naturais.

Segundo Mata-Lima et. al. (2007) e Farias Junior (2010), o tempo de concentração de uma bacia depende de alguns fatores, como a área da bacia, comprimento de declividade do canal principal, forma da bacia, densidade de drenagem, rugosidade da superfície da bacia, entre outros fatores.

Estima-se o tempo de concentração de uma bacia através de diversos métodos, que resultam em valores bem diferentes, A equação 4 mostra a equação de Kirpich, destacada por normalmente fornecer valores menores para o tempo de concentração, resultando numa maior intensidade de chuva, e consequentemente, uma maior vazão de cheia.

$$T_c = 0,0663^{0,77} * S^{-0,385} \quad (4)$$

Onde:

T_c – tempo de concentração, em horas;

S – declividade do talvegue principal.

3.3 INUNDAÇÃO URBANA E SISTEMA DE DRENAGEM DE RECIFE

Uma inundação urbana ocorre quando um curso d'água natural, como rios e riachos, extravasam do seu leito principal de escoamento, denominado leito menor, para o seu leito maior, chegando até as planícies possivelmente ocupadas para moradia da população, ou para transporte, comércio, complexos industriais, entre outros usos. Enchente ou cheia é o transbordamento natural de água do leito menor do corpo hídrico, sejam córregos, lagos, rios, ribeirões, e etc., provocadas por eventos intensos e contínuos de precipitação (Tucci, 2005a).

A inundação ocorre quando a capacidade de infiltração da água precipitada no solo é insuficiente, gerando escoamento superficial, ainda segundo Tucci (2005a). Esse volume escoado, quando supera a capacidade de escoamento do leito menor, alcança a planície de inundação. Os eventos extremos de precipitação que causam esses problemas acontecem em função dos processos climáticos locais e regionais.

Conforme Tucci (2007), existem dois grupos de problemas com relação às inundações: as inundações de áreas ribeirinhas e as inundações devido ao processo de urbanização, que podem ocorrer de forma isolada ou integrada. Essas inundações podem ser desencadeadas em consequência do mau planejamento urbano, além de inundações localizadas.

As inundações em áreas ribeirinhas ocorrem de tempos em tempos nas planícies de inundação, sendo determinante o seu fator geomorfológico. São enchentes naturais que ocorrem no leito maior de rios, afetando a população que habita próxima a essas áreas. Quando eventos extremos de chuva ocorrem, o nível d'água do rio ocupa seu leito maior, causando essas enchentes.

Geralmente, essas áreas são sujeitas naturalmente a inundações por serem localizadas próximas aos cursos d'água, que passam pelo processo de cheias em eventos de grandes precipitações, elevando o nível d'água do corpo hídrico. A água, então, passa a escoar pelo seu leito maior, e quando esta área se encontra ocupada

por alguma habitação popular, há o barramento do escoamento superficial, causando ainda mais a elevação do nível d'água, o que leva ao extravasamento da calha principal do rio.

As inundações devido à urbanização são aquelas causadas por ações de projetos urbanísticos, como o desmatamento, que intensifica o escoamento superficial, impermeabilização do sítio urbano, alteração dos cursos naturais dos corpos hídricos, projetos ineficientes de captação da água pluvial, entre outras ações. Esses aspectos favorecem a ocorrência de inundações em períodos de eventos extremos e intensos de precipitação. Essas inundações ainda podem ser provocadas por intervenções antrópicas no sistema de drenagem, causando, por exemplo, o estrangulamento dos leitos de rios em pontos e bueiros. Outro fator que agrava esse processo é assoreamento dos canais urbanos, reduzindo suas seções e provocando inundações localizadas.

Com o desenvolvimento da cidade, ocorre a redução da cobertura vegetal e a impermeabilização das superfícies, diminuindo a capacidade de infiltração da água no solo, aumentando o volume escoado. A falta de planejamento urbano e investimento em drenagem urbana é um problema enfrentado por diversos municípios do Brasil. A ocupação territorial de áreas sujeitas a inundações, o desmatamento descontrolado, a remoção da mata ciliar, a impermeabilização do solo, o descarte incorreto de resíduos sólidos, entre outros fatores, aumentam os riscos de enchentes em áreas urbanas (SEMADS, 2001).

Por ser uma cidade litorânea, e fortemente urbanizada, Recife sofre constantemente com problemas de inundações, devido a sua com elevada taxa de impermeabilização e às baixas altitudes da região costeira, variando entre 2 e 4 metros. Possui clima predominantemente quente, com temperatura média de 25 °C e umidade relativa média anual de 80%, e precipitação média anual de 2.307,5 mm (FERREIRA, 2016), com períodos de chuva concentrados entre março e agosto. (IBGE, 2021; PERNAMBUCO, 2011)

Recife possui um sistema de drenagem natural envolvendo várias bacias hidrográficas, denominadas de “Estuário Comum do Recife”, formado pelo encontro com o mar pelos rios Capibaribe, Beberibe e Tejipió. Estas áreas de planícies costeiras possuem alta probabilidade de ocorrência de cheias, devido à elevação do nível do mar (SILVA JUNIOR e SILVA, 2016).

Para o bom funcionamento do seu sistema de drenagem, peculiaridades geográficas de Recife precisam ser levadas em consideração. Suas características naturais, como suas baixas cotas em relação ao nível do mar, suas áreas planas, lençóis freáticos próximos à superfície, e aflorante em épocas de chuva e influência dos níveis das marés, dificultam a drenagem urbana na cidade (PREUSS *et. al.*, 2011). A falta de saneamento básico, a canalização dos riachos urbanos da cidade e ocupações irregulares de suas margens também prejudicam o sistema de drenagem da cidade.

Segundo a EMLURB (2016), o sistema de macrodrenagem de Recife é constituído por 99 canais, com um total de cerca de 133 km de extensão. Desse total, aproximadamente 83 km tem seção hidráulica revestida, isto é, cerca de 63%. O sistema de microdrenagem da cidade possui aproximadamente 1.558 km, composto por galerias e canaletas em sua maioria. Recife possui 159 pontos de alagamento catalogados como os mais graves, onde parte deles está localizada no sistema viário da cidade, prejudicando a mobilidade urbana em dias chuvosos.

3.4 SISTEMAS DE MACRODRENAGEM E TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS

A rede de macrodrenagem é constituída por canais abertos ou fechados, naturais ou artificiais, e galerias de maiores dimensões, que recebem as contribuições do sistema de microdrenagem e tem como atribuição a condução final no corpo receptor. Compreende a rede natural de drenagem das bacias hidrográficas. Lagos, lagoas e reservatórios de amortecimento de cheias também fazem parte do sistema de macrodrenagem, que pode abranger áreas superiores a 4 km², com projetos de drenagem que consideram precipitações com tempo de retorno de 25 a 100 anos (FCTH, 1999).

As águas superficiais fluem pelo sistema de macrodrenagem até o seu destino final. Este sistema capta as águas vindas das estruturas de microdrenagem, compostas em geral por galerias de menores dimensões, sarjetas, bocas-de-lobo, entre outros dispositivos que captam as águas pluviais escoadas pelas ruas. (DO CARMO e HONDA, 2013). A macrodrenagem é uma rede de drenagem natural existente antes das ações antrópicas nas regiões urbanizadas, acrescida de obras

dimensionadas para suportar fluxos de grandes vazões e altas velocidades de escoamento (FUNASA, 2006).

As técnicas compensatórias são técnicas alternativas de drenagem que objetivam compensar o impacto negativo da urbanização sobre os processos hidrológicos, se baseando na melhoria da qualidade de vida da população e na preservação dos espaços urbanos. Essas técnicas tiveram origem nos anos 1970, principalmente na América do Norte e na Europa. Essas medidas se tornam alternativas diante das técnicas tradicionais de drenagem urbana, majoritariamente utilizadas nas cidades. As técnicas compensatórias consideram o impacto global da urbanização, considerando a contribuição da bacia urbana como um todo.

Segundo Baptista, Nascimento e Barraud (2011), empregar técnicas compensatórias torna possível o avanço do processo de urbanização, sem utilizar grandes investimentos em infraestrutura do sistema de drenagem, devido a modulação deste considerando as questões urbanísticas aliadas ao crescimento e estudo da drenagem pluvial da área urbana. As técnicas compensatórias auxiliam na melhoria da qualidade de vida e da preservação do meio ambiente em regiões urbanizadas, reduzindo as cargas poluidoras provindas do escoamento pluvial e facilitando a infiltração das águas pluviais, reduzindo os picos de vazão.

As técnicas compensatórias, que fazem parte das medidas de controle das águas pluviais, objetivam harmonizar o transporte de águas pluviais e o seu armazenamento em locais adequados, como lagos, canais, reservatórios, com o espaço urbano e a população desse local (WALES, 1989). Fazem parte dessas técnicas obras de engenharia, planos e ações, desenvolvidas ao longo do tempo visando solucionar os problemas de qualidade e quantidade de águas pluviais no meio urbano.

A maior dificuldade na aplicação das técnicas compensatórias é sua integração ao espaço urbano. É fundamental que uma abordagem multidisciplinar seja aplicada no manejo das águas pluviais, com profissionais de diversas áreas participando dos estudos e projetos, além de contar com o envolvimento da população, a fim de entender, aceitar e aprender o uso adequado dessas estruturas de drenagem (BAPTISTA, NASCIMENTO E BARRAUD, 2011).

As medidas de controle podem ser divididas em medidas estruturais e medidas não-estruturais, onde a combinação de ambas traz diversos benefícios para

comunidades ribeirinhas, com a minimização de perdas e convivência equilibrada com os corpos hídricos locais. Segundo Tucci (2001), essas medidas fazem parte do planejamento da drenagem urbana de uma cidade.

As medidas não estruturais são ações não estruturais de baixo custo, em geral sem envolver obras de engenharia, com boa eficácia e longo tempo de duração. Podem ser implementadas de forma relativamente rápida por indivíduos ou órgãos públicos. Segundo Walesh (1989), tem como objetivo disciplinar a população quanto a ocupação territorial, o consumo dos recursos naturais pela mesma e o impacto disso nas atividades econômicas. Podem ser aplicadas em áreas com pouca consolidação urbana de forma preventiva, como, por exemplo, um plano de urbanização de um município. Essas medidas podem ter efeitos positivos ao escoamento superficial de forma qualitativa e quantitativa.

Considerando as mais adotadas, as medidas não estruturais podem ser agrupadas em: ações de regulamentação do uso e ocupação do solo; educação ambiental voltada ao controle da poluição difusa, erosão e lixo; seguro contra inundações; sistemas de alerta e previsão de inundações; zoneamento de áreas de alto e baixo risco de inundaçao; elaboração de manuais de drenagem urbana (BRAGA, 1999; WALES, 1989).

Delimitar as áreas sujeitas a inundações considerando seu risco possibilita estabelecer um zoneamento na região e sua regulamentação para construções e eventuais obras de proteção individual a serem incluídas nas construções existentes, podendo ser calculados os seguros-enchentes, a partir desses riscos associados às cheias. Além disso, pode-se desapropriar certas áreas, objetivando a criação de parque e praças para uso da população.

As medidas estruturais compreendem obras que objetivam o aceleramento ou retardamento do escoamento pluvial e o desvio do escoamento, por meio de obras de canais, reservatórios de detenção ou retenção, tuneis de derivação, entre outros, e modificar as relações entre a precipitação e a vazão. Geralmente, são grandes obras de engenharia, requerendo aprovação e investimento em sua construção e manutenção por parte do poder público (WALES, 1989). Essas medidas podem visar o controle quantitativo ou qualitativo das águas pluviais e tendem a serem executadas em áreas com urbanização consolidada, em caráter mais corretivo do que preventivo.

As medidas estruturais podem ser caracterizadas como medidas intensivas e extensivas. As medidas intensivas visam acelerar, retardar ou desviar o escoamento. As medidas extensivas visam pequenos armazenamentos disseminados na bacia, para a recomposição de cobertura vegetal e o controle de erosão do solo, ao longo da bacia de drenagem (TUCCI, 2001; WALES, 1989). Dentre os exemplos de medidas estruturais, pode-se citar os reservatórios de armazenamento, sistemas de infiltração e bacias de sedimentação.

Os reservatórios de detenção são dispositivos de drenagem urbana construídos para regularizar a vazão de saída de um sistema de macrodrenagem, atenuando os efeitos do escoamento superficial a jusante, a fim de armazenar um determinado volume de águas pluviais por certo tempo, amortecendo os picos de hidrogramas de cheias. Os reservatórios ou bacias de detenção são estruturas de detenção temporária de águas pluviais, que permanecem secos após eventos intensos de chuva (TUCCI, 1997a).

Devido ao aumento das áreas impermeabilizadas pela urbanização, há uma redução na capacidade natural de armazenamento das bacias hidrográficas. As bacias de detenção visam minimizar o impacto hidrológico dessa redução, armazenando temporariamente as águas pluviais e as redistribuindo ao seu caminho natural ao longo de um maior tempo. Com isso, há a formação de um volume útil de água, além de promover o amortecimento dos picos de vazão de entrada do sistema, até sua disposição final (TUCCI, PORTO e BARROS, 1995; TUCCI, 1997a).

Os reservatórios de detenção podem ser construídos na micro e macrodrenagem de uma região, além de loteamentos. Segundo Canholi (2015), sua adoção na macrodrenagem geralmente é idealizada em conjunto com planos diretores de macrodrenagem urbana, subsidiado por estudos da bacia hidrográfica local. Geralmente, esses reservatórios são medidas estruturais corretivas, interferindo em áreas densamente povoadas. Sua implantação possui altos custos e pode necessitar de desapropriação da população local, por necessitar de grandes áreas (TUCCI, PORTO e BARROS, 1995).

Os reservatórios de detenção podem ser classificados em reservatórios à céu aberto ou reservatórios enterrados. Segundo Berque e Ruperd (2000), os reservatórios a céu aberto podem ser divididos em reservatórios secos, construídos

para a detenção d'água por determinado período de tempo, ou com nível d'água permanente, para armazenarem água mesmo em períodos de estiagem. Os reservatórios enterrados são mais utilizados em zonas amplamente urbanizadas, sendo geralmente indispensável o uso de estações elevatórias para a drenagem da água após eventos intensos de chuva (BERQUE e RUPERD, 2000).

3.5 GEOPROCESSAMENTO

O geoprocessamento é o conjunto de tecnologias que se destina a coletar e tratar informações espaciais, e desenvolver novos sistemas e aplicações, de diferentes formas aprimoradas. De forma geral, os profissionais que aplicam o geoprocessamento são os que trabalham nas áreas de cartografia digital, processamento digital de imagens e sistemas de informação geográfica. Essas áreas se relacionam entre si, utilizando as mesmas funções de hardware, em diferente software (ROSA, 2013).

Entende-se como processamento digital de imagens o conjunto de técnicas que manipulam numericamente imagens digitais, a fim de corrigir distorções nas mesmas e aprimorar o poder de discriminação dos objetos. Os Sistemas de Informação Geográficas (SIG) são um caso específico do Sistema de Informação. Destinam-se à obtenção, armazenamento, manuseio, análise, simulação, modelagem e apresentação dos dados referidos espacialmente na superfície terrestre, com a integração de várias tecnologias (ROSA, 2013).

É possível, por meio dessa ferramenta, automatizar tarefas que antes eram feitas manualmente, facilitando a execução de análises complexas, por meio da integração de dados de diversas fontes. O objetivo de um SIG é ser um instrumento de auxílio para as áreas de conhecimento que utilizam mapas para processamento de dados (ROSA, 2013). Com isso, é possível:

- Integrar em uma única base de dados informações representando vários aspectos do estudo de uma região;
- Permitir a entrada de dados de diversas formas; combinar dados de diferentes fontes, gerando novos tipos de informações;
- Gerar relatórios e documentos gráficos de diversos tipos, etc.

O QGIS é um aplicativo profissional GIS, construído a partir de Software Livre e de Código Aberto, ou *Free and Open Source Software* (FOSS). O QGIS é um Sistema de Informação Geográfica (SIG) licenciado segundo a Licença Pública Geral GNU. O QGIS é um projeto oficial da Open Source Geospatial Foundation (OSGeo) (QGIS, 2021).

O QGIS suporta inúmeros formatos de vetores, rasters e bases de dados e funcionalidades. Este software disponibiliza um número de funcionalidades em constante crescimento, através das funções nativas e de complementos. É possível visualizar, gerir, editar, analisar dados, e criar mapas para impressão. Com suas ferramentas gráficas, o QGIS permite criar, dimensionar, remodelar, medir e unir diversas camadas a fim de entregar um trabalho de alta qualidade (QGIS, 2021).

Dentre algumas das funcionalidades disponíveis dentro do QGIS, estão: a criação de geometrias, com geração de pontos, linhas e polígonos; buffer, que cria uma zona em torno de um recurso em unidades de distância ou tempo; sobreposição, que sobrepõe dois ou mais mapas ou camadas para mostrar as relações entre eles; georreferenciamento, alinhando dados geográficos (mapa, camada, etc.) com um determinado sistema de coordenadas, permitindo sobreposições; recorte, onde é possível cortar uma camada de entrada com a extensão de um limite de uma determinada feição; geocodificação, onde cria pontos em um mapa a partir de endereços organizados em uma planilha; entre outras funções (QGIS, 2021).

O Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D) originou-se pela tomada de decisão de inserir nas metas do Programa de Sustentabilidade Hídrica de Pernambuco (PSHPE) o mapeamento de todo o território do estado de Pernambuco. Os serviços do PE3D compreendem o recobrimento aerofotogramétrico e perfilamento a laser de todo o território pernambucano. Este processo consiste no levantamento da altura de pontos sobre uma superfície através da emissão de raios laser. É como construir uma maquete digital que representa as variações de altitude do terreno e do que se encontra sobre ele, como edificações e árvores (PE3D, 2016).

O conjunto de dados do PE3D apresenta-se exclusivamente em meio digital e todo o conteúdo será disponibilizado integralmente para download. Ao final do levantamento, serão disponibilizados, com coordenadas planimétricas e altimétricas,

cerca de 75 bilhões de pontos, ou seja, um ponto a cada 1,3m² de todo o território pernambucano. Se trata de uma base de dados espaciais para suporte a muitas iniciativas para o desenvolvimento sustentável de Pernambuco (PE3D, 2016).

O PE3D traz diversos benefícios com a sua utilização. O programa tem enorme potencial de utilização para as intervenções que requerem detalhamento preciso do terreno, como barragens, sistemas de irrigação, redes de água, esgotos, entre outros. Com relação à área ambiental, a base de dados pode dar apoio à identificação de áreas de risco e danos aos recursos naturais, como áreas de degradação e perda dos solos e da vegetação, contaminação das águas e degradação de nascentes e áreas de recarga de aquíferos. No ambiente urbano, além das ações de infraestrutura citadas, deve-se ressaltar o potencial do PE3D para o controle da expansão urbana em bases sustentáveis (PE3D, 2016).

3.6 MODELAGEM HIDROLÓGICA

Os modelos hidrológicos buscam a representação terrestre do ciclo hidrológico, onde a precipitação que cai em uma bacia hidrográfica é transformada em vazão em uma determinada seção de um rio. A fragmentação da análise dos processos envolvidos nesse sistema tornou possível o seu conhecimento, como a precipitação, a evapotranspiração, a interceptação vegetal, a infiltração e percolação, o balanço hídrico entre as camadas de solo e o escoamento superficial e subterrâneo em corpos hídricos (TUCCI, 2010).

Um modelo hidrológico é representado pelo fluxo de água em parte de alguma superfície ou subterrâneo matematicamente. A modelagem hidrológica pode ter uma relação com modelagens biológicas e ecológicas, pois há transporte de outros materiais, como matéria orgânica e sedimentos, pela água, que pode ser influenciada por atividades biológicas, aumentando ou diminuindo a quantidade desses materiais, que poderia afetar os habitats aquáticos. As condições climáticas também devem ser levadas em consideração na modelagem hidrológica, porém essa consideração torna-se difícil, pelo fato de modelos atmosféricos trabalharem com resoluções mais amplas do que as trabalhadas nos modelos hidrológicos (MAIDMENT, 1993).

A modelagem hidrológica é usada para obter-se um conhecimento aprofundado dos fenômenos físicos envolvidos em um sistema hidrológico, e prever seus possíveis cenários. O modelo engloba um sistema de equações e procedimentos que envolvem diversas variáveis e parâmetros utilizados em estudos hidroambientais, objetivando compreender e prever o impacto futuro em ecossistemas de mudanças climáticas e do uso do espaço (SILVA, 2007).

A modelagem hidrológica torna-se uma ferramenta fundamental para avaliar o desempenho de sistemas de drenagem urbana, considerando diferentes cenário possíveis para uma determinada região. Com o uso de um modelo hidrológico, é possível representar o escoamento superficial em um ambiente urbano, combinando modelos de chuva-vazão, e avaliando o impacto de eventos extremos de precipitação em determinadas áreas atingidas pelo processo de urbanização. Assim, é possível estimar a redução do pico de vazão quando aplicadas soluções para tais eventos, como medidas estruturais e não estruturais controle de cheias.

Bacias hidrográficas são objetos de estudo de diversos modelos hidrológicos, considerando as superfícies de captação de despejo de água sobre canais de escoamento, que desembocam em uma saída, seu Exutório. A bacia pode atender a uma única unidade espacial para modelos que consideram as propriedades médias para a bacia como um todo. Porém, há diversas abordagens que distribuem espacialmente as características de uma bacia, dividindo-a em sub-bacias (RENNÓ, 2000).

Os modelos de transformação chuva-vazão objetivam estimar o escoamento em um sistema de drenagem, gerado por uma precipitação. Esses modelos buscam reproduzir matematicamente as interrelações entre os fenômenos físicos que compõe as fases do ciclo hidrológico, entre a precipitação e o escoamento do ponto a ser estudado. O ciclo hidrológico é caracterizado como um movimento contínuo de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, podendo ser considerado em escala global ou local. O ciclo é diretamente afetado pela energia solar, e pela gravidade e rotação da Terra.

O estudo de um sistema hidrológico objetiva estudar sua operação e prever suas saídas, aproximando o máximo possível do sistema real, onde suas entradas e saídas são variáveis hidrológicas determináveis, tendo sua estrutura como um conjunto de equações conectando os dados de entrada com os de saída. Segundo

Chow (1988), um modelo hidrológico pode ser usado como ferramenta para a simulação do comportamento de uma bacia hidrográfica, geração de um hidrograma de escoamento (dado de saída do modelo) a partir de uma precipitação considerada (dado de entrada do modelo). Assim, por meio da simulação hidrológica, é possível estudar o comportamento da bacia hidrográfica, diante das precipitações de projeto consideradas, atendendo a diferentes durações e frequências. Por fim, consegue-se prever futuras condições e ainda simular cenários hipotéticos, a fim de avaliar os riscos dos eventos considerados.

Segundo Tucci (2005b), é possível equacionar processos hidrológicos, além de representar, entender e simular o comportamento do modelo hidrológico de uma bacia hidrográfica. Modelos hidrológicos podem ser classificados de acordo com seus diferentes aspectos, como as variáveis utilizadas no modelo (estocástico ou determinístico), a relação entre tais variáveis (empírico ou conceitual), a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos), a forma como se relacionam espacialmente (pontuais ou distribuídos) e a dependência temporal entre as variáveis (estatísticos ou dinâmicos).

Segundo Chow (1988), um modelo hidrológico estocástico leva em consideração que uma distribuição estatística determina uma ou mais de suas variáveis. O autor considera como o conceito de um modelo estocástico como tendo suas saídas parcialmente ou totalmente aleatórias. Levando isso em consideração, define-se os modelos determinísticos como modelos que não consideram aleatoriedades, isto é, cada saída do modelo está associada a uma entrada no mesmo.

Os modelos determinísticos buscam soluções de forma media, sem considerar soluções individuais, como o espaço como um único ponto de dimensões, ou, no caso de variáveis hidrológicas, vários pontos no espaço, obtendo-se as variáveis do modelo como funções espaciais. Já os modelos estocásticos são classificados como independentes do espaço, e sim correlacionados com o mesmo, considerando a influência que as variáveis aleatórias atribuem a diferentes pontos do espaço (CHOW, 1988).

Os modelos determinísticos podem ter fluxo permanente, se o fluxo não varia com o tempo, ou variável, se o fluxo varia com o tempo. Os modelos estocásticos possuem suas saídas sempre variando com o tempo. Quando representam um

evento hidrográfico diferente de outro, são classificados como independentes do tempo. Quando há influência de um evento hidrográfico com outro, são classificados como correlacionados com o tempo.

Segundo o corpo de engenheiros do exército dos Estados Unidos (USACE, 2000), uma variedade de estudos hidrológicos pode fornecer as seguintes informações:

- Planejamento e projeto de novas instalações de transporte hidráulico e controle de água;
- Operar e/ou avaliar instalações existentes de transporte hidráulico e controle de água;
- Preparação e resposta a inundações e/ou secas;
- Regulamentando às atividades da planície de inundaçāo;
- Desenvolvimento de planos que usam água para melhorar a função ambiental.

3.7 MODELO SCS CURVE NUMBER

Apresentado pelo Departamento de Conservação de Solos americano em 1972, o modelo SCS Curve Number é amplamente utilizado para simular hidrogramas de cheias em projetos envolvendo hidráulica e hidrologia, com o estabelecimento de risco de enchentes. É um modelo simples, com número de parâmetros reduzidos e as características físicas da bacia se relacionando com tais parâmetros (TUCCI, 2005b).

Este é um modelo conceitual de precipitação-vazão, determinístico e concentrado, porém aplicável de forma distribuída em sub-bacias. É possível determinar a precipitação de projeto por meio das equações apresentadas pelo modelo, de acordo com o evento simulado, além do volume superficial de água escoado e a propagação do escoamento na bacia, conforme o tempo de concentração.

O modelo leva em consideração a lâmina de escoamento superficial produzida em determinado evento de precipitação em função da altura da lâmina precipitada. Ainda considera as perdas que ocorrem pela infiltração, interceptação vegetal e retenção em depressões do terreno estudado (PEREIRA, 2009).

A precipitação efetiva pode ser determinada a partir das equações 5, 6 e 7, em função das características de infiltração do solo. As perdas iniciais por retenção são consideradas 20% da capacidade máxima de retenção do solo. Logo, só é possível gerar um valor de escoamento superficial se a precipitação total for maior que as perdas iniciais (PORTELA, 2005).

$$P_E = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S}; P > I_a \quad (5)$$

$$I_a = 0,2 \times S \quad (6)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (7)$$

Onde:

P = Precipitação (mm);

P_E = Precipitação efetiva (mm);

I_a = Perdas iniciais (mm);

S → Capacidade máxima de retenção (mm);

$P - I_a$ → Escoamento superficial potencial (mm).

Conforme Machado (2002), o potencial máximo de retenção em uma bacia, e suas perdas iniciais, pode ser determinado por meio do parâmetro CN (Curve Number), que está associado às condições de uso e ocupação do solo, ao seu tipo hidrológico, às condições de escoamento e à sua umidade antecedente, relacionada à precipitação acumulada nos últimos 5 dias do evento considerado.

O CN varia de 0 a 100, e quanto mais próximo de 100 o valor, maior será o escoamento superficial relacionado à precipitação total do evento. Segundo o modelo SCS, há quatro tipos de solos, do ponto de vista hidrológico:

- Solo A – Solos arenosos com baixo teor de silte e argila, inferior a 8% (mais permeável). Solos que produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração;
- Solo B – solos menos permeáveis, arenosos e profundos do que o solo A, com teor de argila inferior a 15%, e com permeabilidade superior à média;

- Solo C – solos barrentos que geram escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média, contendo percentagem considerável de argila (entre 20 e 30%) e sem rochas e camadas argilosas até a profundidade de 1,2m;
- Solo D – solos contendo argilas expansivas, variando entre 30 e 40%, e pouco profundas, com baixa capacidade de infiltração, gerando a maior proporção de escoamento superficial (menos permeável).

O método utiliza as três categorias listadas abaixo para a condição de umidade antecedente do solo:

- Condição I – situação em que os solos estão secos, com a precipitação acumulada dos cinco dias anteriores menor que 15 mm;
- Condição II – situação média em que os solos correspondem à umidade da capacidade de campo, com a bacia em condições que precederam a ocorrência de cheias. As precipitações acumuladas nos cinco dias anteriores variam entre 15 e 40 mm. Esta condição geralmente é usada para elaborar hidrogramas de escoamento superficial usados no dimensionamento de projetos de drenagem;
- Condição III – situação em que ocorreram precipitações consideráveis nos cinco dias anteriores e o solo encontra-se saturado, onde estas superam 40mm, com as condições meteorológicas não favorecendo a evaporação.

Com todos esses parâmetros considerados, é possível calcular o escoamento superficial em uma bacia hidrográfica. Na literatura, há tabelas com a estimativa do CN apresentada pelo SCS para diferentes tipos de uso urbano do solo. Considerando que as condições de uso e ocupação do solo variam espacialmente nas bacias hidrográficas, é necessário aferir um valor médio do CN, representando a bacia como um todo. Para esse cálculo, faz-se uma média ponderada do valor do CN de determinada região da bacia, e sua área de contribuição.

O método do hidrograma unitário do SCS transforma a precipitação em vazão por meio da precipitação efetiva. O hidrograma supõe uma relação linear entre as precipitações excedentes e as vazões do hidrograma de cheias, seguindo os princípios da proporcionalidade e da superposição. É possível aplicar esse método

de forma geral para precipitações de diferentes durações e distribuição temporal (FCTH, 2003).

Conforme Porto, Filho e Marcellini (1999), o hidrograma unitário é um hidrograma de escoamento superficial direto, com a área sob a curva correspondendo a um volume unitário de escoamento superficial direto, obtido através da precipitação efetiva com intensidade e duração unitárias. Com os dados de precipitação de um pluviômetro, o método do hidrograma unitário torna-se compatível com a utilização de métodos de determinação de precipitação efetiva, como o método SCS.

O método do hidrograma unitário é desenvolvido baseado em 3 princípios: o princípio da superposição, o princípio da proporcionalidade das descargas e o princípio da constância dos tempos de base (RAGHUNATH, 2006). A partir do princípio da proporcionalidade, com o hidrograma gerado por uma precipitação unitária (geralmente de 10 mm), é possível gerar o hidrograma de uma chuva de mesma duração, realizando a multiplicação das ordenadas do hidrograma unitário pela razão entre os valores da precipitação. Isso é possível pelo fato de o método assumir que a duração do escoamento superficial direto seja o mesmo para precipitações de mesma duração, independente da intensidade da precipitação que o produziu.

Para a obtenção do hidrograma referente a precipitações de diferentes durações, utiliza-se o princípio da superposição, que admite que a precipitação seja discretizada em intervalos, isto é, em hietogramas dividido em blocos. A partir desse princípio, hidrogramas parciais são obtidos para cada bloco de chuva, e ao somar as ordenadas de cada hidrograma correspondente a sua precipitação, obtém-se um hidrograma resultante que corresponde a toda a precipitação. Por fim, o princípio da constância dos tempos de base indica que, para chuvas efetivas de intensidade constante e de mesma duração, os tempos de escoamento superficial direto são iguais.

3.8 MODELAGEM NO HEC-HMS

A modelagem hidrológica é uma ferramenta importante para simular cenários em um sistema drenagem urbana, avaliando o impacto de uma bacia hidrográfica a

um determinado evento de precipitação, além de considerar cenários de mudanças de uso e ocupação do solo e do processo de urbanização.

Segundo o USACE (1997), o Sistema de Modelagem Hidrológica (HEC-HMS) é projetado para simular os processos hidrológicos completos de sistemas dendríticos de bacias hidrográficas. O software inclui muitos procedimentos tradicionais de análise hidrológica, como infiltração de eventos, hidrogramas unitários e roteamento hidrológico. O HEC-HMS também inclui procedimentos necessários para simulação contínua, incluindo evapotranspiração, derretimento de neve e contabilidade da umidade do solo. Recursos avançados também são fornecidos para simulação de escoamento em grade usando a transformação de escoamento quase distribuída linear (ModClark).

Ferramentas de análise suplementares são fornecidas para a otimização do modelo, previsão do fluxo, redução da área de profundidade, avaliação da incerteza do modelo, erosão e transporte de sedimentos e qualidade da água. O software apresenta um ambiente de trabalho totalmente integrado, incluindo banco de dados, utilitários de entrada de dados, mecanismo de computação e ferramentas de relatório de resultados. Uma interface gráfica do usuário permite que o usuário se movimente sem problemas entre as diferentes partes do software (USACE, 1997).

Os resultados da simulação são armazenados em HEC-DSS (Sistema de Armazenamento de Dados) e podem ser usados em conjunto com outro software para estudos de disponibilidade de água, drenagem urbana, previsão de vazão, impacto de urbanização futura, projeto de vertedouro de reservatório, redução de danos por inundação, regulação de várzea e operação de sistemas (USACE, 1997).

A representação física de uma bacia hidrográfica é realizada por meio de modelo de bacia. Elementos hidrológicos são conectados em uma rede dendrítica para simular processos de escoamento. Os elementos disponíveis incluem sub-bacias, trechos, junções, reservatórios, desvios, fontes e sumidouros. A computação procede de elementos a montante em uma direção à jusante. Uma variedade de métodos diferentes está disponível para simular perdas por infiltração. Cinco opções estão disponíveis para simular períodos de tempo curtos ou eventos de inundação discretos, incluindo Inicial e Constante, Curve Number SCS, Exponencial, Green e Ampt e Smith Parlange (USACE, 1997).

O modelo meteorológico inclui os seguintes processos meteorológicos: radiação de ondas curtas, radiação de ondas longas, precipitação, evapotranspiração e derretimento de neve. Nem todos esses componentes são necessários para todas as simulações. Simulações de eventos simples requerem apenas precipitação, enquanto a simulação contínua requer adicionalmente evapotranspiração. Geralmente, o derretimento da neve só é necessário ao trabalhar com bacias hidrográficas em climas frios (USACE, 1997).

O intervalo de tempo de uma simulação é controlado por especificações de controle. Estas incluem uma data e hora de início, data e hora de término e um intervalo de tempo. Uma simulação é criada combinando um modelo de bacia, modelo meteorológico e especificações de controle. As opções de execução incluem uma taxa de precipitação ou vazão, capacidade de salvar todas as informações de estado da bacia em um determinado momento e capacidade de iniciar uma simulação de execução a partir de informações salvas anteriormente. Os resultados da simulação podem ser visualizados no mapa da bacia (USACE, 1997).

Vários fatores tornam difícil a modelagem de inundações em áreas urbanas, como a presença de diversos obstáculos, a complexidade geométrica da cidade, o armazenamento de águas nos edifícios, entre outros. Porém, como a intensidade da chuva é forte o suficiente e as zonas urbanas são densas, assume-se que a parte do escoamento ocorre pelas ruas e suas junções. O fluxo nas ruas é considerado unidimensional, porém o fluxo em junções e bifurcações são considerados tridimensionais. No entanto, os modelos hidrológicos mais utilizados em projetos de drenagem urbana são unidimensionais (MIGNOT, PAQUIER e HAIDER, 2006).

Santos (2017) realizou o monitoramento, mapeamento e planejamento ambiental da bacia hidrográfica do Ribeirão Lavapés, dentro da área urbana do município de Botucatu/SP, para sua recomposição e conservação. O autor dividiu a bacia em três formações geológicas, e sua produção de água foi quantificada por meio do modelo hidrológico HEC-HMS associado ao SIG, utilizando o Método de Curva Número (CN). Pôde-se concluir que os dados de entrada disponíveis e os parâmetros utilizados tornaram o modelo uma boa ferramenta na simulação de eventos na previsão de cenários, assim como, para futuras tomadas de decisões pelos gestores dos recursos hídricos.

Camara *et. al.* (2018) avaliaram a aplicação de uma bacia de detenção na bacia do Riacho do Moxotó, localizada na cidade do Recife/PE. O pré-processamento de dados foi realizado com o auxílio do plugin do ArcMap, o HEC-GeoHMS, onde foi realizada a delimitação e discretização da bacia com o uso do modelo digital do terreno (MDT) do Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D). A modelagem hidrológica e hidrodinâmica foi realizada por meio do modelo HEC-HMS, onde se utilizaram os métodos SCS Unit Hydrograph e SCS Curve Number (CN), para a modelagem chuva-vazão e o modelo de infiltração respectivamente. Os resultados demonstraram um amortecimento de 76% na vazão de pico.

Crispim, Souza e Formiga (2012) analisaram comparativamente os modelos Storm Water Management Model (SWMM) e o Engineering Center-Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) para simulação do processo de escoamento superficial, a partir de uma precipitação de projeto. A região escolhida para estudo de caso foi a bacia hidrográfica do Córrego Samambaia, localizada no município de Goiânia-GO. Para a comparação dos métodos de simulação, foram consideradas duas hipóteses: a bacia discretizada em 5 subáreas e a bacia concentrada. Foi possível comparar os resultados da modelagem do escoamento superficial pelos dois modelos, assim como, algumas considerações a respeito da utilização dos dois modelos hidrológicos.

Fonseca Neto *et. al.* (2020) avaliaram a confiabilidade de medidas estruturais implementadas em ambientes urbanos costeiros e de baixa elevação, sujeitos às variações da maré. Para isso, foram utilizados os softwares: HEC-GeoHMS para processamento dos dados geoespaciais de topografia, com dados de alta resolução; HEC-HMS 4.2.1 para modelagem hidrológica; e HEC-RAS 5.0.3 para modelagem hidráulica bidimensional, com representação de manchas de inundação através da ferramenta RAS Mapper. Os resultados mostraram que a intervenção seria hidráulicamente satisfatória, pois permitiria o escoamento das vazões, conseguia reduzir cerca de 42,32% das áreas urbanas inundadas, mas não evitaria o alagamento de áreas marginais que são naturalmente muito baixas.

Cabral, Sakuragi e Silveira (2017) apresentaram uma análise das incertezas e erros do modelo SCS-CN do HEC-HMS, para eventos hidrológicos com dados de precipitação observada e estimada por RADAR na bacia do rio São Miguel em Alagoas. O SCS-CN com as estimativas de precipitação pelo RADAR representou

de forma adequada o tempo das vazões de pico, entretanto subestimou a magnitude do pico com erros de até 26% em alguns eventos. A metodologia mostrou-se satisfatória para a bacia em estudo e pode ser uma ferramenta útil para aplicação em outras bacias hidrográfica prevendo possíveis inundações.

Ribeiro Neto *et. al.* (2015) reconstituíram o evento hidrológico de junho de 2010, que causou severos danos às cidades localizadas nas margens dos principais rios da zona da Mata de Pernambuco e Alagoas, utilizando-se o modelo chuva-vazão HEC-HMS e o modelo hidrodinâmico HEC-RAS. A geometria do leito menor e maior do rio Una e seu afluente Pirangi foi determinada por meio de levantamento com técnica LiDAR (Light Detection and Ranging). Eles simularam os eventos de cheia ocorridos na bacia hidrográfica do rio Una, observando os principais aspectos que influenciam a formação da cheia no rio e como isso influencia o processo de calibração dos modelos. O resultado pode ser comparado apenas com a profundidade da água espacializada na cidade de Palmares. Observou-se superestimação da profundidade calculada pelo modelo HEC-RAS, mas uma boa aderência à abrangência da área inundada.

Fonseca Neto (2018) avaliou a vulnerabilidade da macrodrenagem em Recife, utilizando os modelos hidrológico HEC-HMS e hidráulico HEC-RAS. Foram estudadas as características de cobertura do solo, a morfologia da bacia hidrográfica e as precipitações intensas. A metodologia mostrou-se bastante satisfatória, permitindo estimar com precisão que áreas estão em maior ou menor situação de risco. Os resultados mostraram grandes variações no trecho próximo ao encontro com o Capibaribe. O autor concluiu que o aumento do nível médio dos mares influenciará nos níveis normais da macrodrenagem do riacho Cavouco, entretanto em regiões de cotas mais baixas.

3.9 PLANO DE MANEJO DO RIACHO SÍTIO DOS PINTOS

Por meio do Decreto nº 33.676 de 20 de maio de 2020, que regulamenta a Unidade de Conservação da Natureza – APA Sítio dos Pintos, nos termos do Art. 61 da Lei Municipal nº 18.014/2014, aprovou-se o Plano de Manejo da UCN APA Sítio dos Pintos, e atribuiu a categoria de Área de Proteção Ambiental (APA) à UCN Sítio dos Pintos (LEIS MUNICIPAIS, 2020). Esta UCN adequou-se como APA devido aos seus múltiplos usos do solo, com orientação à conservação dos recursos naturais e

preservação de determinadas áreas com alto valor econômico (SILVA, BRAGA E AGUIAR, 2020).

As Unidades de Conservação da Natureza (UCNs) são áreas ambientalmente relevantes, instituídas legalmente pelo poder público, visando conservar suas características ambientais, proteger a biodiversidade e contribuir para a manutenção do ecossistema, entre outros objetivos definidos pelo Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC – Lei Federal nº 9.985/2000) e pelo Sistema Estadual de Unidades de Conservação (SEUC – Lei Estadual nº 13.787/2009). As UCNs localizadas em Recife consistem em locais propícios para atividades de lazer, contemplação e educação ambiental, além de proteger importantes parcelas de Mata Atlântica (LEIS MUNICIPAIS, 2020).

Levando em consideração essas características e o conjunto de ações necessárias para a gestão e uso sustentável dos recursos naturais contidos em cada UCN, a prefeitura de Recife elaborou os Planos de Manejo de suas 25 Unidades de Conservação. Esses planos são importantes para a gestão das UCNs, apresentando seus diagnósticos, zoneamentos, programas e diversas ações que visam orientar as práticas de conservação e uso dos recursos naturais desses locais (LEIS MUNICIPAIS, 2020).

Na parte noroeste de Recife, está localizado a UCN Sítio dos Pintos, no bairro Sítio dos Pintos, situada na Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe, sub-bacia do Rio Camaragibe. Nesta UCN, destacam-se os dois canais de estudo neste trabalho: o córrego da Fortuna e o riacho Sítio dos Pintos. Segundo Silva, Braga e Aguiar (2020), a UCN Sítio dos Pintos foi regulamentada pelo Decreto Municipal nº 23.828/2008, e em 2014, o Sistema Municipal de Unidades Protegidas – SMUP (Lei nº 18.014/14) determinou a elaboração do Plano de Manejo, categorizando e regulamentando o local.

O riacho Sítio dos Pintos possui mais características naturais, quando comparado com outros riachos da bacia, porém inúmeras intervenções, causadas pela ocupação da população na bacia, vêm alterando esta condição, reduzindo o riacho a uma estreita canaleta de drenagem. Cabral *et. al.* (2020) apresentaram um estudo em que avalia, sob a ótica da resiliência da engenharia, o riacho Sítio dos Pintos sob alguns aspectos, como hidrologia e hidráulica. Seis fatores de avaliação

qualitativa foram considerados, sendo estes úteis para este trabalho, avaliando-se os principais problemas do riacho.

Apesar de não apresentar muitas intervenções quanto ao sistema hidráulico, há trechos em que o riacho foi estrangulado a galerias de drenagem (CABRAL *et. al.*, 2020). Há vários pontos de assoreamento do leito natural do riacho, devido à erosão causada pela urbanização da região. Quando avaliados dados de eventos extremos de precipitação, observou-se que há transbordamento da calha natural do riacho em parte mais da bacia, onde não há grande taxa de ocupação, não causando grandes transtornos para o local (EMLURB, 2016).

Segundo Cabral *et. al.* (2020), com relação à instabilidade nas margens, que depende da cobertura vegetal, o riacho possui boa proteção vegetal, garantindo um solo firme e estável contra erosão. Porém, na parte mais alta da bacia, devido à grande ocupação das margens, há grandes áreas de solo exposto, sem proteção vegetal. Por fim, há pontos ao longo do riacho em que há pouca presença de esgoto e lixo (Figura 2), enquanto que nas áreas com maior taxa de ocupação há grande quantidade de lançamento de resíduos no riacho.

Figura 2 – Presença de ocupações obstruindo a passagem natural do riacho Sítio dos Pintos e trecho com vegetação preservada, mas com cheiro e cor de esgoto devido à ocupação a montante.



Fonte: Cabral *et. al.* (2020).

Com relação às atividades e empreendimentos dentro dos limites da UCN Sítio dos Pintos, há apenas um empreendimento formal, de acordo com dados no Cadastro Mercantil da Cidade do Recife. Refere-se a um serviço de assistência psicológica. Porém, há diversos empreendimentos informais na região, como mercadinhos, bares, padarias, pequenos comércios, entre outros. Quanto ao serviço

público, há duas escolas públicas na unidade: a Escola Municipal Esperança e Escola Estadual Lions de Parnamirim (LEIS MUNICIPAIS, 2020).

Há 3 Unidades de Saúde da Família (USF), onde duas delas já foram citadas anteriormente como parte da área de estudo de revitalização. Entre espaços coletivos, destacam-se campos de futebol, que também faz parte da área de estudo deste trabalho. Por fim, no entorno da região, localiza-se o campus da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), categorizado como Unidade de Equilíbrio Ambiental, Imóvel de Proteção de Área Verde (IPAV) do SMUP (LEIS MUNICIPAIS, 2020).

Na UCN Sítio dos Pintos, foi promovida em diversas ocasiões a participação social, visando agregar contribuições da comunidade local para a elaboração do Plano de Manejo. Em maio de 2008, a Prefeitura de Recife apresentou a estratégia de elaboração durante a apresentação de resultados do projeto “Paisagem, história e cidadania ambiental na UCN Sítio dos Pintos”, desenvolvido pela Associação Águas do Nordeste (ANE), com recursos do Fundo Municipal de Meio Ambiente e apoiado pela Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Recife. Nesta oficina, foram discutidas as principais questões socioambientais da Unidade de Conservação e indicadas sugestões para seu Plano de Manejo (SILVA, BRAGA E AGUIAR, 2020).

Após isso, em julho de 2018, foi realizado o Diagnóstico Participativo da UCN Sítio dos Pintos, com a presença de 19 participantes, incluindo moradores locais, representantes do poder público, profissionais das áreas de meio ambiente e universidades, incluindo a Universidade Federal de Pernambuco. O foco desse encontro foi o alcance dos objetivos almejados relativos à (LEIS MUNICIPAIS, 2020):

- Construção coletiva a partir da realidade, história local, espacialidade e identificação de elementos de interação com a Unidade de Conservação;
- Reconhecimento da importância da unidade como espaço de conservação da natureza;
- Interação social e colaboração para a elaboração do diagnóstico ambiental, por meio da visão dos participantes;
- Enumeração e discussão dos principais problemas e potencialidades da UCN.

Os pontos fortes discutidos no encontro foram o patrimônio ambiental, água floresta e biodiversidade, interesse da comunidade e atuação de instituições, enquanto que os pontos fracos mencionados pelos participantes foram as ocupações desordenadas, poluição, insegurança e o deficiente controle ambiental da unidade. O reconhecimento legal da área de Sítio dos Pintos com uma UCN e o processo de elaboração de seu Plano de manejo foram os tópicos mais destacados pelos participantes, sendo considerado como oportunidades importantes para a conservação e o desenvolvimento sustentável da unidade (LEIS MUNICIPAIS, 2020).

Já em dezembro de 2018, ocorreu a Oficina de Categorização, Zoneamento e Programas de Manejo da UCN Sítio dos Pintos, com a participação de 25 pessoas, incluindo moradores locais, representantes do poder público, pesquisadores, empresas e ONGs com atuação na região. Na ocasião, foi divulgado pela equipe técnica da Prefeitura de Recife os resultados do diagnóstico da UCN em questão, tratando-se da caracterização socioambiental da unidade, com levantamento e sistematização de dados secundários, aerolevantamento, trabalho de campo, análise de imagens e oficinas participativas (LEIS MUNICIPAIS, 2020).

A partir dessas informações, foi possível formular de modo coletivo uma perspectiva de 5 anos no futuro da UCN. Alguns pontos relevantes levantados e planejados foram:

- Ordenamento urbano-ambiental, por meio de infraestrutura de saneamento;
- Instrumentos que tornem possível a implementação do Plano de Manejo;
- Práticas e fluxos intersetoriais, por meio de articulação entre políticas públicas;
- Unidade de Conservação reconhecida, valorizada e cuidada pela comunidade, por meio da educação ambiental;
- Potencialidades econômicas, sociais, culturais e ambientais locais reconhecidas e valorizadas;
- Patrimônio ambiental mantido e recuperado.

A partir dessas informações do diagnóstico, os participantes fizeram algumas proposições visando o futuro da UCN, contribuindo para a elaboração dos programas de manejo, com ações sugeridas para aplicação na UCN Sítio dos

Pintos. Algumas dessas propostas de ações são: a recuperação de áreas degradadas, definição de áreas degradadas para compensação ambiental, monitoramento e pesquisa dos corpos d'água, estabelecimento de parâmetros urbanísticos e ambientais para os setores, educação ambiental e comunicação, definição de estruturas de fiscalização, entre outras ações (LEIS MUNICIPAIS, 2020).

3.10 ESTUDOS DE TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS APLICADAS EM RIACHOS

Souza *et. al.* (2017) realizaram um trabalho a fim de contribuir para melhorar a compreensão dos fatores morfológicos e hidrológicos intervenientes no processo do amortecimento de cheias em reservatórios e no desenvolvimento de um método de simples aplicação que estime o amortecimento, a partir de tais fatores, realizando simulações hidrológicas de vários cenários representativos de configurações de reservatórios e de bacias hidrográficas para analisar o impacto de cada parâmetro no amortecimento. Os resultados indicaram que o amortecimento aumenta com o fator de forma do reservatório e a altura do vertedouro. Por outro lado, diminui com a área da bacia hidrográfica, fator CN, largura do vertedouro e tempo de concentração.

Vergutz, Pereira e Schmidt (2019) propuseram o uso de reservatório de detenção como técnica compensatória de drenagem urbana. Os autores simularam cenários com e sem a implantação de reservatórios, avaliando a interferência para cenários de urbanização e de pré-desenvolvimento. Além disso, foram analisadas diferentes concepções de reservatórios, variando a altura dos dispositivos de saída. Concluiu-se que localizar a saída do reservatório em posições mais altas gera maior impacto na redução do pico de vazão.

Guan, Sillanpaa e Koivusalo (2015) mostram que a utilização de reservatórios não só reduz o pico das vazões, mas também retardam a ocorrência do tempo de pico gerado pela bacia. Entretanto, a utilização do reservatório não conseguiu restaurar vazões de pré-desenvolvimento quando ocorrem chuvas de maior magnitude, muito em razão da limitação de volume, já que o dispositivo perde a efetividade ao atingir a capacidade máxima.

Por outro lado, Vieira, Barreto e Figueira (2016), ao analisarem o impacto da construção de bacias de detenção na geração de vazões para eventos com alto tempo de retorno (100 anos), concluem que esta solução é extremamente eficiente, pois é capaz de reduzir em até 72% o pico de vazão, protegendo áreas urbanizadas a jusante. Os autores ainda concluem que é mais vantajosa economicamente a utilização de reservatórios de detenção do que obras de canalização de cursos d'água.

4 REVITALIZAÇÃO DE RIOS E RIACHOS: ESTUDO DE CASOS

Neste capítulo, serão estudados alguns casos famosos de revitalização de rios e riachos pelo mundo, informando um breve histórico sobre os mesmos, elencando seus possíveis problemas, e indicando como foram feitos os projetos de revitalização de cada caso.

4.1 RIO CHEONG GYE CHEON, SEUL, CORÉIA DO SUL

Inaugurada em 1971 em uma das partes mais densas de Seul, a via expressa Cheong Gye Cheon possuía cerca de 50 a 80 metros de largura e 6 km de extensão. Ela foi construída acima do riacho e de uma canalização de esgoto. A via expressa rapidamente se tornou um importante canal para o movimento dentro da cidade (KANG, 2009).

A construção de vias expressas elevadas traz diversos benefícios para a população, criando acesso controlado e separado para o trânsito, fornecendo mobilidade e conectividade vital para a região. Por outro lado, elas formam barreiras ao cortarem os bairros, manchando a paisagem do local, além dos ruídos e vibrações nas áreas circundantes. Por esse motivo, sob a liderança do então prefeito de Seul Myung-Bak Lee, optou-se por demolir essa estrutura em 2003 para tornar o local mais habitável para a população, reordenando as prioridades públicas.

O projeto de restauração do riacho que estava enterrado abaixo da rodovia custou cerca de US\$ 313 milhões. O objetivo era restaurar o córrego urbano com a elaboração de um projeto de um parque de recreação com ciclovia e via de pedestres, melhorando a qualidade de vida da população urbana, visto que o rio CheongGyeCheon é uma fonte de água doce e uma peça central da vida urbana em Seul.

Medidas foram tomadas para combater os impactos de possíveis congestionamentos, causados pela retirada uma rodovia de 6km de tráfego intenso. O governo abriu 68km de vias rápidas de ônibus ao longo das principais vias artérias, e reconfigurou as rotas de ônibus para alimentar o intenso sistema de metrô da cidade de forma mais eficaz. Além disso, um conjunto de lojas e mercados de vendas localizava-se ao longo da via expressa. Assim, pequenos empreendedores

eram contra o projeto por terem receio de perderem seus negócios, porém o governo compensou financeiramente os comerciantes e realocaram várias lojas para um novo centro de mercado ao sul do rio Han. O resultado do projeto foi a completa transformação do local, aumentando a qualidade de vida da comunidade local e estimulando o comércio e turismo em seu entorno.

Com relação aos benefícios ambientais da restauração do rio CheongGyeCheon, segundo Park (2007), o rio passou a fornecer proteção contra inundações para eventos de até 200 anos de retorno. Além disso, o efeito da ilha de calor urbana foi reduzido, resultando numa redução de temperatura na área. Houve o aumento da biodiversidade geral no rio em 639% entre o trabalho de pré-restauração em 2003 e o final de 2008 com o número de espécies de plantas aumentando de 62 para 308, e de espécies de peixes de 4 para 2 (KIM, KOH E KWON, 2009). Com a redução de circulação de automóveis, a poluição do ar por pequenas partículas foi reduzida em 35%, de $74\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $48\mu\text{g}/\text{m}^3$ (REVKIN, 2009).

No âmbito social, segundo Kim, Koh & Kwon (2009), o projeto favoreceu para um aumento de 15,1% no número de passageiros de ônibus na cidade e 3,3% no número de viagens de metrô entre 2003 e 2008. A restauração do rio atraiu em média 64 mil visitantes por dia, sendo cerca de 1,5 mil turistas estrangeiros, o que contribui financeiramente para o turismo local. Ainda segundo com relação à economia local, o projeto da restauração causou uma valorização em torno de 30% a 50% no preço dos terrenos a 50 metros do rio, o dobro da taxa de aumento de propriedades em outras áreas de Seul (KIM, KOH E KWON, 2009).

4.2 RIO TEJO, LISBOA, PORTUGAL

A bacia hidrográfica do rio Tejo possui uma área total de mais de 80 500 km², onde o rio Tejo é o curso d'água mais extenso da Península Ibérica. No site da ARH Tejo (2012), encontra-se elaborado o Plano de Gestão de Região Hidrográfica do Tejo. O documento trata da requalificação da bacia hidrográfica do Tejo, levando em consideração o clima, a hidrologia e a economia local. O plano passou por consulta pública e é acompanhado pela sociedade civil. A requalificação beneficiou uma população de cerca de 3,5 milhões de habitantes.

Além disso, segundo a arquiteta Branca Neves, Diretora de Projetos da Direção Municipal de Economia e Inovação da Prefeitura de Lisboa, a Frente Ribeirinha de Lisboa é uma das unidades de execução do Plano Diretor Municipal, que define ações para realizar intervenções públicas e privadas na cidade. Várias dessas intervenções de requalificação urbana permitem o uso total das margens do rio Tejo pela população e também por turistas (CORREIO, 2016).

Plano Geral de Intervenção da Frente Ribeirinha de Lisboa (CML, 2008) contempla as propostas de reconfiguração das infraestruturas portuárias, permitindo liberar para usos não portuários certos setores da frente ribeirinha. Seu objetivo é contribuir para a valorização de Lisboa como centro da área metropolitana nacional de Portugal, criando uma paisagem unificada de toda a frente ribeirinha, sendo o ponto mais importante a ligação entre a cidade e o rio Tejo. Vale salientar que esse plano de intervenção pretende melhorar a qualidade de vida da comunidade local e da área metropolitana, considerando os critérios socioculturais, econômicos, ambientais e urbanísticos.

Para definir-se uma estratégia de atuação, identificaram-se os principais problemas comuns para toda a área, entre eles: pouca permeabilidade da faixa marginal e dificuldade de mobilidade na mesma; vias de pedestres e ciclistas descontínuas ao longo da margem do rio; pouca interação entre a malha urbana e o rio; diversos espaços públicos desqualificados; falta de transportes públicos (CML, 2008).

O investimento para a revitalização do rio Tejo, encerrada em 2012, foi de 800 milhões de euros. A construção de uma infraestrutura de saneamento e a renovação da rede de abastecimento de águas e sistemas de esgoto estão incluídas no projeto, devido à quantidade de esgoto que eram despejados diretamente no rio. Com isso, milhões de habitantes foram beneficiados com o projeto. Inclusive, segundo o portal G1 (2020), com a melhoria da qualidade da água, o rio ganhou vidas aquáticas, atraindo golfinhos de volta às suas águas.

Além disso, foram geradas novas áreas residenciais conectadas a faixa marginal do rio, além de novas atividades culturais recreativas, comerciais e desportivas, com a criação de infraestruturas de suporte ao turismo de cruzeiros e a náutica de recreio. Vias de pedestres e ciclistas foram criadas entre espaços verdes, elementos patrimoniais e a malha urbana adjacente. Não obstante, desenvolveu-se

um sistema de vistas de toda a Frente Ribeirinha, permitindo uma ótima visualização de todo o rio ao longo da malha urbana, utilizando toda a frente ribeirinha como espaço público. Medidas de participação pública foram tomadas ao longo de todo o processo de revitalização do rio Tejo, com a ampla divulgação dos projetos, sessões temáticas para conscientização da comunidade, entre outras medidas (CML, 2008; OLIVEIRA, 2014).

4.3 RIO TÂMISA, LONDRES, REINO UNIDO

O rio Tâmisa é um dos maiores e mais importantes rios do Reino Unido, banhando grandes cidades como Oxford e Londres. Possui 346 km de extensão e deságua no mar do norte. Sua revitalização ocorreu em cerca de 50 anos, com a ajuda de muito investimento e tecnologias apropriadas por parte do governo, além da participação pública no processo, que entendeu a importância relação entre o rio e a cidade. No século XIX, o rio foi decretado biologicamente morto, sendo muito comum a contaminação da população por doenças de veiculação hídrica, como a cólera.

O primeiro passo para tratar o problema da poluição dos rios foi a construção de um sistema de captação de esgoto, porém esta solução não foi suficiente com expansão da cidade, e consequentemente de sua população. O rio sofreu com o despejo incessante de resíduos residenciais e industriais ao longo do século XIX. Desde então, o número de estações de tratamento de esgoto foi ampliado e as estações foram aprimoradas, evidenciando a evolução do sistema de captação de esgoto (NOSSA ILHÉUS, 2016).

Segundo Halliday (2001), alguns aspectos importantes quanto à questão sanitária de Londres foram considerados: a saúde da população, os impactos econômicos da revitalização do rio e seus efeitos sociais. Assim, em 1958 foi aprovado o projeto de Joseph Bazalgette, engenheiro-chefe nomeado pelo Conselho Metropolitano de Obras em Londres, conselho responsável por todos os projetos relacionados ao sistema de saneamento metropolitano. O projeto de Bazalgette se tratava de um sistema agrupado de esgoto e águas pluviais, dividido em várias regiões da cidade, que, ao se encontrarem em diferentes pontos, fluem em direção ao mar paralelamente ao rio Tâmisa, com destino ao seu estuário.

Desde a sua conclusão, esse sistema foi eficaz na época. Porém, com o passar dos anos, o sistema mostrou-se cada vez mais ineficiente, considerando a expansiva demanda da cidade, além da diminuição de áreas verdes com a construção de grandes obras na cidade, como shoppings e condomínios. Logo, houve grande pressão internacional para que Londres renovasse seu sistema de tratamento de águas, considerando a grande relevância política e econômica da preservação do meio ambiente no cenário mundial (HALLIDAY, 2001).

Em 2000, a Thames Water, empresa de saneamento de Londres, foi encarregada de elaborar um projeto de renovação do sistema sanitário de Londres. Em 2006, *The London Tideway Improvements (project)* foi apresentado ao governo, com o objetivo de executar ações fundamentais para tal renovação. Segundo Stride (2019), o projeto visava separar os sistemas de esgoto e de captação de águas pluviais, aprimorar esses sistemas, e a limpeza da superfície do rio. Em 2007, a Thames Water foi autorizada a executar o projeto. Com um custo de cerca de 674 milhões de libras, as obras foram concluídas em 2014.

Um dos esquemas de defesa contra as inundações, que ajudou a reduzir os danos nos últimos anos, é a barreira do Tâmisa. Esta é uma barreira anti-inundações localizada no rio Tâmisa, em Londres, que previne cheias causadas por altas marés e tempestades excepcionais. A barreira é erguida durante a maré cheia e rebaixada para liberar a água a montante quando a maré baixa (NOSSA ILHÉUS, 2016).

Outro projeto importante é o Thames Tideway Tunnel. Esse projeto, iniciado em 2015 com previsão de término em 2024, que consiste na construção de um túnel com extensão de 25 km, 7,2 metros de diâmetro e localizado a 65 metros abaixo do nível do rio Tâmisa. Esse túnel proporcionará a substituição de 34 canais combinados de esgoto e águas pluviais, devido a sua capacidade de armazenamento de aproximadamente 1,6 milhão de m³, impedindo que milhões de toneladas de esgoto seja despejada diretamente no rio. Seu orçamento é de cerca de 4,2 bilhões de libras, sendo financiado, construído, operado e mantido pela Tideway (Bazalgette Tunnel Ltda.) (STRIDE, 2019).

Atualmente, a Thames Water segue investindo em infraestrutura sanitária e diversas tecnologias, objetivando o tratamento da água e do esgoto, e a retirada diária de toneladas de resíduos sólidos do local. Como resultado, espécies de peixes

sensíveis à poluição reapareceram no rio, que foi transformado em um ecossistema exitoso. Além disso, o rio voltou a ser local apropriado para esportes náuticos (BENTO, 2021).

4.4 RIO SENA, PARIS, FRANÇA

O rio Sena banha a cidade de Paris, localizado no norte da França. Com uma extensão de 776 km, o rio deságua no Oceano Atlântico. A área de sua bacia hidrográfica, a bacia Sena-Normandia, é de aproximadamente 78 mil km². O rio Sena é fundamental para o transporte fluvial em Paris, sendo usado para o transporte de resíduos de construção e demolição, de materiais de construção e terras de escavação, do carvão usado para abastecer as usinas termoelétricas locais, e do trigo utilizado como matéria-prima da conhecida baguete francesa. O rio Sena também é conhecido como um ponto turístico tradicional de Paris, utilizado para transporte de passageiros em seus conhecidos barcos.

As principais fontes de poluição do rio são o despejo de esgoto doméstico e industrial. Desde 1905, o rio Sena era utilizado por atletas para competições náuticas, como a travessia de Paris pelo Sena, mesmo sem nenhuma forma de atestar a boa qualidade da água do rio. Era comum a população se banhar no rio Sena durante o verão europeu, porém sua poluição era tão severa que, em 1923, passou a ser proibido o uso do rio como recreação de banhistas (LE POINT, 2017). Como parte do processo de despoluição do rio Sena, investiu-se em estações de tratamento de esgoto, a partir de 1960, funcionando inicialmente com apenas 11 estações. Além disso, há incentivos financeiros do governo para os agricultores que vivem próximos ao rio não o poluam, além de leis que multam empresas e fábricas que despejarem resíduos nele.

O rio Sena ainda sofre com o despejo de resíduos de forma difusa em Paris. Dito isso, para melhorar a qualidade da água do rio e diminuir sua contaminação, estão sendo estudadas algumas ações, como: inserir barcos com sistema de estocagem de águas usadas, separar as ligações incorretas entre as redes de coleta de esgoto e de águas pluviais (LE FIGARO, 2017), e melhorar o sistema de tratamento de esgoto com dispositivos de desinfecção de ozônio ou ultravioleta (LA CROIX, 2016).

Outro problema relacionado ao rio Sena são as enchentes causadas por eventos extremos de chuvas em Paris. Como exemplo, segundo a matéria do site DW Brasil (2016), temporais na França causaram o transbordamento do rio em 2016, ultrapassando a altura de 5 metros, seu nível mais alto dos últimos 30 anos. O risco de alagamento fez o Museu do Louvre, o museu mais visitado do mundo, e o Museu de Orsay fecharem para não haver risco de perda de obras de arte em salas ameaçadas pelo aumento do nível do rio Sena. Visando resolver essa questão, procurou-se evitar a impermeabilização do solo, adotando opções mais naturais, com coeficientes de infiltração maiores, reduzindo o pico de vazão (LE FIGARO, 2017).

Atualmente, há um grande avanço na requalificação do rio, com um comprometimento por parte do governo para o avanço do projeto de revitalização do rio, considerando que Paris será a sede dos Jogos Olímpicos de 2024. A meta é liberar o rio Sena não apenas para os competidores, mas a toda população local e turistas permanentemente (20 MINUTES, 2017).

Além de revitalizar o rio e suas margens, objetiva-se criar locais em que a população possa conviver com o rio, como bares, áreas para prática de esportes e lazer. As pistas de rolamento destinadas à locomoção de carros foram substituídas por vias para pedestres. Segundo o site Conexão Paris (2013), tudo isso faz parte dos projetos “Réinventer la Seine”, ou “Reinventar o Sena”. Seu desafio é desenvolver as atividades econômicas do local, preservando o meio ambiente e promovendo a harmonia entre o rio e a cidade.

4.5 RIO PIRARUNGAUA, SÃO PAULO, BRASIL

O córrego Pirarungaua é afluente do Riacho do Ipiranga, e sua nascente está localizada no Jardim Botânico de São Paulo, uma das unidades de preservação que fazem parte do Parque Estadual das Fontes do Ipiranga (INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE, 2021). Sendo umas das áreas verdes mais importantes de São Paulo, o Jardim Botânico de São Paulo tem 360 mil m² de vegetação, 280 espécies variadas de árvores e fauna diversificada. Em 1945, o Córrego Pirarungáua foi retificado, canalizado dentro de uma galeria coberta com uma laje, passando

décadas escondido da população, porém ressurgiu em 2008, quando foi retirada a placa que o cobria.

Durante o período de urbanização e industrialização do Brasil, os corpos hídricos sofreram grandes transformações, por serem considerados obstáculos para o desenvolvimento urbano. Além disso, o crescimento populacional da região causa o aumento da demanda por água potável, e o aumento de produção de resíduos, que, por não possuírem local adequado de destinação, agravam a degradação dos rios. Logo, a canalização de rios e ocupação das várzeas se tornou algum comum na época (FREITAS E FRANCO, 2019).

Devido aos fatores socioeconômicos e políticos relacionados à harmonia entre a cidade e a natureza, em 2008, foi iniciada uma grande intervenção em um trecho do córrego canalizado. Algumas palmeiras localizadas na Alameda foram realocadas e uma edificação administrativa foi demolida, ajudando o córrego a renascer. Além disso, por nascer dentro dos limites do Jardim Botânico de São Paulo, a qualidade da água do córrego seria preservada até a sua foz no Córrego do Simão (FREITAS E FRANCO, 2019).

Segundo Freitas e Franco (2019), o arquiteto José Ganzelli foi o responsável pelo projeto de requalificação do Córrego. Foi proposta a instalação de decks de madeira para que visitantes pudessem apreciar o córrego e a mata ciliar ao longo de suas margens à céu aberto. A conscientização ambiental foi levada em conta para a criação desse espaço, considerando a importância da harmonia entre a mata e corpos d'água localizados próximos a elas. Além da regeneração das margens do córrego, foram plantadas diversas espécies nativas da Mata Atlântica, tornando o local ainda mais atrativo para visitantes.

O projeto acabou sendo um exemplo de infraestrutura verde a ser seguido para requalificação de outros corpos hídricos, apesar de ter sido implantado em apenas um trecho de 240 metros do córrego. Dito isso, o projeto se mostra bem-sucedido, por construir uma bela paisagem a ser apreciada e incentivar a convivência da população com o córrego. Isso pode ser comprovado pelo aumento do número de visitantes no local e a repercussão de sua inauguração na mídia (FREITAS E FRANCO, 2019).

Embora haja diversas ações que não só visam melhorar a qualidade da água de corpos hídricos, mas também reintroduzi-los à paisagem urbana, não há políticas

públicas suficientes que promovam a sua interação com a comunidade. É preciso haver uma conscientização da população com relação aos cuidados que precisam ser tomados para preservar as águas do córrego Pirarungáua, e investir nas iniciativas já existentes para que mudanças significativas possam ocorrer.

4.6 PARQUE BARIGUI, CURITIBA, BRASIL

O Parque Barigui é um dos maiores parques urbanos da cidade de Curitiba, no Paraná. Recebeu esse nome devido ao rio Barigui, que passa pelo parque e forma um grande lago de 230 mil m² em seu interior. Além do lago, existe um bosque e trilhas no meio da mata, e uma via pública que os separa. O parque, com seus 140 hectares, é conhecido por atrair a população local por ser próximo ao centro da cidade, além de proporcionar uma bela paisagem natural, atividades esportivas e recreativas (CURITIBA, 2021).

Desde 2007, há um planejamento estratégico para a revitalização da bacia do rio Barigui. A prefeitura avaliou as diversas ligações de esgoto irregulares e verificou as redes de coleta e tratamento, visando a correção de possíveis falhas para reduzir o volume de carga orgânica lançada na bacia do rio Barigui. Segundo o site da prefeitura municipal de Curitiba (2007), a prefeitura promoveu uma grande campanha de conscientização ambiental e mobilização social, envolvendo escolas, empresas, universidades e outras organizações sociais. Foram envolvidas diretamente nos projetos as secretarias do Meio Ambiente, Obras, Urbanismo, Educação, Planejamento além da Companhia de Habitação Popular de Curitiba (COHAB) e Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba (IPPUC).

Nesse processo de revitalização da bacia do rio Barigui, a prioridade da prefeitura de Curitiba foi investir em obras de infraestrutura, e ações de fiscalização e de conscientização ambiental. Adotaram-se medidas de conservação de nascentes e ambientes naturais já existentes na região, e reordenação de áreas de ocupação irregular às margens do rio. Além disso, a prefeitura consolidou o Parque Linear do Rio Barigui, área que interliga bosques e áreas de lazer a novas unidades de conservação que possam ser criadas, aproveitando trechos do sistema viário existente e criando novas ligações, com vias de caminhadas e ciclovias (CURITIBA, 2007).

Outra iniciativa da Prefeitura de Curitiba é o projeto Viva Barigui. Segundo Froes (2018), este projeto aborda políticas de revitalização e recuperação ambiental, intervindo na parte da bacia do rio Barigui localizada em Curitiba. A requalificação das margens do rio Barigui visa revitalizar a vegetação remanescente no local, criar espaços de lazer (como skateparks, academias ao ar livre, playgrounds e quadras poliesportivas) e vias para pedestres e ciclistas, e renovar a paisagem, incentivando a convivência adequada entre a comunidade urbana e as unidades de preservação (OFICINA URBANA, 2019). Com isso, a prefeitura propiciará melhorias no acesso ao parque e a mobilidade nele, oferecendo um local de referência urbana para o município, e promovendo conforto e segurança para o desfrute da população.

5 METODOLOGIA

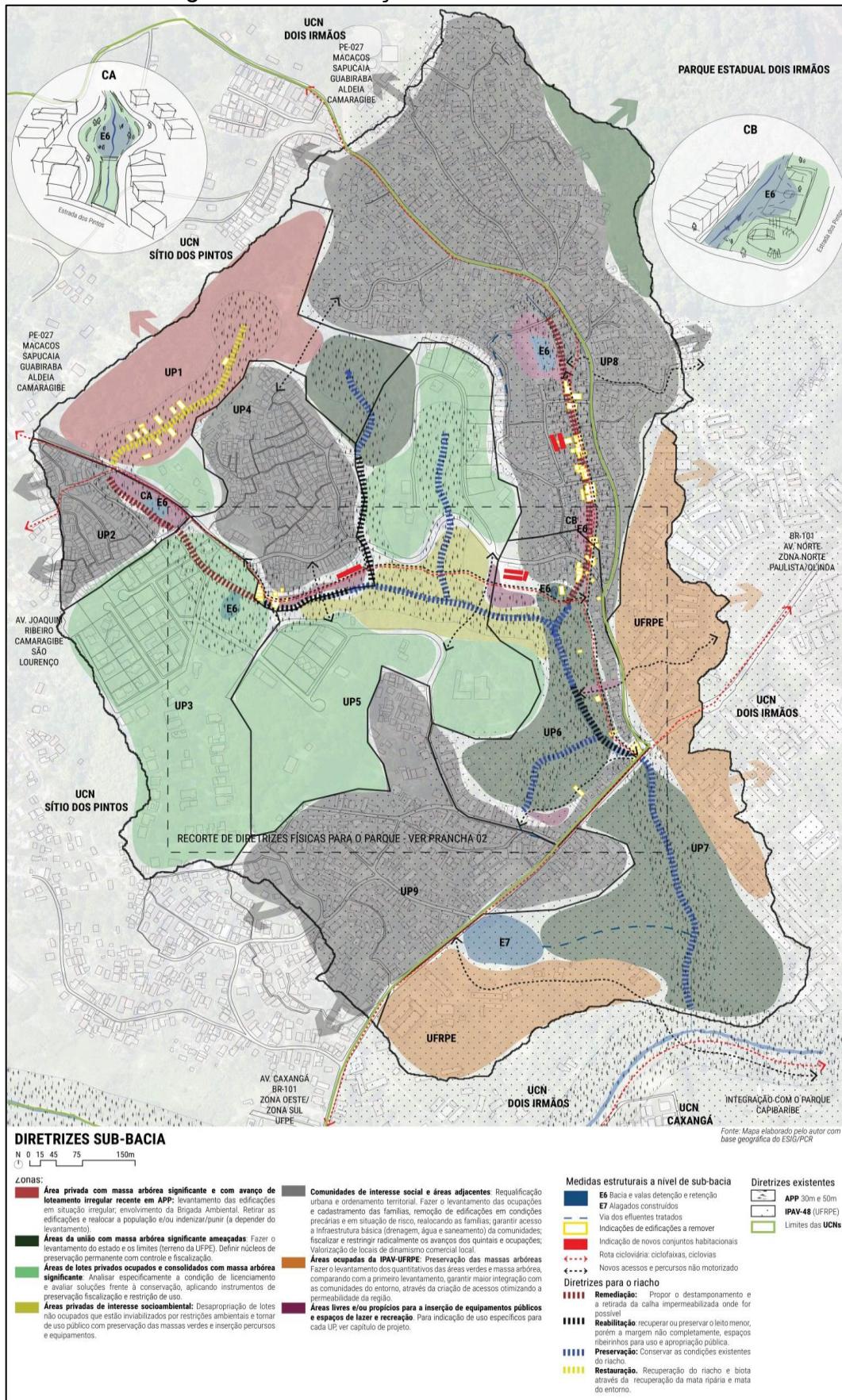
Para a avaliação da eficiência da técnica compensatória para o amortecimento de cheias nos locais de estudo, utilizou-se o modelo hidrológico HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System), a partir de dados de entrada, como seções transversais do canal, estudo analítico das chuvas de Recife e dados do terreno disponibilizados pelo PE3D (Pernambuco Tridimensional). Com as sub-bacias sendo delimitadas por meio de software de geoprocessamento QGIS e de suas ferramentas, foi possível construir o modelo hidráulico da bacia. Por fim, foram avaliados projetos como alternativas para a revitalização do trecho do riacho e do córrego estudados.

5.1 ÁREA DE ESTUDO

A cidade do Recife (PE) possui área de 218,50 km² e um percentual elevado de impermeabilização do solo e baixas altitudes. O clima é predominantemente quente, com temperatura média de 25°C e alta precipitação média anual, sendo o rio Capibaribe, o principal rio que corta a cidade. O crescimento populacional não planejado, a impermeabilização do solo e os aterramentos realizados contribuem para a ocorrência de inundações em diversos pontos de Recife (IBGE, 2020) (CABRAL e ALENCAR, 2005).

A UCN Sítio dos Pintos (Figura 2) situa-se na parte Noroeste do Recife, na Região Político Administrativa III (RPA 3), no bairro do Sítio dos Pintos. Localiza-se entre os paralelos 08°00'30"S e 08°01'20"S e os meridianos 34°57'46"W e 34°57'21"W, ocupando uma área de 1.525.500 m² (152,55 hectares), o que corresponde a 0,7% do território do Recife (Figura 3) (LEIS MUNICIPAIS, 2020).

Figura 3 – Localização da UCN Sítio dos Pintos.



A classe de solo encontrada na UCN Sítio dos Pintos é PAd6 - Argissolo Amarelo Distrófico latossólico e não latossólico, textura média/média e argilosa + Argissolo Amarelo Distrófico + Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico, ambos com textura média/argilosa, demonstrando-se ser como um solo de baixa fertilidade natural e baixo potencial agrícola. Há uma área em que não foi possível determinar os tipos de solo, pela presença de aterros, ocupações e outras atividades resultantes da ação humana. (EMBRAPA, 2001).

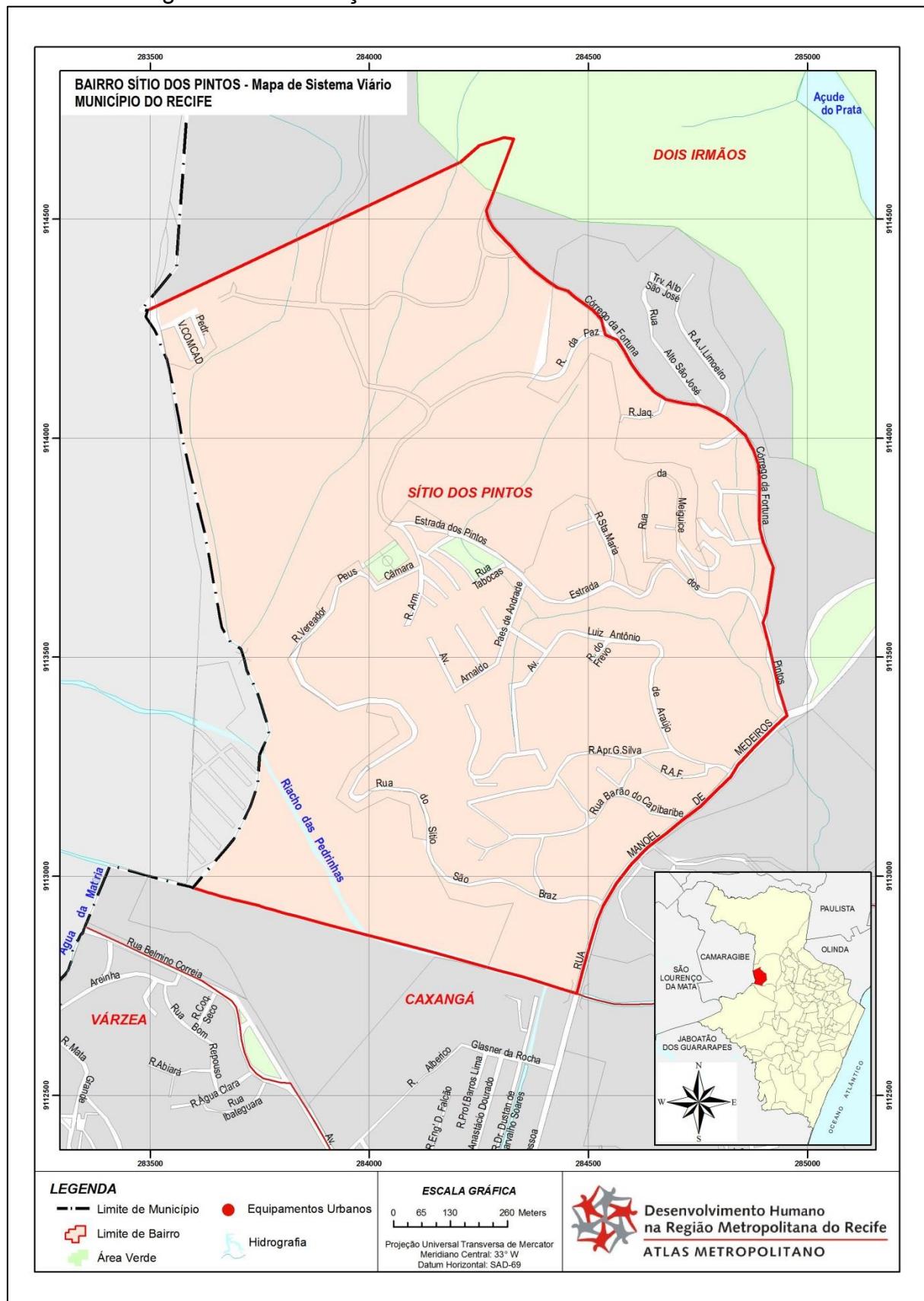
A Unidade de Conservação da Natureza Sítio dos Pintos situa-se na Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe, sub-bacia do Rio Camaragibe, onde este se encontra na parte inferior da Unidade de Conservação (LEIS MUNICIPAIS, 2020). Nesta UCN, destacam-se os dois corpos d'água de estudo: o córrego da Fortuna, com largura média de 1,50 metro e profundidade média de 1,50 metro; e o riacho Sítio dos Pintos, com largura média de 1,73 metro e profundidade média de 1,20 metro (RECIFE, 2018).

O riacho Sítio dos Pintos está localizado no bairro de mesmo nome, na cidade do Recife, como pode ser visto no mapa do Sistema Viário do Município de Recife (Figura 4), e que faz limite com o município de Camaragibe, sendo afluente do rio Camaragibe, afluente da margem esquerda do rio Capibaribe. A Figura 5 mostra uma imagem de satélite do bairro Sítio dos Pintos em Recife. A bacia hidrográfica do riacho Sítio dos Pintos possui uma área de 102,8 hectares.

Parte da bacia foi considerada Zona Especial de Proteção pela Lei Municipal Nº 16.176/96 (RECIFE, 1996) e, posteriormente, declarada Unidade de Conservação da Natureza (UCN) Sítio dos Pintos, entretanto, tem sofrido severa degradação ambiental (CABRAL *et. al.*, 2019). Em 2020, passou à categoria de Área de Preservação Ambiental (APA) (BRAGA, SILVA E AGUIAR, 2020).

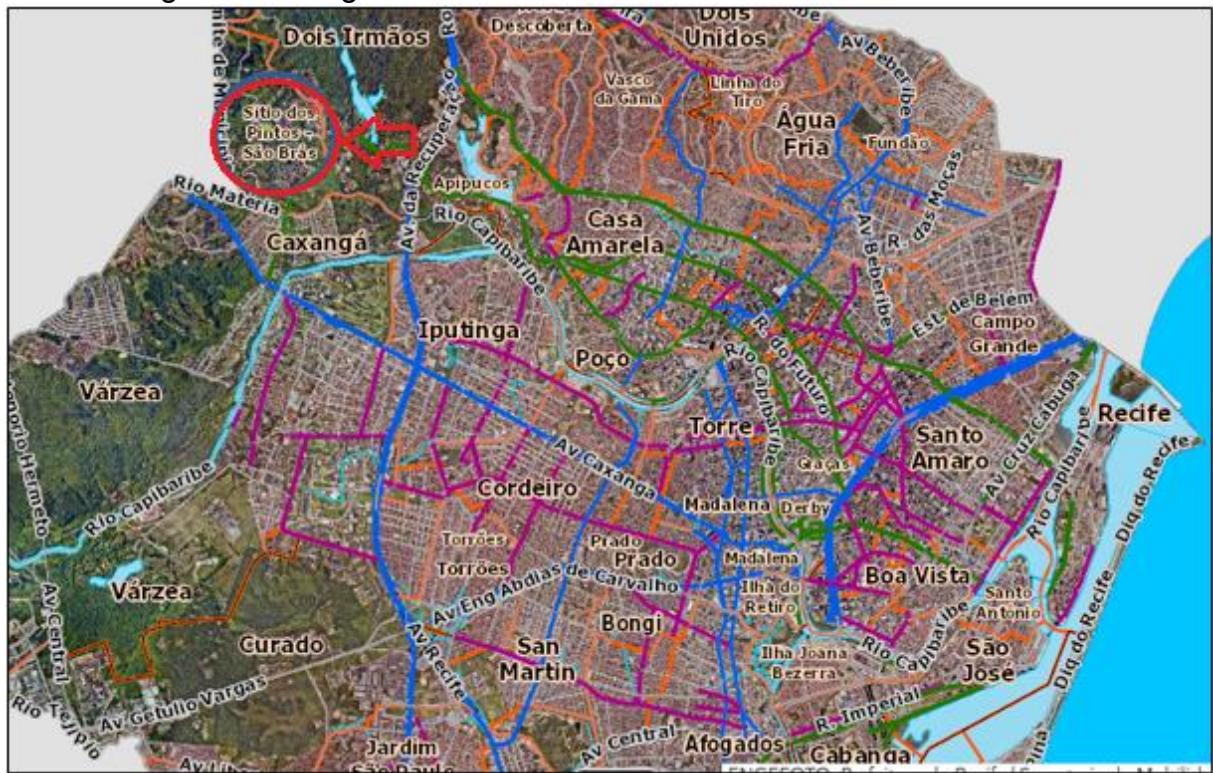
O córrego da Fortuna, corpo hídrico também de estudo neste trabalho, faz parte da sub-bacia do riacho Sítio dos Pintos e é seu principal afluente. O córrego possui uma área de contribuição de 25,9 hectares (CABRAL *et. al.*, 2019). Localiza-se no bairro Sítio dos Pintos e faz parte da UCN Sítio dos Pintos. Esta área é a que apresenta maior exclusão socioambiental. Pode ser visto na Figura 6 a indicação dos locais de estudo do riacho Sítio dos Pintos e córrego da Fortuna.

Figura 4 – Localização do bairro Sítio dos Pintos em Recife.



Fonte: Recife (2011).

Figura 5 – Imagem de satélite do bairro Sítio dos Pintos em Recife.



Fonte: Recife (2022).

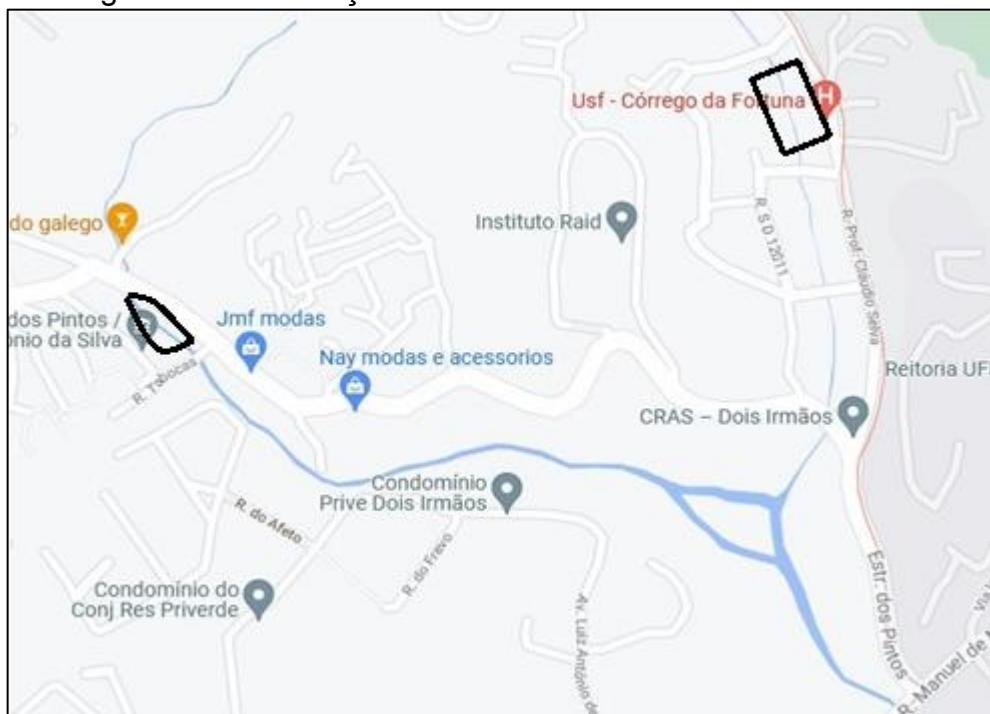
Figura 6 – Locais de Estudo do riacho Sítio dos Pontos e córrego da Fortuna.



Fonte: Recife (2022).

Apresenta ocupação ilegal pela população local que invadiu áreas da Reserva Ecológica de Dois Irmãos e da ZEPA do Sítio dos Pintos. Segundo Novaes *et. al.* (2016), a consequência disso é a retirada de recursos naturais do local, intensificando a perda de área natural das Unidades de Conservação. Porém, a população acaba sendo vítima da negligência por parte da prefeitura de serviços públicos urbanos essenciais, como coleta de lixo e saneamento básico, relatam os moradores locais. Pode ser visto na Figura 7 a localização dos trechos da sub-bacia de estudo.

Figura 7 – Localização dos trechos da sub-bacia estudados.



Fonte: Google Maps (2020), modificado pelo autor.

5.2 DELIMITAÇÃO DA BACIA

Dentre os diversos métodos computacionais utilizáveis para obter os dados de relevo para a delimitação das sub-bacias hidrográficas, utilizou-se o software QGIS e Modelos Digitais de Terreno (MDT) gerados a partir de ortofotos obtidas no programa Pernambuco Tridimensional (PE3D). Delimitaram-se as sub-bacias hidrográficas por meio de critérios topográficos, baseando-se na altitude e declividade da superfície da bacia estudada. Com o tipo de MDT definido como dado

de entrada, pôde-se fornecer ao software os dados de relevo necessários para a análise topográfica do terreno.

O mosaico disponibilizado pelo PE3D sobrepõe o mapa de Pernambuco, em escala de 1:5000, com cada quadrícula do mosaico tendo um código associados a uma imagem de satélite. Esta se sobrepõe à área delimitada pela quadrícula. A nomenclatura das quadrículas é baseada na latitude e longitude correspondente ao vértice superior esquerdo de cada quadrícula. Os dados baixados são compostos por *pixels* quadrados georreferenciados, representando os eixos x e y de uma superfície plana, com cada *pixel* contendo um valor que representa a altitude média da superfície, em metros, em relação ao solo. Seria o eixo z do Modelo Digital de Terreno. Assim, é possível que o software Qgis interprete os valores dos 3 eixos como uma superfície tridimensional, identificando feições do relevo e declividade, por meio do processamento da imagem.

Os MDTs da área de Recife do projeto PE3D foram disponibilizados pelo professor Almir Cirilo, da Universidade Federal de Pernambuco, no formato .TIF, por possuir uma compactação mais eficiente. Escolheu-se esse formato pela fácil disponibilização dos arquivos pela UFPE. Como esses arquivos, foi possível importá-los como dados de entrada para o software QGIS. Com toda a área geográfica da sub-bacia em questão contida nos arquivos de entrada inseridos no QGIS, foi possível delimitar a bacia hidrográfica do riacho Sítio dos Pintos, partindo-se do exutório.

Com os dados de MDT baixados, por meio de um processamento computacional em um notebook comum pessoal, é preciso tratar os dados brutos inseridos, e fazer procedimentos para que os dados possam ser processados. As imagens precisam ser processadas de uma só vez, para gerar apenas um arquivo de saída, e o método de apresentação dos dados precisam ser convertidos para que o algoritmo utilizado consiga utilizá-lo e calculá-lo corretamente. Para isso, usaram-se as seguintes operações e ferramentas disponibilizadas pelo software QGIS versão 2.18.20 para delimitar-se as sub-bacias de estudo:

- Importação dos dados de entrada no ambiente do programa;
- Comando *mosaic*, para unir os arquivos de entrada *rasters* em um só arquivo de entrada, para evitar erros nos *pixels* de uma imagem para outra;

- Verificar o sistema de coordenadas utilizado, pois as coordenadas são apresentadas em graus, minutos e segundos, mas o programa precisa receber os valores dos eixos em metros;
- Comando *merged images*, para cortar as imagens fundidas;
- Delimitação da bacia, com ajuste na visualização e elaboração de mapas com todos os elementos obrigatórios, como legendas, datum e sistemas de coordenadas de referência;

Vale lembrar que a área de estudo, a bacia do riacho Sítio dos Pintos se adequa às características de escoamento por gravidade, o que torna mais precisa a delimitação da sub-bacia, por esse método ser baseado na topografia local. Outro fator que colaborou para a precisão da delimitação foi a resolução espacial do MDT disponibilizados pelo PE3D. Com um padrão de exatidão cartográfica (PEC) atendendo a classe de escala de 1:5000, o modelo pode chegar perto da realidade.

Através da ferramenta *flow direction*, determinou-se a direção do fluxo na superfície, *pixel a pixel*, em apenas uma direção, considerando que há oito caminhos possíveis em relação aos *pixels* próximos. Obtendo-se o fluxo representado pela linha composta pelos *pixels* selecionados anteriormente, pela ferramenta *contributing area*, foi possível determinar o exutório da bacia, e consequentemente a área de contribuição a montante do exutório. Por conseguinte, obteve-se a bacia em formato raster, por meio da ferramenta *stream reach and watershed*, sendo possível fazer a extração da rede de drenagem da área estudada. Por fim, converteu-se o arquivo *raster* obtido para o formato vetor (polígono), para calcular os valores de áreas de contribuição e comprimento dos trechos do riacho.

5.3 CARACTERIZAÇÃO HIDROLÓGICA DA BACIA

As informações levantadas por geoprocessamento, conferidas por Cabral *et al.* (2018) contribuíram para a obtenção de características como comprimento dos trechos dos riachos e áreas das sub-bacias, necessárias à determinação do tempo de concentração da bacia do Sítio dos Pintos. Considerando as localizações propostas para os reservatórios, calculou-se o tempo de concentração para o trecho contribuinte correspondente a cada um deles.

Utilizando-se o método de Carter (Equação 8), recomendado por Silveira (2005), o tempo de concentração foi avaliado, utilizando-se os dados de comprimento, em metros, e declividade, em m/m, dos respectivos trechos considerados. Escolheu-se este método, porque a fórmula é recomendada para áreas de drenagem de 0,2 a 21 km², apesar de funcionar melhor para áreas urbanas de até 11 km², e para baixas declividades, de até 0,05 m/m, se adequando ao caso da bacia hidrográfica do riacho Sítio dos Pintos.

$$T_c = 0,0997L^{0,6}S^{-0,3} \quad (8)$$

Em seguida, estimou-se a intensidade média das chuvas para tempos de retorno de 2 anos, 5 anos, 10 anos e 25 anos, com o uso da equação de chuvas intensas (Equação 9) do Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais do Recife (RECIFE, 2013), com tempo de concentração em minutos. Escolheu-se esses tempos de retorno, para considerar eventos de chuva recorrentes e extremos.

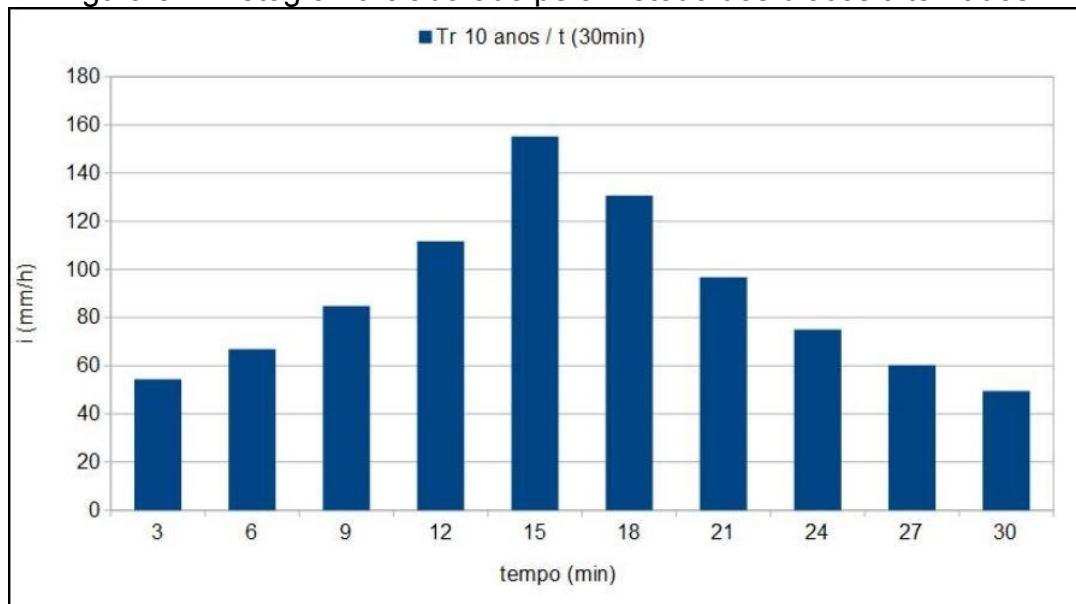
$$i = \frac{611,3425T_r^{0,1671}}{(t + 7,3069)^{0,6348}} \quad (9)$$

Os valores de precipitação serão especificados por hietogramas. Para a elaboração deles, utilizou-se o método dos Blocos Alternados (ZAHED FILHO e MARCELLINI, 1995), por ser bastante utilizado na prática de projetos de engenharia. Considerando a duração total da chuva sendo igual ao tempo de concentração do trecho da bacia, estimaram-se as intensidades médias das chuvas para diversas durações até a duração total, para os diversos tempos de retorno, com base na equação IDF da cidade de Recife, especificada anteriormente.

As intensidades médias são convertidas em alturas de chuva, representando os valores de volume de chuva acumulados até o último intervalo considerado. Com os incrementos entre um valor acumulado e outro calculado, rearranja-se os valores alternadamente, com o maior valor posicionando-se no centro da duração total da chuva, e os demais sendo alocados em ordem decrescente, alternando à direita e à

esquerda do bloco central. Uma recomendação adotada foi considerar a duração de cada intervalo sendo menor que o tempo de concentração aferido, e distribuir os valores em pelo menos 6 blocos. Pode ser visto na Figura 8 um exemplo de hietograma elaborado pelo método dos blocos alternados.

Figura 8 – Hietograma elaborado pelo método dos blocos alternados.



Fonte: SIEBRA (2021).

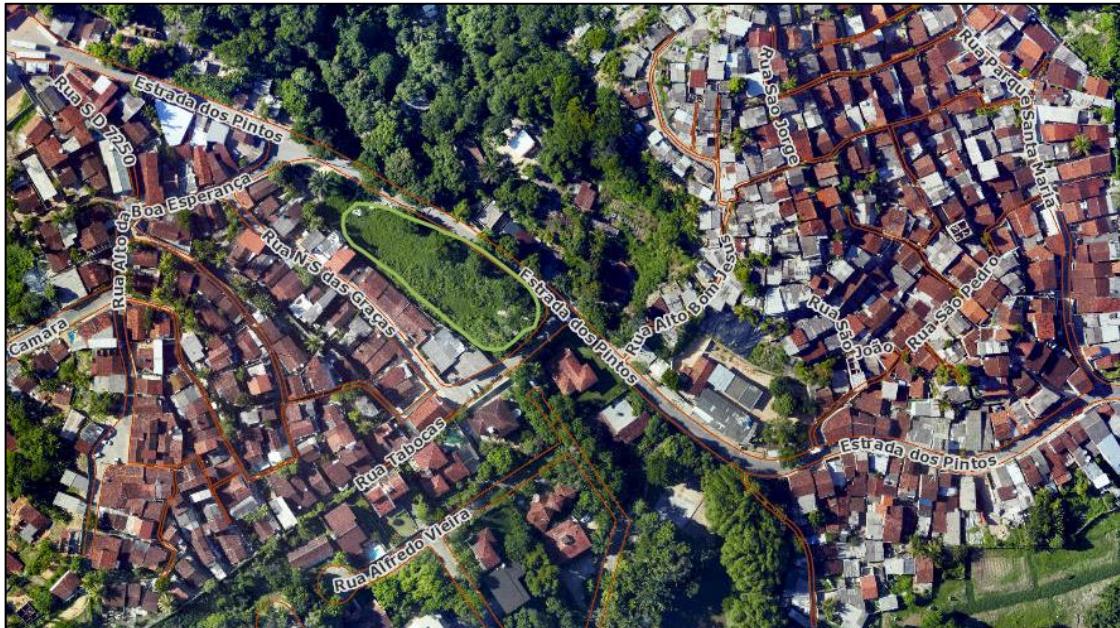
5.4 MODELAGEM COMPUTACIONAL

Para avaliar a influência do reservatório de detenção no riacho Sítios dos Pintos, utilizou-se o modelo hidrológico HEC-HMS, produto do Centro de Engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA. Este programa é um sistema de modelagem generalizado, projetado para simular os processos de precipitação e escoamento superficial de bacias hidrográficas urbanas e rurais. Os hidrogramas produzidos pelo software podem ser usados para estudos de drenagem urbana, previsão de vazão, impacto de urbanização futura, projetos de reservatório, entre outras utilidades (USA, 1997).

Para o projeto de revitalização de dois trechos do riacho Sítio dos Pintos, propôs-se o dimensionamento e a instalação de reservatórios de detenção, visando o acúmulo temporário de águas pluviais. Isso contribui para a redução de inundações urbanas, principalmente em áreas densamente popularizadas e com altas taxas de impermeabilização do solo. Essa é uma alternativa mais barata e

viável do que ampliar os canais e galerias de drenagem existentes. O primeiro reservatório localiza-se próximo a USF Sítio dos pintos, e o segundo reservatório localiza-se próximo a USF Córrego da Fortuna. As Figuras 9 e 10 mostram as localizações dos reservatórios propostos no bairro Sítios dos Pintos.

Figura 9 – Localização do reservatório proposto USF Sítio dos Pintos.



Fonte: Recife (2022).

Figura 10 – Localização do reservatório proposto USF Córrego da Fortuna.



Fonte: Recife (2022).

Para a criação do modelo de sub-bacias no HEC-HMS, utilizou-se os seguintes dados de entrada:

- Área de contribuição das sub-bacias analisadas e o tempo de concentração do trecho analisado, obtido pela equação IDF de Recife;
- Lag time (tempo de retardo), definido como 60% do tempo de concentração;
- *Curve number* (CN), ou número de escoamento, definido pelo método *Soil Conservation Service* (SCS), que representa a caracterização hidrológica da cobertura do solo da bacia hidrográfica, definido como 80, considerando uma futura urbanização do local;
- Porcentagem de área impermeabilizada, definida como 65%, considerando que a área é consideravelmente urbanizada.

Por meio de sensoriamento remoto e visita de campo, foi possível obter as dimensões aproximadas dos reservatórios propostos, como cotas, comprimentos e localização dos pontos de entrada e saída (Figura 11 a e c) e fotos do local de implantação (Figura 11 b e d). Com esses dados, foi possível a elaboração da curva cota-volume, método de armazenamento dos reservatórios. Esse método relaciona o volume armazenado nos reservatórios com a elevação do nível d'água no mesmo, sendo fundamental para seus dimensionamentos.

Figura 11 – Curvas de nível do reservatório USF Sítio dos Pintos (a). Fotografia do local de implantação deste reservatório (b). Perímetro do reservatório USF Córrego da Fortuna (c). Fotografia do local para implantação deste reservatório (d).



Fonte: Google Maps (2021), modificado pelo autor; Schlicht Ponds (2020).

Pode ser visto na Tabela 1 os dados de entrada utilizados na modelagem computacional dos dois reservatórios. Para o reservatório USF Sítio dos Pintos, a área de contribuição foi a da sub-bacia 2. Para o reservatório USF Córrego da Fortuna, as áreas de contribuição foram as das sub-bacias 0, 1 e 3.

Tabela 1 – Dados de entrada para modelagem computacional.

Parâmetros	Reservatório Sítio dos Pintos	Reservatório Córrego da Fortuna
Área (km ²)	0,143	0,259
CN	60	60
Área Imperm. (%)	65	65
Tc (min)	13,37	16,07
Lag Time (min)	8,02	9,64

Fonte: Autor (2021).

Ao inserir as precipitações no modelo, por meio dos hietogramas estimados, considerou-se uma estação para todas as sub-bacias analisadas. Além disso, considerou-se um hidrograma de 2 horas de duração, com intervalos de 5 minutos, valor abaixo dos tempos de retorno considerados para ambos os reservatórios. Em seguida, os reservatórios de detenção foram inseridos no modelo. Os reservatórios possuem uma estrutura de saída de fluxo, com um vertedouro e um orifício de saída, ambos com direção principal. O vertedouro foi calculado para ambos pelo método Broad-Crested, com elevação de 2,5m, comprimento de 5m e coeficiente de $0,3m^{0,5}/s$. A Tabela 2 mostra os parâmetros usados para dimensionar o orifício de saída dos reservatórios.

Tabela 2 – Parâmetros de cálculo do orifício de saída dos reservatórios.

Parâmetro	Reservatório SP	Reservatório CF
Elevação central (m)	0,3	0,5
Diâmetro da tubulação (m)	0,6	0,8
Área (m ²)	0,283	0,503
Coeficiente	0,63	0,63

Fonte: Autor (2021).

Feito isso, verificou-se o extravasamento do reservatório, e como isso influencia na redução do pico de vazão a jusante do reservatório. Além disso, verificam-se outros parâmetros, como o armazenamento e a elevação máxima nos reservatórios e o tempo de detenção. Por fim, analisou-se a redução do pico de vazão em um cenário considerando o funcionamento dos dois reservatórios ao mesmo tempo.

5.5 COMPATIBILIZAÇÃO SOCIO URBANÍSTICA DOS RESERVATÓRIOS DE DETENÇÃO

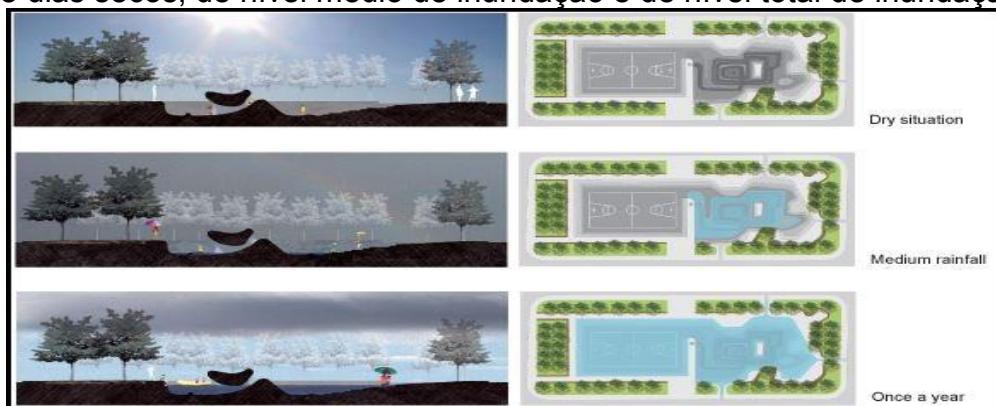
Cada reservatório seria construído em áreas estratégicas no bairro Sítio dos Pintos, onde ocorrem inundações durante eventos extremos de precipitação, segundo a comunidade local. O terreno em que se propõe o reservatório de detenção no riacho Sítio dos Pintos localiza-se próximo a USF Sítio dos Pintos / Dr. Antônio da silva e a associação de moradores de sítio dos pintos. Para o projeto de

revitalização do trecho do riacho, será proposta a construção de uma praça nos arredores do riacho, com uma estrutura própria para lazer que poderia ser utilizada pela população em dias secos. E em dias chuvosos, essa área teria previsão de uso para a retenção de águas pluviais.

A Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA, 2021) é a empresa brasileira responsável pela concessão dos serviços públicos de saneamento básico no Estado de Pernambuco. Através do Programa Cidade Saneada, firmou a Parceria Público-Privada (PPP) para serviços de esgotamento sanitário da Região Metropolitana do Recife. Quando questionada sobre a coleta de esgoto nos riachos Sítio dos Pintos e Córrego da Fortuna, informou que ambos os corpos hídricos estão localizados na região denominada pelo Programa Cidade Saneada como SES Camaragibe, que conta com alguns sub-sistemas de esgoto em regiões próximas a estes riachos e tem previsão de implantação total para o ano de 2029. A nota técnica enviada pela COMPESA pode ser vista no Anexo I. No momento em que isso ocorrer, poderiam ser construídas estruturas que possibilitem o contato primário da comunidade com a água do riacho.

Pode ser visto na Figura 12 um exemplo de projeto de reservatório de detenção construído com uma praça, implementado pela empresa holandesa De Urbanisten (2010). O reservatório em questão foi projetado para a cidade de Roterdã, localizada na Holanda, onde pode-se observar o comportamento do conjunto diante de diferentes intensidades de chuva, que seriam dias secos, dias com baixa precipitação (com nível médio de inundação) e dias de eventos extremos de precipitação (com nível total de inundação).

Figura 12 – Water Square projetada em Roterdã, Holanda, com praça em situação de dias secos, de nível médio de inundação e de nível total de inundação.



Fonte: De Urbanisten (2010).

Para o projeto de revitalização do trecho do Córrego da Fortuna estudado, propõe-se a construção de um reservatório de amortecimento de cheias em um campo de futebol no bairro Sítio dos Pintos, conhecido como Campo da Boa Esperança, localizado entre a Rua Alto da Boa Esperança e a USF Córrego da Fortuna. Assim, o local poderia ser restaurado, e poderia ser usado para o lazer da comunidade em dias secos.

Como exemplo, pode ser visto na Figura 13 uma maquete virtual do projeto da construção de um reservatório de detenção na Praça Celso Luft, em Porto Alegre, proposto pelo Plano Diretor de Drenagem Urbana de Porto Alegre (PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE, 2009). Nela, podem-se ver imagens em perspectiva do projeto da quadra, com vistas mostrando a escada de acesso à quadra e da vegetação que será usada para melhorar o paisagismo do local. Além disso, também está indicado o processo construtivo do reservatório em questão.

Figura 13 – Construção de reservatório de detenção na Praça Celso Luft, em Porto Alegre, com vistas em perspectiva do projeto e da construção do reservatório.



Fonte: Prefeitura Municipal De Porto Alegre (2009).

A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2013), por meio do Programa Soluções para Cidades, apresenta algumas especificações técnicas

recomendadas na instalação de um reservatório de detenção. A princípio, o fundo do reservatório seria permeável, contribuindo para a infiltração da água no solo. Por influenciar no desempenho do reservatório, o nível máximo do lençol freático deve estar a no máximo 1 metro do fundo deste. Quando a diferença entre o nível do lençol freático e o fundo do reservatório for menor que 1 metro, alguns autores recomendam a impermeabilização do fundo do reservatório.

Outros fatores a serem observados, que podem restringir a instalação de um reservatório, são: a disponibilidade da área de implantação, a presença de instalações de rede de abastecimento, esgoto, eletricidade, entre outros, a declividade do terreno, a incidência de sedimentos e resíduos sólidos no local, a densidade populacional do local, bem como a intensidade do tráfego nas vias próximas.

Além disso, é importante observar o risco de contaminação do aquífero. Se este for o caso, recomenda-se a instalação de fundo impermeabilizado, devido ao risco de infiltração de águas contaminadas de esgotos e poluentes de origem difusa no aquífero. É necessário, também, que haja uma rede de drenagem local para a descarga do volume regularizado de água. Caso a água esteja com altas concentrações de poluentes, recomenda-se que seja encaminhada diretamente para uma estação de tratamento, reduzindo o impacto sobre o corpo hídrico receptor.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente estudo avaliou se as alternativas de controle de cheias no Riacho Sítio dos Pintos e no Córrego da Fortuna são viáveis, levando em consideração a sustentabilidade das técnicas escolhidas e a diminuição de utilização dos recursos hídricos. Com os dados hidrológicos obtidos pelo modelo digital do terreno da bacia, foi possível construir o modelo do canal por meio do HEC-HMS.

Simulações foram realizadas, a fim de analisar a possível aplicação de uma técnica compensatória em um trecho do riacho Sítio dos Pintos e do Córrego da Fortuna, gerando dados que poderão auxiliar no gerenciamento de recursos hídricos na Região Metropolitana de Recife. Além disso, analisou-se um cenário onde os dois reservatórios funcionariam ao mesmo tempo, verificando a redução no pico de vazão.

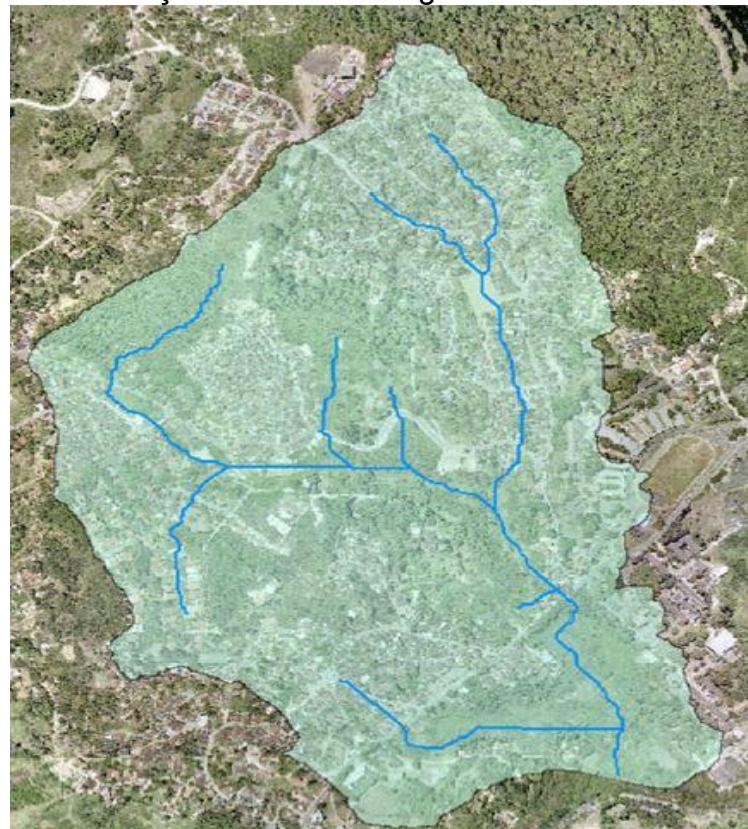
Por fim, foi proposta uma alternativa de revitalização dos corpos hídricos estudados, com a concepção de um projeto de uma praça como área de lazer, a restauração de um campo de futebol, a fim de melhorar a qualidade de vida da comunidade local, preservando o ecossistema do corpo d'água.

6.1 CONDIÇÕES HIDRÁULICAS DAS SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS

Com o processamento dos dados de entrada realizado através do software QGIS, delimitou-se a área da bacia hidrográfica do riacho Sítio dos Pintos, e obtiveram-se os dados de sua caracterização hidrológica. Como pode-se observar na Figura 14, os limites da bacia hidrográfica não coincidem com os limites do bairro Sítio dos Pintos, que por conseguinte não coincidem com os limites da UCN Sítio dos Pintos. Além disso, podem ser vistos os trechos do riacho Sítio dos Pintos.

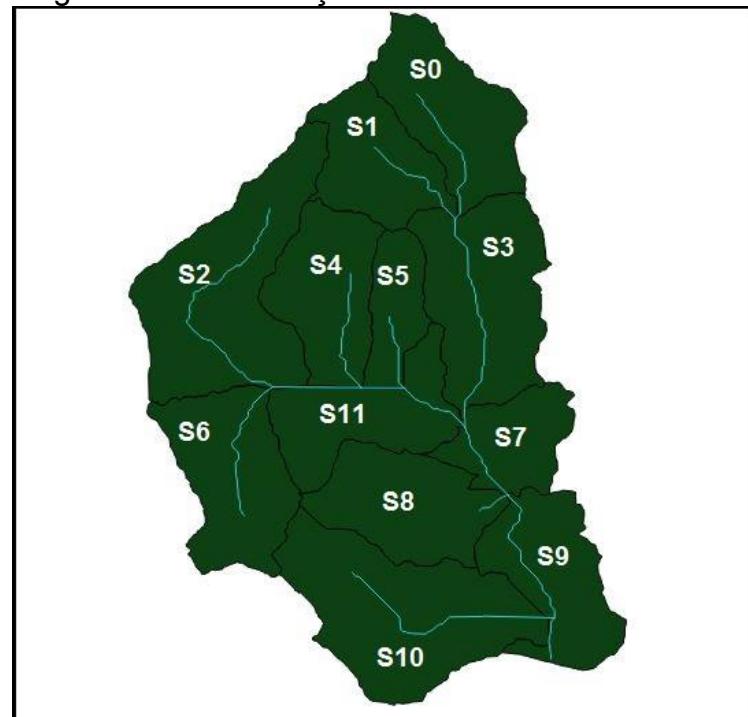
Com os dados obtidos, foi possível analisar a topografia da região, identificando os divisores de água, e consequentemente delimitando as sub-bacias de cada trecho do riacho. Pode ser visto na Figura 15 a divisão das sub-bacias de cada trecho, com as respectivas nomenclaturas, dividindo-se a bacia em 12 sub-bacias. Aferiu-se que o relevo da bacia hidrográfica é muito acidentado, com uma diferença considerável entre o ponto mais alto e o ponto mais baixo do riacho.

Figura 14 – Delimitação da bacia hidrográfica do riacho Sítio dos Pintos.



Fonte: Autor (2021).

Figura 15 – Delimitação das sub-bacias do riacho.



Fonte: Autor (2021).

A Tabela 3 mostra os dados relevantes da bacia hidrográfica obtidos pelo processamento do Modelo Digital do Terreno (MDT), detalhados para cada sub-bacia considerada. Os dados obtidos foram da área de contribuição das sub-bacias, o comprimento de cada trecho que compõe a malha hidrográfica do riacho, as cotas das nascentes dos cursos d'água, com os pontos mais alto e mais baixo de cada trecho e sua declividade.

Tabela 3 – Dados das sub-bacias do riacho.

Sub-Bacia	Área de Contribuição (km ²)	Comprimento do Trecho (m)	Cota ponto mais alto (m)	Cota ponto mais baixo (m)	Δh (m)	Declividade (m/m)
0	0,084	338,9	26,35	8,34	18,01	0,053
1	0,066	270,4	14,14	8,34	5,80	0,021
2	0,143	627,8	21,35	5,51	15,84	0,025
3	0,109	521,1	8,34	4,30	4,05	0,008
4	0,075	288,7	9,58	4,69	4,89	0,017
5	0,037	172,9	7,23	5,03	2,19	0,013
6	0,090	346,9	21,25	5,51	15,73	0,045
7	0,051	188,8	4,30	3,80	0,50	0,003
8	0,081	78,6	4,00	3,80	0,20	0,003
9	0,079	443,7	3,80	1,63	2,17	0,005
10	0,139	539,1	9,84	2,27	7,57	0,014
11	0,074	469,0	5,51	4,30	1,22	0,003

Fonte: Autor (2021).

O trecho com a maior área de contribuição e com o maior comprimento foi o trecho da sub-bacia 2, com área de 0,143 km² e comprimento de 627,8 m. O ponto mais alto do riacho situa-se no início do Córrego da Fortuna, na sub-bacia 0, com cota de 26,35 m. O ponto mais baixo situa-se na foz do riacho Sítio dos Pintos no rio Camaragibe, na sub-bacia 9, com cota de 1,63m. O trecho com maior declividade localiza-se na sub-bacia 0, com declividade de aproximadamente 0,053 m/m, e o trecho com menor declividade localiza-se na sub-bacia 8, com declividade de aproximadamente 0,003 m/m.

6.2 RESERVATÓRIO USF SÍTIO DOS PINTOS

Com as dimensões aproximadas do reservatório USF Sítio dos Pintos, suas cotas e comprimentos, estimou-se a área do terreno. Consequentemente, estimou-

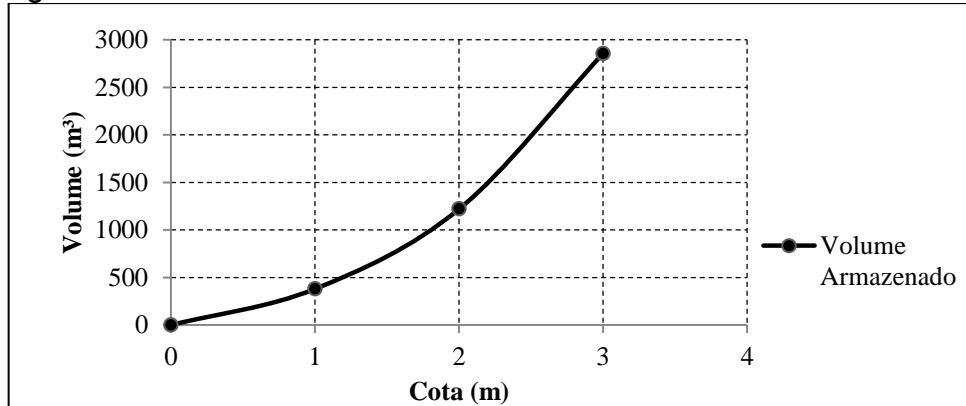
se seu volume de armazenamento. Esses dados podem ser vistos na Tabela 4. Com isso, foi possível calcular a curva Cota-Volume (Figura 16), responsável por mostrar a variação e capacidade máxima de armazenamento de água no reservatório. A variação do volume armazenado no reservatório foi avaliada de acordo com a lâmina d'água armazenada e sua capacidade máxima foi estimada como 2856 m³.

Tabela 4 – Dados de cota, área e volume do reservatório.

Cota (m)	Área (m ²)	Vol. Acum. (m ³)
0	230	0
1	530	380
2	1150	1220
3	2122	2856

Fonte: Autor (2021).

Figura 16 – Curva Cota-Volume do reservatório USF Sítio dos Pintos.



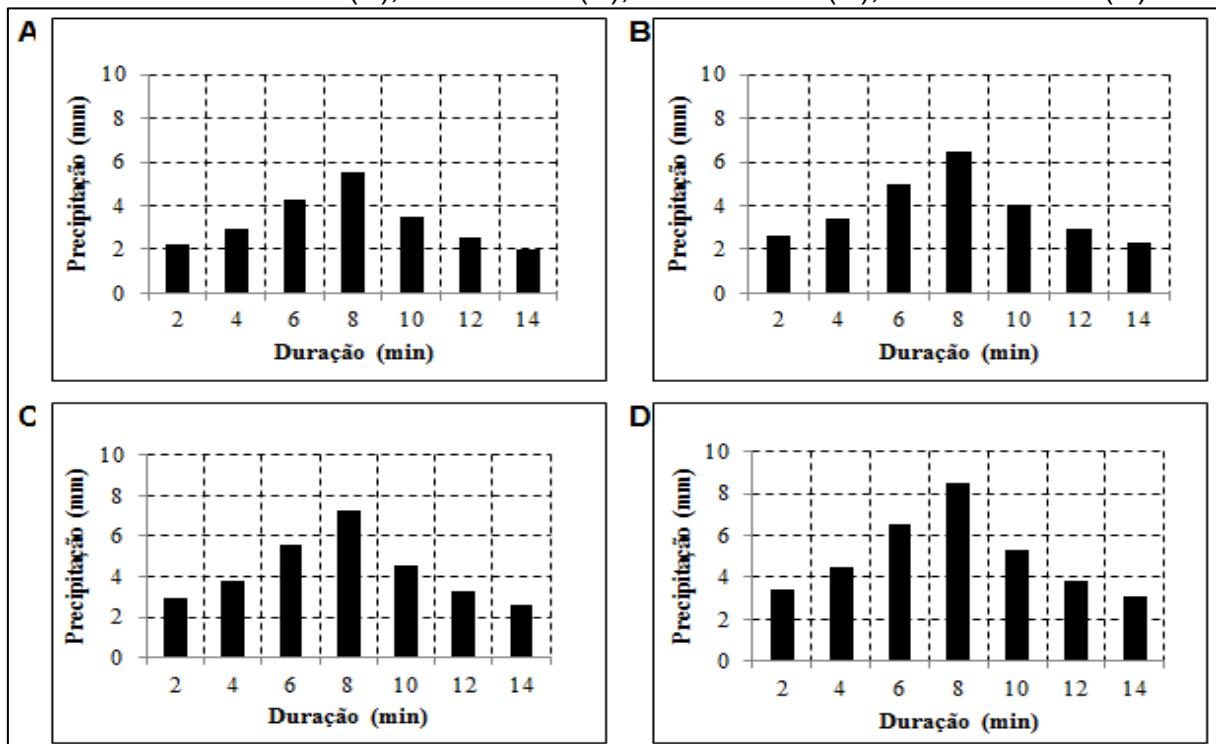
Fonte: Autor (2021).

Aferiu-se o tempo de concentração da bacia como um todo, considerando o trecho mais longo da bacia, que seria a soma dos trechos das sub-bacias 2, 11, 7 e 9. Calculado pelo método de Carter, o tempo de concentração encontrado foi de 38,65 minutos. Porém, considerando a posição proposta para a construção do reservatório de detenção, calculou-se o tempo de concentração apenas do trecho a montante do reservatório, que seria o trecho correspondente a sub-bacia 2. O valor encontrado foi de 13,37 minutos.

Com essas informações, foi possível obter os dados de precipitação, especificados pelos hietogramas. Pode ser visto na Figura 17 os hietogramas estimados pelo método dos blocos alternados para os tempos de retorno de 2 anos, 5 anos, 10 anos e 25 anos. As precipitações acumuladas no último intervalo de

tempo considerado para cada um dos valores de tempo de retorno considerados são, respectivamente, 22,97mm, 26,77mm, 30,06mm e 35,04mm, para chuvas de duração de cerca de 14 minutos.

Figura 17 – Hietogramas estimados para os tempos de retorno considerados no estudo: $Tr = 2$ anos (A); $Tr = 5$ anos (B); $Tr = 10$ anos (C); e $Tr = 25$ anos (D).

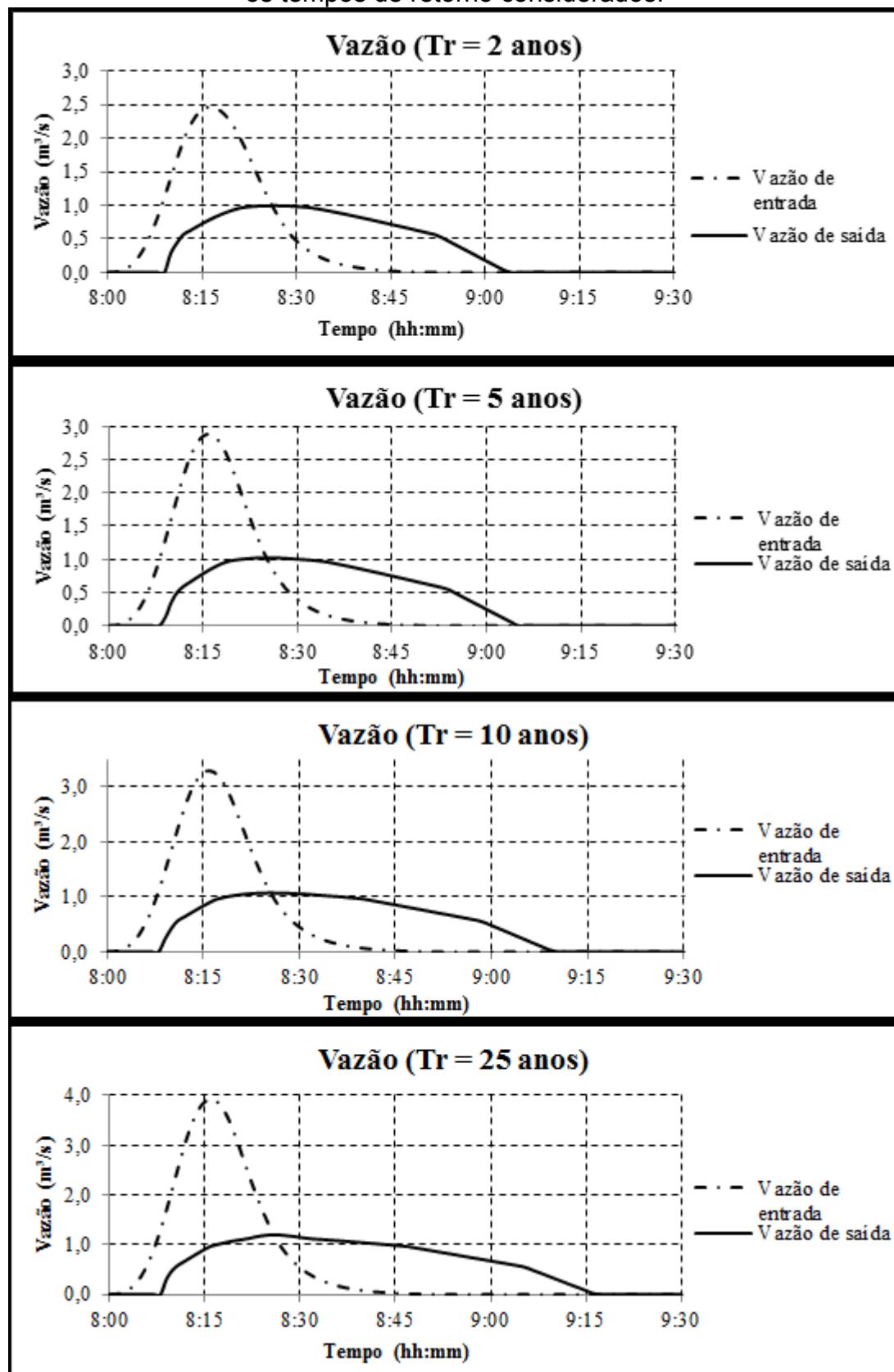


Fonte: Autor (2021).

Com os hietogramas e a curva Cota-Volume estimados, e demais informações, foi possível inserir as informações necessárias no modelo, a fim de executá-lo pelo software HEC-HMS. Com a simulação computacional feita, é possível obter dados da vazão de entrada e saída do reservatório. Assim, os resultados podem ser analisados e discutidos, com a elaboração dos hidrogramas para cada um dos tempos de concentração.

Considerando um evento de chuva de 1h30min de duração, a Figura 18 mostra os hidrogramas que comparam os valores da vazão de entrada e de saída do reservatório proposto. Em todos os eventos de chuva considerados, é evidente que o pico da vazão de entrada sofre grande redução, devido à capacidade de armazenamento do reservatório. Isso indica que a implantação do reservatório de detenção é viável em termos hidráulicos.

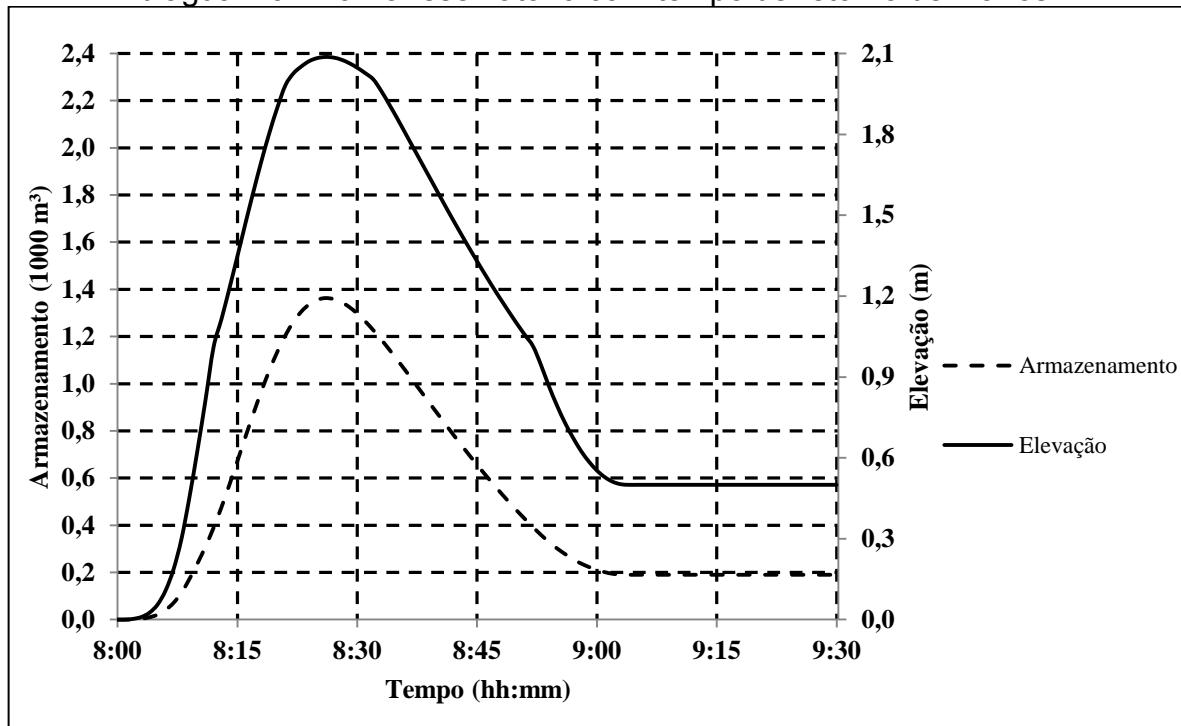
Figura 18 – Hidrogramas de vazão de entrada e saída do reservatório proposto para os tempos de retorno considerados.



Fonte: Autor (2021).

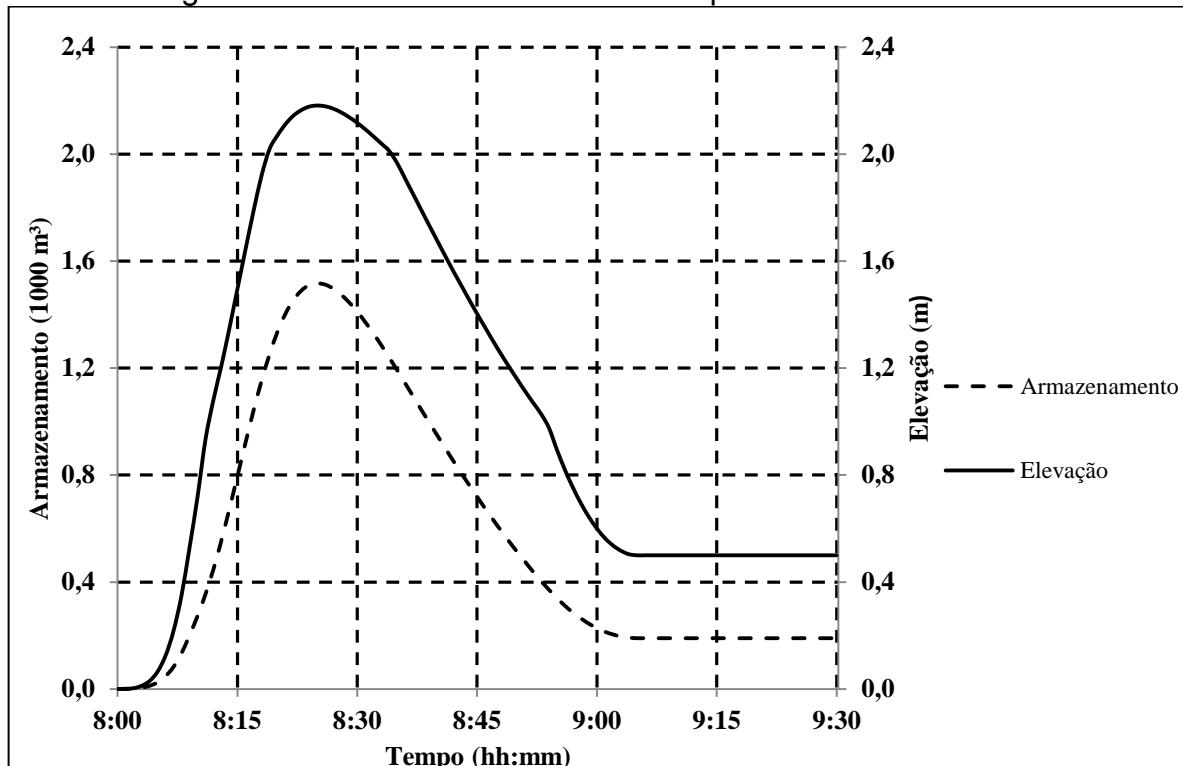
Além disso, outros parâmetros resultantes da modelagem computacional são o armazenamento máximo e a elevação do nível d'água máxima no reservatório para cada evento de chuva considerado. As Figuras 19, 20, 21 e 22 mostram os gráficos elaborados com esses parâmetros, para cada tempo de retorno considerado, indicando que em certo ponto do evento de chuva, ambos ficam constantes.

Figura 19 – Gráficos com dados de armazenamento máximo e elevação do nível d'água máxima no reservatório com tempo de retorno de 2 anos.



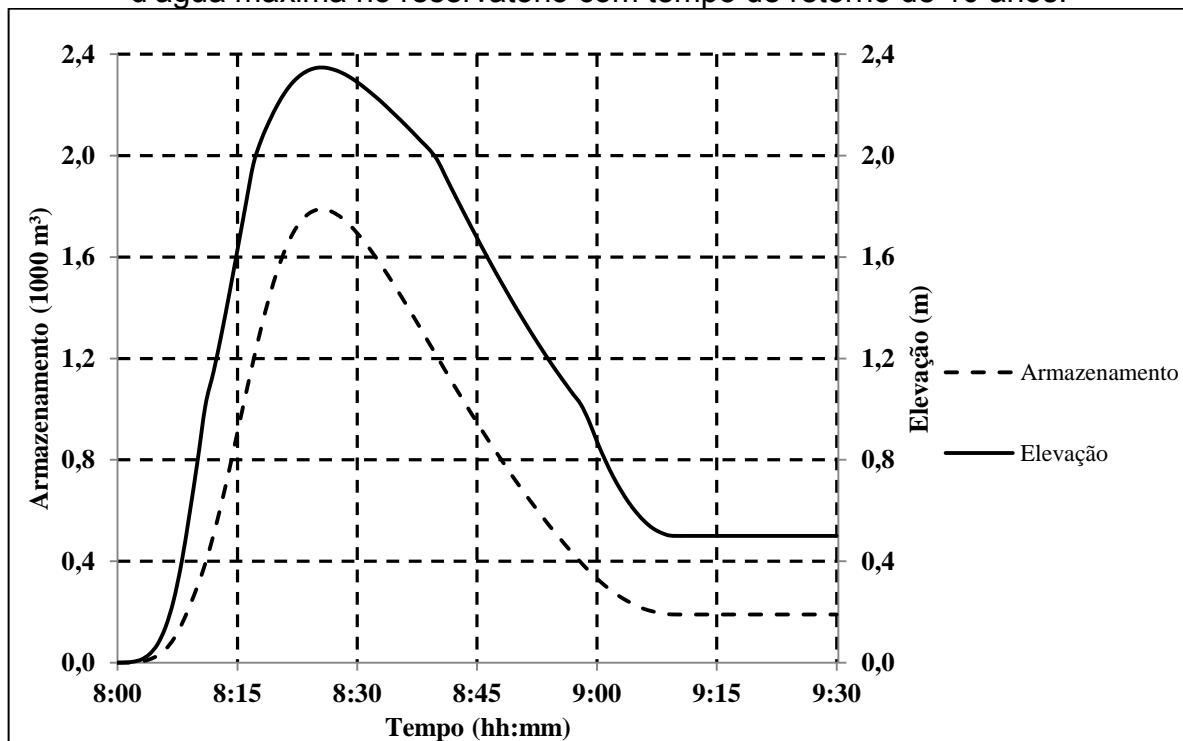
Fonte: Autor (2021).

Figura 20 – Gráficos com dados de armazenamento máximo e elevação do nível d'água máxima no reservatório com tempo de retorno de 5 anos.



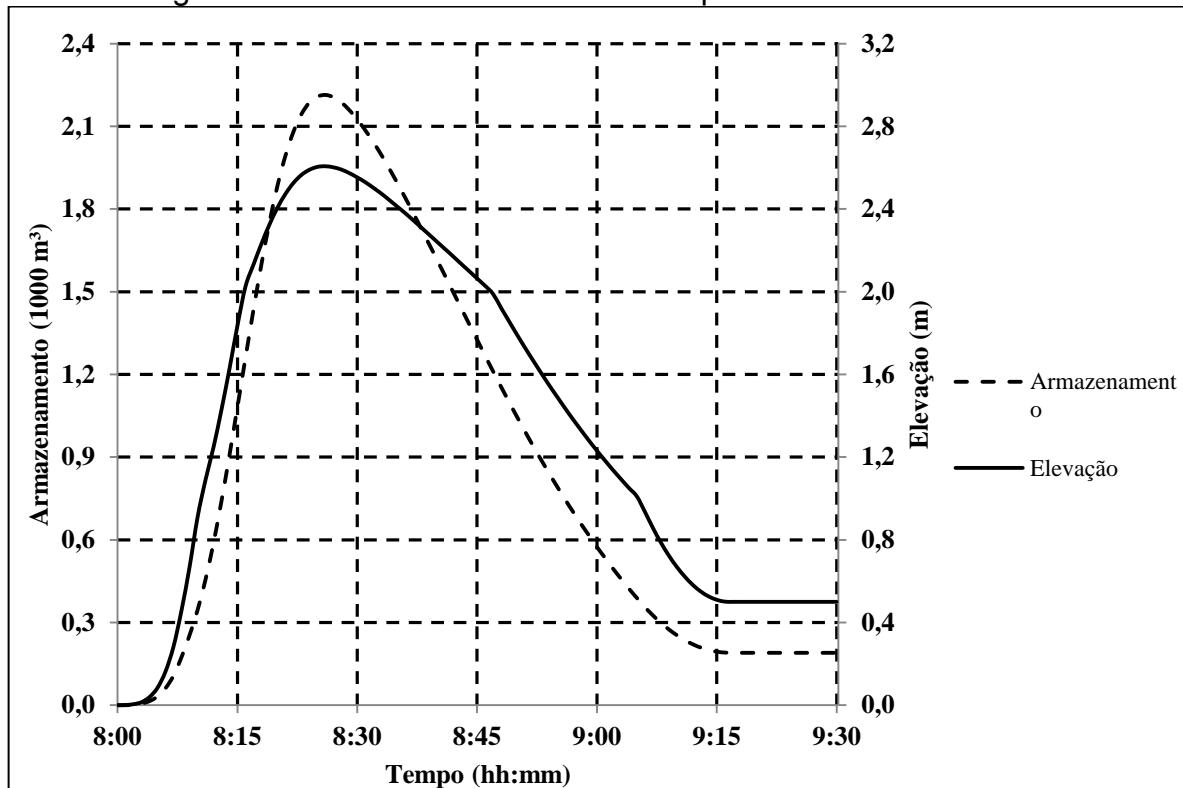
Fonte: Autor (2021).

Figura 21 – Gráficos com dados de armazenamento máximo e elevação do nível d'água máxima no reservatório com tempo de retorno de 10 anos.



Fonte: Autor (2021).

Figura 22 – Gráficos com dados de armazenamento máximo e elevação do nível d’água máxima no reservatório com tempo de retorno de 25 anos.



Fonte: Autor (2021).

Com os hidrogramas de vazão, e demais parâmetros resultantes da simulação computacional, pôde-se fazer outras análises. Pode ser visto na Tabela 5, para cada tempo de retorno considerado, a porcentagem de redução do pico de vazão no reservatório proposto, o volume máximo de água armazenado, a cota de elevação máxima do nível d’água no reservatório e o tempo de detenção da água.

Tabela 5 – Demais parâmetros resultantes da simulação hidrológica.

Tempo de Retorno (anos)	Redução do Pico de Vazão	Armazenamento Máximo (m ³)	Elevação Máxima (m)	Tempo de Detenção (min)
2	59,59%	1.363	2,09	61
5	64,51%	1.517	2,18	62
10	67,42%	1.788	2,35	67
25	69,46%	2.214	2,61	74

Fonte: Autor (2021).

Pode-se observar que quanto maior o tempo de retorno do evento de chuva, maior será a redução do pico de vazão. O armazenamento máximo no reservatório

não ultrapassa a capacidade máxima de armazenamento do reservatório. Além disso, considerando o evento de chuva mais extremo com um tempo de retorno de 25 anos, a elevação máxima de água no reservatório não atingiria a cota máxima de 3 metros considerada para o mesmo, evidenciando a segurança dos resultados obtidos, validando a problemática do estudo.

Para o projeto do reservatório com área de lazer nos dias secos, o ideal seria que a água armazenada atendesse aos padrões mínimos de potabilidade, para que a recreação de contato primário entre a população e o corpo hídrico fosse possível. Porém, considerando a quantidade de esgoto que é despejada no riacho Sítio dos Pintos, a qualidade da água do riacho não torna viável o seu contato direto com a população, tornando impraticáveis atividades como mergulho.

O mais indicado seria implantar estruturas em que a comunidade fique restrita apenas ao contato secundário, em que o contato com a água seja esporádico ou acidental, e a possibilidade de ingerir água seja pequena, conforme a resolução CONAMA nº 274, de 29 de novembro de 2000, que estabelece os padrões de balneabilidade dos corpos d'água (CONAMA, 2000) e a resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005, que dispõe sobre diretrizes ambientais para o enquadramento de corpos d'água, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes (CONAMA, 2005).

A quantidade de águas pluviais retidas pelo reservatório seria diferente, a depender do período de retorno da precipitação. A praça pode ser ocupada total ou parcialmente pelas águas de chuvas, modificando os possíveis usos das estruturas pela comunidade. Como a praça estaria seca a maior parte do ano, pode-se prever no projeto duas partes principais: uma área para prática de esportes, com a construção de uma quadra poliesportiva, e uma área destinada para recreação, com bancos para contemplação, brinquedos para crianças e equipamentos para exercícios.

Como mostra o esboço do projeto na Figura 23, o trecho do riacho Sítio dos Pintos poderia correr pelo canto da praça. No espaço em seu entorno, seriam construídos espaços para caminhada de pedestres e faixas de ciclovias. Também seriam plantadas árvores, grama e outras vegetações, trazendo um ar mais sustentável para o paisagismo urbano do local. Seria uma combinação entre o armazenamento de águas pluviais e a melhoria do espaço público urbano no bairro.

Sítio dos Pintos, criando qualidade ambiental em um espaço central para a comunidade. Além disso, propõe-se uma porta da Associação de Moradores do Sítio dos Pintos para a praça, proporcionando aos moradores locais um acesso à área de lazer.

Figura 23 – Esboço da área de lazer proposta. Praça em situação de dias secos (a). Praça em situação de nível médio de inundaçao (b). Praça em situação de nível total de inundaçao (c).



Fonte: Autor (2021).

Com relação ao armazenamento de água pelo reservatório, as estruturas de lazer poderiam ser utilizadas pela população em dias secos. Em dias de baixa precipitação, a água de chuva coletada flui de forma visível a uma parte da praça destinada para seu armazenamento, ainda sendo possível o uso de algumas estruturas de lazer pela população. Na medida em que o nível d'água aumenta, uma maior parte da praça é preenchida, sendo o projeto feito com declives fluentes.

Em dias de eventos extremos de precipitação, toda a área da praça é utilizada para o seu armazenamento. Portanto, as estruturas de lazer ficariam temporariamente sem serem utilizadas, até o momento em que o sistema de drenagem de águas pluviais da cidade voltar a capacidade de escoamento normal.

Por fim, é fundamental que a manutenção da área da praça seja recorrente, mantendo o local limpo.

6.3 RESERVATÓRIO USF CÓRREGO DA FORTUNA

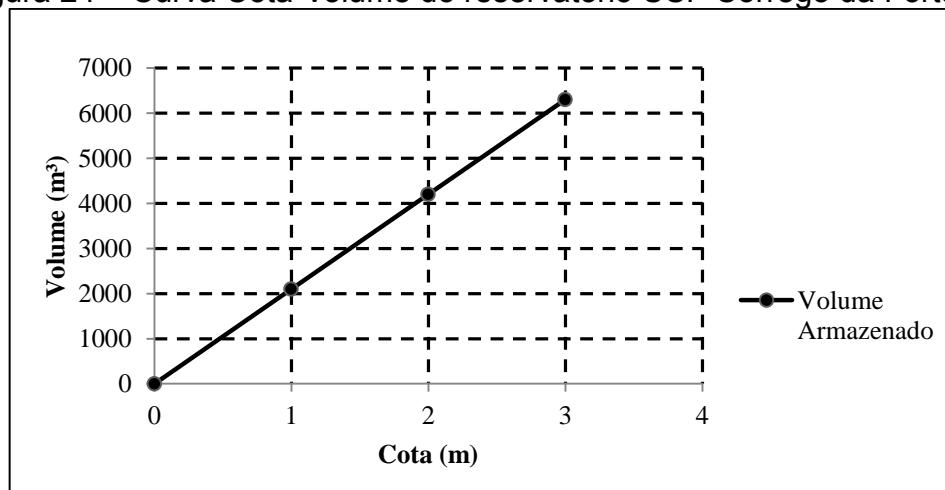
Com as dimensões aproximadas do reservatório USF Córrego da Fortuna, suas cotas e comprimentos, estimou-se a área do terreno. Consequentemente, estimou-se seu volume de armazenamento. Esses dados podem ser vistos na Tabela 6. Com isso, foi possível calcular a curva Cota-Volume (Figura 24), responsável por mostrar a variação e capacidade máxima de armazenamento de água no reservatório. A variação do volume armazenado no reservatório foi avaliada de acordo com a lámina d'água armazenada e sua capacidade máxima foi estimada como 6300 m³.

Tabela 6 – Dados de cota, área e volume do reservatório.

Cota (m)	Área (m ²)	Vol. Acum. (m ³)
0	2100	0
1	2100	2100
2	2100	4200
3	2100	6300

Fonte: Autor (2021).

Figura 24 – Curva Cota-Volume do reservatório USF Córrego da Fortuna.



Fonte: Autor (2021).

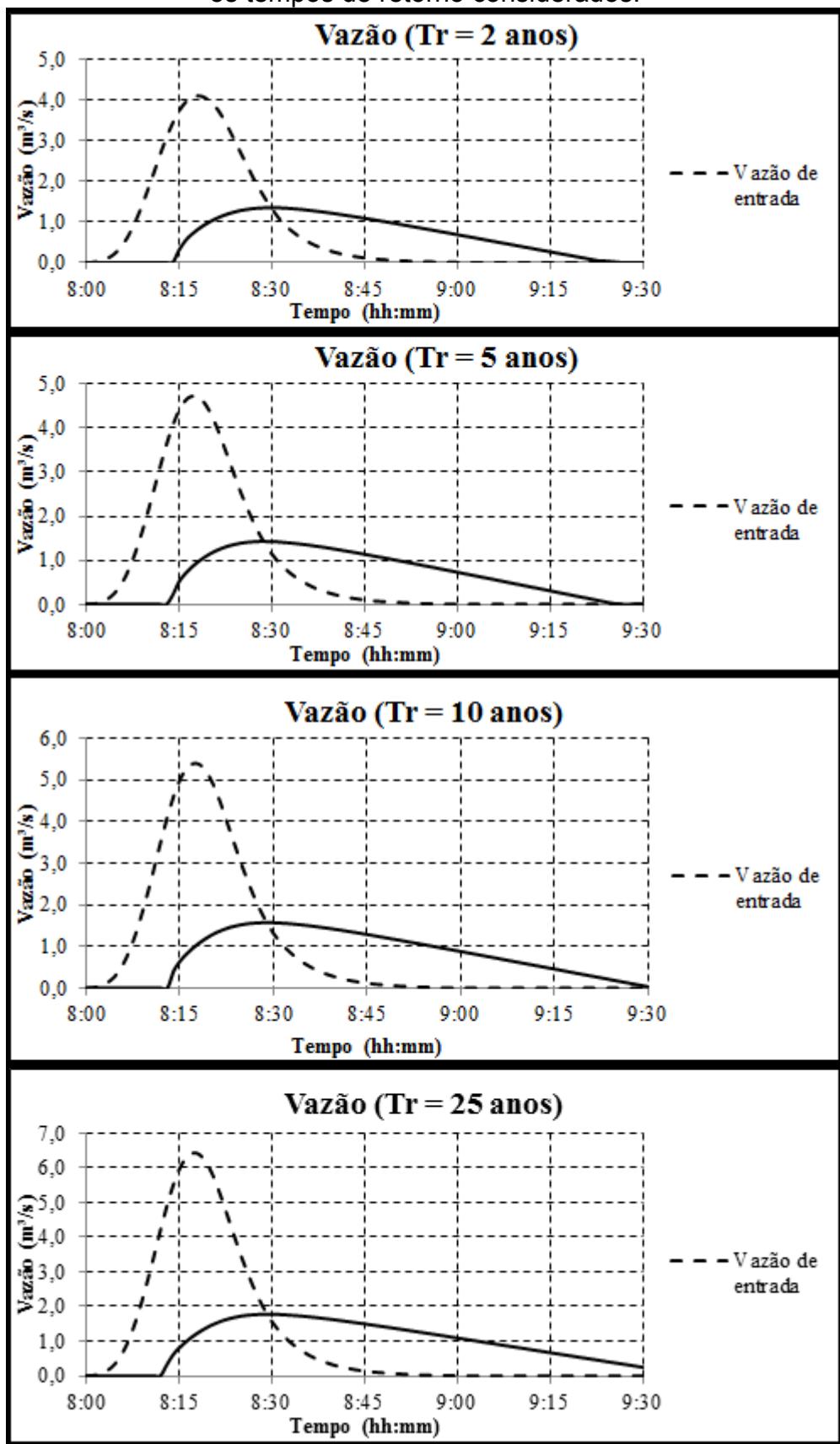
Considerando a posição proposta para a construção do reservatório de detenção, calculou-se o tempo de concentração apenas do trecho a montante do reservatório, que seria o trecho correspondente as sub-bacias 0 e 3. O valor encontrado foi de 16,07 minutos. Com essas informações, foi possível obter os dados de precipitação, especificados pelos hietogramas. Como a estimativa dos hietogramas dependem apenas dos valores de tempo de concentração e duração da chuva, são utilizados para a simulação os mesmos hietogramas para os dois reservatórios.

Com os hietogramas e a curva Cota-Volume estimados, e demais informações, foi possível inserir as informações necessárias no modelo, a fim de executá-lo pelo software HEC-HMS. Com a simulação computacional feita, é possível obter dados da vazão de entrada e saída do reservatório, de forma semelhante à simulação anterior. Assim, os resultados podem ser analisados e discutidos para este reservatório, com a elaboração dos hidrogramas para cada um dos tempos de concentração.

Considerando um evento de chuva de 1h30min de duração, a Figura 25 mostra os hidrogramas que comparam os valores da vazão de entrada e de saída do reservatório proposto. Em todos os eventos de chuva considerados, novamente é evidente que o pico da vazão de entrada sofre grande redução, devido à capacidade de armazenamento do reservatório. Isso indica que a implantação do reservatório de detenção USF Córrego da Fortuna também é viável em termos hidráulicos.

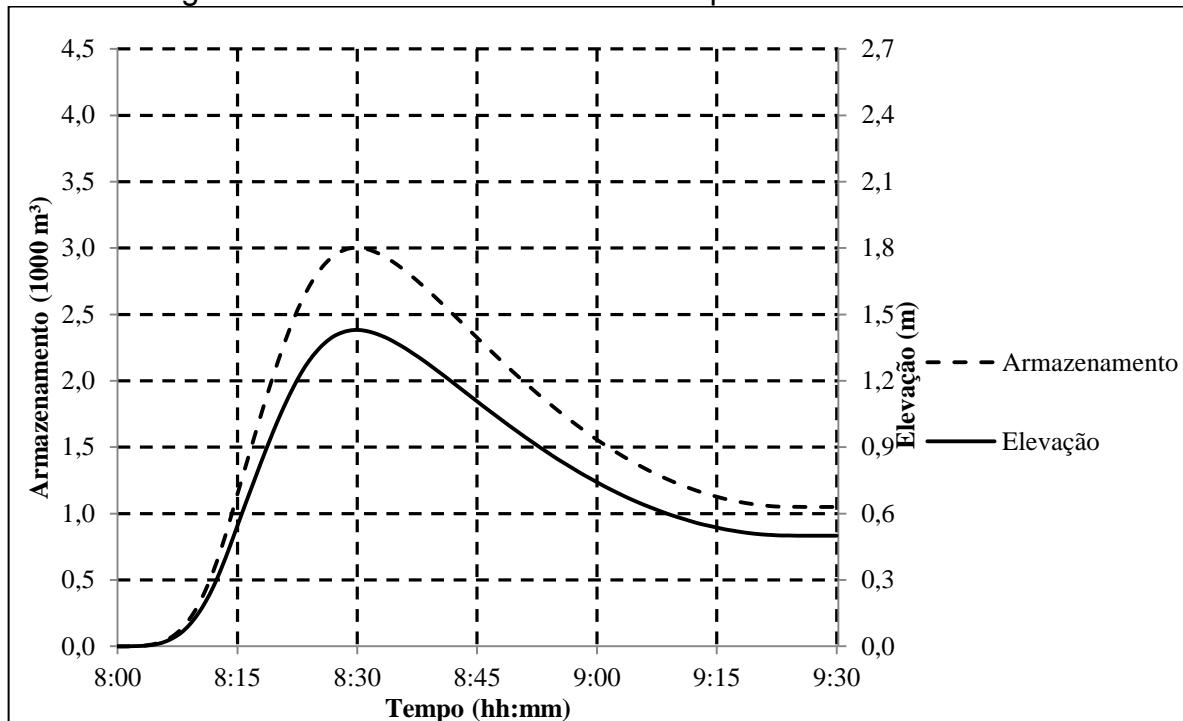
Além disso, outros parâmetros resultantes da modelagem computacional são o armazenamento máximo e a elevação do nível d'água máxima no reservatório para cada evento de chuva considerado. As Figuras 26, 27, 28 e 29 mostram os gráficos elaborados com esses parâmetros, para cada tempo de retorno considerado, indicando que em certo ponto do evento de chuva, ambos ficam constantes.

Figura 25 – Hidrogramas de vazão de entrada e saída do reservatório proposto para os tempos de retorno considerados.



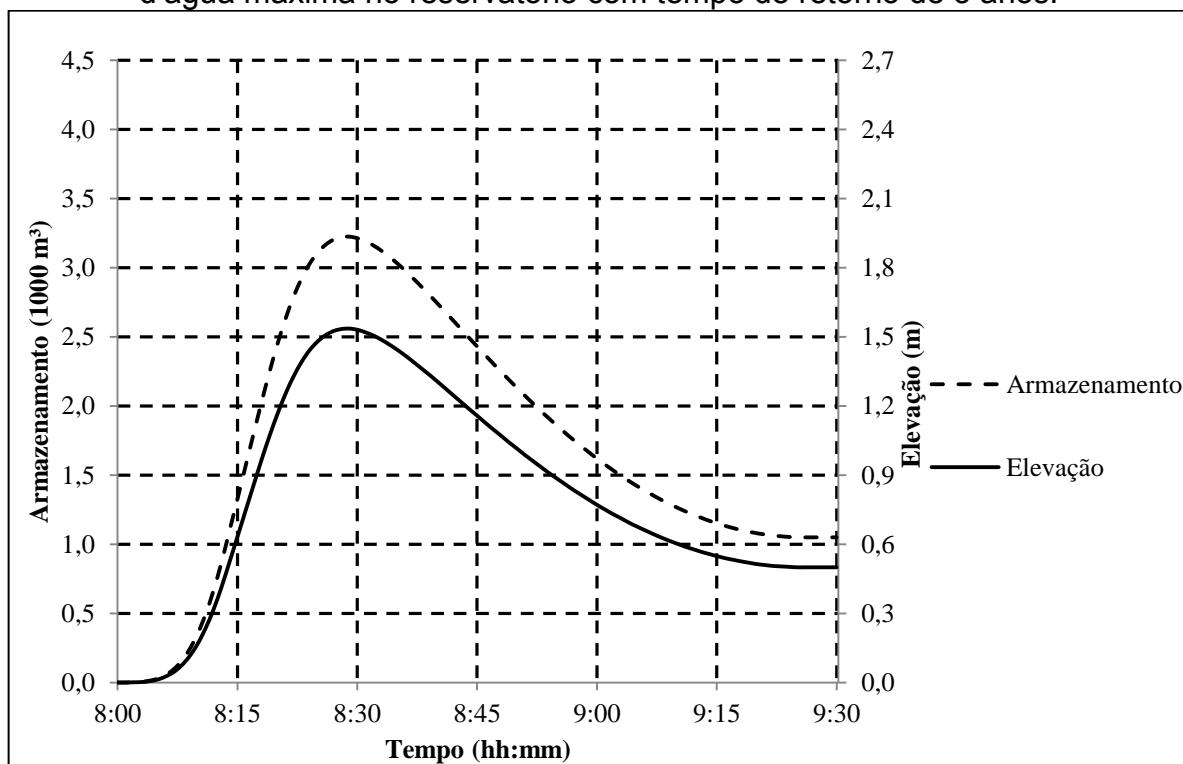
Fonte: Autor (2021).

Figura 26 – Gráficos com dados de armazenamento máximo e elevação do nível d’água máxima no reservatório com tempo de retorno de 2 anos.



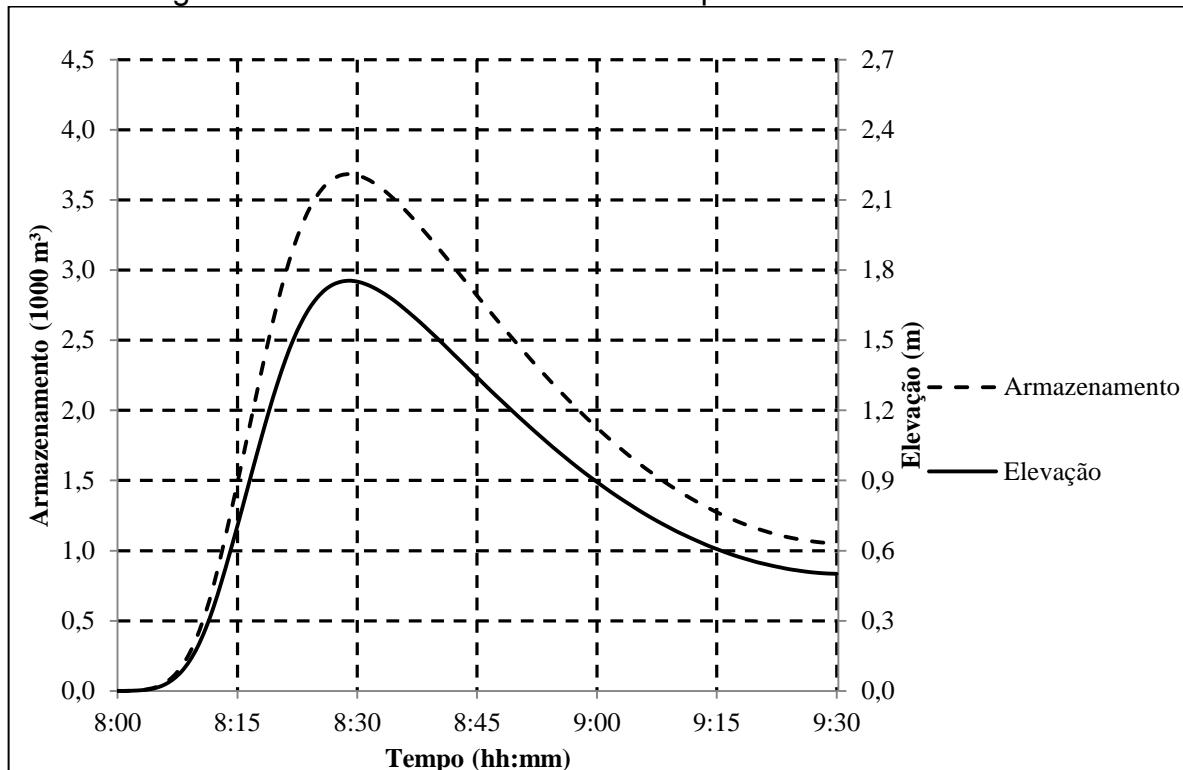
Fonte: Autor (2021).

Figura 27 – Gráficos com dados de armazenamento máximo e elevação do nível d’água máxima no reservatório com tempo de retorno de 5 anos.



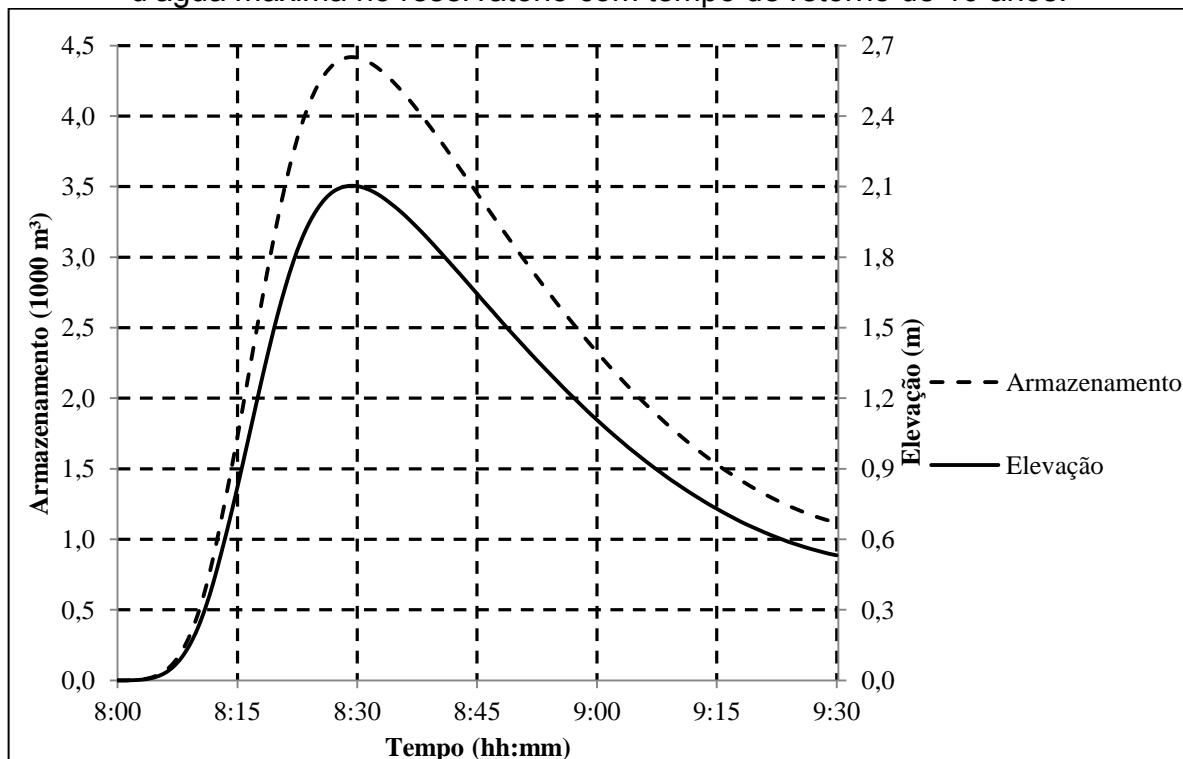
Fonte: Autor (2021).

Figura 28 – Gráficos com dados de armazenamento máximo e elevação do nível d'água máxima no reservatório com tempo de retorno de 10 anos.



Fonte: Autor (2021).

Figura 29 – Gráficos com dados de armazenamento máximo e elevação do nível d'água máxima no reservatório com tempo de retorno de 10 anos.



Fonte: Autor (2021).

Com os hidrogramas de vazão, e demais parâmetros resultantes da simulação computacional, pôde-se fazer outras análises. Pode ser visto na Tabela 7, para cada tempo de retorno considerado, a porcentagem de redução do pico de vazão no reservatório proposto, o volume máximo de água armazenado, a cota de elevação máxima do nível d'água no reservatório e o tempo de detenção da água.

Tabela 7 – Demais parâmetros resultantes da simulação hidrológica.

Tempo de Retorno (anos)	Redução do Pico de Vazão	Armazenamento Máximo (m ³)	Elevação Máxima (m)	Tempo de Detenção (min)
2	67,07%	3.003	1,43	83
5	69,75%	3.225	1,54	83
10	70,79%	3,685	1,76	88
25	72,30%	4,417	2,10	96

Fonte: Autor (2021).

Pode-se observar que quanto maior o tempo de retorno do evento de chuva, maior será a redução do pico de vazão. O armazenamento máximo no reservatório não ultrapassa a capacidade máxima de armazenamento do reservatório. Os resultados do tempo de detenção para o tempo de retorno de 25 anos foi o único que demorou mais que a duração da chuva de 1h30 considerada. Além disso, considerando o evento de chuva mais extremo com um tempo de retorno de 25 anos, a elevação máxima de água no reservatório não atingiria a cota máxima de 3 metros considerada para o mesmo, evidenciando a segurança dos resultados obtidos, validando a problemática do estudo.

A construção de um reservatório de detenção é proposta em uma área aberta usada para lazer esportivo no bairro Sítio dos Pintos. Como opções de lazer para a comunidade local, propõe-se a construção de um campo de futebol amplo e revitalizado, ou duas quadras poliesportivas, rodeadas por ciclo faixas e vias de pedestre. Também almeja-se implantar um gramado e vegetação, a fim de melhorar o paisagismo do local.

O local especificado possui dimensões de 40 m x 80 m. Logo, propõe-se um reservatório de detenção de cheias aberto, com 70 m de comprimento por 30 m de largura e 1,5 m de altura. Com essas dimensões, o reservatório proposto é capaz de deter cerca de 3 milhões de litros de água (ou 3 mil metros cúbicos) em dias de

precipitação, contribuindo para minimizar os problemas causados pelas inundações na região.

Adota-se os reservatórios de detenção abertos em regiões com áreas disponíveis e poucos recursos financeiros. Nesse caso, a proposta seria de construir-se uma arquibancada ao redor da quadra, que serviria como as paredes laterais do reservatório. Caso as águas pluviais estejam muito poluídas, recomenda-se instalar um reservatório fechado com dimensões menores para armazenar as águas que carregam a maior parte dos dejetos. Assim, o trecho do riacho seria desviado para o reservatório menor, que encaminha as águas poluídas para uma estação de tratamento. Quando o volume armazenado exceder o limite, ele é extravasado para o reservatório de detenção, que é esvaziado de forma lenta pelo descarregador de fundo. Se o volume de água precipitado também exceder a capacidade de armazenamento do reservatório, as águas serão expelidas pelo vertedouro (ABCP, 2013).

Com relação ao material utilizado, o reservatório seria construído em concreto armado. Assim, o volume de água que causaria inundações é armazenado lentamente e encaminhado para a rede de drenagem local, conforme a sua capacidade de armazenamento for atingindo o limite.

6.4 ANÁLISE COM OS DOIS RESERVATÓRIOS

Em uma última simulação hidrológica, analisou-se a redução do pico de vazão em um cenário considerando o funcionamento dos dois reservatórios simultaneamente. Como pode ser visto na Tabela 8, que mostra os resultados dessa análise, há uma considerável redução no pico de vazão, considerando a construção dos dois reservatórios de detenção. Pode-se observar que, mais uma vez, quanto maior o tempo de retorno, maior será a redução do pico de vazão, com a redução máxima de 71,22% ocorrendo no evento de chuva mais extremo, com tempo de retorno de 25 anos.

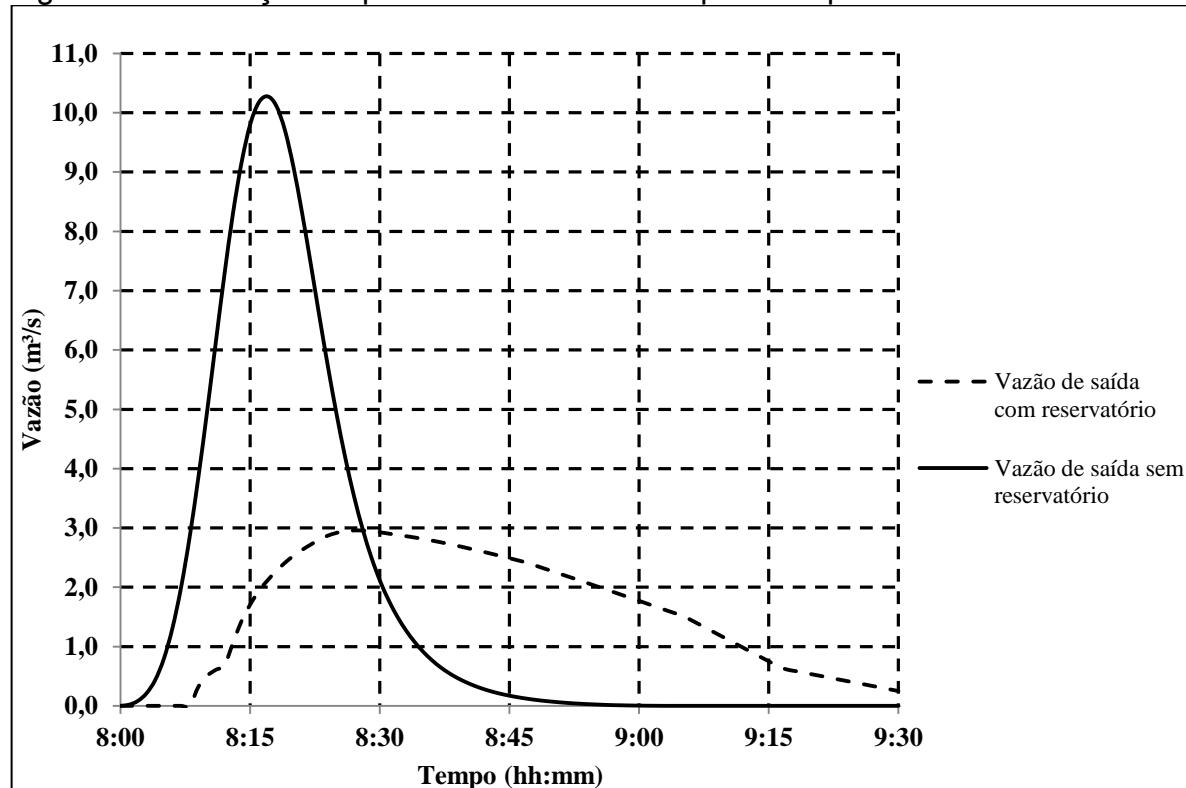
Tabela 8 – Resultado da simulação considerando os dois reservatórios.

Tempo de retorno (anos)	Vazão de pico de saída (sem res.) (m ³ /s)	Vazão de pico de saída (com res.) (m ³ /s)	Redução do Pico de Vazão
2	6,516	2,339	64,10%
5	7,553	2,443	67,66%
10	8,620	2,637	69,41%
25	10,276	2,957	71,22%

Fonte: Autor (2021).

Para o caso mais extremo considerado, com tempo de retorno de 25 anos, a Figura 30 mostra a redução do pico de vazão de saída, considerando a situação do riacho sem os reservatórios, e a hipótese dos reservatórios de detenção funcionando em conjunto.

Figura 30 – Redução do pico de vazão de saída para tempo de retorno de 25 anos.



Fonte: Autor (2021).

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Analisando a metodologia utilizada e os resultados obtidos, pôde-se avaliar a viabilidade da implantação de reservatórios de detenção em trechos do riacho Sítio dos Pintos e do Córrego da Fortuna como alternativa de controle às inundações na região, considerando a crescente urbanização do local, impactando na macrodrenagem do bairro.

Propor a construção de uma bacia de detenção depende de uma série de fatores econômicos, sociais e ambientais. Isso é evidenciado no estudo quando este mostrou como esses fatores influenciam na atual situação do bairro Sítio dos Pintos, que se encontra em condições ainda precárias, com falta de saneamento e infraestrutura urbana de qualidade para a população.

Os dados de relevo, obtidos por meio do programa Pernambuco Tridimensional foram imprescindíveis para a execução da metodologia proposta. Os arquivos do modelo digital do terreno (MDT) de Recife, obtidos pelas ortofotos do PE3D, foram usados para delimitar a bacia hidrográfica do riacho Sítio dos Pintos, visto que a topografia local é fundamental para determinar a direção e sentido do escoamento no riacho. O software QGIS se mostrou eficiente na delimitação da bacia, resultando em dados acurados o suficiente para a concepção do modelo hidrológico, considerando a classe de escalas utilizadas.

Para melhores dados de entrada, recomenda-se utilizar um padrão de exatidão cartográfica (PEC) com escalas maiores, por exemplo, escala de 1:1000. Também é importante que o modelador fique atento ao usar software de geoprocessamento, pois há o risco de redução na resolução das imagens utilizadas. Além disso, é importante salientar que, para bacias hidrográficas menores, existem novas tecnologias de sensoriamento remoto, como os veículos aéreos não tripulados e a imagens de satélite com sensores mais avançados, que resultariam em dados mais precisos.

Com o software HEC-HMS, foi possível conceber o modelo do riacho Sítio dos Pintos e do Córrego da Fortuna de forma acurada, realizando a simulação hidrológica com boa precisão de dados. Assim, chegou-se a uma solução viável para a problemática do estudo, demonstrando ser possível a aplicação dessa solução na região para todos os cenários estudados, contribuindo para equilibrar as vazões propagadas no riacho.

Em ambas as simulações, os resultados mostraram uma considerável redução do pico de vazão em todos os tempos de retorno de precipitação considerados, além de não ultrapassar a elevação máxima em ambos os reservatórios dimensionados. No reservatório USF Sítio dos Pintos, a maior redução de pico de vazão ocorreu no cenário mais extremo de precipitação, com redução de quase 70% do pico de vazão. No reservatório USF Córrego da Fortuna, a maior redução de pico de vazão também ocorreu no cenário mais extremo de precipitação, com redução de mais de 72% do pico de vazão.

Considerando a análise da modelagem no cenário com os dois reservatórios funcionando, a redução do pico de vazão foi novamente acima de 70%. Esses resultados evidenciam a viabilidade da implantação de reservatórios de detenção no riacho Sítio dos Pintos. Apesar da viabilidade hidrológica para reduzir ou eliminar inundações a jusante, há de se buscar a compatibilização com o uso social da área em que se localiza a intervenção proposta, sendo oportuna a contribuição de outras especialidades à comunidade local.

Os projetos estudados da praça com área de lazer para recreação, e da área de lazer esportiva se mostraram promissores para a utilização pela população das áreas de construção dos reservatórios. Os projetos trariam grandes benefícios socioeconômicos para o bairro Sítio dos Pintos, proporcionando áreas recreativas para a população e diminuindo os prejuízos causados pelos danos das inundações recorrentes na área.

7.1 RECOMENDAÇÕES

Desenvolver um projeto do parque ecológico em trecho do riacho também se mostraria promissor, trazendo benefícios socioambientais para o local, proporcionando uma área preservada para a população, promovendo a conscientização desta com relação a importância de se ter um bom envolvimento com o riacho e a mata ciliar preservada no local. É necessário o envolvimento de vários setores públicos para a execução da revitalização do riacho Sítios dos Pintos, está sendo iniciada após a apresentação e aprovação de cada um dos projetos que a envolvem. Considerando todos esses fatores, poderá ser avaliada a melhor metodologia proposta a ser executada.

Como recomendação para futuras pesquisas, a fim de se obter melhores resultados, deve-se avaliar a bacia hidrográfica do Sítio dos Pintos como um todo, a fim de propor a construção de bacias de detenção, aumentando a eficiência do sistema de drenagem da capital pernambucana. Também é importante o estudo da viabilidade de outras alternativas para a revitalização das áreas menos urbanizadas do riacho, como a considerada no estudo em questão.

REFERÊNCIAS

20 MINUTES. Paris 2024: On va pouvoir se baigner dans la Seine, vraiment ?. **20 Minutes**. 2017. Disponível em: <<http://www.20minutes.fr/sport/2071075-20170519-paris-2024-vapouvoir-baigner-seine-vraiment>>. Acesso em: 2 de agosto de 2021.

ABCP. Projeto técnico: Reservatórios de detenção. **Programa soluções para cidades**. Associação Brasileira de Cimento Portland. 2013. Disponível em: <https://www.solucoesparacidades.com.br/wp-content/uploads/2013/09/AF_Reservatorios%20Deten_web.pdf>. Acesso em: 16 de setembro de 2021.

ARH TEJO. Plano de gestão da região hidrográfica do Tejo. Administração da Região Hidrográfica do Tejo. **Governo de Portugal**. 2012. Disponível em: <https://sniambgeoviewer.apambiente.pt/Geodocs/geoportaldocs/Planos/PGRH5-TEJO/AAE%5CPGRHTejo_AAE_RA.pdf>. Acesso em: 28 de julho de 2021.

ATHIAS, J. B. Desenho Urbano sensível às águas com foco na reabilitação do riacho Sítio dos Pintos. **Associação Brasileira de Ensino de Arquitetura e Urbanismo - ABEA**. 2020. Disponível em: <https://www.abea.org.br/?page_id=2680>. Acesso em: 27 de dezembro de 2021.

BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N; BARRAUD, S. Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana. **ABRH**, Porto Alegre-RS, 2011.

BENTO, C. B. Despoluição de Rios Londres – São Paulo: Insights para a recuperação e reintegração dos rios paulistas ao ambiente urbano. **Monografia apresentada à Universidade Federal de São Paulo**. Escola Paulista de Política, Economia e Negócios. Osasco. 2021.

BERQUE, J. M.; RUPERD, Y. Stormwater Retention basins. **Rotterdam: A. A. Balkema**, 2000.

BRAGA, B. P. F. Non-structural flood control measures – introductory notes for a special issue for urban waters. **Urban Water. Guest Editorial**, v. 1, 1999.

BRAGA, R. A. P.; SILVA, R. P.; AGUIAR, W. Área de Proteção Ambiental (APA) Sítio dos Pintos. Recife, **Ed. Ane**. 34p. 2020.

CABRAL, J. J. S. P. Revitalização de Riachos. **Riachos Urbanos Recife**, 2012. Disponível em: <<http://conselhodacidade.recife.pe.gov.br/sites/default/files/2017-12-12%20CT%20Saneamento%20-%20Jaime%20Cabral%20.pdf>>. Acesso em: 16 de setembro de 2021.

CABRAL, J. J. S. P.; ALENCAR, A. V. Recife e a convivência com as águas. In: **Gestão do Território e Manejo Integrado das ÁGUAS urbanas**, Ministério das Cidades. Brasília – DF. 2005.

CABRAL, J. J. S. P.; BRAGA, R. A. P.; NETO, G. C. F.; CABRAL, P. L. Características hidrológicas do riacho Sítio dos Pintos como subsídio para o processo de revitalização. Maceió: **ABRH**, p. 1–10. 2018.

CABRAL, J. J. S. P.; BRAGA, R. A. P.; NETO, G. C. F.; CABRAL, P. L.; SANTOS, S. N. Abordagem multidisciplinar no processo de início de revitalização de três riachos da bacia do rio Capibaribe. **XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Foz do Iguaçu: ABRH, 2019.

CABRAL, J. J. S. P.; FONSECA NETO, G. C.; SILVA JUNIOR, M. A. B.; RODRIGUES, A. B.; MOURA, L. S. Resiliência de engenharia como subsídio ao processo de revitalização de três riachos urbanos em Recife-PE. **III Simpósio de Revitalização de Rios Urbanos**. IPH/UFRGS. Porto Alegre, 2020.

CABRAL, S. L.; SAKURAGI, J.; SILVEIRA, C. S. Incertezas e erros na estimativa de vazões usando modelagem hidrológica e precipitação por RADAR. **Rev. Ambiente & Água**. vol. 12 n. 1, Taubaté, 2017.

CAMARA, C. P. S.; FERREIRA, E. C.; RIBEIRO NETO, A.; SANTOS, S. M.; PAIVA, A. L. R. Modelagem de bacia de detenção em área urbanizada da cidade do Recife-PE. XII Encontro Nacional de Águas Urbanas. **ABRH**. 2018.

CANHOLI, A. P. Drenagem urbana e controle de enchentes. **Oficina de Textos**. 2a Edição ampliada e atualizada. São Paulo. ISBN: 978-85-7975-160-8. 2015.

CARVALHO, O. O.; GAZEN, A. F.; SILVA, A. Chuvas intensas de Porto Alegre. Porto Alegre, 1972.

CHOW, V. T.; MAIDMENI, D. R.; MAYS, L. W. *Applied Hydrology*. Berkshire, Uk: **Mcgraw-hill Book Co (uk)**, 572 p. 1988.

CML. Plano Geral de Intervenção da Frente Ribeirinha de Lisboa. Documento Prospectivo. **Departamento de Planeamento Urbano. Direção Municipal de Planeamento Urbano. Camara Municipal de Lisboa**. 2008. Disponível em: <<https://www.lisboa.pt/cidade/urbanismo/planeamento-urbano/teste-outros-estudos-e-planos/plano-geral-de-intervencoes-na-frente-ribeirinha>>. Acesso em: 28 de julho de 2021.

COMPESA. História e Perfil. **Companhia Pernambucana de Saneamento - COMPESA**. 2021. Disponível em: <<https://servicos.compesa.com.br/historia-e-perfil/>>. Acesso em 20 de setembro de 2021.

CONAMA. Resolução CONAMA nº 274. **Conselho Nacional do Meio Ambiente**. 2000. Disponível em: <http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=272>. Acesso em 20 de setembro de 2021.

CONAMA. Resolução CONAMA nº 357. **Conselho Nacional do Meio Ambiente**. 2005. Disponível em:

<http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=450>. Acesso em 20 de setembro de 2021.

CONEXÃO PARIS. As margens do Sena em Paris. **Conexão Paris**. 2013. Disponível em: <<https://www.conexaoparis.com.br/as-margens-do-sena-em-paris/>>. Acesso em: 2 de agosto de 2021.

CORREIO. Arquiteta que trabalha na revitalização de Lisboa fala sobre sua experiência na capital portuguesa. **Correio 24 horas**. 2016. Disponível em: <<https://www.correio24horas.com.br/noticia/nid/arquiteta-que-trabalha-na-revitalizacao-de-lisboa-fala-sobre-sua-experiencia-na-capital-portuguesa/>>. Acesso em: 27 de julho de 2021.

CRISPIM, D. C.; SOUZA, R. M.; FORMIGA, K. T. M. Estudo comparativo entre os modelos SWMM e HEC-HMS para simulação de escoamento superficial – caso de estudo bacia do córrego samambaia. **REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil**. v.5, n.2, ISSN: 2179-0612. 2012.

CURITIBA. Parque Barigui. **Prefeitura municipal de Curitiba**. 2021. Disponível em: <<https://www.curitiba.pr.gov.br/conteudo/parque-barigui/292>>. Acesso em: 7 de agosto de 2021.

CURITIBA. Planejamento estratégico para revitalização da bacia do rio Barigui. **Prefeitura municipal de Curitiba**. 2007. Disponível em: <<https://www.curitiba.pr.gov.br/noticias/planejamento-estrategico-para-revitalizacao-da-bacia-do-rio-barigui/8660>>. Acesso em: 7 de agosto de 2021.

DE URBANISTEN. Water Squares. **De Urbanisten**. 2010. Disponível em <<http://www.urbanisten.nl/wp/?portfolio=waterpleinen>>. Acesso em 20 de setembro de 2021.

DO CARMO, V. M.; HONDA, S. C. D. A. L. Degradação ambiental e sua relação com a drenagem urbana—estudo de caso em Dracena-SP. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, 1(1), 2013.

DW BRASIL. Chuvas fazem rio Sena transbordar em Paris. **Deutsche Welle**. 2016. Disponível em: <<https://www.dw.com/pt-br/chuvas-fazem-rio-sena-transbordar-em-paris/a-19303436>>. Acesso em: 2 de agosto de 2021.

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

EMBRAPA. Zoneamento Agroecológico do Estado de Pernambuco. **Embrapa/Secretaria de Agricultura**. escala 1:100.000, Recife, 2001.

FARIAS JUNIOR, E. F. Análise do comportamento do tempo de concentração no rio. Cônego, município de Nova Friburgo/RJ. **Monografia (Escola Nacional de Ciências Estatísticas)**, 2010.

FCTH. Diretrizes Básicas para Projetos de Drenagem Urbana no Município de São Paulo. **Fundação Centro Tecnológico de Hidrologia**, 1999.

FCTH. Hidrologia urbana – Capacitação tecnológica e transferência de tecnologia em drenagem urbana. **Fundação Centro Tecnológico de Hidrologia**, 2003.

Disponível em:

<<http://www.fcth.br/public/cursos/praiagrande/1HidrologiaUrbana.pdf>>. Acesso em: 05 de dezembro de 2021.

FERREIRA, F. F. Climatologia da precipitação na cidade do Recife. In: **Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC**. Foz do Iguaçu-PR. 2016.

FONSECA NETO, G. C. Vulnerabilidade da macrodrenagem do riacho Cavouco em Recife em resposta às mudanças climáticas e à abertura das comportas da barragem de Carpina. **Dissertação submetida à Universidade Federal de Pernambuco - UFPE**. Recife, 2018.

FONSECA NETO, G. C.; SILVA JUNIOR, M. A. B.; RODRIGUES, A. B.; RIBEIRO NETO, A.; CABRAL, J. J. S. P. Modelagem bidimensional para a verificação hidráulica da Canalização de um trecho do rio Fragoso em Olinda (Pernambuco, Brasil). **Revista Brasileira de Geografia Física**. v.13, n.6, 2963-2977. 2020.

FREITAS, J. M. S.; FRANCO, M. A. R. O ressurgimento do Pirarungáua: caminhos e descaminhos das águas urbanas. **Revista LABVERDE**. v. 9, n. 2. São Paulo. 2019.

FROES, A. C. S. Ideologia ambiental no planejamento e produção do espaço urbano em Curitiba: estudo de caso do projeto Viva Barigui. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Planejamento Urbano. **Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná**. Curitiba. 2018.

FUNASA. Manual de saneamento. 3. ed. rev. – Brasília: **Fundação Nacional de Saúde**, 2006.

G1. Em rara aparição, golfinhos são fotografados no rio Tejo, em Lisboa. **G1 – Natureza**. 2020. Disponível em:

<<https://g1.globo.com/natureza/noticia/2020/07/10/em-rara-aparicao-golfinhos-sao-fotografados-no-rio-tejo-em-lisboa.ghtml>>. Acesso em: 27 de julho de 2021.

GASTALDINI, M. C. C.; SEFFRIN, G. F. F.; PAZ, M. F. Diagnóstico atual e previsão futura da qualidade das águas do rio Ibicuí. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.7, p.34 –43. 2002.

GUAN, M.; SILLANPÄÄ, N.; KOIVUSALO, H. Assessment of LID practices for restoring pre-development runoff regime in an urbanized catchment in Southern Finland. **Water Science and Technology**, v. 71, n. 10, p. 1485–1491. 2015.

HALLIDAY, S. The Great Stink of London: Sir Joseph Bazalgette and the cleansing of the victorian metropolis. **The History Press**. Cheltenham. 2001.

IBGE. Estimativa populacional da cidade do Recife em 2020. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **IBGE**. 2020. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/recife/panorama>>. Acesso em: 20 de setembro de 2021.

IBGE. Panorama Recife. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **IBGE**. 2021. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/recife/panorama>>. Acesso em: 29 de novembro de 2021.

INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE. Jardim Botânico. **São Paulo Governo do Estado**. 2021. Disponível em: <<https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/jardimbotanico/>>. Acesso em: 4 de agosto de 2021.

KANG, C. D.; CERVERO, R. From elevated Freeway to Urban Greenway: Land value impacts of the CGC project in Seoul, Korea. **Urban Studies**. v. 46 (13) pp. 2771-2794. 2009.

KIM, H.S.; KOH, T.G.; KWON, K.W. The Cheonggyecheon (Stream) Restoration Project - Effects of the restoration work. **Cheonggyecheon Management Team, Seoul Metropolitan Facilities Management Corporation**. Seoul, South Korea. Received from Kie-Wook Kwon, July 18, 2011. 2009.

LA CROIX. Un bain dans la seine en 2024 ?. **La croix**. 2016. Disponível em: <<https://www.la-croix.com/sciences/environnement/un-bain-dans-seine-2024-possible-2016-05-12-1200759485>>. Acesso em: 3 de agosto de 2021.

LE FIGARO. Se baigner dans la seine : rêve ou réalité ?. **Le figaro**. 2017. Disponível em: <<https://www.lefigaro.fr/sciences/2017/07/26/01008-20170726artfig00363-se-baigner-dans-la-seine-reve-ou-realite.php>>. Acesso em: 3 de agosto de 2021.

LE POINT. Se baigner dans la seine, un rêve bientôt réalité ?. **Le point**. 2017. Disponível em: <https://www.lepoint.fr/insolite/se-baigner-dans-la-seine-un-reve-bientot-realite-04-07-2017-2140378_48.php>. Acesso em: 3 de agosto de 2021.

LEIS MUNICIPAIS. Decreto nº 33.676 de 20 de maio de 2020. **Leis Municipais – Recife**. 2020. Disponível em: <<https://leismunicipais.com.br/a/pe/r/recife/decreto/2020/3367/33676/decreto-n-33676-2020-regulamenta-a-unidade-de-conservacao-da-natureza-apa-sitio-dos-pintos-nos-termos-do-art-61-da-lei-municipal-n-18014-2014-que-instituiu-o-sistema-municipal-de-unidades-protedidas-smup-recife-e-revoga-o-decreto-municipal-n-23-818-de-23-julho-de-2006>>. Acesso em: 22 de setembro de 2021.

LINS, L. Sítio dos Pintos conta a própria história. **OXERECIFE**. 2017. Disponível em: <<http://oxerrecife.com.br/2017/11/20/sitio-dos-pintos-conta-propria-historia/>>. Acesso em 01 de fevereiro de 2022.

MACHADO, R. E. Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. Tese (doutorado), **Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, Piracicaba, 2002.

MAIDMENT, D. R. GIS and hydrologic modeling. In: Goodchild, M. F.; Parks, B. O.; Steyaert, L.T.; ed. **Environmental modeling with GIS**. New York, Oxford University Press, Cap. 14, p. 147-167. 1993.

MATA-LIMA, H.; VARGAS, H.; CARVALHO, J.; GONÇALVES, M; CAETANO, H; MARQUES, A.; RAMINHOS, C. Comportamento hidrológico de bacias hidrográficas: integração de métodos e aplicação a um estudo de caso. **Rem: Ver. Esc. Minas, Ouro Preto**, vol. 60, nº 3, 2007.

MELO, M. Recife tem riachos urbanos em situações críticas. **FOLHA PE**. 2018. Disponível em: <<https://www.folhape.com.br/noticias/recife-tem-riachos-urbanos-em-situacao-critica/84997/>>. Acesso em 01 de fevereiro de 2022.

MIGNOT, E.; PAQUIER, A.; HAIDER, S. Modeling floods in a dense urban área using 2D shallow water equations. **Journal of Hydrology**, 327, p. 186-199, 2006.

NOSSA ILHÉUS. Despoluição do rio Tâmisa. **Instituto Nossa Ilhéus**. 2016. Disponível em: <<https://www.nossailheus.org.br/despoluicao-rio-tamisa/>>. Acesso em: 30 de julho de 2021.

NOVAES, F. L.; LOURENÇO, F.; ALVES, L. V.; FEITOSA, R. S.; SOUSA, R.; VILELA, S. Um histórico de segregação recifense: o Córrego da Fortuna. **Revista Rural & Urbano**, Recife. v. 01, n. 01, p. 192-199, 2016.

OFICINA URBANA. Viva Barigui. **Oficina urbana de arquitetura**. 2019. Disponível em: <<https://www.oficinaurbana.com.br/viva-barigui.html>>. Acesso em: 8 de agosto de 2021.

OLIVEIRA, A. C. P. Frente Ribeirinha de Lisboa. Regeneração Urbana – Nova Maneira de Pensar e Fazer. **Dissertação de Mestrado em Gestão do Território Área de especialização em Planeamento e Ordenamento do Território**. Lisboa, Março, 2014.

PARK, K. Cheonggyecheon Restoration Project. **Seoul Metropolitan Government**, Seoul, South Korea. 2007.

PDDR. Plano Diretor de Drenagem de Recife. **Prefeitura do Recife**. 2015. Disponível em: <<http://conselhodacidade.recife.pe.gov.br/sites/default/files/biblioteca/PDDR%20-%20PLANO%20DIRETOR%20DE%20DRENAGEM%20DO%20RECIFE.pdf>>. Acesso em: 10 de dezembro de 2019.

PE3D. Pernambuco Tridimensional. **Governo do Estado de Pernambuco**. 2016. Disponível em: <<http://www.pe3d.pe.gov.br/>>. Acesso em 02 de dezembro de 2021.

PEREIRA, L. M. Modelagem hidrológica dinâmica distribuída para estimativa do escoamento superficial em uma microbacia urbana. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE**, São José dos Campos, 2009.

PERNAMBUCO. Plano Estadual de Mudanças Climáticas. **Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade**. Recife, 2011, 94 p. 2011.

PORTELA, M. M. Modelação Hidrológica. **Técnico Lisboa**. 2005. Disponível em <<https://fenix.ist.utl.pt/disciplinas/mh/2005-2006/2-semestre/bibliografia>>. Acesso em 06 de dezembro de 2021.

PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos avançados**, v. 22, p. 43-60, 2008.

PORTO, R. L.; FILHO, K. Z.; MARCELLINI, S. S. PHD 307 - Hidrologia Aplicada. **Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**, 1999.

PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE. Bacias combaterão alagamentos em dois bairros. **Comunicação Social**. 2009. Disponível em: <http://www2.portoalegre.rs.gov.br/cs/default.php?reg=108181&p_secao=3&di=2009-05-28>. Acesso em 16 de setembro de 2021.

PREUSS, S. L. C.; SILVA, A. A.; BRAGA, R. A. P.; CABRAL, J. J. S. P. Adequação Estrutural e Ambiental para a Drenagem Urbana Sustentável: o caso do Recife, Pernambuco. In: **XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Maceió-AL, 2011.

QGIS. Descubra o QGIS. **QGIS**. 2021. Disponível em: <https://qgis.org/pt_BR/site/about/features.html>. Acesso em: 02 de dezembro de 2021.

RAGHUNATH, H. M. Hydrology. New Delhi: **New Age International**, 463 p. 2006.

RECIFE. Bairro Sítio dos Pintos – Mapa do Sistema Viário Município de Recife. **Atlas Metropolitano. Desenvolvimento humano na Região Metropolitana do Recife. Prefeitura de Recife**. 2011. Disponível em: <<http://www2.recife.pe.gov.br/servico/sitio-dos-pintos?op=NTI4Mg==>>. Acesso em: 02 de fevereiro de 2022.

RECIFE. E-SIG Informações Geográficas do Recife. **Prefeitura da Cidade do Recife. Secretaria de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente**. 2022. Disponível em: <<https://esigportal2.recife.pe.gov.br/portal/apps/webappviewer/index.html?id=7f6ee791d4d94be4bcf1d0bb93a162a9>>. Acesso em: 02 de fevereiro de 2022.

RECIFE. **Lei nº 16.176 - Estabelece a lei de uso e ocupação do solo da cidade do Recife**. Disponível em: <<http://leismunicipa.is/ofskd>>. 1996. Acesso em: 17 de setembro de 2021.

RECIFE. Prefeitura da Cidade do Recife. Secretaria de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente. **E-SIG UNIDADES DE CONSERVAÇÃO DO RECIFE**, 2018. Disponível em: <<https://esigportal.recife.pe.gov.br/arcgis/apps/webappviewer/index.html?id=2d16de816cbd4e7d8031189fee8c87ec>>. Acesso em: 18 de setembro de 2021.

RECIFE. Relatório do diagnóstico do sistema de drenagem existente. *In: SISUR; EMLURB (Org.). Elaboração dos estudos de concepção para gestão e manejo de águas pluviais e drenagem urbana do Recife*. Recife: ABF, p. 1–333, 2013.

RENNÓ, D. C.; SOARES, J. V. Modelos hidrológicos para gestão ambiental. Relatório Técnico Parcial “Métodos, modelos e geoinformação para a gestão ambiental”. Brasília: **MCTI; INPE**, 2000. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/geopro/modelagem/relatorio_modelos_hidrologicos.pdf>. Acesso em: 02 de dezembro de 2021.

REVKIN, A. Peeling back pavement to expose water havens. **New York Times**. 2009. Disponível em: <<http://www.nytimes.com/2009/07/17/world/asia/17daylight.html>>. Acesso em: 28 de julho de 2021.

RIBEIRO NETO, A.; CIRILO, J. A.; DANTAS. C. E. O.; SILVA, E. R. Caracterização da formação de cheias na bacia do rio Una em Pernambuco: simulação hidrológica hidrodinâmica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.20, n.2, p. 394 – 403, Porto Alegre, ISSN 2318-0331, 2015.

ROSA, R. Introdução ao Geoprocessamento. **Universidade Federal de Uberlândia** - Instituto de Geografia - Laboratório de Geoprocessamento. 2013. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/posgraduacao/wp-content/uploads/sites/33/2016/12/Introdu%C3%A7%C3%A3o-ao-Geoprocessamento-Roberto-Rosa.pdf>>. Acesso em 02 de dezembro de 2021.

SANTOS, J. B. Modelagem hidrológica HEC-HMS da bacia hidrográfica do Ribeirão Lavapés, Botucatu-SP. Tese de Doutorado – **Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agronômicas**, 78p, Botucatu, 2017.

SCHLICHT PONDS. Detention Pond Maintenance. **Michigan Detention & Retention Pond Maintenance**, 2020. Disponível em: <<https://michiganretentionponds.com/retention-pond-maintenance/>>. Acesso em: 17 de setembro de 2021.

SEMADS. Enchentes no estado do Rio de Janeiro: Uma Abordagem Geral. Rio de Janeiro: **Projeto Planáqua Semads / Gtz de Cooperação Técnica Brasil – Alemanha**. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. 2001.

SIEBRA, G. Método dos blocos alternados. **Blog Gustavo Sierra – Engenheiro Civil**. 2021. Disponível em: <<https://gustavosiebra.github.io/metodo-dos-blocos-alternados/>>. Acesso em: 18 de outubro de 2021.

SILVA, L. P. E. Modelagem e geoprocessamento na identificação de áreas com risco de inundação e erosão na bacia do Rio Cuiá - João Pessoa. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – **Universidade Federal da Paraíba**, João Pessoa, 2007.

SILVA, R.; BRAGA, R.; AGUIAR, W. Área de Proteção Ambiental Sítio dos Pintos – História, natureza e cidadania. **Publicações ANE**. Recife, 2020.

SILVA JUNIOR, M. A. B.; SILVA, S. R. Impacts of urbanization and climate change in the drainage system of Recife-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, pp. 2034-2053. 2016.

SILVEIRA, A. L. L. Da. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 1, p. 5-23. 2005.

SOUZA, D. N. S.; STUDART, T. M. C.; LIMA NETO, I. E.; CAMPOS, J. N. B. Flood damping by reservoirs: proposition of a graphical parametric method. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, v. 22, e39, ISSN 2318-0331. 2017.

STRIDE, P. The Thames Tideway Tunnel: preventing another Great Stink. **The History Press**. Cheltenham. 2019.

TEIXEIRA, C. A. Apostila de hidrologia aplicada. Ministério da Educação. **Universidade Tecnológica Federal do Paraná**. Curitiba, 2010.

TOMINAGA, E.N.S. Urbanização e cheias: Medidas de controle na fonte. Dissertação de Mestrado. **Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**, São Paulo, 137p, 2013.

TUCCI, C. E. M. Água no meio urbano. Capítulo 14 do Livro Água Doce. **Porto Alegre: UFRGS**. 1997a.

TUCCI, C. E. M. Controle de Enchentes. In: ____ (Ed.). Hidrologia: ciência e aplicação. 2^a edição. **Ed. Da Universidade/UFRGS**, cap. 16, p. 621-658. Porto Alegre. 2001.

TUCCI, C. E. M. Gerenciamento da Drenagem Urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, n. 1, pp. 5-27, 2002.

TUCCI, C. E. M. Gestão das Águas Pluviais Urbanas: Saneamento para todos, Programa de Modernização do Setor Saneamento, **Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental**, Brasília, Ministério das Cidades. 2005a.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. 2.ed. Porto Alegre: **Coleção ABRH de recursos hídricos**, v.4, Editora da Universidade, 1997b.

TUCCI, C. E. M. Inundações Urbanas. Porto Alegre: **ABRH/RHAMA**. 2007.

TUCCI, C. E. M. Modelos Hidrológicos. **ABRH-UFRGS**, Porto Alegre, 2005b.

TUCCI, C. E. M. Modelos hidrológicos distribuídos. **Rhama**, Porto Alegre, 2010. Disponível em: <<http://rhama.net/wordpress/?p=134>>. Acesso em: 02 de dezembro de 2021.

TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L.; BARROS, M. T. de. Drenagem urbana. 1.ed. Porto Alegre: **ABRH/Editora da Universidade/UFRGS**, 428p. 1995.

TUNDISI, J. G. Ciclo hidrológico e gerenciamento integrado. **Ciência e Cultura**, v. 55, n. 4, p. 31-33, 2003.

USA. HEC-HMS Applications Guide. **USACE**, 1997. Disponível em: <<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsag/>>. Acesso em: 17 de setembro de 2021.

USACE. HEC-HMS Hydrologic Modeling System. Technical Reference Manual. Version 2.0. **USACE**. 2000. Disponível em: <www.usace.army.mil>. Acesso em 01 de dezembro de 2021.

VERGUTZ, L. A. A.; PEREIRA, C. E.; SCHMIDT, M. A. R. Implementation analysis of detention reservoirs in order to minimize the impacts caused by floods. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 6, p. 1267–1277. 2019.

VIEIRA, I.; BARRETO, V.; FIGUEIRA, C. The use of detention basins to reduce flash flood hazard in small and steep volcanic watersheds – a simulation from Madeira Island. **Journal of Flood Risk Management**, v. 11, p. S930–S942. 2016.

WALES, S. G. Urban Surface Water Management. **New York: John Wiley & Sons**, Inc., 518p. 1989.

ZAHED FILHO, K.; MARCELLINI, S. S. Precipitações máximas. In: TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. De (Org.). **Drenagem Urbana**. 1. ed. Porto Alegre: ABRH, p. 37–73. 1995.

ANEXO A – NOTA TÉCNICA COMPESA

06/07/2021

SEI/GOVPE - 14545318 - GOVPE - Nota Técnica



NOTA TÉCNICA - COMPESA - GER TECNICA DE ENGENHARIA - Nº 69/2021

Recife, 16 de junho de 2021

Assunto: Questionamentos sobre coleta de esgoto nos riachos Sítio dos Pintos e Córrego da Fortuna, Recife/PE.

Referência: E-mail encaminhado via processo SEI nº 0060500140.002305/2021-85

DA ANÁLISE REQUERIDA

Em atenção aos documentos supracitados, que questionam sobre coleta de esgoto nos riachos Sítio dos Pintos e Córrego da Fortuna, Recife/PE, tecemos os seguintes comentários:

DA CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

A Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA), através do Programa Cidade Saneada firmou a Parceria Público-Privada (PPP) para serviços de esgotamento sanitário da Região Metropolitana do Recife. Esta parceria tem um prazo de alcance de 35 anos, onde a modalidade do contrato é do tipo concessão administrativa e visa atender mais de 5,9 milhões de pessoas.

O Programa prevê não apenas a universalização da disponibilidade de esgotamento sanitário em áreas urbanas (ampliação/implantação de sistemas), mas também a recuperação e adequação dos sistemas já existentes, além da manutenção e operação dos mesmos

Diante do contrato firmado entre COMPESA e Parceiro Privado, foram estabelecidas metas progressivas para que fossem desenvolvidos e implantados todos os projetos de sistemas de esgoto sanitário da RMR.

Ocorre que o cenário econômico nacional no qual foi lançado o Programa sofreu significativa mudança, trazendo impactos em relação à captação de recursos tanto para COMPESA quanto para o Parceiro Privado; interferindo assim no desenvolvimento dos compromissos inicialmente assumidos em relação à ampliação dos serviços de esgotamento sanitário, visto estar o Brasil inserido numa relevante crise econômica.

Em face do novo cenário observado e ainda considerando a importância do Programa, não apenas no campo social, mas também em relação à saúde pública e qualidade de vida da população, a COMPESA deu início a um processo de repactuação das ações inicialmente previstas em um aditivo contratual. O novo aditivo pactuado permitiu promover os ajustes necessários em relação aos cronogramas das obras de ampliação dos serviços, sempre procurando manter a premissa de que se promova o mínimo de alterações possível nos compromissos já assumidos.

DA SITUAÇÃO ATUAL

Os pleitos ora apresentados requerem esclarecimentos sobre coleta de esgoto nos riachos Sítio dos Pintos e Córrego da Fortuna.

Ambos os corpos hídricos estão localizados na região denominada pelo Programa Cidade Saneada como SES Camaragibe, que conta com alguns sub-sistemas de esgoto em regiões próximas a estes riachos e com previsão de implantação total para o ano de 2029.

Salientamos que a responsabilidade pela coleta de dados de corpos hídricos não faz parte do escopo da Companhia Pernambucana de Saneamento, sendo realizada pelas entidades ambientais do estado de Pernambuco.

CONCLUSÃO

Os riachos Sítio dos Pintos e Córrego da Fortuna estão dentro de área coberta pelo Programa Cidade Saneada, porém não temos informação sobre coleta de esgotos destes corpos hídricos.

Diego de Oliveira Costa Henrique
Analista de Saneamento - GTE



Documento assinado eletronicamente por **Diego De Oliveira Costa Henrique**, em 16/06/2021, às 09:00, conforme horário oficial de Recife, com fundamento no art. 10º, do Decreto nº 45.157, de 23 de outubro de 2017.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.pe.gov.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **14545318** e o código CRC **D7C1D3BB**.

COMPANHIA PERNAMBUCANA DE SANEAMENTO

Av. Cruz Cabugá, 1387, - Bairro Santo Amaro, Recife/PE - CEP 50040-000, Telefone: