

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA HÍDRICA

**Aplicação do modelo SWMM para análise de inundações na área urbana de Itajubá -
MG**

Thaís Faria Costa

Itajubá, abril de 2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA HÍDRICA

Thaís Faria Costa

**Aplicação do modelo SWMM para análise de inundações na área urbana de Itajubá –
MG**

**Dissertação submetida ao Programa de Mestrado Profissional em
Engenharia Hídrica como parte dos requisitos para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Hídrica.**

Área de concentração: Gestão de Sistema Hídricos

Orientador: Prof. Dr. Benedito Cláudio da Silva

Abril de 2022

Itajubá

À minha grande e eterna amiga Flavia.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus que sempre iluminou o meu caminho e meus pensamentos, me dando força e coragem para enfrentar as dificuldades.

À minha família, em especial aos meus pais, pelos ensinamentos, orações, amor e incentivo.

Ao meu noivo, Roberto, pela parceria, apoio, paciência e amor durante toda a caminhada.

Ao professor e orientador, Benedito Cláudio da Silva, pelo aprendizado, confiança, conhecimento compartilhado e compreensão.

Ao NEIRU, por todo o conhecimento e crescimento profissional adquiridos que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, além das amizades feitas que tornaram a jornada mais leve.

À STATUM Geotecnia, em especial à equipe de Recursos Hídricos, pela oportunidade, amizade, por todo o conhecimento compartilhado e pelos aprendizados que proporcionaram um melhor desenvolvimento deste trabalho.

Ao amigo e colega de trabalho Roberto, pelos ensinamentos, conversas e todo tempo dedicado em me ajudar.

Aos meus amigos que sempre estiveram presentes de alguma forma na minha vida, compreenderam as ausências e torceram por mim.

A Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, por contribuir para minha formação.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desse trabalho.

RESUMO

Inundações e alagamentos são realidade em muitas cidades do Brasil devido a intensa expansão urbana e ocupação do solo de forma desordenada. Para quantificar o escoamento superficial em bacias urbanas, compreender seu comportamento hidrológico e avaliar as causas alagamentos, pode-se utilizar modelos hidrológicos. Esses modelos auxiliam no planejamento do espaço urbano, na avaliação de medidas de controle de drenagem a serem implantadas e subsidiam a tomada de decisão. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a aplicabilidade do modelo hidrológico SWMM (*Storm Water Management Model*) para análise de alagamentos em bairros urbanos no bairro em relação aos dados mínimos necessários para esse tipo de estudo. Para isso, será realizado o estudo de caso do bairro Vila Rubens, em Itajubá/MG, para analisar as principais causas de alagamento e os efeitos da adoção de algumas medidas sustentáveis de controle de drenagem urbana. Primeiramente, realizou-se a delimitação e o diagnóstico da área de estudo. A bacia hidrográfica definida foi caracterizada em relação aos seus aspectos físicos e hidrológicos. Elaborou-se o estudo de chuvas intensas por meio de análise de frequência de precipitações máximas, realizou-se a desagregação da chuva em quantis sub-diários pelo método de Torrico e a discretização temporal pelo método de Huff para se obter a chuva de projeto para tempo de retorno de 2, 5 e 10 anos. A estimativa do escoamento superficial foi realizada pelo método de infiltração CN-SCS e pelo modelo da Onda Dinâmica para transporte hidráulico. O cenário atual da bacia foi simulado e, em seguida, definiu-se alguns cenários com medidas de controle LID (*Low Impact Development*). Para os três tempos de retorno, a duração crítica da chuva obtida no cenário atual foi de 30 min e a sub-bacia correspondente ao bairro Morro Chic foi a principal contribuinte na parcela de escoamento superficial. A adoção de medidas LID, principalmente na fonte do problema, contribuiu para a minimização dos alagamentos. Apesar dos resultados das medidas, deve-se considerar a localização da bacia, que se encontra em uma planície de inundação, em terreno muito plano. Já a grande quantidade de dados de entrada necessários e as incertezas na determinação de alguns deles foram dificuldades encontradas. Frente a essas incertezas, pode-se dizer que a validação com os moradores foi fundamental na aplicação do modelo SWMM para áreas com poucos dados que alimentam o modelo e sem dados medidos de vazão para calibração e verificação. O modelo SWMM se mostrou adequado para esse estudo e pode ser usado como uma ferramenta de planejamento urbano.

Palavras-chave: modelagem hidrológica, drenagem urbana, alagamentos, técnicas compensatórias, LID.

ABSTRACT

Floods and inundations are a reality in many cities in Brazil due to intense urban expansion and disorderly land occupation. To quantify surface runoff in urban basins, understand its hydrological behavior and assess the causes of flooding, hydrological models can be used. These models help in the planning of urban space, in the evaluation of drainage control measures to be implemented and subsidize decision-making. In this context, the present work aimed to evaluate the applicability of the SWMM hydrological model (*Storm Water Management Model*) for the analysis of flooding in urban neighborhoods in the neighborhood in relation to the minimum data necessary for this type of study. For this, a case study of the Vila Rubens neighborhood, in Itajubá/MG, will be carried out to analyze the main causes of flooding and the effects of adopting some sustainable measures to control urban drainage. First, the delimitation and diagnosis of the study area were carried out. The defined hydrographic basin was characterized in relation to its physical and hydrological aspects. The study of intense rains was elaborated through analysis of the frequency of maximum precipitations, the rain disaggregation in sub-daily quantiles was carried out by the Torrico method and the temporal discretization by the Huff method to obtain the design rain for return period of 2, 5 and 10 years. Surface runoff was estimated using the CN-SCS infiltration method and the Dynamic Wave model for hydraulic transport. The current scenario of the basin was simulated and then some scenarios were defined with LID (*Low Impact Development*) control measures. For the three return times, the critical rainfall duration obtained in the current scenario was 30 min and the sub-basin corresponding to the Morro Chic neighborhood was the main contributor to the runoff portion. The adoption of LID measures, mainly at the source of the problem, contributed to the minimization of flooding. Despite the results of the measurements, the location of the basin, which is located in a floodplain, on very flat terrain, must be considered. The large amount of necessary input data and the uncertainties in the determination of some of them were difficulties encountered. Faced with these uncertainties, it can be said that the validation with the residents was fundamental in the application of the SWMM model to areas with little data that feed the model and without measured flow data for calibration and verification. The SWMM model proved to be suitable for this study and can be used as an urban planning tool.

Keywords: hydrological modeling, urban drainage, flooding, compensatory techniques, LID.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Concepção estratégica da gestão integrada das águas urbanas.....	22
Figura 3.2 - Processo de impacto da drenagem urbana	25
Figura 3.3 - Balanço hídrico numa bacia urbana.....	25
Figura 3.4 - Hidrogramas de cheia antes e depois da urbanização.....	27
Figura 3.5 - Leito maior do rio antes e depois da urbanização.....	28
Figura 3.6 - Estágio de desenvolvimento da drenagem.....	31
Figura 3.7 - Visão higienista x conceito conservacionista na drenagem urbana.....	35
Figura 3.8 - Possíveis camadas de um controle LID no modelo SWMM.....	42
Figura 3.9 - Representação da sub-bacia como um reservatório não-linera no modelo SWMM	43
Figura 3.10 - Produção científica ao longo do tempo.....	49
Figura 3.11 – Produção científica ao longo do tempo.....	50
Figura 3.12 – Autores mais relevantes	50
Figura 3.13 – Principais países com produção científica no tema.....	50
Figura 3.14 – Palavras mais citadas nos 422 artigos levantados.....	51
Figura 4.1 - Fluxograma das etapas do estudo	52
Figura 4.2 - Localização do município de Itajubá/MG	54
Figura 4.3 - Hidrografia de Itajubá e a Área de Controle de Risco de Inundação (ACRI)	55
Figura 4.4 - Localização do bairro Vila Rubens.....	56
Figura 4.5 - Hidrografia do bairro Vila Rubens	57
Figura 4.6 - Trecho do ribeirão Água Preta como canal aberto em 1989 e como canal fechado em 2021, na Rua Evaristo de Barros Filho.....	58
Figura 4.7 - Trecho do ribeirão Água Preta em canal aberto no bairro Vila Rubens.....	59
Figura 4.8 - Ruas com rede de drenagem no bairro Vila Rubens.....	60
Figura 4.9 - Trecho do córrego Vila Isabel em canal aberto no limite do bairro Vila Isabel com o Vila Rubens	61
Figura 4.10 - Trecho do ribeirão Água Preta em canal fechado.....	61
Figura 4.11 - Final do trecho em canal fechado do ribeirão Água Preta.....	62
Figura 4.12 - Influência dos bairros vizinhos no bairro Vila Rubens	63
Figura 4.13 - Alagamento entorno a Associação de Voluntários Vida a Vida de Itajubá.....	64
Figura 4.14 - Ruas que sofrem alagamento em períodos de chuva e os pontos críticos	64
Figura 4.15 - Rua Manoel Gomes de Oliveira, no bairro Vila Rubens, em janeiro de 2000 ...	65

Figura 4.16 - Rua do bairro Vila Rubens inundada pelo rio Sapucaí em janeiro de 2000	66
Figura 4.17 - Final da rua Antônio Pereira Macedo, no bairro Vila Isabel, após a chuva intensa de janeiro de 2021.....	66
Figura 4.18 - Limpeza da Rua Antônio Pereira Macedo, no bairro Vila Isabel, após chuva intensa em janeiro de 2021	67
Figura 4.19 - Rua Antônio Pereira Macedo, no bairro Vila Isabel, durante limpeza após chuva intensa em janeiro de 2021	67
Figura 4.20 - Limpeza das ruas no bairro Vila Isabel após a chuva intensa de janeiro de 2021	68
Figura 4.21 - Bacia hidrográfica Vila Rubens	69
Figura 4.22 - Mapa de declividade da bacia Vila Rubens	70
Figura 4.23 - Mapa de solos da bacia Vila Rubens	71
Figura 4.24 – Uso e ocupação do solo da bacia Vila Rubens.....	72
Figura 4.25 - Localização das estações pluviométricas existentes próximas a região de estudo	74
Figura 4.26 - Regime pluviométrico de Itajubá/MG com base na estação pluviométrica São João de Itajubá	75
Figura 4.27 – Distribuições de probabilidade teóricas para precipitação máxima.....	77
Figura 4.28 - Mapa das Isozonas	78
Figura 4.29 - Quartis de chuva definidos por Huff.....	81
Figura 4.30 – Hietograma típico para 1º quartil de Huff.....	82
Figura 4.31 - Curva envelope ou método das chuvas.....	90
Figura 5.1 – Sub-bacias, nós e canais definidos para o modelo	94
Figura 5.2 – Arranjo da bacia Vila Rubens com suas sub-bacias, nós e canais no modelo SWMM	95
Figura 5.3 - Áreas alagáveis em cima de cada nó	97
Figura 5.4 - Localização dos dispositivos LID.....	99
Figura 5.5 - Hidrograma defluente para TR de 2 anos	101
Figura 5.6 - Hidrograma defluente para TR de 5 anos	101
Figura 5.7 - Hidrograma defluente para TR de 10 anos	102
Figura 5.8 – Altura máxima da área alagada em cada nó para TR de 2 anos.....	103
Figura 5.9 – Altura máxima da área alagada em cada nó para TR de 5 anos.....	103
Figura 5.10 – Altura máxima da área alagada em cada nó para TR de 10 anos.....	104

Figura 5.11 – Altura máxima da área alagada em cada cenário para chuva de duração de 30 min e TR de 2 anos	107
Figura 5.12 – Altura máxima da área alagada em cada cenário para chuva de duração de 30 min e TR de 5 anos	107
Figura 5.13 – Altura máxima da área alagada em cada cenário para chuva de duração de 30 min e TR de 10 anos	108
Figura 5.14 – Vazão defluente da bacia em cada cenário para chuva de duração de 30 min e TR de 2 anos	109
Figura 5.15 – Vazão defluente da bacia em cada cenário para chuva de duração de 30 min e TR de 5 anos	109
Figura 5.16 – Vazão defluente da bacia em cada cenário para chuva de duração de 30 min e TR de 10 anos	110

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 - Fases do desenvolvimento das águas urbanas.....	16
Quadro 3.2 - Resultado da pesquisa de artigos nas bases de dados bibliográficos Scopus.....	48
Quadro 4.1 - Metodologias para tempo de concentração recomendadas para bacias urbanas segundo Silveira (2005).....	72
Quadro 4.2 – Dados das estações pluviométricas existentes próximas a área de estudo	74
Quadro 4.3 – Quociente entre as alturas de chuva de 6 min e 1 h em relação à chuva de 24 h	78
Quadro 4.4 - Valores de CN para condição II de umidade antecedente.....	84
Quadro 4.5 - Coeficiente de rugosidade de Manning (n) para canais abertos.....	89
Quadro 5.1 - Dispositivos LID implantados em cada sub-bacia para cada cenário	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Resultados do tempo de concentração por método utilizado.....	73
Tabela 4.2 - Altura de chuva diária máxima anual.....	76
Tabela 4.3 – Quantis de chuva para a estação São João de Itajubá.....	79
Tabela 4.4 – Valores de CN para cada classe de uso e ocupação do solo.....	85
Tabela 4.5 - Valores de coeficiente de rugosidade de Manning (n) para escoamento à superfície livre.....	86
Tabela 4.6 – Valores de coeficiente “n” para cada classe de uso e ocupação do solo.....	86
Tabela 4.7 - Armazenamento em depressões.....	87
Tabela 4.8 - Declividades definidas para cada trecho.....	87
Tabela 4.9 - Descrição dos cenários definidos para o estudo.....	89
Tabela 4.10 - Coeficiente de segurança para estruturas de infiltração.....	91
Tabela 4.11 - Valores típicos de condutividade hidráulica para diferentes solos.....	91
Tabela 4.12 - Porosidade efetiva para materiais típicos.....	92
Tabela 5.1 – Resumo dos dados de entrada para as sub-bacias.....	96
Tabela 5.2 – Resumo dos dados de entrada para os nós.....	96
Tabela 5.3 – Resumo dos dados de entrada para os canais.....	98
Tabela 5.4 – Volume de armazenamento para os dispositivos LID.....	99
Tabela 5.5 – Valores recomendados e adotados para os parâmetros de cada camada do pavimento permeável.....	100
Tabela 5.6 – Valores recomendados e adotados para os parâmetros de cada camada da célula de biorretenção.....	100
Tabela 5.7 - Resultados de escoamento superficial por sub-bacia para o cenário atual para chuva com duração de 30 min.....	105
Tabela 5.8 – Balanço hídrico de cada cenário simulado para chuva com duração de 30 min.....	106
Tabela 5.9 - Resultados referentes ao exutório da bacia Vila Rubens para chuva de duração de 30 min e TR de 2 anos.....	110
Tabela 5.10 - Resultados referentes ao exutório da bacia Vila Rubens para chuva de duração de 30 min e TR de 5 anos.....	110
Tabela 5.11 - Resultados referentes ao exutório da bacia Vila Rubens para chuva de duração de 30 min e TR de 10 anos.....	110

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	15
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1 O desenvolvimento urbano e seus impactos	16
3.2 O planejamento municipal.....	19
3.3 As águas no meio urbano	22
3.3.1 O sistema de drenagem urbana.....	23
3.4 Medidas para o controle da drenagem urbana	30
3.5 Métodos de quantificação do escoamento.....	35
3.5.1 Modelo de Gestão de Drenagem Urbana - Storm Water Management Model (SWMM).....	37
3.5.2 Aplicações do modelo SWMM.....	44
3.6 Revisão bibliométrica	47
4 METODOLOGIA	52
4.1 Delimitação da área de estudo	52
4.2 Diagnóstico da área de estudo.....	52
4.2.1 O município de Itajubá.....	53
4.2.2 O bairro Vila Rubens.....	55
4.3 Caracterização da bacia hidrográfica	68
4.4 Estudo de chuvas intensas	73
4.4.1 Estação pluviométrica	73
4.4.2 Análise de frequência de chuva.....	75
4.4.3 Desagregação da precipitação diária	77
4.4.4 Discretização temporal da chuva.....	80
4.5 Simulação hidrológica	82
4.5.1 Dados de entrada	83
4.5.2 Definição dos cenários	89
4.5.3 Dimensionamento dos dispositivos LID	90
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	93
5.1 Simulação hidrológica no modelo SWMM.....	93
5.1.1 Dados de entrada	96

5.1.2 Dispositivos LID	98
5.1.3 Cenários simulados	100
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	114
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	116

1 INTRODUÇÃO

Inundações e alagamentos são realidade em muitas cidades do Brasil devido a intensa expansão urbana. O crescimento rápido e sem planejamento gera problemas ambientais, sociais e de infraestrutura que, na maioria das vezes, não possuem soluções fáceis ou viáveis (MINERVINO; DUARTE, 2016).

O principal impacto da urbanização é o aumento do escoamento superficial devido a impermeabilização do solo, que intensifica processos naturais de enchentes e aumenta sua frequência, por exemplo. Com isso, todo o balanço hídrico da bacia hidrográfica é alterado refletindo diretamente na qualidade de vida da população (MOURA *et al.*, 2019; NUNES; ROSA, 2020).

Apesar de existirem leis que estabelecem diretrizes de planejamento e desenvolvimento urbano, o setor da drenagem urbana ainda é deficitário e sem regras bem definidas (TASCA *et al.*, 2018). A drenagem urbana se tornou um problema de alocação de espaços que se agrava conforme as áreas urbanas vão sendo ocupadas de forma desordenada (CANHOLI, 2005).

Para minimizar os impactos, primeiro, deve-se compreender os fatores por trás das inundações e alagamentos urbanos e depois propor medidas estruturais e não-estruturais, levando em consideração que a bacia hidrográfica é um sistema integrado e dinâmico, a fim de não transferir os problemas para outras áreas. Desse modo, se faz necessário conhecer o comportamento dos processos hidrológicos presentes na bacia, como precipitação, escoamento superficial, infiltração, interceptação e armazenamento.

Para isso, o uso de modelos matemáticos aplicados em ferramentas computacionais facilita a avaliação do comportamento da drenagem durante eventos chuvosos. Eles permitem a simulação de diferentes cenários com condições variadas, auxiliando no conhecimento prévio dos impactos e na tomada de decisão. No entanto, para a correta utilização da modelagem hidrológica, deve-se ter um entendimento do funcionamento, dos métodos e dos parâmetros dos modelos disponíveis bem como das suas incertezas e limitações (ELGA *et al.*, 2015; BROEKHUIZEN *et al.*, 2019; MOGES *et al.*, 2021).

Além das limitações dos modelos, existem as limitações na disponibilidade de dados do local de estudo, uma vez que os modelos atuais necessitam de alta resolução temporal e espacial (ELGA *et al.*, 2015). Muitos locais ainda não têm uma estação pluviométrica próxima para obtenção do regime de chuva, ou há a estação, mas ela não tem uma série histórica extensa e

consistente. A topografia é outro dado que pode limitar o estudo, principalmente no nível de drenagem urbana que muitas vezes necessita de uma topografia mais refinada. Alguns parâmetros físicos também podem ser inviáveis de serem coletados em campo ou através de análise de imagens de satélite, recorrendo, assim, a equações empíricas e dados da literatura. Ainda, muitas vezes, não há dados de vazão medida para se fazer o processo de calibração e verificação do modelo. Como alternativa a esses limitadores, pode-se recorrer ao conhecimento dos moradores sobre a área de estudo.

Muitos modelos computacionais desenvolveram ferramentas que permitem aplicar e simular medidas de controle de drenagem, como as medidas sustentáveis ou conservacionistas, que vêm se destacando. No Brasil, elas são denominadas de técnicas compensatórias, mas também são conhecidas por LID (*Low Impact Development* - Desenvolvimento de Baixo Impacto). Essas medidas buscam reproduzir o comportamento hidrológico anterior a urbanização e atenuar o problema o mais próximo possível da fonte geradora dos escoamentos (MIGUEZ *et al.*, 2016).

Nesse contexto, o presente trabalho busca realizar a modelagem hidrológica, por meio do software SWMM, de áreas urbanas que sofrem alagamentos em períodos chuvosos e possuem poucos dados que alimentam o modelo hidrológico. Portanto, será avaliada a aplicabilidade desse modelo em relação aos dados mínimos necessários para esse tipo de estudo.

Para isso, será realizado o estudo de caso do bairro Vila Rubens, em Itajubá/MG. Durante o período chuvoso, os moradores do bairro enfrentam cenários de alagamento, sendo, portanto, necessária a adoção de medidas que minimizem esses impactos. Dessa forma, será utilizado o modelo hidrológico SWMM para analisar as principais causas de alagamento e os efeitos da adoção de algumas medidas sustentáveis de controle de drenagem urbana.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar a aplicabilidade do modelo hidrológico SWMM para análise de alagamentos em áreas urbanas, a fim de auxiliar a proposição de medidas de controle de drenagem urbana efetivas e contribuir para a minimização dos impactos causados pelas chuvas.

Os objetivos específicos são:

- Estudar o bairro Vila Rubens, localizado em Itajubá/MG, no modelo hidrológico SWMM;
- Verificar as principais causas de alagamentos na área de estudo;
- Avaliar os efeitos de medidas de controle de drenagem propostas para diferentes cenários;
- Analisar os dados mínimos necessários para esse tipo de estudo para que o modelo gere resultados coerentes com a situação real.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 O desenvolvimento urbano e seus impactos

Desde a sua origem, o homem convive com as condições naturais do planeta para sua sobrevivência e para o uso dos recursos (TUCCI, 2012a). Com a sua evolução, o ser humano passou a aprender novas formas e técnicas de uso dos recursos naturais e ocupação do solo, se estabelecendo e formando aldeias e povoados, principalmente em regiões próximas aos rios para usá-los em atividades, como agricultura e criação de animais. Isso permitiu o desenvolvimento da agricultura, a produção de excedente agrícola, o surgimento do comércio e, conseqüentemente, a consolidação das cidades. Com o desenvolvimento do comércio, o surgimento da indústria e a modernização da agricultura, a economia de base agrária foi substituída pela industrial, acarretando o crescimento e a modernização das cidades, as quais atraíam a população que até então trabalhava no campo, formando, assim, os núcleos urbanos (CASTANHO; TEIXEIRA, 2017; AQUINO *et al.*, 2019).

No início do século XX, a população urbana representava cerca de 15% da população mundial, porém, a partir da metade do século, mais especificamente nas décadas de 1970 e 1980 no Brasil, houve intensa concentração populacional nas áreas urbanas, acelerando o desenvolvimento urbano e impactando os ecossistemas terrestre e aquático além da própria população (TUCCI, 1995, 2006). Atualmente, quase 85% da população brasileira vive em áreas urbanas (IBGE, 2015). O processo de urbanização ocorreu sem planejamento e controle do espaço, pois, conforme os núcleos urbanos cresciam, mais difícil era mantê-lo saudável. Isso deteriorou a qualidade de vida e do meio ambiente e produziu conseqüências diretas na infraestrutura de água, da qual faz parte o abastecimento, o esgotamento sanitário, as águas pluviais e os resíduos sólidos (TUCCI, 2006; MDR, 2020).

De forma sucinta, segundo Tucci (2008), pode-se dividir o desenvolvimento das águas urbanas em quatro fases, as quais são apresentadas no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Fases do desenvolvimento das águas urbanas

Fase	Características	Conseqüências
Pré-higienista: até o início do século XX	<ul style="list-style-type: none"> - Mudança do campo para a cidade dos pequenos grupos da sociedade agrícola; - Esgoto em fossas ou na drenagem, sem coleta ou tratamento, contaminando as fontes de abastecimento. 	<ul style="list-style-type: none"> - Proliferação de doenças, principalmente devido às condições sanitárias precárias; - Inundações; - Grande mortalidade.
Higienista: até 1970	<ul style="list-style-type: none"> - Abastecimento de água de fontes seguras; - Coleta de esgoto, ainda sem tratamento, com despejo a jusante do manancial da cidade; - Canalização do escoamento; 	<ul style="list-style-type: none"> - Redução das doenças; - Transferência de impactos para a jusante: poluição dos rios e inundações.

Fase	Características	Consequências
	<ul style="list-style-type: none"> - Crescimento urbano acelerado após a 2ª Guerra Mundial; - Urbanização acelerada, resultando novamente em colapso do ambiente urbano devido aos efluentes sem tratamento e da poluição aérea. 	
Corretiva: entre 1970 e 1990	<ul style="list-style-type: none"> - Tratamento de efluentes doméstico e industrial; - Utilização de sistemas de amortecimento do escoamento em detrimento de canalização dos rios naturais. 	<ul style="list-style-type: none"> - Recuperação da qualidade da água dos cursos d'água; - Melhoria das condições ambientais; - Redução da proliferação de doenças; - Ainda há poluição difusa, obras hidráulicas e impacto ambiental.
Desenvolvimento sustentável: depois de 1990	<ul style="list-style-type: none"> - Presença de poluição de fontes difusas devido as inundações urbanas e rurais; - Investimento no desenvolvimento de uma política de desenvolvimento sustentável urbano; - Tratamento das águas pluviais urbanas e rurais; - Conservação do escoamento pluvial; - Tratamento dos efluentes em nível terciário para retirada de nitrogênio e fósforo que eutrofizam os lagos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Conservação ambiental; - Redução das inundações; - Melhoria da qualidade de vida.

Fonte: Adaptado de Tucci (2008)

No caso dos países em desenvolvimento, como o Brasil, os municípios variam de estágio. Quando a população é pequena, inicialmente o abastecimento é feito por meio de poços ou de um corpo d'água próximo e o esgoto é lançado em fossas negras ou fossas sépticas ou na drenagem se existente, causando o risco de contaminação da água de abastecimento e do esgoto escoar pelas ruas ou drenagem. Esse estágio é o pré-higienista, tendo a proliferação de doenças transmitidas pela água, como a diarreia, a principal causa de mortalidade infantil (TUCCI, 2008).

Quando há a saída do pré-higienismo para o higienismo, dois cenários podem ocorrer de acordo com Tucci (2012b): no primeiro, há a construção da rede de esgoto em algumas cidades, mas não da rede de drenagem, diminuindo a poluição doméstica e aumentando a frequência de inundações; e no segundo, há a construção da rede de drenagem sem a rede de esgoto doméstico, causando a poluição dos mananciais devido à poluição doméstica e industrial, além de problemas com o aumento do escoamento devido à urbanização, reduzindo, portanto, a qualidade de vida da população.

Ainda, segundo o autor, os municípios brasileiros podem estar em diferentes fases. Pequenas comunidades, áreas de favelas, de ocupação irregular ou cidades onde o investimento em saneamento é muito deficiente se encontram na fase pré-higienista. A maior parte das cidades se encontram na fase higienista e um pequeno número se encontra entre a fase higienista e corretiva.

A urbanização trouxe diversos problemas na infraestrutura das cidades e no uso do solo que impactam diretamente os recursos hídricos urbanos. Entre os principais problemas enfrentados nos países em desenvolvimento, como o Brasil, pode-se citar a grande concentração populacional em pequenas áreas e o aumento da periferia da cidade de forma descontrolada. Ambas as regiões são desprovidas ou deficientes de serviços de saneamento, transporte e segurança, além de contarem com poluição do ar e da água e inundações frequentes (TUCCI, 2006, 2012b).

Além disso, o aumento da densidade populacional gera o conseqüente aumento da demanda de água e da geração de efluentes domésticos que, muitas vezes, são descartados sem tratamento nos rios próximos às cidades, deteriorando a qualidade das águas e criando potenciais riscos ao abastecimento da população e, conseqüentemente, à saúde. Há também o surgimento da cidade formal e informal. Na primeira, ocupada pela população de renda média e alta, há um melhor planejamento e gestão do espaço urbano. Na segunda, ocupada pela população de baixa renda, não há planejamento do espaço, sendo observada apenas as tendências de ocupação a qual ocorre sobre áreas de risco de inundações e/ou deslizamentos. A expansão irregular sobre as áreas de mananciais compromete a sustentabilidade hídrica dos municípios. Já a falta de drenagem urbana associada ao aumento da impermeabilização do solo e a canalização dos rios urbanos causa o aumento da vazão de cheia e de sua frequência e inundações frequentes (TUCCI, 2006, 2012b).

Esses problemas ocorrem, principalmente, devido à incapacidade do município de antecipar a urbanização por meio do planejamento de forma a permitir o investimento em espaços seguros e adequados como base do desenvolvimento urbano. A carência de uma gestão organizacional que associe o solo urbano a sua infraestrutura gera, muitas vezes, legislações equivocadas de controle do espaço urbano. Ainda, o déficit de emprego e migrantes de baixa renda, sem capacidade de investimento, aumentam a população de baixa renda e com pouco poder aquisitivo de moradia, fazendo com que esse grupo ocupe as áreas precárias de infraestrutura ou áreas de risco do município (TUCCI, 2006).

Pode-se considerar também a falta de conhecimento generalizado por parte tanto da população quanto dos profissionais de diferentes áreas em avaliar os problemas e suas causas, adotando, muitas vezes, medidas menos racionais e sustentáveis. Como exemplo, pode-se citar a solicitação, por parte da população, da canalização de cursos d'água toda vez que ocorre alguma inundação, transferindo esse problema para a jusante e deixando as obras mais caras que uma medida de controle local. Alguns profissionais ainda têm uma concepção inadequada

de planejamento e controle de sistemas e uma visão setorizada do planejamento urbano como um todo, deixando de lado a questão ambiental. Além disso, os municípios não apresentam uma boa estrutura gerencial dos sistemas hídricos urbanos de forma integrada (TUCCI, 1999, 2006; TUCCI; BERTONI, 2003).

Tucci e Bertoni (2003) ressaltam que grande parte dos problemas relacionados às águas urbanas é consequência de profissionais que priorizam projetos localizados sem ter a visão da bacia hidrográfica e dos aspectos sociais e institucionais das cidades. Ainda, os países em desenvolvimento priorizam as medidas estruturais que muitas vezes são ações menos sustentáveis, enquanto os países desenvolvidos priorizam a prevenção dos problemas com medidas não-estruturais, que são, de certa forma, mais econômicas e sustentáveis.

Diante disso, pode-se afirmar que a urbanização gerou a concentração da população em um espaço reduzido, competindo pelos mesmos recursos naturais, levando à deterioração do meio ambiente natural e diminuindo a qualidade de vida da sociedade. Isso mostra que o meio ambiente é dinâmico e que todos os seus componentes estão interligados e são interdependentes, devendo, portanto, serem tratados de forma holística no planejamento e gestão do espaço urbano a fim de garantir um desenvolvimento sustentável.

3.2 O planejamento municipal

Em uma sociedade em que o uso da água é crescente e múltiplo e que seus usuários tendem a ocupar espaços inadequados e danificar o meio ambiente, o planejamento da ocupação da bacia hidrográfica é fundamental, implicando no desenvolvimento sustentável da mesma, onde deve haver o aproveitamento racional dos recursos naturais com o mínimo dano ao meio ambiente (TUCCI, 2012a).

Dentro da bacia hidrográfica, a cidade é um de seus usuários de recursos hídricos ao retirar água para abastecimento da população e lançar seus efluentes. Essas ações, quando realizadas de forma não sustentável, resultam em impactos, como as enchentes e inundações e a contaminação dos corpos hídricos a jusante, que são transferidos para o restante da bacia hidrográfica e atingem os próprios habitantes do município. Portanto, a regulação e o controle de normas e padrões podem ser estabelecidos através de leis ambientais e de recursos hídricos em nível federal ou estadual (TUCCI, 2012b).

A Lei Federal nº 9.433/1997, mais conhecida como a Lei das Águas, instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos. Ela estabelece a bacia hidrográfica como unidade territorial de

gestão dos recursos hídricos, sendo esta gestão articulada com a do uso do solo e integrada com a gestão ambiental, sem dissociar os aspectos qualitativos e quantitativos da água. Um de seus instrumentos é o Plano de Recursos Hídricos, o qual é um plano diretor elaborado por bacia hidrográfica e tem o objetivo de “fundamentar e orientar a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e o gerenciamento dos recursos hídricos” da bacia. Na execução do plano e implementação da política, o poder executivo municipal deve promover a integração dela com as demais políticas locais, como a de saneamento básico, de uso, ocupação e conservação do solo e do meio ambiente (BRASIL, 1997).

Enquanto cabe aos comitês e agências de bacia hidrográfica a gestão do espaço da mesma por meio do plano de recursos hídricos da bacia a fim de garantir a quantidade e qualidade de todos os rios do seu território, sem a transferência dos impactos, cabe ao município a gestão do seu espaço de forma a não disseminar a jusante os impactos causados nos recursos hídricos e isso pode ser feito por meio do estabelecimento de medidas e ações definidas nas legislações municipais. Nesse sentido, há alguns instrumentos que podem ser utilizados, como o plano diretor municipal e os planos setoriais (TUCCI, 2012b).

Apesar do processo de urbanização no Brasil ter começado na década de 1970, foi apenas em 2001 que foi promulgada a Lei Federal nº 10.257/2001, denominada Estatuto da Cidade. Ela estabelece normas para que os municípios planejem seu desenvolvimento de forma sustentável por meio de instrumentos que asseguram à população o crescimento planejado e ordenado do território. O seu principal instrumento é o plano diretor, o qual delimita a área urbana e orienta o uso e a ocupação do solo, integrando o crescimento da cidade com a proteção do meio ambiente natural e assegurando a qualidade de vida à população. A partir dele que se define as áreas de risco de desastre, como as áreas suscetíveis à ocorrência de inundações e deslizamento e as áreas verdes, visando a diminuição da impermeabilização da cidade (BRASIL, 2001; SANTIN; CORTE, 2010).

Outro instrumento do Estatuto da Cidade que diz respeito ao planejamento municipal são os planos setoriais (BRASIL, 2001) que estão associados a políticas públicas, como a de saneamento, saúde, mobilidade, meio ambiente, educação, entre outras, e muitas vezes já são exigidos pelas diretrizes do plano diretor municipal. Alguns planos já são exigidos por lei federal, como o plano de saneamento básico e o plano de resíduos sólidos.

Apesar do saneamento ter se originado junto às cidades, apenas em 2007 que se promulgou a Lei Federal nº 11.445/2007 a qual estabelece as diretrizes para o saneamento

básico no Brasil. Ele é composto pelos serviços de abastecimento de água potável (abrange desde a captação até as ligações prediais); esgotamento sanitário (contempla a coleta, o tratamento e a disposição final adequada dos esgotos sanitários); limpeza urbana e o manejo de resíduos sólidos (contempla a coleta, o transporte, transbordo, tratamento e destino dos resíduos sólidos domiciliares e dos resíduos da limpeza urbana); e drenagem e manejo de águas pluviais urbanas (contempla o transporte, a detenção ou retenção para o amortecimento de vazões de cheias, tratamento e disposição final das águas pluviais drenadas de áreas urbanas, além da limpeza e fiscalização preventiva das redes) (BRASIL, 2007a).

O município é o titular dos serviços de saneamento e deve elaborar o plano de saneamento básico, sendo esta uma condição obrigatória para o município validar os contratos de prestação dos serviços públicos de saneamento. Além disso, a lei define que o plano deve ser compatível com o plano de bacia hidrográfica, o plano diretor municipal e outros planos setoriais. O Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) é a principal ferramenta de planejamento e gestão da prestação dos serviços públicos de saneamento básico no município (BRASIL, 2007a).

A Lei Federal do Saneamento Básico foi atualizada em 2020 pela Lei Federal nº 14.026, conhecida pelo novo marco regulatório do saneamento. No que se refere à drenagem e manejo de águas pluviais urbanas, houve algumas alterações e adições na lei. A primeira delas está no art.2º, inciso IV, onde há a adição do tratamento das redes de drenagem e dos serviços desse componente serem realizados de forma adequada à proteção do meio ambiente e, também, além da saúde pública, da segurança da vida e do patrimônio público e privado. No art. 3º, inciso I, letra “d” há a adição da limpeza e fiscalização preventiva das redes de drenagem. Há também a adição do art. 3º-D, o qual considera que os serviços públicos de manejo das águas pluviais urbanas são aqueles constituídos por pelo menos uma das seguintes atividades:

I - drenagem urbana;

II - transporte de águas pluviais urbanas;

III - detenção ou retenção de águas pluviais urbanas para amortecimento de vazões de cheias; e

IV - tratamento e disposição final de águas pluviais urbanas (BRASIL, 2020).

No art. 7º, inciso III, há a adição da limpeza de dispositivos de drenagem de águas pluviais e da limpeza de córregos. E no art. 29, inciso III, há a adição de tarifas e outros preços públicos, além das taxas, nos tributos relacionados à cobrança pelos serviços de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas (BRASIL, 2020).

3.3 As águas no meio urbano

O uso e a ocupação do solo estão diretamente ligados à demanda dos recursos hídricos e dos serviços de saneamento básico: quanto maior a concentração populacional, maior será a demanda de água, a produção de esgoto e a geração de resíduos, além da impermeabilização do solo afetando a drenagem urbana. Assim, exige-se cada vez mais dos serviços públicos de saneamento básico.

Desse modo, ao contemplar o saneamento no planejamento urbano de forma integrada, embasado na gestão institucional, pode-se garantir a conservação da água, o seu uso eficiente e a mitigação dos seus impactos e, assim, atingir a meta de conservar a qualidade de vida da população e do meio ambiente, como é apresentado na Figura 3.1 (TUCCI, 2012b). A Lei Federal nº 11.445/2007 traz como um dos princípios a integração dos serviços de saneamento e com uma gestão eficiente dos recursos hídricos.

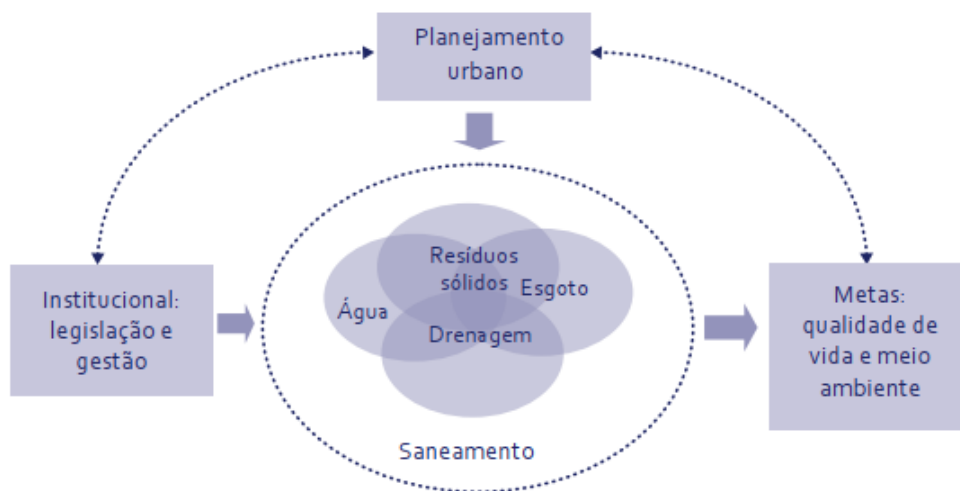


Figura 3.1 - Concepção estratégica da gestão integrada das águas urbanas
Fonte: Tucci (2009 *apud* TUCCI, 2012b)

De modo mais específico, pode-se observar a interrelação entre cada sistema do saneamento e o uso do solo. Ao ocupar o solo, o ser humano o modifica, e quando isso ocorre sem o planejamento adequado, os impactos se intensificam. A população, ao ocupar áreas de risco, como as áreas de várzeas que correspondem ao leito maior do rio, está sujeita às inundações naturais. Ao ocupar morros urbanos com grandes inclinações, está sujeita a deslizamentos após um período chuvoso. Além disso, a tendência da urbanização é de impermeabilizar o solo, diminuindo a infiltração da água pluvial no solo e aumentando o escoamento superficial. Aliado a isso, a canalização dos cursos d'água urbanos provoca a redução da capacidade de armazenamento natural dos deflúvios, acelerando o escoamento,

aumentando os picos de vazão e, conseqüentemente, as inundações. A rede de drenagem urbana ainda sofre mais impactos quando o sistema de coleta e limpeza dos resíduos sólidos é ineficiente, acarretando o entupimento da rede e causando alagamentos nas vias públicas (TUCCI; BERTONI, 2003; CANHOLI, 2005; TUCCI, 2012b).

O sistema de abastecimento urbano sofre influência direta dos esgotos sanitário e pluvial que, quando não tratados, podem contaminar os mananciais superficiais e subterrâneos. Quando a disposição final dos resíduos sólidos não é feita de maneira adequada, eles também podem contaminar os mananciais com o depósito de resíduos sólidos no seu curso e através da infiltração de poluentes do aterro quando mal administrado. As inundações podem parar o funcionamento do sistema de abastecimento e até mesmo destruir a infraestrutura da rede de drenagem pluvial (TUCCI, 2012b).

Quando há um sistema misto entre esgotamento sanitário e drenagem urbana, a gestão deve ser integrada e há comportamentos diversos entre os períodos com e sem chuva. As inundações podem destruir as estações de tratamento de esgoto (ETE) nesse caso. Quando o sistema é separador, há interferências construtivas e de gestão, pois, muitas vezes, há ligações de esgoto sanitário na rede de drenagem e vice-versa. Isso torna o funcionamento do sistema, principalmente o tratamento do esgoto, ineficiente, já que em épocas de chuva há uma vazão maior do que a projetada para ser tratada na ETE (TUCCI, 2012b).

3.3.1 O sistema de drenagem urbana

De acordo com o estabelecido pela Lei Federal nº 11.445/2007, o sistema de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas é constituído “pelas atividades, pela infraestrutura e pelas instalações operacionais de drenagem de águas pluviais, transporte, detenção ou retenção para o amortecimento de vazões de cheias, tratamento e disposição final das águas pluviais drenadas, contempladas a limpeza e a fiscalização preventiva das redes”. Por essa definição, observa-se a tendência da preocupação com a degradação ambiental e com o descontrole dos escoamentos na rede artificial e natural de drenagem (MIGUEZ *et al.*, 2016).

Tucci (2006) conceitua a drenagem urbana como o sistema que integra a rede de coleta da água originada da precipitação sobre as superfícies urbanas, o seu tratamento e retorno aos rios. Porto *et al.* (2012) trazem um sentido mais amplo para o termo drenagem urbana, considerando-o como um conjunto de medidas que visam a minimização dos riscos que a população está sujeita, a diminuição dos impactos e prejuízos causados pelas inundações e um desenvolvimento urbano mais harmônico, articulado e sustentável.

Tucci e Bertoni (2003) dividem o sistema de drenagem em três: na fonte, microdrenagem e macrodrenagem. Já Porto *et al.* (2012) consideram a microdrenagem e a macrodrenagem como os níveis principais de dimensionamento. Nesse caso, a drenagem na fonte é incorporada pela microdrenagem.

A drenagem na fonte representa o escoamento que ocorre no lote, em um condomínio, em estacionamentos, parques e passeios. A microdrenagem envolve o sistema de condutos pluviais a nível de loteamento ou de rede primária urbana, e é projetado para atender à drenagem de precipitações de risco moderado. Ela coleta água de escoamentos oriundos das edificações, ruas, calçadas, sarjetas, galerias, entre outras estruturas. Já a macrodrenagem engloba os sistemas coletores de diferentes sistemas de microdrenagem e é projetado para atender à drenagem de precipitações superiores as da microdrenagem. A macrodrenagem da zona urbana corresponde a sua drenagem natural já existente no terreno antes da ocupação, constituída pelos córregos, ribeirões e rios localizados nos talwegues e vales (MARTINS, 1995; TUCCI; BERTONI, 2003).

As interferências na macrodrenagem surgem da necessidade de suportar maiores vazões afluentes devido às estruturas de microdrenagem implantadas, que aumentam a velocidade com que os deflúvios saem da bacia e reduzem o tempo de concentração. As interferências também podem ocorrer em função da ocupação dos leitos secundários dos cursos d'água, do aumento do aporte de sedimentos em função do manejo inadequado e desmatamento dos terrenos e do descarte incorreto dos resíduos sólidos, da necessidade de ampliação da malha viária e de saneamento de áreas alagadiças. Esses fatores, somados ao planejamento e gestão inadequados da ocupação da bacia e da conservação da qualidade ambiental, interferem na drenagem natural, a degradando (MARTINS, 1995).

As respostas advindas dessas interferências sobre os processos naturais compõem-se num dos fatores mais importantes que afetam a produção de água na bacia hidrográfica. A urbanização é caracterizada, principalmente, pela ocupação das várzeas e impermeabilização do solo, provocando a diminuição da capacidade de infiltração e, conseqüentemente, o aumento do escoamento superficial, fator de grande influência no aumento de inundações no meio urbano (RIGHETTO, 2009). Segundo Porto *et al.* (2012), as alterações do escoamento superficial direto são as principais conseqüências da urbanização na drenagem urbana, como é observado de forma resumida na Figura 3.2. Canholi (2005) reforça a abordagem da drenagem urbana como um problema de alocação de espaços, ou seja, as águas que deveriam estar em um

espaço naturalmente alagável e que foi ocupado, se deslocarão para outras áreas, podendo gerar inundações em espaços anteriormente seguros.

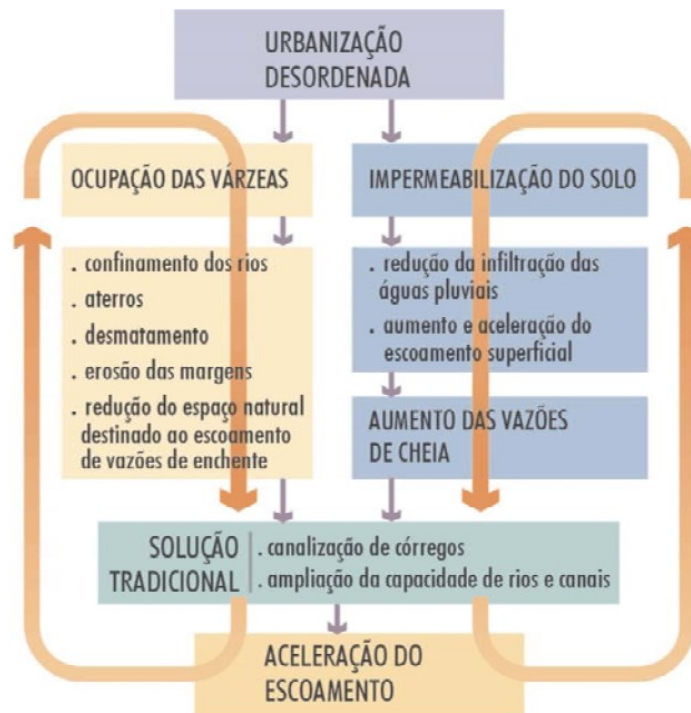
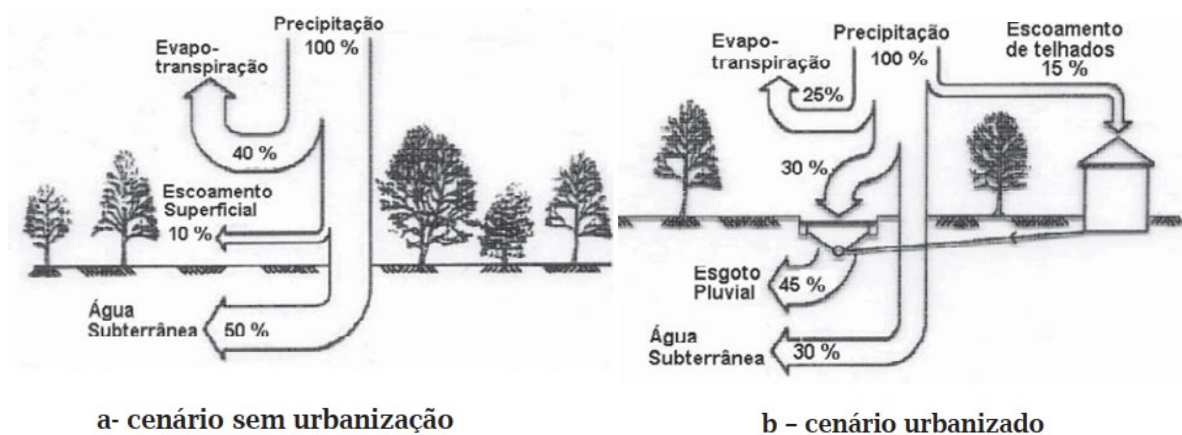


Figura 3.2 - Processo de impacto da drenagem urbana

Fonte: Sudersha (2002 *apud* TUCCI, 2006)

De acordo com Tucci e Genz (1995), o impacto da urbanização no escoamento e nas alterações no comportamento hidrológico de uma bacia urbana podem ser analisados sob os aspectos do balanço hídrico, das enchentes e das estiagens. O balanço hídrico antes e depois da urbanização pode ser observado na Figura 3.3.



a - cenário sem urbanização

b - cenário urbanizado

Figura 3.3 - Balanço hídrico numa bacia urbana

Fonte: OECD (1986 *apud* TUCCI, 2006)

De acordo com Miguez *et al.* (2016), a urbanização altera o ciclo hidrológico, modificando suas parcelas e o balanço hídrico da bacia urbanizada. O balanço hídrico se altera com o aumento do escoamento superficial e a redução da infiltração de água no solo (escoamento de base) e da evapotranspiração. Em uma bacia urbanizada, o aquífero ainda pode receber parte da água da rede de abastecimento de água, por meio das perdas nas tubulações. Há também perdas na rede de drenagem e de esgoto, além do material percolado das fossas sépticas, sendo que nesses casos, pode haver contaminação do aquífero. Já as perdas por evapotranspiração se alteram conforme a época do ano e o clima, pois em períodos com alta temperatura, a perda por evaporação da superfície impermeável pode ser alta. Porém, como o escoamento é rápido nas bacias urbanas, a tendência é que ocorra redução da evapotranspiração (TUCCI; GENZ, 1995). A redução da cobertura vegetal para dar lugar a agricultura ou a expansão urbana provoca a redução do efeito da interceptação de parte da precipitação que pode gerar escoamento, tira a proteção do solo, causa assoreamento nos rios e, conseqüentemente, aumenta a frequência de inundações (TUCCI, 2012c).

Em relação as enchentes, o hidrograma de cheia é alterado devido as modificações do solo ocasionadas pela urbanização, onde, devido a impermeabilização do solo, o escoamento ocorre, principalmente, pelos condutos e canais, reduzindo a infiltração e aumentando o volume de água pluvial escoado pela superfície (Figura 3.4). Como a capacidade do escoamento nas sarjetas, condutos e canais é superior à dos cursos d'água naturais, o escoamento superficial chega mais rápido à seção principal, provocando vazões maiores que as naturais (TUCCI; GENZ, 1995). Segundo Porto *et al.* (2012), em casos extremos, o pico de cheia numa bacia urbanizada pode chegar a ser seis vezes maior do que o pico nesta mesma bacia em condições naturais.

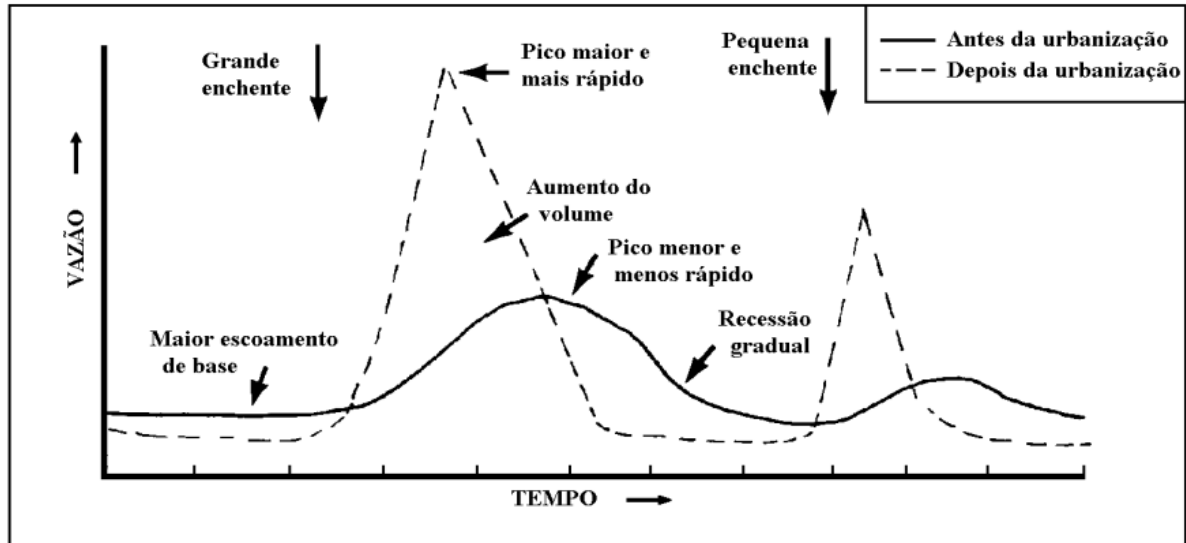


Figura 3.4 - Hidrogramas de cheia antes e depois da urbanização

Fonte: Schueler (1987 *apud* TUCCI, 2006)

Já as estiagens estão associadas a redução da recarga dos aquíferos devido ao menor volume de água infiltrado no solo, consequência da impermeabilização do solo, produzindo o rebaixamento do lençol freático e a diminuição das vazões durante o período de estiagem, como observa-se pelo menor escoamento de base na Figura 3.4 (TUCCI; GENZ, 1995). Esse fator reforça a interrelação entre os sistemas de águas urbanas, onde o uso e ocupação do solo desordenado aliado a um sistema de drenagem ineficiente pode contribuir para a redução das vazões de mananciais de abastecimento de água.

Tucci (1995, 1997) e Miguez *et al.* (2016) resumem os principais impactos da urbanização na drenagem urbana: canalização; retirada da cobertura vegetal; aumento do escoamento superficial, da vazão máxima dos hidrogramas e da antecipação dos picos; ampliação das enchentes e inundações e suas frequências; redução da evapotranspiração e do escoamento subterrâneo; redução da vazão no período de estiagem; aumento da produção de sedimentos e resíduos sólidos; deterioração da qualidade das águas superficiais devido ao carreamento do material sólido pelas chuvas; degradação da qualidade da água pluvial drenada pelas redes; assoreamento da drenagem, com redução da capacidade de escoamento das galerias e canais naturais; e contaminação dos aquíferos.

As inundações urbanas são um dos principais impactos sobre a sociedade e da má gestão do sistema de drenagem urbana. As inundações, no geral, são fenômenos naturais, mas que podem se intensificar devido às alterações feitas na bacia, como a urbanização, e os problemas resultantes variam de acordo com o grau de ocupação da várzea do curso d'água pela população.

Elas são geradas devido a dois processos que ocorrem de forma isolada ou em conjunto: as inundações de áreas ribeirinhas e as inundações devido à urbanização (TUCCI, 2008, 2012c).

As inundações de áreas ribeirinhas são fenômenos naturais que ocorrem quando o escoamento atinge níveis superiores ao leito menor, atingindo o leito maior por causa da variabilidade temporal e espacial da precipitação e do escoamento na bacia hidrográfica (Figura 3.5). Os impactos ocorrem quando a população ocupa essa área já que não há restrições no plano diretor municipal ou devido a invasões pela população de baixa renda, já que são áreas com frequência menor de inundações, sendo razão suficiente para a ocupação. Porém, quando o evento ocorre, os prejuízos são significativos (TUCCI, 1995, 2008). Nessas áreas, costuma-se utilizar medidas não-estruturais, pois os custos das medidas estruturais são muito altos (TUCCI, 2012b).

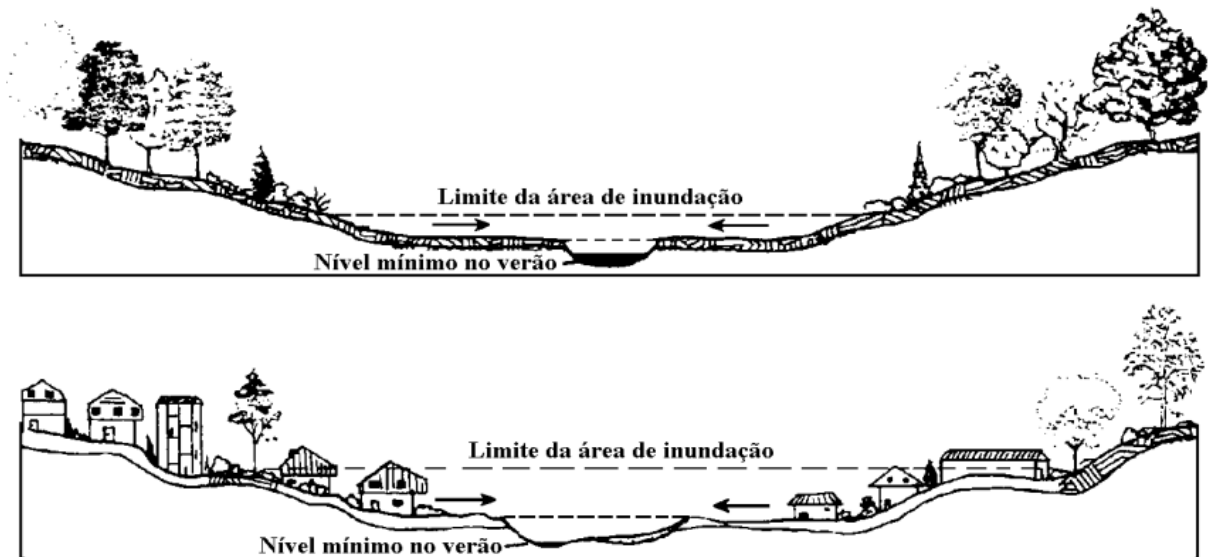


Figura 3.5 - Leito maior do rio antes e depois da urbanização

Fonte: Schueler (1987 *apud* TUCCI, 2006)

As inundações devido à urbanização são as inundações ampliadas pelo efeito da urbanização, ou seja, impermeabilização do solo, canalização do escoamento e obstruções do escoamento, provocando o aumento das vazões máximas e da sua frequência, a antecipação do pico e o aumento do volume do escoamento superficial. A situação é agravada pelo aumento da produção de sedimentos devido à falta de proteção das superfícies pela cobertura vegetal e pela produção de resíduos sólidos, que obstruem rios, canais e condutos e deterioram a qualidade da água superficial e subterrânea (TUCCI, 1995, 2008). Em casos em que há áreas sem construções ainda, utilizam-se medidas não-estruturais, como a legislação, a fiscalização, o controle e os mecanismos de incentivos econômicos. Para áreas já construídas, utilizam-se medidas

estruturais que priorizam o amortecimento do escoamento na fonte ou na macrodrenagem (TUCCI, 2012b).

É possível acontecer impactos combinados de inundações ribeirinhas e drenagem urbana. Isso ocorre quando a cidade, localizada próxima a um rio, começa a crescer, os imóveis na parte mais alta ficam mais valorizados e as pressões para ocupação da várzea de inundação começam. Um canal é construído para conter a inundação atual e, com isso, a população ocupa a planície de inundação até as margens do rio. O crescimento da cidade para a montante do rio contribui para o aumento das vazões e o canal construído não possui mais capacidade para transportar o volume gerado para a bacia nos mesmos riscos de inundações. Assim, torna-se necessário canalizar o rio por longos trechos, o que envolve custos muito altos (TUCCI, 2012b).

Vale lembrar que há diferença entre os termos inundação, enchente e alagamento. A enchente ou cheia é a elevação temporária do nível d'água de um curso d'água devido ao aumento da vazão gerada pela precipitação. A inundação ocorre quando as vazões afluentes superam a capacidade de descarga da calha do curso d'água, assim, a enchente atinge a cota acima do nível máximo da calha principal do rio e ocorre o extravasamento da água para as áreas marginais, denominadas de várzea, leito maior ou planície de inundação. O alagamento é o acúmulo momentâneo de água em uma dada área por problemas no sistema de drenagem, como subdimensionamento, falta de estruturas de escoamento da água ou obstrução por resíduos sólidos descartados incorretamente (BRASIL, 2007b).

Porto *et al.* (2012) abordam as consequências não-hidrológicas trazidas pela urbanização que impactam de forma considerável as questões de drenagem urbana, principalmente em regiões com crescimento acelerado e desorganizado. Entre esses impactos, pode-se citar as consequências sobre a ocupação do solo e as consequências do comportamento político e administrativo. No primeiro caso, há a multiplicação de loteamentos efetuados sem condições técnicas apropriadas, a ocupação de áreas de risco, o aumento de favelas e invasões, e a ocupação extensa e saturada, o que dificulta a construção de canalizações e elimina áreas de armazenamento pluvial. No segundo caso, como há o crescimento acelerado, os diversos setores administrativos disputam recursos financeiros e acaba prevalecendo a tendência de atuar de forma corretiva em pontos isolados. Há também conflitos de interesses que dificultam a execução de medidas para disciplinar a ocupação do território, além de políticas de médio e longo prazo que acabam sendo colocadas em segundo plano.

O controle quantitativo da drenagem urbana ainda é limitado nos países em desenvolvimento e o controle qualitativo da água resultante da drenagem é inexistente, pois os sistemas construídos focam apenas no quantitativo, sem atentar para o controle da qualidade da água. Esse componente depende de diversos fatores, como a limpeza das vias públicas, a intensidade da precipitação e a sua distribuição espacial e temporal, a época do ano e a forma de uso e ocupação da área (TUCCI, 2008).

Quando há um sistema adequado de drenagem da água de chuva, há diversos benefícios, como a redução de perdas materiais e de doenças associadas às águas contaminadas, e à preservação de ecossistemas terrestres e aquáticos e terrestres (MDR, 2020).

3.4 Medidas para o controle da drenagem urbana

A visão higienista de controle dos impactos quantitativos na drenagem urbana se baseia no conceito de escoar a água precipitada o mais rápido possível, tendo como principal consequência o aumento das inundações a jusante devido à canalização. Entretanto, a vertente conservacionista tem ganhado espaço com conceitos mais inovadores com o objetivo de promover o retardamento dos escoamentos, amortecer os picos e reduzir os volumes de enchentes e melhorar as condições de infiltração, agregando um conjunto de ações e soluções de caráter estrutural e não-estrutural (TUCCI, 2003; CANHOLI, 2005; RIGHETTO, 2009).

De acordo com Tucci (2003), projetos baseados na visão higienista podem ter custos insustentáveis, sendo até dez vezes maior do que o custo de amortecer o pico dos hidrogramas e diminuir a vazão máxima para jusante através de uma detenção. Esse tipo de solução segue a visão particular de um trecho da bacia, sem que as consequências sejam previstas para o restante dela ou dentro de diferentes horizontes de ocupação urbana. A canalização dos pontos críticos acaba apenas transferindo a inundação de um lugar para outro na bacia, e o processo ocorre na sequência apresentada na Figura 3.6 (TUCCI, 1995). Assim, no início dos anos 1970, os países desenvolvidos abandonaram esse tipo de solução, porém os países em desenvolvimento ainda adoram essas medidas, tendo maiores custos e prejuízos (TUCCI, 2003).

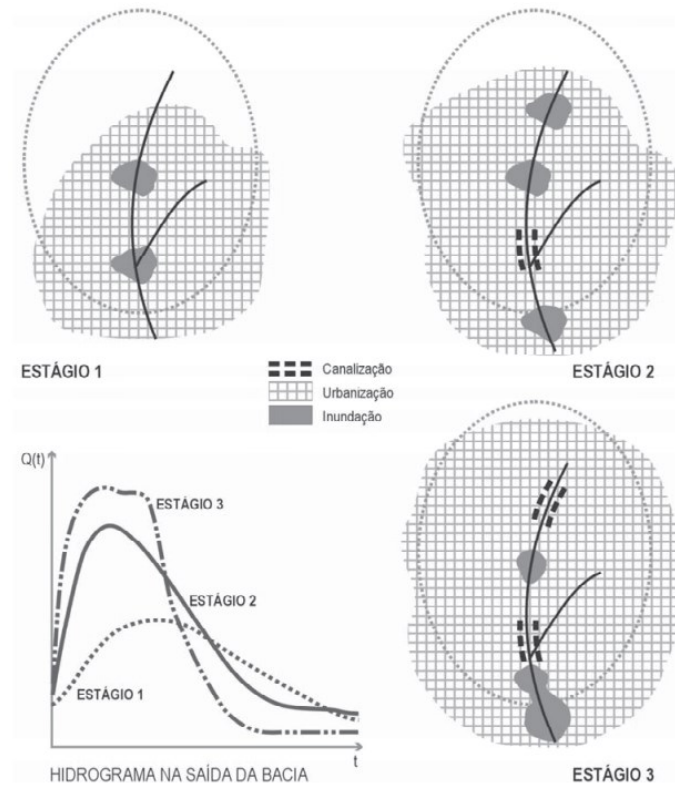


Figura 3.6 - Estágio de desenvolvimento da drenagem

Fonte: Tucci (2006)

Os princípios básicos dos controles de enchentes foram apresentados por Tucci e Genz (1995), sendo eles: as medidas devem considerar a bacia hidrográfica como um todo e não apenas em pontos isolados; considerar medidas estruturais e não-estruturais em conjunto; os cenários de análise devem contemplar o futuro desenvolvimento da bacia; deve-se evitar a ampliação da cheia natural; não transferir os impactos para jusante; o controle de enchentes deve ser permanente; educação de profissionais da área e da população a fim de tomar decisões sustentáveis e conscientes; os meios de implantação do controle de enchentes devem ser estabelecido no plano diretor municipal, no plano diretor de drenagem urbana e pelas leis municipais e estaduais; e a manutenção e controle deve ser feito pela administração pública municipal.

De acordo com Tucci (1997), os princípios citados são aplicados, geralmente, nos países desenvolvidos, enquanto no Brasil, há alguns problemas que dificultam a sua implementação. Nas periferias das grandes cidades, onde o lote tem menor valor agregado, há uma significativa quantidade de loteamentos clandestinos nas áreas privadas. Existe invasão de áreas públicas reservadas pelo plano diretor ou de propriedade pública. As áreas ribeirinhas com risco de inundações são ocupadas, principalmente, pela população de baixa renda. Portanto, essas áreas

citadas não acompanham a regulamentação do plano diretor, dificultando o planejamento, a gestão e o controle sobre elas.

As medidas de controle de inundação podem ser de correção ou prevenção e são classificadas, de acordo com sua natureza, em medidas estruturais e não-estruturais. As medidas estruturais envolvem as obras que modificam o sistema fluvial a fim de corrigir ou prevenir os problemas decorrentes das inundações. Elas podem ser caracterizadas em medidas extensivas e intensivas. As medidas extensivas são as que agem na bacia, buscando modificar as relações entre precipitação e vazão, podendo ser chamadas de medidas hidrológicas, como a recomposição da cobertura vegetal e o controle de erosão do solo (CANHOLI, 2005; TUCCI, 2012c; MIGUEZ *et al.*, 2016).

As medidas intensivas são aquelas que agem diretamente no escoamento da água nos rios e canais. Elas procuram modificar as condições hidrodinâmicas da onda de cheia, podendo ser chamadas de medidas hidráulicas, e são de três tipos:

- Aceleram o escoamento: canalização, diques, aumento da capacidade de descarga do rio e corte de meandros;
- Retardam o escoamento: reservatórios, bacias de amortecimento (detenção e retenção) e restauração de calhas naturais;
- Desviam o escoamento: túneis de derivação e canais de desvios (CANHOLI, 2005; TUCCI, 2012c; MIGUEZ *et al.*, 2016).

Tucci (2006) estabelece uma classificação para as medidas estruturais de acordo com a sua atuação na bacia, sendo elas: distribuídas ou na fonte (é o controle que atua sobre o lote, praças e passeios); na microdrenagem (é o controle que atua sobre o hidrograma resultante de um ou mais loteamentos); e na macrodrenagem (é o controle que atua sobre os rios e canais).

As medidas de controle podem ser organizadas de acordo com a sua ação sobre o hidrograma em cada uma das partes das bacias mencionadas acima:

- Infiltração e percolação: busca recuperar as funções hidrológicas naturais da área ao encaminhar o escoamento para áreas de infiltração e percolação no solo, utilizando o armazenamento e o fluxo subterrâneo para retardar o escoamento superficial;

- Armazenamento: por meio de reservatórios e bacias de amortecimento que podem ocupar espaços abertos ou fechados, retendo parte do volume do escoamento superficial, reduzindo o seu pico e distribuindo a vazão no tempo;
- Aumento da eficiência do escoamento: por meio de condutos e canais, drenando áreas inundadas. Tende a transferir enchentes de uma área para outra, mas pode ser benéfico quando utilizado em conjunto com bacias de retenção;
- Diques e estações de bombeamento: solução tradicional de controle localizado de enchentes em áreas urbanas que não possuam espaço para amortecimento da inundação (TUCCI, 2006).

As medidas não-estruturais são ações indiretas que visam reduzir os danos e consequências das inundações pela melhor convivência da população com o rio. Elas buscam disciplinar a ocupação territorial e o comportamento de consumo das pessoas e atividades econômicas, então elas podem ser agrupadas em: regulamentação do uso e ocupação do solo e zoneamento das áreas de inundação, construções à prova de inundações, seguro-inundação, sistema de previsão e alerta de inundações, e educação ambiental da população para a manutenção dos dispositivos de drenagem a fim de controlar poluição difusa, erosão e lixo (CANHOLI, 2005; TUCCI, 2012c; MIGUEZ *et al.*, 2016).

O controle da inundação deve ser feito por um conjunto de medidas estruturais e não-estruturais, permitindo à população ribeirinha minimizar suas perdas e manter uma convivência equilibrada com o rio. Portanto, o planejamento da proteção contra a inundação e suas consequências se dá por meio da pesquisa e análise de combinação ótima dessas medidas em função das características do rio, do benefício da redução de inundações e dos aspectos sociais do seu impacto. A combinação de medidas não-estruturais e estruturais podem minimizar consideravelmente os prejuízos com um custo menor, já que melhores soluções são alcançadas por meio de uma compreensão mais integrada do ambiente urbano e das relações entre os sistemas que o compõem (TUCCI, 2012c; PORTO *et al.*, 2012).

Miguez *et al.* (2016) trazem a abordagem ecossistêmica para a drenagem urbana que evolui do pensamento reativo de um plano diretor de drenagem convencional para um pensamento proativo e avançado, considerando como componentes integrados e interdependentes, além de enfatizar a orientação e o planejamento das decisões nas alterações do uso do solo, resultando em menores custos.

A partir disso, as regulamentações procuram uma solução ambientalmente sustentável para os novos empreendimentos, com novas abordagens no campo da drenagem urbana, buscando a ocupação do espaço com a preservação das funções naturais, como a infiltração, a evapotranspiração e a rede natural de escoamento. Este tipo de desenvolvimento recebe a denominação Sistemas de Drenagem Urbana Sustentável (SUDS - *Sustainable Urban Drainage Systems*) na Europa, Melhores Práticas de Gerenciamento (BMPs - *Best Management Practices*) nos Estados Unidos, Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID - *Low Impact Development*) nos Estados Unidos e na Nova Zelândia, Cidade Sensível a Água (WSUD - *Water Sensitive Urban Design*) na Austrália, e Técnicas Compensatórias no Brasil. A implantação dessas práticas tem sido recomendada com base na redução de custo da implantação e não necessariamente por meio de legislação específica (MIGUEZ *et al.*, 2016).

Os projetos de SUDS buscam reduzir os escoamentos superficiais por meio de estruturas de controle da água pluvial em pequenas unidades. Dessa maneira, o controle dos escoamentos superficiais realizado na fonte diminui a necessidade de grandes estruturas de atenuação e controle na calha dos rios. Os principais componentes desse sistema são: faixas de filtração, valas de infiltração, bacias de infiltração, bacias de retenção e de detenção, charcos artificiais ou banhados construídos, trincheiras de filtração, dispositivos de infiltração, pavimentos permeáveis e telhados verdes (MIGUEZ *et al.*, 2016).

Os projetos de LID buscam reproduzir o comportamento hidrológico anterior à urbanização e criar uma paisagem funcional que incorpore nos projetos características que simulem as funções de infiltração e armazenamento. Isso é feito por meio da modificação do coeficiente curva-número (CN) característico do local, manutenção do tempo de concentração natural e incorporação de medidas de retenção distribuídas na bacia e de medidas de detenção para manter o volume e o pico de vazão do escoamento superficial (COFFMAN *et al.*, 1998 *apud* MIGUEZ *et al.*, 2016).

No Brasil, Baptista *et al.* (2005 *apud* MIGUEZ *et al.*, 2016) consolidaram os conceitos de técnicas compensatórias em drenagem urbana com foco na infiltração e armazenamento, visando compensar os impactos da urbanização sobre o ciclo hidrológico. Elas podem ser divididas em:

- Técnicas compensatórias não-estruturais: legislação, racionalização do uso do solo urbano, educação ambiental e tratamento de fundo de vale.
- Técnicas compensatórias estruturais:

- Bacias: detenção e retenção, infiltração, e detenção/retenção e infiltração;
- Obras lineares: trincheiras, valas e valetas, e pavimentos (revestimentos, permeáveis e pavimentos reservatórios);
- Obras pontuais: poços de infiltração, telhados verdes e técnicas adaptadas à parcela.

A Figura 3.7 resume e compara as diferenças a visão higienista, voltada para obras de canalização que aceleram o escoamento, e a visão conservacionista, que visam a redução do pico das enchentes por meio do amortecimento das ondas de cheias obtido pelo armazenamento e infiltração de parte do volume escoado (CANHOLI, 2005).

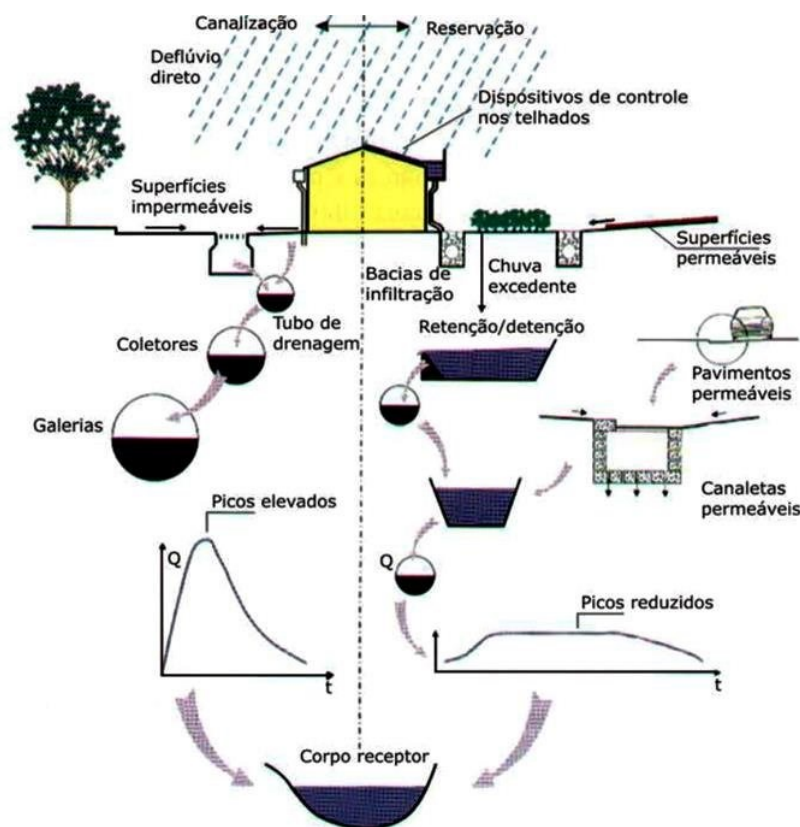


Figura 3.7 - Visão higienista x conceito conservacionista na drenagem urbana

Fonte: Braga (1994 *apud* CANHOLI, 2005)

3.5 Métodos de quantificação do escoamento

O estudo das bacias urbanas ganhou maior importância devido a necessidade de desenvolvimento de técnicas que minimizem os problemas gerados pelo crescimento acelerado e pela falta de planejamento urbano (SOUZA, 2017). Para isso, são necessários métodos que fazem a transformação da chuva em escoamento superficial de forma a possibilitar uma análise quantitativa e qualitativa dos impactos causados pela urbanização.

Os métodos para determinação do escoamento superficial variam conforme a disponibilidade de dados hidrológicos na área de estudo. Dessa forma, eles são divididos em métodos diretos e indiretos.

Os métodos diretos são aqueles que se baseiam apenas nos registros fluviométricos para estimativa da vazão de projeto, por meio de distribuições estatísticas de probabilidades. Entretanto, é comum a ausência de dados fluviométricos, sendo empregados os métodos indiretos de estimativa de vazões. Nesses métodos, são utilizados dados pluviométricos e técnicas de transformação de chuva em vazão (SOUZA, 2017).

De acordo com Gontijo (2007), pode-se classificar os métodos indiretos em quatro grupos: fórmulas empíricas, método racional (para microbacias que não ultrapassem os 2 km²), método do hidrograma unitário e simulação hidrológica por modelos conceituais de precipitações máximas. A escolha do método dependerá do objetivo que se quer alcançar, a disponibilidade de dados, da relevância do projeto e das características da área de interesse.

Canholi (2014) ressalta a importância do uso de modelos computacionais para a simulação hidrológica e hidrodinâmica na drenagem urbana por possuírem um leque maior de opções de modelos conceituais para simulação dos diversos processos envolvidos na drenagem. Isso permite maior flexibilidade na modelagem e maior aplicabilidade dos modelos às diversas situações de projeto existentes.

Righetto (2009) afirma que os modelos computacionais são muito úteis em diversas situações e fases da gestão das águas pluviais urbanas. Eles podem ser empregados na fase de planejamento e de detalhamento de projeto, ou em casos de manutenção corretiva, ou ainda para simular cenários sobre o comportamento de um sistema de drenagem. Os modelos de drenagem urbana buscam representar o escoamento da precipitação pela superfície do terreno, a interceptação, infiltração, evapotranspiração e a interação destes processos com a rede de drenagem de águas pluviais. Isso possibilita a demarcação de áreas inundáveis, a análise estatística dos resultados e a apresentação por meio de mapas, servindo como subsídio para o planejamento e gestão da drenagem.

Garcia (2005) complementa que entender os processos e os reais impactos que ocorrem na bacia ao longo do tempo são indispensáveis para que os administradores e planejadores possam tomar decisões coerentes, com um elevado grau de confiabilidade.

A modelagem hidrológica e da gestão de medidas de controle e demais infraestruturas do ambiente urbano é instrumento essencial para a gestão e manejo das águas pluviais urbanas que oferece as reais possibilidades de se avaliar as vazões de cheia, os níveis e áreas de inundação, as tomadas de decisão e as medidas a serem executadas tanto no quesito técnico quanto econômico. Para o planejamento da ocupação de novas áreas urbanas, pode-se realizar simulações hidrológicas da área antes da ocupação a fim de definir os valores de deflúvios que servirão para a regulamentação da execução de ações voltadas à drenagem da área. Isso possibilita um desenvolvimento espacial harmonioso com a infraestrutura existente (RIGHETTO, 2009).

Os modelos desenvolvidos para simulação da drenagem urbana geralmente compreendem dois componentes sequencialmente conectados: um modelo hidrológico, para transformação da chuva em vazão, e um modelo hidráulico, para a propagação do escoamento em redes de condutos e canais, possibilitando a identificação das possíveis áreas de inundação na bacia hidrográfica (GRACIOSA, 2010).

Os modelos hidrológicos descrevem os processos de transformação da chuva em escoamento superficial através de algoritmos de perdas por armazenamento em depressões, interceptação, perdas por infiltração e de propagação na superfície. Já os modelos de propagação do escoamento podem ser classificados em modelos de armazenamento ou hidrodinâmicos. Os primeiros consideram somente os efeitos do armazenamento na atenuação e no deslocamento da onda de cheia, desprezando os efeitos de atrito levados em conta pela equação do momento. Os modelos hidrodinâmicos utilizam as equações de Saint-Venant e podem ser classificados em simplificados ou completos, de acordo com a consideração ou não dos termos da equação do momento (RIGHETTO, 2009).

3.5.1 Modelo de Gestão de Drenagem Urbana - Storm Water Management Model (SWMM)

O modelo SWMM (*Storm Water Management Model* – Modelo de Gestão de Drenagem Urbana) foi desenvolvido pela USEPA (*United States Environmental Protection Agency*) e, ao longo dos anos, obteve diversos melhoramentos. O modelo é composto por vários módulos, o que possibilita diversos estudos de hidrologia urbana e de qualidade de água. Atualmente, o SWMM é o software mais utilizado para simulação da drenagem urbana, principalmente por ser de domínio público e ter seu código de programação aberto, permitindo modificações. Além disso, ele é bastante difundido e com grande aplicação para bacias urbanas, tornando-se uma

ferramenta eficiente para os gestores municipais para melhorar o gerenciamento das águas urbanas (RIGHETTO, 2009).

O SWMM é um modelo dinâmico de chuva-vazão que simula a quantidade e a qualidade do escoamento superficial, principalmente em áreas urbanas, e pode ser utilizado tanto para a simulação de um único evento chuvoso quanto para uma simulação contínua de longo prazo. Ele pode ser aplicado em estudos de redes de drenagem de águas residuárias e de águas pluviais. Entre as aplicações, está a concepção e dimensionamento de componentes da rede de drenagem para controle de inundações, o dimensionamento de estruturas de retenção e acessórios para o controle de inundações e a proteção da qualidade das águas, a delimitação de zonas de inundação em leitos naturais, a concepção de estratégias de controle para minimizar o transbordamento de sistemas unitários e mistos, a avaliação do impacto de contribuições e infiltrações sobre o transbordamento de sistemas de drenagem de águas residuárias, a geração de poluição difusa para estudos de lançamento de efluentes e a avaliação da eficácia das Boas Práticas de Manejo (BMPs) para reduzir o carreamento de poluentes durante a chuva (USEPA, 2012).

As versões mais atuais do SWMM se destacam pela presença do editor de Controles por Dispositivos de Baixo Impacto (LID), utilizado para definir controles por dispositivos de baixo impacto que podem ser implantados numa área de estudo para armazenar, infiltrar e evaporar a água escoada na superfície da sub-bacia. Também conta com o dispositivo de Unidade de Armazenamento, que permite fazer a retenção de parte da onda de cheia, subtraindo parte do escoamento superficial por meio de sistemas artificiais combinados de retenção, infiltração e evapotranspiração (ROSSMAN, 2015).

O SWMM possui quatro módulos, sendo eles:

- Módulo Atmosférico: onde ocorre a precipitação e depósito dos poluentes sobre a superfície do solo e utiliza o objeto pluviômetro para representar as entradas de chuva no sistema;
- Módulo Superfície do Solo: recebe a precipitação do módulo anterior sob a forma de chuva ou neve, exporta o fluxo de água por meio da infiltração (módulo de Águas Subterrâneas), do escoamento superficial e do carreamento de poluentes para o módulo Transporte. É representado pelo objeto da sub-bacia;

- Módulo Águas Subterrâneas: recebe a infiltração do módulo anterior e transfere uma parte para o módulo Transporte como fluxo de entrada. É representado pelo objeto aquífero;
- Módulo Transporte: possui uma rede com elementos de transporte (canais, tubulações, bombas e elementos de regulação) e unidades de armazenamento e tratamento, que transportam a água para os nós exutórios ou para estações de tratamento. Os fluxos de entrada podem vir do escoamento superficial, da interação com o fluxo subterrâneo, de escoamento de águas residuárias ou de hidrogramas de entrada definidos pelo usuário. Esse módulo utiliza os objetos de nós e trechos (USEPA, 2012).

As sub-bacias conduzem o escoamento diretamente para um único ponto de descarga, podendo ser um nó ou outra sub-bacia. Elas podem ser divididas em áreas permeáveis e impermeáveis, sendo que nas primeiras pode ter infiltração de água na camada superior do solo. As áreas impermeáveis podem ser divididas em duas subáreas: uma que possui armazenamento em depressão e outra que não possui (USEPA, 2012).

A infiltração da chuva para a zona não saturada do solo pode ocorrer mediante três modelos diferentes: o modelo de infiltração de Horton, o modelo de infiltração de Green-Ampt e o modelo de infiltração baseado na Curva Número (CN) do SCS. No caso deste trabalho, utilizou-se o modelo do CN-SCS (USEPA, 2012).

O método Curve Number (CN) do SCS é uma aproximação adotada a partir do denominado Número da Curva (CN), desenvolvida pelo *National Resources Conservation Service* (NRCS, 2004) para estimativa do escoamento superficial. Neste método, considera-se que a capacidade de infiltração total pode ser estimada a partir do CN, tabelado de acordo com o tipo de cobertura e grupo hidrológico do solo e pela sua condição anterior de umidade. Durante um evento de chuva, a capacidade de infiltração é deplecionada em função da precipitação acumulada e da capacidade de infiltração remanescente. O cálculo da precipitação efetiva é realizado pela Equação 3.1.

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde:

- P_e é a precipitação efetiva acumulada (mm);
- P é a precipitação acumulada (mm);

- I_a é a infiltração inicial (mm);
- S é a infiltração potencial máxima (mm).

Somente após o preenchimento da parcela de infiltração inicial é que pode haver escoamento superficial. O método sugere que I_a seja uma parcela de 20% de S .

A infiltração potencial máxima (S) é a capacidade máxima de armazenamento da bacia e está em função do número da curva (CN), estimada a partir do emprego da Equação 3.2.

$$S = \frac{25400 - 254 * CN}{CN} \quad \text{Equação 3.2}$$

Os nós de conexão são objetos que conectam diferentes trechos entre si e podem representar poços de visita do sistema de drenagem, confluência de canais superficiais naturais ou elementos de conexão de tubulações. Os nós permitem a entrada de contribuições externas no sistema e o excesso de água em um nó pode conduzir a um escoamento parcialmente pressurizado ou a uma perda de água para o sistema ou a um alagamento no terreno acima do nó que gradualmente voltará ao sistema (USEPA, 2012).

Os condutos são canais ou tubulações que transportam água de um nó para outro e podem possuir diversas geometrias. O modelo SWMM utiliza a equação de Manning (Equação 3.3) para estabelecer a relação entre a vazão que escoar pelo conduto, a área transversal, o raio hidráulico e a declividade (USEPA, 2012).

$$Q = \frac{1}{n} * A * R_h^{\frac{2}{3}} * \sqrt{S} \quad \text{Equação 3.3}$$

Onde:

- “ n ” é o coeficiente de rugosidade de Manning;
- A é a área da seção transversal (m^2);
- R_h é o raio hidráulico (m);
- S é a declividade do conduto mediante modelo de propagação da Onda Cinemática ou a declividade hidráulica do fluxo, isto é, a perda de carga por unidade de comprimento para modelo da Onda Dinâmica.

Os objetos Controle por Dispositivos de Baixo Impacto são projetados para subtrair parte do escoamento superficial por meio de processos artificiais combinados de retenção, infiltração e evapotranspiração. O SWMM permite modelar oito tipos de controle LID, sendo eles:

- Células de biorretenção: depressões que contêm vegetação cultivada em uma mistura de solo colocada acima de um leito de drenagem de cascalho. Elas permitem armazenamento, infiltração e evaporação tanto da chuva direta quanto do escoamento capturado das áreas vizinhas;
- Jardins de chuva: são um tipo de célula de biorretenção que consiste apenas na camada de solo sem nenhum leito de cascalho abaixo dela;
- Telhados verdes: são uma outra variação de uma célula de biorretenção que têm uma camada de solo sobre um material especial de drenagem que transporta o excesso de chuva percolada para fora do telhado;
- Trincheiras de infiltração: são valas escavadas e estreitas preenchidas com cascalho que interceptam o escoamento de áreas impermeáveis. Permitem armazenamento e infiltração e proporcionam o amortecimento da onda de cheia;
- Pavimentos permeáveis: são áreas escavadas preenchidas com brita e pavimentadas com concreto poroso, asfalto poroso ou elementos vazados. Permitem armazenamento de água na camada de material granular e infiltração no solo nativo;
- Cisternas: são recipientes que coletam a água de chuva escoada do telhado, permitindo sua posterior utilização;
- Desconexão de telhado: permite que as calhas sejam descarregadas em áreas ajardinadas e gramados permeáveis, em vez de diretamente em bueiros;
- Valas de infiltração: são canais ou depressões com paredes laterais inclinadas cobertos com grama e outra vegetação. Elas permitem o armazenamento e retardamento do escoamento da água e posterior infiltração no solo nativo (ROSSMAN, 2015).

Os controles LID são representados pela combinação de camadas verticais, como apresentado na Figura 3.8.

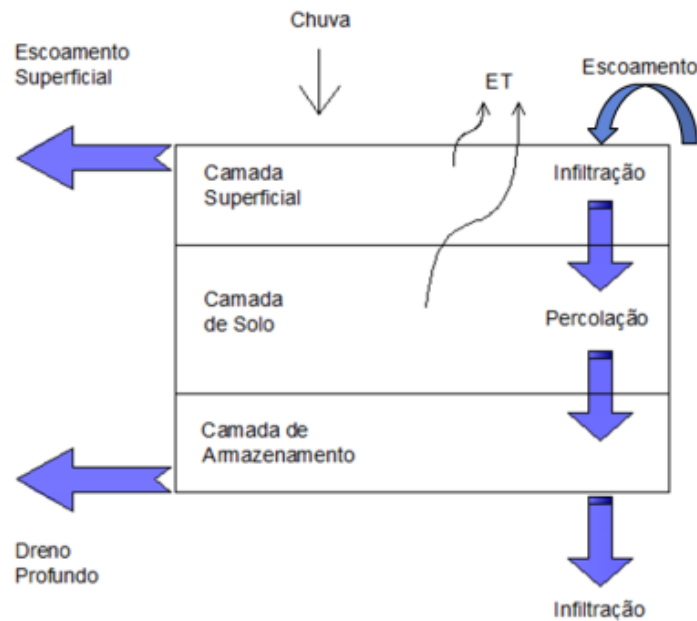


Figura 3.8 - Possíveis camadas de um controle LID no modelo SWMM

Fonte: USEPA (2012)

As possíveis camadas de um controle LID são:

- Camada superficial: corresponde à superfície do solo ou o pavimento que recebe diretamente a chuva e o escoamento de áreas a montante, armazena o excesso de afluência em depressões e gera escoamento superficial que entra no sistema de drenagem ou flui para áreas a jusante;
- Camada de pavimento: camada de concreto ou asfalto poroso utilizado em sistemas de pavimento permeável contínuo, ou são os blocos de pavimentação e material de preenchimento utilizado em sistemas modulares;
- Camada de solo: é a mistura de solo preparada usada em células de biorretenção para manter o crescimento vegetal, ou pode ser uma camada de areia colocada sob uma camada de pavimento para fornecer cama e filtragem;
- Camada de armazenamento: é um leito de material granular que permite o armazenamento de água;
- Sistema de dreno: transporta a água para fora da camada de armazenamento para um conduto ou uma caixa de contenção;
- Camada de tapete de drenagem: é um tapete ou placa colocada entre o meio do solo e o telhado em um telhado verde cuja finalidade é transportar qualquer água que escoe através da camada de solo para fora do telhado (ROSSMAN, 2015).

O conceito do escoamento superficial utilizado no SWMM é representado pela Figura 3.9. Cada sub-bacia é tratada como um reservatório não linear. O fluxo de entrada vem da precipitação e de quaisquer sub-bacias situadas a montante. O fluxo de saída engloba infiltração, evaporação e escoamento superficial (USEPA, 2012).

A capacidade do reservatório é o valor máximo de armazenamento em depressões, que representa os alagamentos de superfícies, encharcamento de solos e interceptação. O escoamento superficial por unidade de área (Q) ocorre apenas quando a profundidade da água no reservatório excede o valor máximo do armazenamento da depressão (d_p), sendo “ Q ” calculado pela equação de Manning. A lâmina d’água (d) sobre a sub-bacia é continuamente recalculada no tempo por meio da resolução numérica do balanço hídrico na sub-bacia (USEPA, 2012).

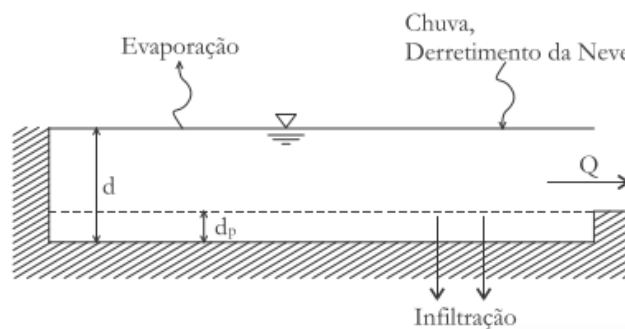


Figura 3.9 - Representação da sub-bacia como um reservatório não-linear no modelo SWMM

Fonte: USEPA (2012)

O modelo de transporte hidráulico do SWMM é governado pelas equações de conservação de massa e da quantidade de movimento, para fluxo gradualmente variado não permanente, ou seja, utiliza-se as equações de Saint Venant em diferentes níveis de detalhamento. Assim, é possível escolher entre três modelos: o Fluxo em Regime Uniforme, a Onda Cinemática e a Onda Dinâmica (USEPA, 2012).

Cada um desses métodos de transporte de água emprega a equação de Manning para relacionar a vazão com a profundidade do fluxo e a declividade do leito. Quando ocorre escoamentos pressurizados em condutos circulares, utiliza-se a equação de Hazen-Williams ou de Darcy-Weisbach (USEPA, 2012).

A propagação pelo Fluxo em Regime Uniforme representa o tipo mais simples de transporte, onde não há nenhuma propagação inclusive, assumindo que em cada intervalo de tempo computacional, o escoamento é uniforme e permanente. Portanto, ele apenas transfere o hidrograma de entrada do nó de montante do conduto para o nó de jusante. Esse modelo é

apropriado apenas em análises preliminares usando simulações contínuas de longo prazo (USEPA, 2012).

Já o modelo da Onda Cinemática resolve a equação de continuidade junto com uma forma simplificada da equação de momento em cada conduto, assumindo que a declividade da superfície da água é igual à declividade de fundo do conduto. Qualquer fluxo em excesso no nó de entrada do conduto é perdido para o sistema ou pode alagar a superfície do nó e ser reintroduzindo no sistema posteriormente (USEPA, 2012).

Esse modelo permite que a vazão e a área variem tanto espacial quanto temporalmente dentro de um conduto, resultando em hidrogramas de vazão amortecidos e atrasados à medida que a vazão de entrada é propagada através do canal. Porém, ele não permite a simulação de efeitos de remanso, ressalto hidráulico, fluxo pressurizado e perdas nas entradas e saídas (USEPA, 2012).

Por fim, o modelo de propagação da Onda Dinâmica, empregado neste trabalho, resolve as equações completas unidimensionais de Saint Venant, gerando, teoricamente, resultados mais precisos. Essas equações consistem nas equações da continuidade e da quantidade de movimento nos condutos e na equação da continuidade dos volumes nos nós (USEPA, 2012).

O modelo permite representar o fluxo pressurizado, inundações no nó, o armazenamento nos condutos, remanso, perdas nas entradas e saídas e ressalto hidráulico. Ele pode ser aplicado a qualquer layout de rede de drenagem, porém se deve usar passos de tempo muito menores, da ordem de trinta segundos ou menos (USEPA, 2012).

3.5.2 Aplicações do modelo SWMM

Na literatura há diversos estudos que buscam verificar o nível de detalhamento mais adequado para representar os sistemas, mas as conclusões são contraditórias e há necessidade de mais estudos aprofundados.

Garcia *et al.* (2004) empregaram o modelo SWMM para avaliar o grau de discretização que deve ser empregado na bacia urbana, localizada em Santa Maria/RS, identificando o ganho de qualidade na representação dos eventos observados. Foram propostas três alternativas: bacia concentrada e bacia dividida em sete e onze sub-bacias. As bacias discretizadas apresentaram melhores resultados para os processos hidrológicos e hidráulicos do que os da bacia concentrada. Porém, os dois graus de discretização não tiveram diferenças significativas.

Constatou-se que uma maior divisão da bacia, sem um aumento no detalhamento dos parâmetros, nem sempre significa mudanças ou melhorias no ajuste dos hidrogramas.

Collodel (2009) também estudou os níveis de detalhamento de uma bacia hidrográfica na modelagem hidrológica no SWMM. Ela verificou que independentemente do nível de detalhamento, é importante considerar a microdrenagem na representação dos sistemas. Além disso, quanto maior o detalhamento na representação da bacia, maior a velocidade de escoamento resultante, devido à baixa rugosidade das galerias pluviais, e maior vazão de pico. Constatou-se que as áreas impermeáveis têm grande influência sobre os hidrogramas, sendo um parâmetro que precisa de uma análise criteriosa na sua determinação.

Nascimento *et al.* (2017) avaliaram a eficiência de modelos hidrológicos implementados na bacia do Córrego Gorduras, pequena bacia urbana localizada em Belo Horizonte/MG, com diferentes formas de discretização espacial. Os modelos computacionais utilizados foram SWMM e o HEC-HMS. Os autores observaram que o modelo concentrado possui maior sensibilidade do que o modelo semi-distribuído. O modelo SWMM exige um maior nível de detalhamento da discretização espacial da bacia e da rede de drenagem quando comparado ao HEC-HMS e os parâmetros mais sensíveis, principalmente no modelo concentrado, foram o coeficiente de Manning nas áreas impermeáveis e da galeria utilizada no estudo, declividade do plano e largura equivalente da bacia. Já no modelo HEC-HMS, o método de propagação do escoamento utilizado interfere de modo significativo nos resultados.

Kokkonen *et al.* (2019) utilizaram o modelo SWMM para avaliar o impacto de diferentes fontes de dados de cobertura do solo com resoluções variadas sobre o resultado de simulação de escoamento urbano em diferentes níveis de densidade urbana. Eles compararam três conjuntos de dados de cobertura da terra diferentes: um conjunto de dados de referência adaptado manualmente para a região de estudo; um conjunto de dados públicos derivado de imagens aéreas que cobrem a região de estudo; e um conjunto de dados de cobertura do solo do Atlas Urbano da Europa derivado de imagens de satélite. Pelos resultados obtidos, pode-se sugerir que o conjunto de dados públicos teve um desempenho igualmente bom em relação ao conjunto de dados adaptado manualmente. No entanto, os tipos mistos de cobertura do solo do conjunto de dados do Atlas Urbano foram problemáticos na descrição de áreas impermeáveis diretamente conectadas, levando a resultados ruins em áreas urbanas de baixa densidade.

Pontes (2019) avaliou a resposta de uma bacia hidrográfica do riacho Reginaldo, em Maceió/AL, frente a dois níveis de discretização dos eventos chuvosos, concentrado e

distribuído por sub-bacia, por meio do modelo SWMM. Avaliou-se os parâmetros de vazão de pico, o tempo de pico, o volume escoado e o volume infiltrado. Todos os eventos analisados apresentaram grandes variações nos parâmetros de avaliação e as principais causas dessas divergências são: diferentes valores de CN para as sub-bacias e a localização dos núcleos chuvosos dos eventos.

Há também diversos trabalhos que buscam analisar o comportamento de diferentes cenários propostos com base na variação do uso e ocupação do solo ao longo do tempo e na implantação de medidas de controle de drenagem, como reservatórios de retenção e detenção e dispositivos LID.

Barros *et al.* (2016) utilizaram o SWMM para estudar a influência da oscilação das características físicas e da distribuição do uso e ocupação do solo na geração de escoamento em áreas urbanas. A área de estudo foi a bacia urbana do riacho do Sapo, em Maceió/AL. Os autores analisaram que a discretização do sistema em sub-bacias foi fundamental para evidenciar a variabilidade da geração do escoamento e as causas conjuntas. A impermeabilização da bacia não foi a única responsável pelo aumento da geração de vazão. A ocupação em áreas de maior declividade e em áreas com solos mais permeáveis contribuíram bastante com o aumento do escoamento. A mudança na vazão de pico é muito influenciada pela parcela impermeável de solo e os parâmetros físicos de largura e declividade média da sub-bacia podem amplificar os efeitos da impermeabilização no processo de propagação do escoamento na superfície da bacia.

Zhou *et al.* (2019) investigaram os impactos do desenvolvimento urbano no escoamento superficial e nos volumes de inundação urbana em uma grande cidade localizada no norte da China, utilizando o modelo SWMM. Os autores compararam os impactos da urbanização com os efeitos induzidos pelas mudanças climáticas sob o cenário atual e o cenário de mitigação climática. Verificou-se que a urbanização aumentou o escoamento superficial anual de 208 a 413%, porém as mudanças nos volumes de inundação urbana variaram dependendo do desempenho do sistema de drenagem ao longo do desenvolvimento. As alterações causadas nos volumes de inundações pela urbanização são muito maiores que os efeitos induzidos pelas mudanças climáticas.

Rodrigues e Santini Junior (2021) estudaram os efeitos do emprego de técnicas compensatórias na sub-bacia hidrográfica Ribeirão do Santa Rita, localizada no município de Fernandópolis/SP, utilizando o modelo SWMM. Analisou-se a vazão de pico e o tempo de resposta de diversos cenários para verificar o potencial de atenuação das inundações. As

técnicas compensatórias foram instaladas isoladamente e em conjunto. Os melhores resultados foram para eventos com tempo de retorno menos. Nos cenários com as técnicas isoladas, a porcentagem de atenuação de pico foi parecida para as trincheiras de infiltração, pavimentos permeáveis e jardins de chuva, sendo na ordem dos 30%. Já o telhado verde conseguiu atenuar a vazão de pico por volta de 12%. O aumento no tempo de resposta foi de até 16 minutos. Já no cenário com todas as técnicas compensatórias juntas, a atenuação da vazão d'épico foi por volta de 37% e o tempo de resposta aumento 18 minutos. Com isso, constatou-se que as técnicas compensatórias podem reduzir a vazão de pico e aumentar o tempo de resposta da sub-bacia, mitigando as ocorrências de inundações.

Alves *et al.* (2022) apresentaram uma estrutura de modelagem de implantação de sistema de drenagem urbana sustentável (SUDS) por meio do SWWM. O estudo visa contribuir para o desenvolvimento de procedimentos para implantação desse tipo de medida com o objetivo de mitigar as enchentes e maximizar os benefícios urbanos, principalmente em territórios heterogêneos, densos e assentamentos precários. O procedimento foi aplicado em uma bacia hidrográfica brasileira e utilizou-se pavimentos permeáveis, sistemas de biorretenção, valas de infiltração e sistemas de captação de água da chuva, introduzidos em áreas públicas e privadas. Foi possível fazer várias configurações de cobertura de SUDS na bacia, levando a diferentes resultados de mitigação de inundações. O SUDS implementado em espaços públicos não evita completamente os alagamentos nas partes mais densas da bacia. Nessas áreas, uma alternativa às possibilidades reduzidas de implantação do SUDS é a implantação em lotes privados, porém é necessária uma abordagem adequada aos moradores. Isso pode ser alcançado por meio de programas que buscam integrar os membros da comunidade no processo de planejamento e tomada de decisão, bem como oferecer oportunidades de educação sobre enchentes e conservação da água e seus benefícios para a comunidade em que vivem.

3.6 Revisão bibliométrica

A fim de pesquisar e quantificar o estado da arte e revisão dos trabalhos já existentes sobre o tema abordado na presente dissertação, foi realizada uma pesquisa bibliométrica. De acordo com Guedes (2005) a bibliometria denota a área de estudo que usa métodos matemáticos e estatísticos para investigar e quantificar processos de comunicação escrita.

Ainda nesse sentido, Coates *et al.* (2001 *apud* Yoshida, 2010) discutem que o conceito de bibliometria (ou análise bibliométrica) se refere à contagem de publicações ou citações encontradas em bases de publicações científicas acadêmicas.

Dito isso, a pesquisa realizada utilizou técnicas avaliativas e relacionais para triagem dos dados e o emprego dos softwares Mendeley, RStudio, e a plataforma *biblioshiny for bibliometrix* para visualização dos resultados. Foi utilizada a base de dados bibliográficos Scopus como fonte de pesquisa dos documentos e o acesso se deu pelo Portal de Periódicos CAPES.

A Scopus é o maior banco de dados de resumos e citações da literatura com revisão por pares, apresenta um panorama geral da produção de pesquisas de todo o mundo nas áreas de ciência, tecnologia, medicina, ciências sociais e artes e humanidades (SCOPUS, 2022).

A metodologia para a construção da bibliometria seguiu os seguintes passos:

- Definição das palavras-chaves relacionadas ao tema;
- Escolha da base de dados para a pesquisa;
- Utilização da ferramenta RStudio para acesso ao *biblioshiny for bibliometrix*;
- Compilação dos resultados encontrados.

A pesquisa bibliográfica foi realizada no dia 19 de março de 2022 e a estratégia de busca tomou como premissa a pesquisa das seguintes palavras-chaves, a saber: modelagem hidrológica, alagamento e SWMM.

Para a pesquisa na base de dados a busca foi feita combinando as palavras chaves e as *strings* formadas aplicou-se filtro para seleção de somente documentos do tipo artigo no idioma inglês. O Quadro 3.2 exhibe a combinação das palavras juntamente com o resultado da quantidade de artigos encontrados de acordo com a respectiva *string*.

Quadro 3.2 - Resultado da pesquisa de artigos nas bases de dados bibliográficos Scopus

Combinação de palavras			String	Quantidade de artigos Scopus
Hydrological modeling	SWMM		(TITLE-ABS-KEY ("hydrological modeling") AND TITLE-ABS-KEY (swmm*))	212
Hydrological modeling	Flooding		(TITLE-ABS-KEY ("hydrological modeling") AND TITLE-ABS-KEY (flooding*))	1574
Flooding	SWMM		(TITLE-ABS-KEY (flooding*) AND TITLE-ABS-KEY (swmm*))	262

Hydrological modeling	Flooding	SWMM	(TITLE-ABS-KEY ("hydrological modeling") OR TITLE-ABS-KEY (flooding*) AND TITLE-ABS-KEY (swmm*))	422
-----------------------	----------	------	--	-----

Para continuidade da bibliometria, selecionou-se a combinação das três palavras, uma vez que a presença da ferramenta SWMM é importante no contexto da dissertação. Na plataforma Scopus foi feito o download do arquivo contendo informações dos 422 artigos relacionados à modelagem hidrológica, alagamento e SWMM.

Posteriormente a triagem dos documentos, utilizou-se o software RStudio para acesso, via web, da página Bibliometrix, ambiente no qual os dados da pesquisa bibliométrica são organizados em forma de resultados numéricos e gráficos.

Com o objetivo de avaliar as métricas da produção científica sobre a utilização da ferramenta SWMM no estudo de alagamentos urbanos, foram selecionados os seguintes parâmetros: produção científica, principais periódicos de publicação, autores mais relevantes, principais países com produção científica no tema e as palavras mais citadas nos respectivos artigos. Da Figura 3.10 a Figura 3.14 são apresentados graficamente os parâmetros supracitados.

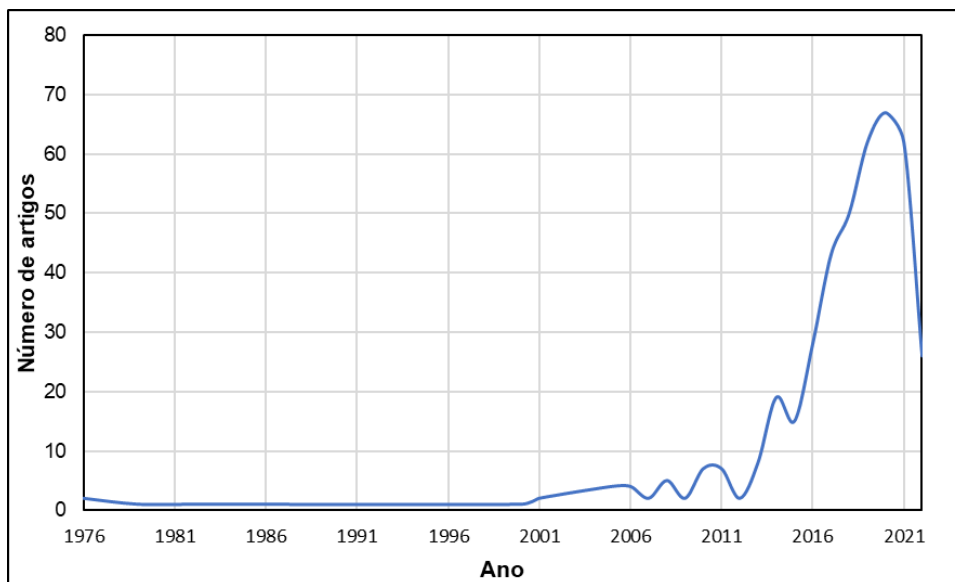


Figura 3.10 - Produção científica ao longo do tempo

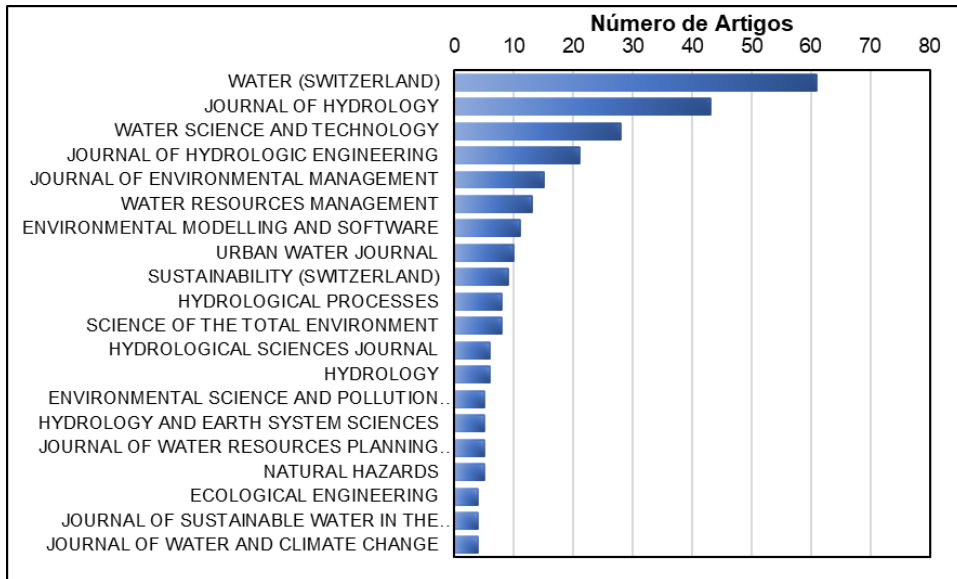


Figura 3.11 – Produção científica ao longo do tempo

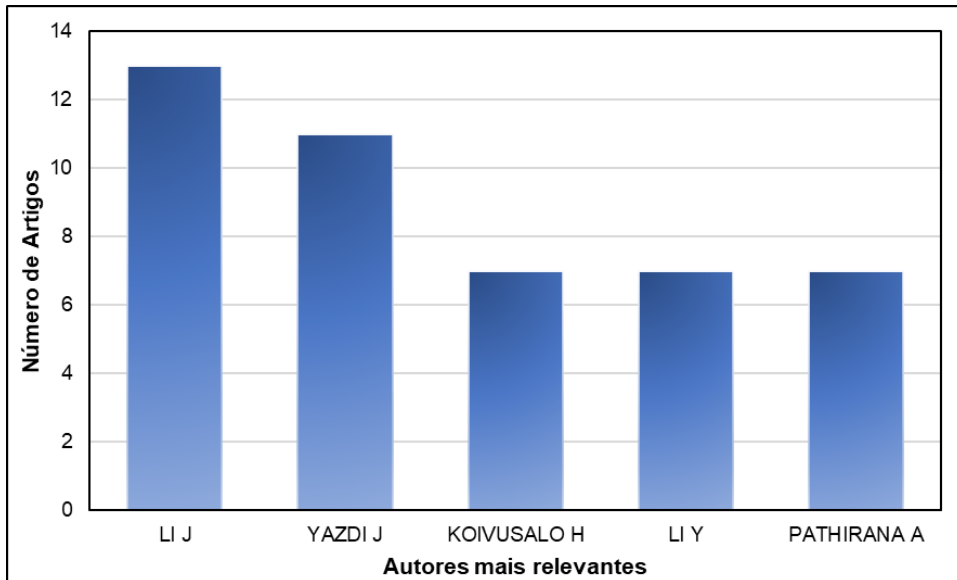


Figura 3.12 – Autores mais relevantes

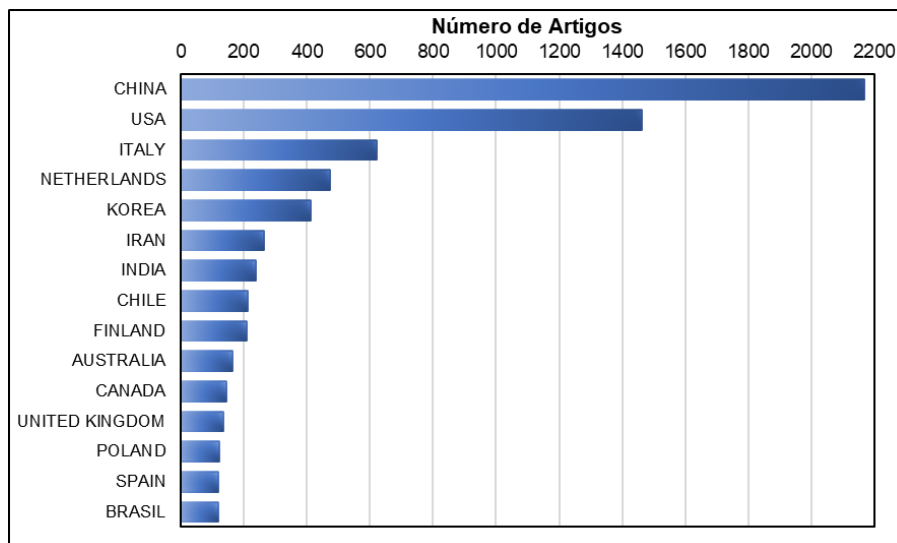


Figura 3.13 – Principais países com produção científica no tema

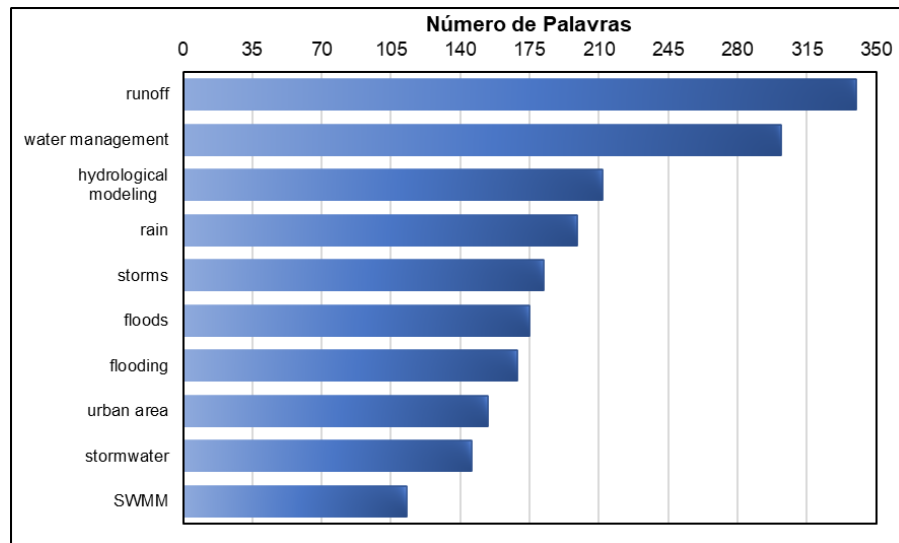


Figura 3.14 – Palavras mais citadas nos 422 artigos levantados.

Pode-se perceber que a partir de 2011 o tema vem sendo cada vez mais pesquisado, dito que, o número de publicações saiu de 7 e foi para 67 em 2021. A revista *Water* da Suíça juntamente com *Journal of Hydrology* figuram entre os periódicos que mais publicam os artigos.

No que tange os principais autores e países mais relevantes na produção de artigos é possível ver a China liderando a lista, seguida dos Estados Unidos. O Brasil figura entre os principais países com produção científica de 118 artigos que citam a modelagem hidrológica de inundações urbanas.

Nos 422 documentos abarcados na pesquisa bibliográfica é possível identificar, entre as principais palavras citadas, modelagem hidrológica, alagamentos e a ferramenta SWMM. Tal fato, indica que a bibliometria conseguiu mostrar um panorama, do ponto de vista quantitativo, sobre o tema abordado na dissertação.

4 METODOLOGIA

Para o alcance dos objetivos propostos neste trabalho, foram necessárias diversas etapas organizadas de forma sistematizada como apresentado na Figura 4.1. O diagnóstico e a caracterização da área de estudo foram essenciais para a modelagem do cenário atual no software utilizado.

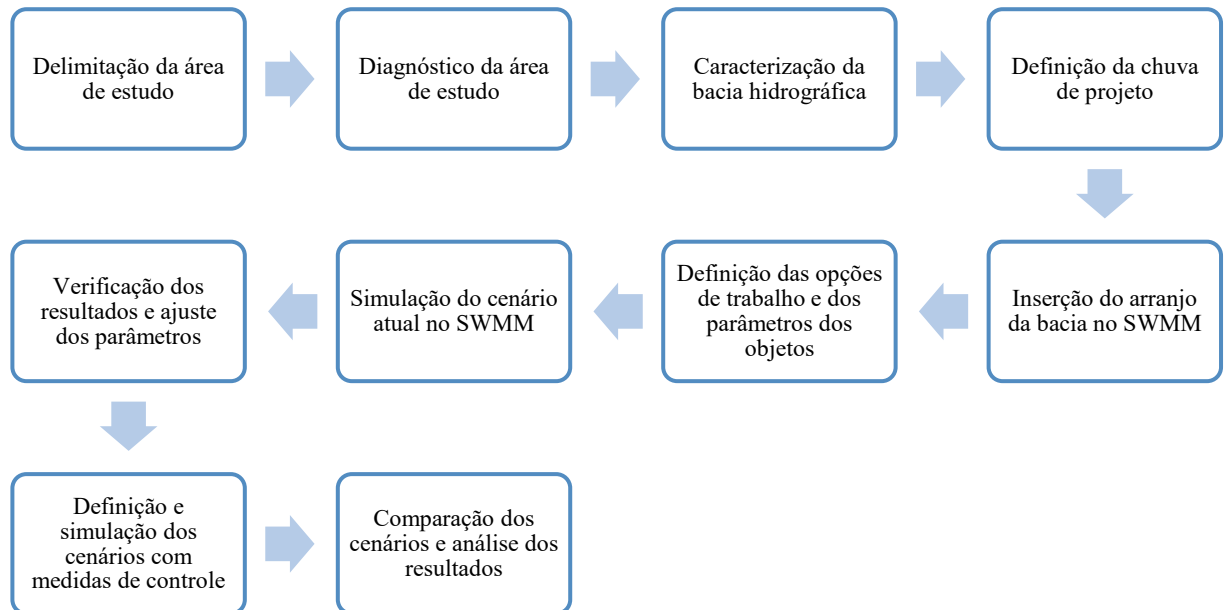


Figura 4.1 - Fluxograma das etapas do estudo

Fonte: Própria autora (2022)

4.1 Delimitação da área de estudo

Para esse trabalho, buscou-se uma região de área urbana em que houvesse problemas com alagamentos em períodos chuvosos e que fosse de fácil acesso para realização de visitas a campo. Aliado a isso, em maio de 2021, a Associação dos Moradores do Bairro Vila Rubens (AMBVR), localizado na área urbana de Itajubá/MG, solicitou a ajuda da UNIFEI para a realização de um estudo que buscasse alternativas viáveis para amenizar o problema de alagamentos no bairro nos períodos chuvosos, o qual vem se agravando ao longo dos anos. Dessa forma, o bairro Vila Rubens se mostrou adequado ao objetivo do trabalho e foi definido como área de estudo.

4.2 Diagnóstico da área de estudo

Primeiramente, realizou-se um diagnóstico da situação atual do município de Itajubá/MG por meio de levantamento de dados secundários. Avaliou-se os cursos d'água que o cortam, quais destes exercem influência no planejamento territorial e na qualidade de vida da

população, o histórico de enchentes e inundações, as áreas suscetíveis a inundações e se há registros de dados de precipitação e vazão.

Em seguida, realizou-se o diagnóstico do bairro Vila Rubens por meio do levantamento de dados secundários e de visita ao bairro. A visita ocorreu no dia 09 de junho de 2021, sendo realizada uma reunião e caminhada pelo bairro com os moradores que fazem parte da AMBVR para coleta de informações e fotos. A seguir são apresentados os questionamentos feitos aos moradores:

- Quais os principais problemas enfrentados;
- Cursos d'água presentes no bairro e arredores;
- Existência de rede de drenagem urbana, localização e funcionamento;
- Se os alagamentos ocorrem para qualquer altura de chuva ou somente para chuvas mais intensas;
- Ruas e locais mais atingidos em períodos chuvosos;
- Influência de outros bairros no escoamento de água que chega no bairro;
- Pavimentação das ruas;
- Situação atual das margens dos cursos d'água existentes;
- Presença de áreas verdes no bairro;
- Se há áreas permeáveis no terreno das residências.

Com base nas informações obtidas, delimitou-se a bacia hidrográfica e determinou-se suas características físicas, hidrológicas, pedológicas, de declividade e seu uso e ocupação do solo.

4.2.1 O município de Itajubá

O município de Itajubá está localizado no sul de Minas Gerais e pertence à bacia hidrográfica do rio Sapucaí, mais precisamente na região do Alto Sapucaí. A cidade se desenvolveu de forma desordenada e sem planejamento na planície de inundação do rio Sapucaí e seus afluentes, como o ribeirão Anhumas, o ribeirão Piranguçu, o ribeirão José Pereira e o ribeirão Água Preta (Figura 4.2). A topografia da região e as condições hidráulicas de escoamento dos corpos d'água favorecem as inundações e o efeito de remanso (PINHEIRO, 2005).

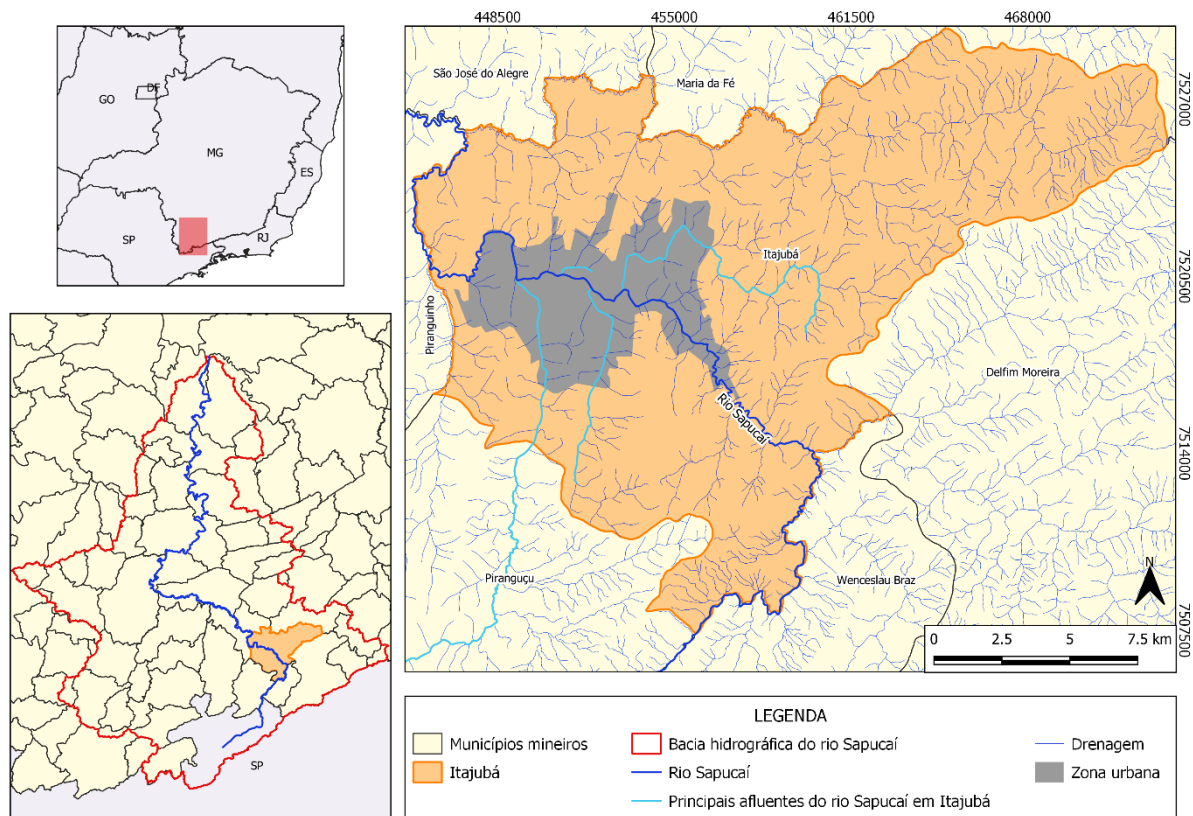


Figura 4.2 - Localização do município de Itajubá/MG

Fonte: Própria autora (2021)

Há registros de inundações em Itajubá desde 1821, totalizando a ocorrência de mais de 70 eventos de cheias. As inundações são frequentes em Itajubá, mesmo sendo de pequena magnitude, e a ocupação da calha secundária do rio Sapucaí e de seus afluentes influenciam diretamente nos eventos extremos (PINHEIRO, 2005; BARBORA *et al.*, 2015). Além disso, segundo Reboita *et al.* (2017), a região do sul de Minas Gerais é suscetível a eventos extremos de chuva no período entre a primavera e o outono, aumentando a probabilidade de eventos com inundações nesse período. De acordo com Silva *et al.* (2017), o limiar de chuva para desencadear um evento de inundação na bacia é de pelo menos 47 mm em 24 horas, porém alguns eventos ocorridos com esse valor não estavam vinculados a uma inundação. Isso pode ser explicado pelo tempo de concentração da bacia ser menor que 24 horas, podendo inferir que a precipitação de 47 mm se concentrou em um período menor que um dia. Para resultados mais precisos, seria necessário dados horários de precipitação.

A Figura 4.3 apresenta a Área de Controle de Risco de Inundação (ACRI), definida pelo Plano Diretor de Itajubá, a qual representa a área inundada pela última grande cheia do rio Sapucaí (no ano 2000) e dispõe de medidas de proteção contra enchentes no que se refere ao parcelamento e uso e ocupação do solo (ITAJUBÁ, 2019). Os bairros mais suscetíveis às inundações do rio Sapucaí são: Santa Rosa, Imbel, Nossa Senhora de Fátima, Cantina, Santa

e a UBS Vila Rubens. Há também uma área verde, sendo que uma parte se encontra como Área de Interesse Ambiental (AIA), isto é, é uma área que concentra remanescentes florestais expressivos, mata em regeneração ou por se situar em altitude superior a 950 metros. No caso do bairro, é uma área de mata em regeneração (ITAJUBÁ, 2019). A Figura 4.4 apresenta a localização do bairro no município.

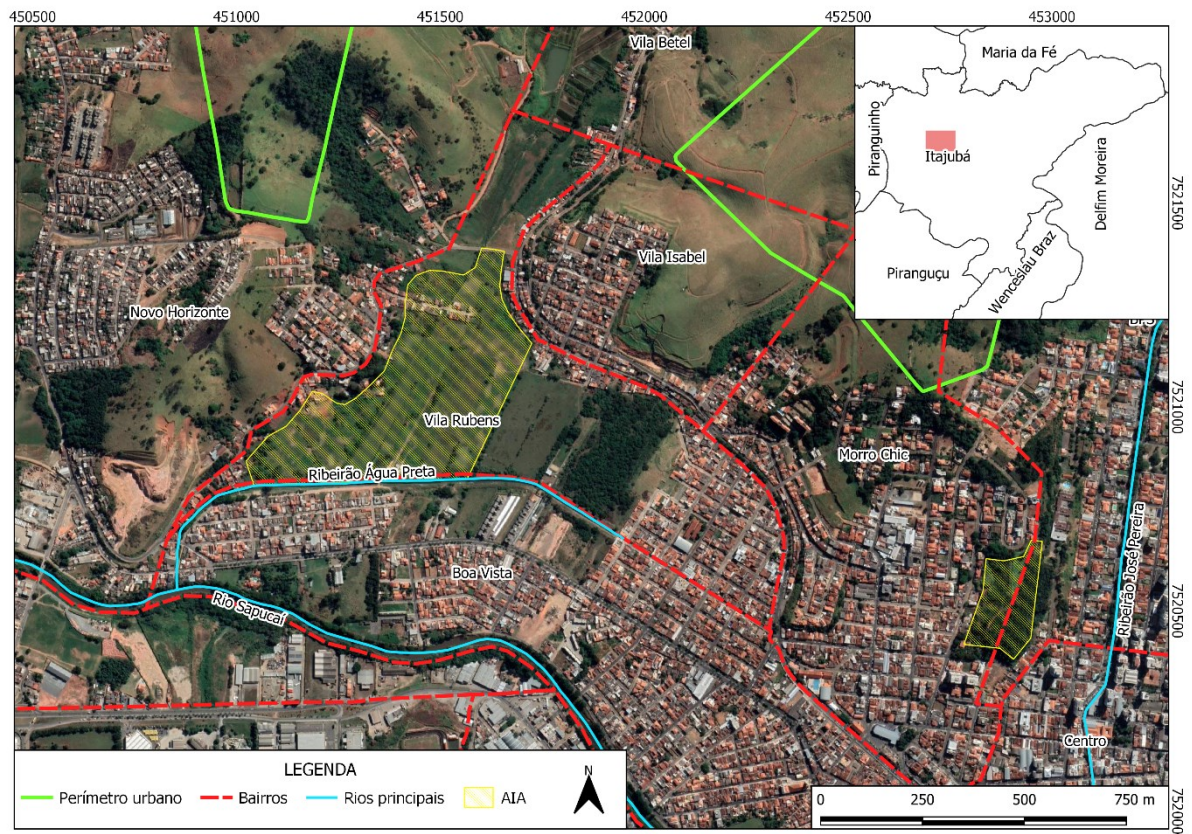


Figura 4.4 - Localização do bairro Vila Rubens

Fonte: Adaptado de ITAJUBÁ (2019)

Os bairros vizinhos ao Vila Rubens são os bairros Boa Vista, Morro Chic, Vila Isabel, Vila Betel e Novo Horizonte. Os bairros Boa Vista e Morro Chic também se encontram na ZAR e uma parte está na Zona Adensável (ZAD), isto é, zona passível de adensamento devido às condições favoráveis do meio físico, infraestruturas e características do uso do solo. O bairro Vila Isabel está todo na ZAR. Os bairros Vila Betel e Novo Horizonte estão em parte na ZAR e em parte na Zona de Expansão Urbana (ZEU), isto é, área não urbanizada interna ao perímetro urbano e propícia ao parcelamento, ocupação e uso do solo e que não esteja situada em ZAD ou ZAR.

Em relação a hidrografia, no bairro há o ribeirão Água Preta, conhecido pelos moradores como “valetão”, além de outros pequenos córregos oriundos dos bairros vizinhos que desaguam

no ribeirão. Para facilitar a nomeação dos cursos d'água sem nome, considerou-se, nesse trabalho, que o córrego que escoa do bairro Vila Isabel e o córrego que escoa do bairro Vila Betel, ambos em direção ao ribeirão Água Preta, serão chamados, respectivamente, de córrego Vila Isabel e córrego Vila Betel. A Figura 4.5 apresenta a hidrografia do bairro, sendo que a localização dos córregos é aproximada, já que eles não estão visíveis.

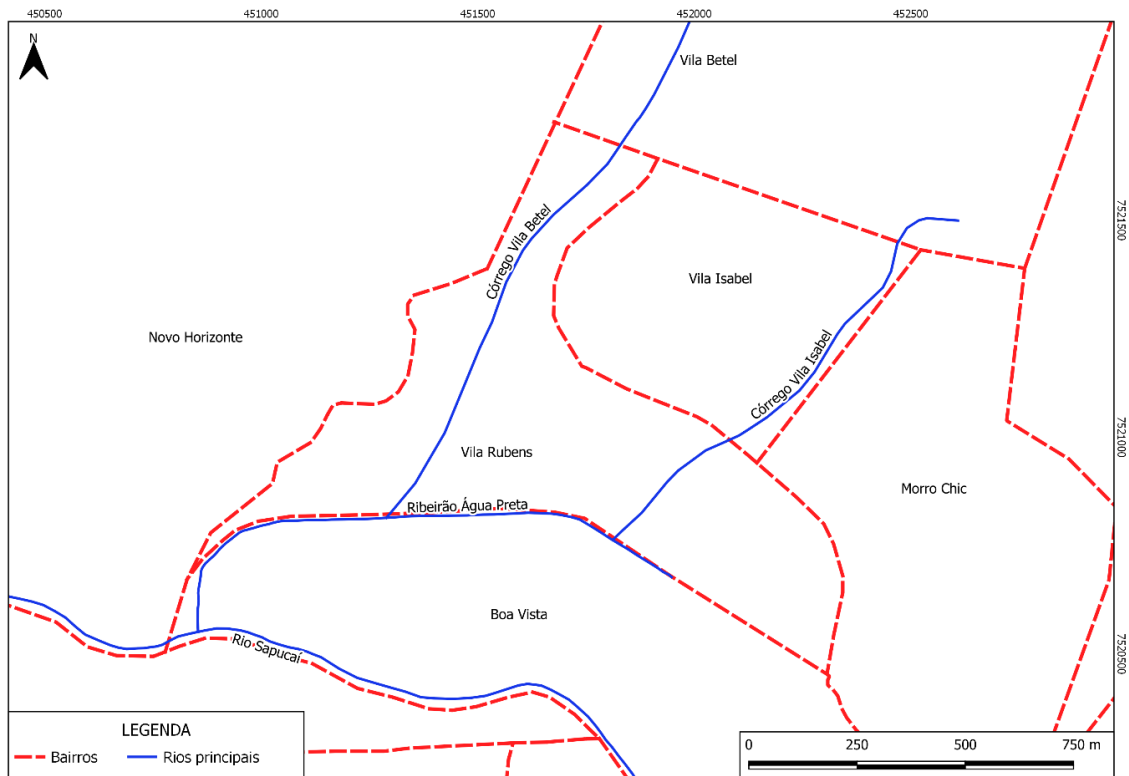


Figura 4.5 - Hidrografia do bairro Vila Rubens

Fonte: Adaptado de ITAJUBÁ (2019)

O ribeirão Água Preta nasce no bairro Capetinga (MARCIANO, 2019), porém a maior parte de sua extensão se dá em canal fechado e o canal aberto se inicia ao final da Rua Evaristo de Barros Filho, no bairro Vila Rubens. Sua foz é no rio Sapucaí, no bairro Boa Vista. A Figura 4.6 apresenta o ribeirão na Rua Evaristo de Barros Filho antes e depois da sua canalização.



Figura 4.6 - Trecho do ribeirão Água Preta como canal aberto em 1989 e como canal fechado em 2021, na Rua Evaristo de Barros Filho

Fonte: AMBVR (2021)

O ribeirão possui uma baixa declividade na região do bairro, extravasando com facilidade e represando a água conforme o nível d'água do rio Sapucaí se eleva. Há assoreamento da sua calha devido ao material sólido carreado através da tubulação e as suas margens não estão devidamente protegidas (Figura 4.7). Às vezes, há a limpeza da calha do ribeirão e dos outros cursos d'água da região ou quando os moradores solicitam à prefeitura.



Figura 4.7 - Trecho do ribeirão Água Preta em canal aberto no bairro Vila Rubens

Fonte: Própria autora (2021)

O bairro Vila Rubens apresenta uma certa infraestrutura de drenagem na maioria das ruas, porém as manilhas estão subdimensionadas, não suportando o volume de água que se direciona para o bairro, e muitas estão assoreadas. A Figura 4.8 apresenta as ruas que há infraestrutura de drenagem de acordo com o que foi relatado pelos moradores, porém não há conhecimento se isso se dá ao longo de toda a extensão da rua e quais são as condições da rede de drenagem. As ruas apresentadas são: Rua Horácio Souza Oliveira, Rua José Marques Duarte, Rua José Dias Coelho, Rua Targino Borges, Rua Evaristo de Barros Filho, Rua Pompílio Ferrini, Rua Eurico Viana e Rua Manoel Gomes de Oliveira.

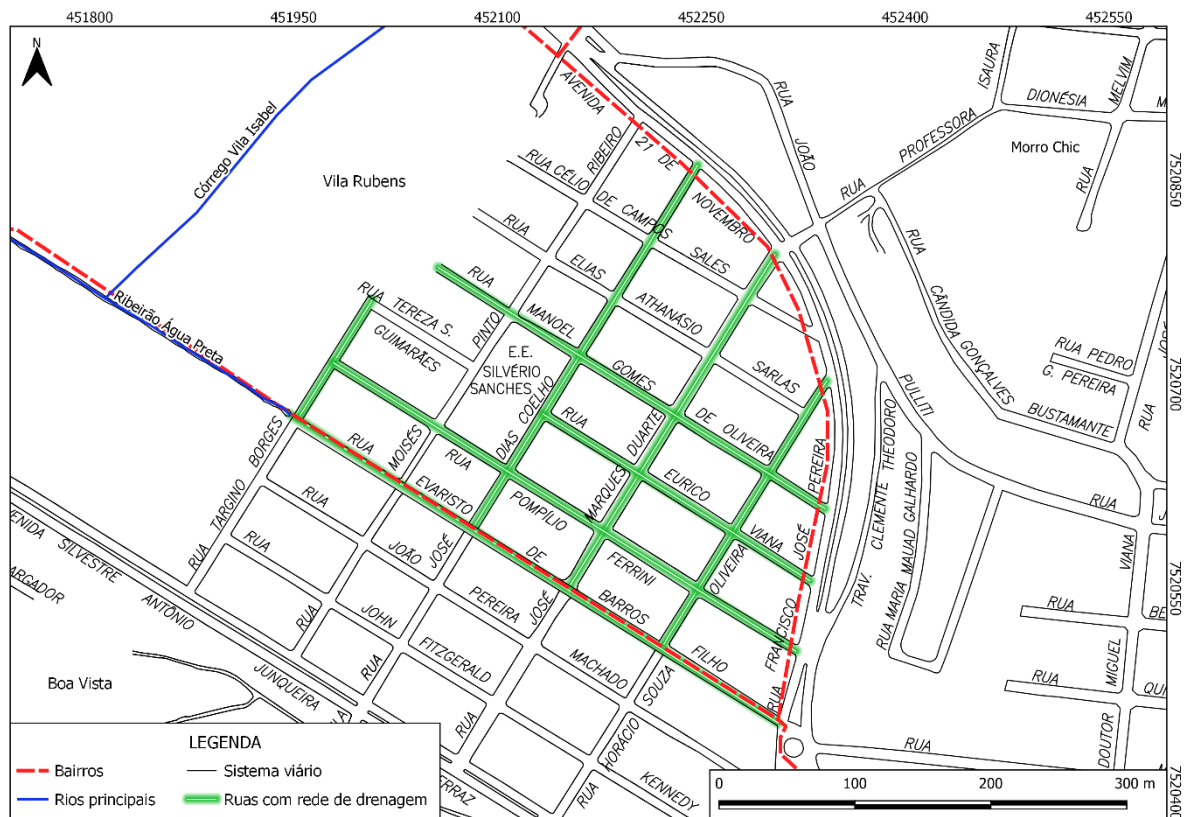


Figura 4.8 - Ruas com rede de drenagem no bairro Vila Rubens

Fonte: Adaptado de ITAJUBÁ (2019)

A manutenção realizada nas bocas de lobo é insuficiente e, muitas vezes, há acúmulo de lixo nelas devido a dois fatores: ao descarte do lixo em dias e horários diferentes ao da coleta realizada pela prefeitura municipal, fazendo com que, quando chove, o lixo seja carregado para as bocas de lobo; e ao lixo vindo de outros bairros carregados pela água pluvial em direção ao bairro Vila Rubens. Uma parte do canal fechado do ribeirão Água Preta se estende pela Rua Evaristo Barros Filho, o qual recebe as águas pluviais escoadas do bairro Morro Chic. Uma parte da água drenada pela rede dos bairros Morro Chic e Vila Isabel deságua no córrego Vila Isabel (Figura 4.9). A Figura 4.10 apresenta um trecho da canalização do ribeirão Água Preta, com três manilhas, e a Figura 4.11 apresenta o final do trecho fechado do ribeirão, com duas manilhas.



Figura 4.9 - Trecho do córrego Vila Isabel em canal aberto no limite do bairro Vila Isabel com o Vila Rubens
Fonte: Própria autora (2021)



Figura 4.10 - Trecho do ribeirão Água Preta em canal fechado
Fonte: AMBVR (2021)



Figura 4.11 - Final do trecho em canal fechado do ribeirão Água Preta

Fonte: Própria autora (2021)

De acordo com UNIFEI (2016), há descarte de esgoto direto das residências para o ribeirão, sem utilização de rede coletora. Além disso, há indícios de que pode ter descarte irregular de esgoto na rede de drenagem devido ao mau cheiro verificado, durante a visita, no início do canal aberto do ribeirão Água Preta. A pavimentação da maioria das ruas é de pavimento de concreto intertravado, algumas são de paralelepípedo e três ruas são asfaltadas, sendo elas: Rua Pompílio Ferrini, Rua José Dias Coelho e Avenida 21 de Novembro.

Conforme relatado pelos moradores, o principal problema do bairro são os alagamentos nas ruas em períodos de chuva. Já houve situações de inundação quando o nível d'água do rio Sapucaí se eleva, comprometendo o ribeirão Água Preta e causando nele um efeito de remanso. Como relatado pelos moradores, a água do ribeirão retorna pela tubulação de drenagem, a qual já está comprometida com o escoamento da água pluvial, sai pelas bocas de lobo e alaga as ruas.

Segundo Pinto (2014), a maior parte do bairro está localizada na parte mais baixa da região, sendo até mais baixa que o bairro Boa Vista. Isso se comprova em períodos de chuva, pois há a influência do escoamento de água pluvial vindo dos bairros Morro Chic, Vila Isabel e Boa Vista, que compromete toda a infraestrutura de drenagem presente no bairro Vila Rubens, causando enxurradas, alagamentos e carreamento de resíduos sólidos, como lixo doméstico, terra e vegetação do entorno (Figura 4.12).

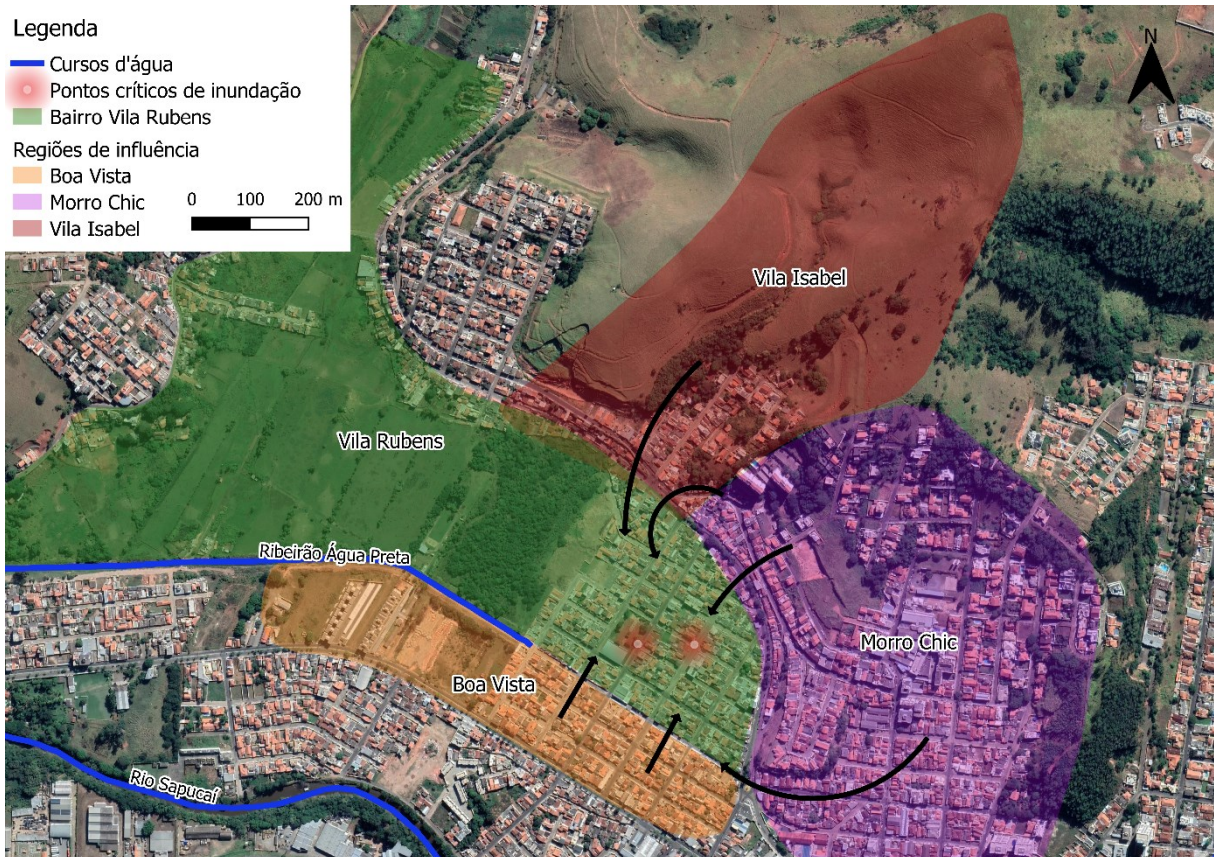


Figura 4.12 - Influência dos bairros vizinhos no bairro Vila Rubens

Como apontado pelos moradores, as ruas mais próximas ao ribeirão Água Preta e ao rio Sapucaí são as mais afetadas pela chuva, pois estão em áreas mais baixas. As ruas mais afastadas, que tem construções mais recentes, são mais altas e não apresentam problemas com alagamento. Além disso, as ruas asfaltadas são regiões críticas de escoamento da água e, após o asfaltamento, a situação de alagamento se agravou.

A influência dos bairros se dá, principalmente, do escoamento de água pluvial vindo da Rua Antônio Pereira Macedo, no bairro Vila Isabel, conhecida como rua do Grotão, e da Rua João Pulliti, próximo ao Condomínio Chácara das Moças, no bairro Morro Chic. Nessas ruas, há rede de drenagem, mas devido ao volume e à velocidade do escoamento, as bocas de lobo não conseguem engolir a água e grande parte desta se direciona para as ruas José Dias Coelho, José Marques Duarte e Horácio Souza Oliveira, no bairro Vila Rubens. Há também a influência na rede de drenagem da água pluvial escoada do bairro Morro Chic que deságua no ribeirão Água Preta e a drenagem do bairro Boa Vista. Os pontos mais críticos de alagamento são no encontro das ruas José Dias Coelho e Eurico Viana, em frente à Escola Estadual Silvério Sanches, e no cruzamento da rua Manoel Gomes de Oliveira com a rua José Marques Duarte, em frente à Associação de Voluntários Viva a Vida de Itajubá (Figura 4.13). No geral, as ruas afetadas com alagamentos são: Rua Targino Borges, Rua José Dias Coelho, Rua José Marques

Duarte, Rua Evaristo de Barros Filho, Rua Pompílio Ferrini, Rua Eurico Viana e Rua Manoel Gomes de Oliveira. A Figura 4.14 apresenta as ruas do bairro que sofrem com alagamentos em algum trecho e as regiões mais críticas.



Figura 4.13 - Alagamento entorno a Associação de Voluntários Vida a Vida de Itajubá

Fonte: AMBVR (2021)

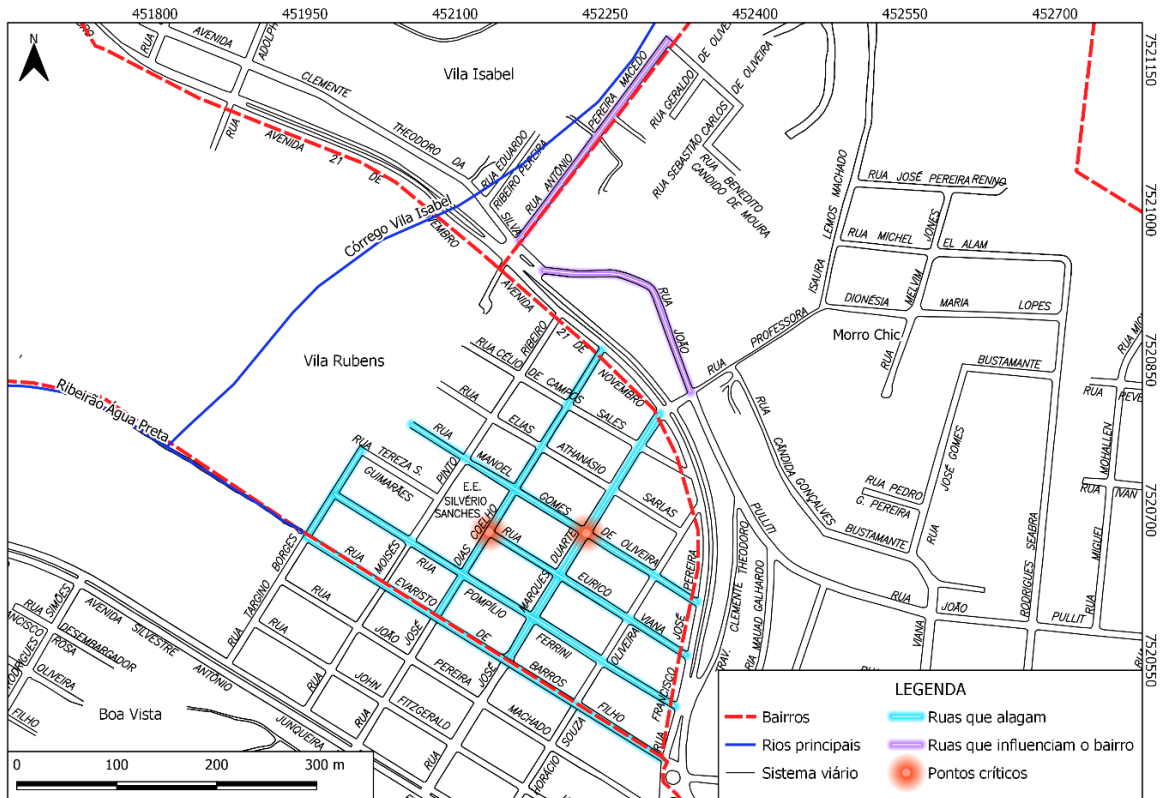


Figura 4.14 - Ruas que sofrem alagamento em períodos de chuva e os pontos críticos

Fonte: Adaptado de ITAJUBÁ (2019)

A inundação do rio Sapucaí ocorrida em Itajubá no ano 2000 atingiu de forma severa o bairro Vila Rubens. A Figura 4.15 e a Figura 4.16 apresentam duas regiões do bairro inundadas. Mais recentemente, no dia 12 de janeiro de 2021, ocorreu uma chuva intensa em Itajubá e os bairros Vila Rubens e Vila Isabel foram um dos mais impactados. O escoamento da água convergiu na Rua Antônio Pereira Macedo, ou rua do Grotão, no bairro Vila Isabel, arrastando árvores, terra e carros até o bairro Vila Rubens e Boa Vista, inundando casas e obstruindo as ruas e a rede de drenagem (Figura 4.17, Figura 4.18, Figura 4.19 e Figura 4.20). Segundo os moradores, no bairro Vila Rubens, a rua mais atingida foi a rua José Dias Coelho, em frente à Escola Estadual Silvério Sanches, com muita lama e galhos.

Outro problema relatado pelos moradores se refere ao tráfego de veículos pesados nas ruas do bairro, as quais não tem suporte necessário para esse tipo de veículo, por ser uma área de várzea sem o devido planejamento, causando trincas nas casas e a quebra de grades de bocas de lobo e tampas de poços de visita. Esse problema, aliado aos alagamentos, estão sendo a causa da evasão de moradores do bairro.



Figura 4.15 - Rua Manoel Gomes de Oliveira, no bairro Vila Rubens, em janeiro de 2000

Fonte: Laboratório de Informações Hídricas da UNIFEI (2014 *apud* MARCIANO, 2019)



Figura 4.16 - Rua do bairro Vila Rubens inundada pelo rio Sapucaí em janeiro de 2000

Fonte: AMBVR (2021)



Figura 4.17 - Final da rua Antônio Pereira Macedo, no bairro Vila Isabel, após a chuva intensa de janeiro de 2021

Fonte: Conexão Itajubá (2021)



Figura 4.18 - Limpeza da Rua Antônio Pereira Macedo, no bairro Vila Isabel, após chuva intensa em janeiro de 2021

Fonte: Prefeitura Municipal de Itajubá (2021)



Figura 4.19 - Rua Antônio Pereira Macedo, no bairro Vila Isabel, durante limpeza após chuva intensa em janeiro de 2021

Fonte: Prefeitura Municipal de Itajubá (2021)



Figura 4.20 - Limpeza das ruas no bairro Vila Isabel após a chuva intensa de janeiro de 2021

Fonte: Prefeitura Municipal de Itajubá (2021)

4.3 Caracterização da bacia hidrográfica

A bacia hidrográfica do estudo foi nomeada de Vila Rubens e suas características foram obtidas com auxílio do software de geoprocessamento QGis 3.10. Ela foi delimitada tendo como foco principal a área com maior densidade habitacional do bairro Vila Rubens e as áreas de contribuição do seu entorno, e possui 1,05 km² de área de drenagem.

Para a obtenção da topografia, utilizou-se o modelo digital de elevação (MDE) *Alos Palsar*, que é um radar de abertura sintética que opera na Banda L e é capaz de obter imagens diurnas e noturnas em qualquer condição atmosférica (ASF, 2011). Ele tem uma resolução de 12,5 m e, de acordo com Barbosa *et al.* (2019), ele apresenta maior penetração na vegetação, alcançando o terreno. Assim, ele pode ser classificado como um MDT (modelo digital de terreno).

As áreas com cerrado típico, cerrado campo alto e cerrado campo baixo não interferem no dado, mas as matas galerias, que são mais densas, não permitem a infiltração total de ondas, causando mínima interferência no resultado (BARBOSA *et al.*, 2019). Como a bacia hidrográfica em estudo apresenta uma pequena parcela de vegetação densa, pode-se dizer que a interferência da vegetação foi mínima, tendo resultados coerentes com o terreno real. Porém,

ainda deve-se considerar que não foi feito nenhum tratamento da imagem nas áreas com edificações. Assim, ao se realizar o procedimento de tratamento da imagem para correção de elevações, resultados diferentes dos apresentados neste trabalho podem ser gerados.

Por meio desse MDT, foi possível determinar as curvas de nível e a declividade da região de estudo. Como auxílio na delimitação da bacia, utilizou-se também as curvas de nível elaboradas na Revisão dos Estudos de Inventário Hidrelétrico do Rio Sapucaí (MINAS PCH, GUERRA LAGE, 2013), as quais tem resolução de 2 m, porém não abrangem toda a área de estudo.

A Figura 4.21 apresenta a bacia hidrográfica definida para esse estudo e a Figura 4.22 apresenta o mapa de declividade da bacia.

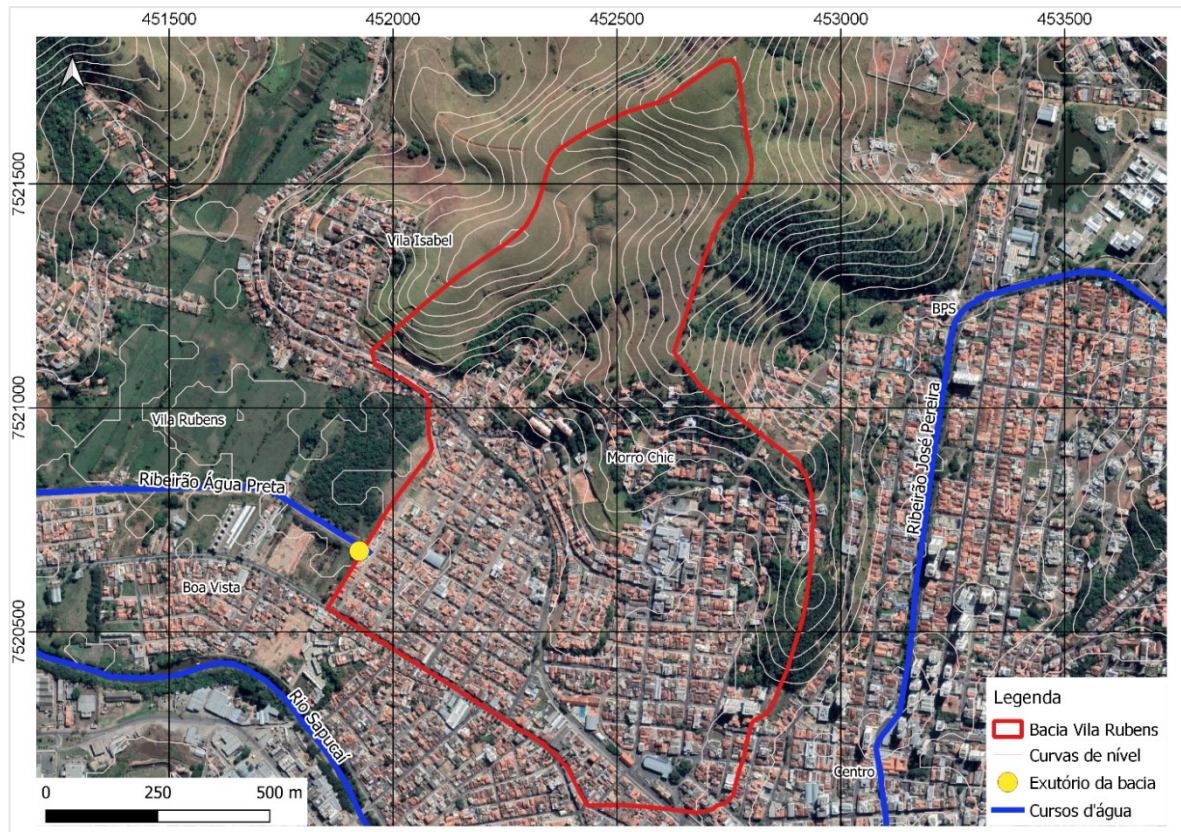


Figura 4.21 - Bacia hidrográfica Vila Rubens

Fonte: Própria autora (2022)

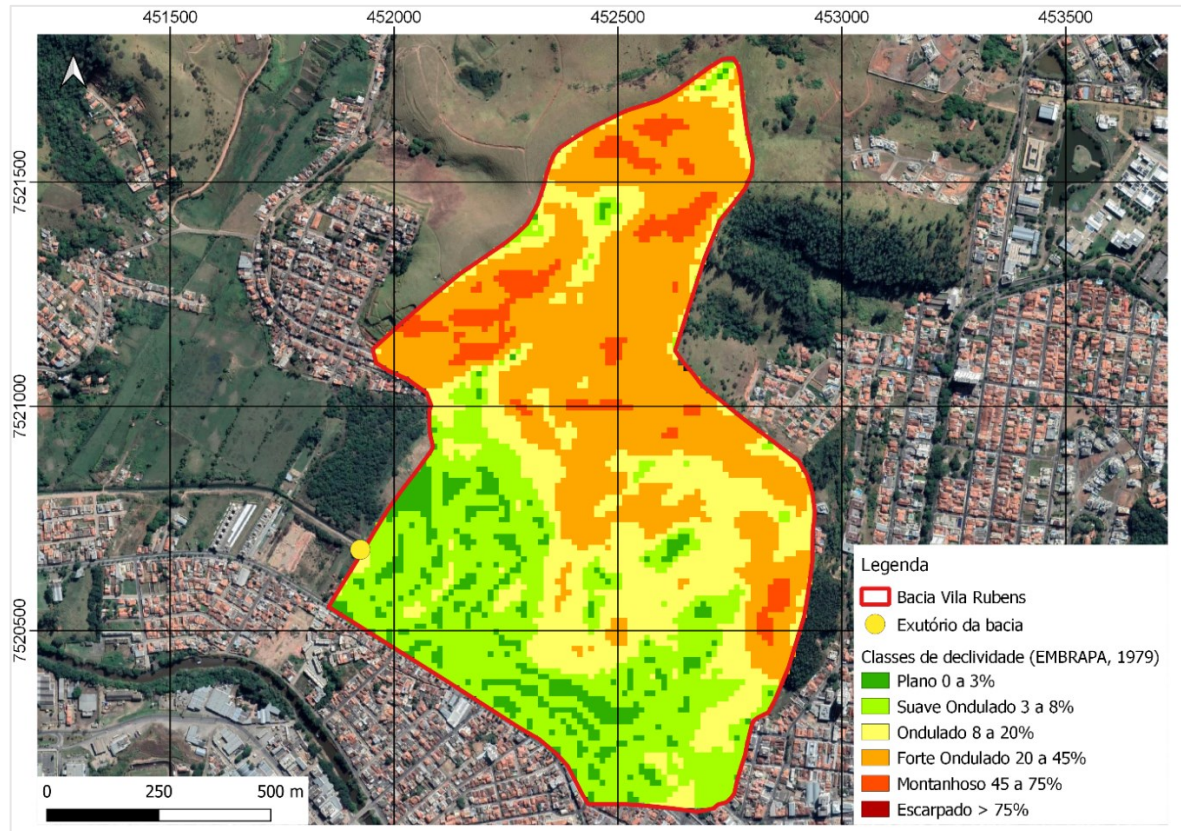


Figura 4.22 - Mapa de declividade da bacia Vila Rubens

Fonte: Própria autora (2022)

Pela Figura 4.22, observa-se que há uma grande variação de declividade na bacia Vila Rubens, apresentando encostas mais íngremes na porção norte, prevalecendo um terreno forte ondulado, enquanto na porção mais sul e sudoeste o terreno varia entre plano e suave ondulado. Essa variação de declividade contribui para que a água escoe com altas velocidades nas regiões mais declivosas e se acumule na região mais plana da bacia, gerando os alagamentos.

A caracterização pedológica foi feita por meio do mapa de solos do estado de Minas Gerais, elaborado pela Universidade Federal de Viçosa, possuindo escala de 1:650.000 no sistema de coordenadas geográficas e *datum* SAD69 (MINAS GERAIS, 2010). O solo característico da área de interesse é o Argissolo Vermelho distrófico típico A moderado/fraco textura média/argilosa; fase floresta subperenifólia, relevo forte ondulado (PVD1), conforme apresentado na Figura 4.23.



Figura 4.23 - Mapa de solos da bacia Vila Rubens

Fonte: MINAS GERAIS (2010)

Para a determinação das características de uso e ocupação do solo da bacia Vila Rubens, utilizou-se a imagem do satélite CBERS 04A, especificamente a câmera multiespectral e pancromática de ampla varredura (WPM), que fornece imagens com resolução panorâmica de 2 m e resolução multiespectral de 8 m simultaneamente (INPE, 2019). Por meio dela, fez-se a composição colorida das bandas 432 utilizando a imagem multiespectral e, com a imagem pancromática, realizou-se o processo denominado *pan sharpening*, isto é, o processo de fusão de imagens pancromáticas de alta resolução e multiespectrais de baixa resolução para criar uma única imagem colorida de alta resolução (ESRI, s. d.). A imagem utilizada neste trabalho é datada de novembro de 2020 (INPE, 2019).

A classificação da imagem em relação aos diferentes tipos de uso e ocupação do solo foi realizada por meio do *plugin* Dzetsaka, no software QGis 3.10. Os tipos de uso do solo considerados foram: vegetação densa, vegetação rasteira, pastagem, solo exposto, telhado e rua. Eles foram definidos com base na observação local durante a visita em campo, pelo conhecimento prévio da região e pelo nível de identificação de áreas que a imagem de satélite possibilitava.

A Figura 4.24 apresenta o resultado da classificação de uso e ocupação do solo para a bacia Vila Rubens. A classe predominante é a de telhado, correspondendo a 51% da área total, seguida da classe pastagem (28%). Em menor número está a classe de rua (9%), vegetação rasteira (6%), vegetação densa (5%) e solo exposto (1%).

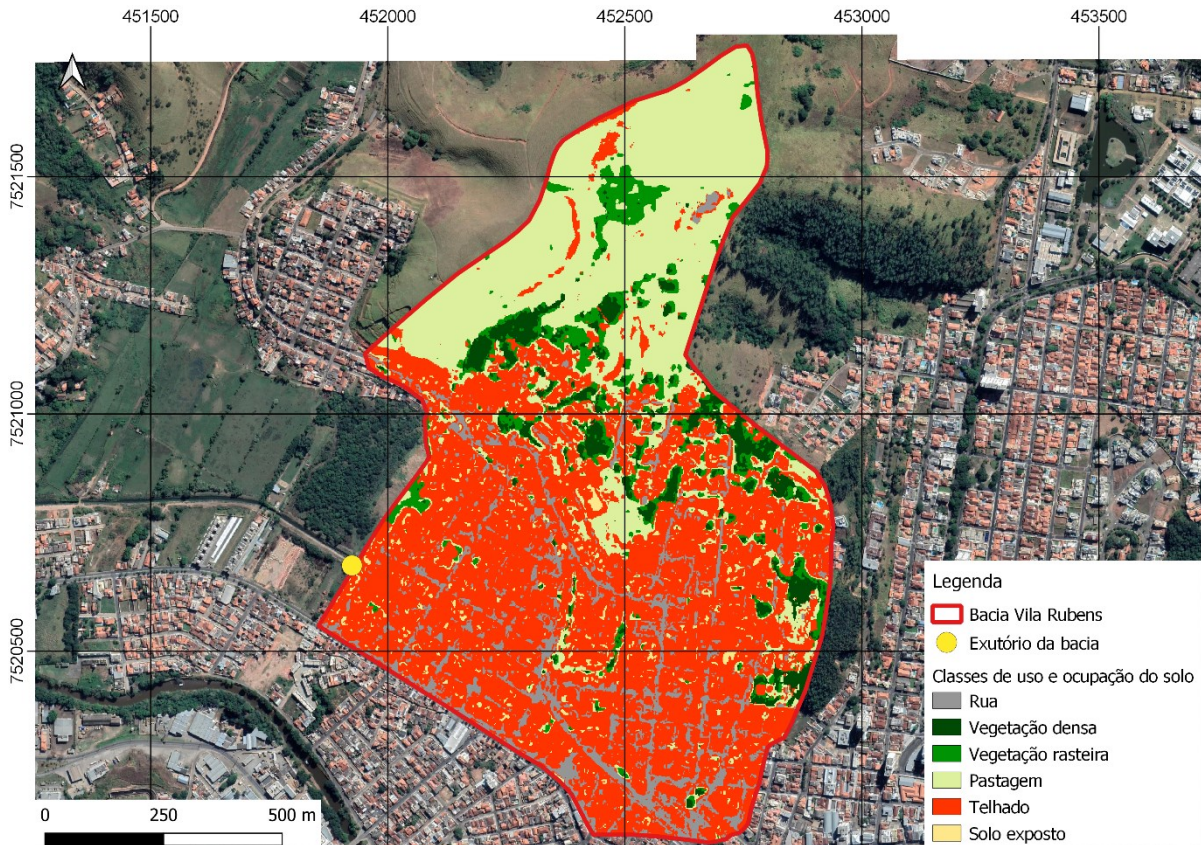


Figura 4.24 – Uso e ocupação do solo da bacia Vila Rubens

Fonte: Própria autora (2022)

Outro parâmetro importante a ser determinado é o tempo de concentração (TC) da bacia hidrográfica, ou seja, é o tempo necessário, a partir do início da precipitação, para que toda a bacia contribua com a vazão na seção de controle. Para sua determinação, utilizou-se as metodologias recomendadas por Silveira (2005) para bacias urbanas, apresentadas na Quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Metodologias para tempo de concentração recomendadas para bacias urbanas segundo Silveira (2005)

Método	Equação*	Recomendação
Carter	$TC = 0,0977 * L^{0,6} * S^{-0,3}$	Área < 11 km ²
Schaake	$TC = 0,0828 * L^{0,24} * S^{-0,16} * A_{imp}^{-0,26}$	Área < 0,62 km ²
Kirpich	$TC = 0,0663 * L^{0,77} * S^{-0,385}$	Área < 27 km ²
Desbordes	$TC = 0,0869 * A^{0,3039} * S^{-0,3832} * A_{imp}^{-0,4523}$	Área < 51 km ²
Picking	$TC = 0,0883 * L^{0,667} * S^{-0,333}$	Área < 11 km ²

* TC (h), L é o comprimento do curso d'água principal (km), S é a declividade média (m/m), Aimp é a fração de área impermeável da bacia.

Apesar do método de Schaake não se enquadrar no critério de área para a bacia Vila Rubens, optou-se por utilizá-lo para compará-lo com os demais métodos.

A Tabela 4.1 apresenta o resultado do tempo de concentração da bacia para cada metodologia e a mediana entre elas.

Tabela 4.1 – Resultados do tempo de concentração por método utilizado

Método	Tempo de concentração (min)
Carter	30,96
Schaake	18,17
Kirpich	30,02
Desbordes	55,50
Picking	32,04
Mediana	30,96

Fonte: Própria autora (2022)

Observa-se que houve divergências entre os métodos utilizados, sendo que o método que permite uma maior área de drenagem (Desbordes) resultou em um maior tempo de concentração, e o método que permite uma menor área (Schaake) resultou em um menor tempo de concentração. Os demais métodos obtiveram valores próximos, sendo a mediana por volta de 30 min.

Os resultados obtidos para o tempo de concentração serviram para balizar a duração da chuva de projeto e verificar a duração crítica da simulação hidrológica. Portanto, além dos valores encontrados, considerou-se valores duas e três vezes maiores que os resultados do TC para duração de chuva.

4.4 Estudo de chuvas intensas

4.4.1 Estação pluviométrica

Para a definição da chuva de projeto a ser utilizada na simulação hidrológica, realizou-se um estudo de chuvas intensas. Segundo Souza *et al.* (2012), o estudo de chuvas intensas em áreas urbanas é fundamental devido aos incidentes de variadas proporções que podem ocorrer em períodos de eventos extremos, como as inundações e escorregamentos, alagamentos temporários, colapso de serviços de infraestrutura, perdas de vidas humanas, entre outros.

Para isso, definiu-se uma estação pluviométrica considerando alguns critérios, como distância da estação ao projeto, existência de dados consistidos e extensão da série histórica. A

Figura 4.25 apresenta a localização de estações pluviométricas selecionadas próximas a área de estudo e o Quadro 4.2 apresenta as suas informações.

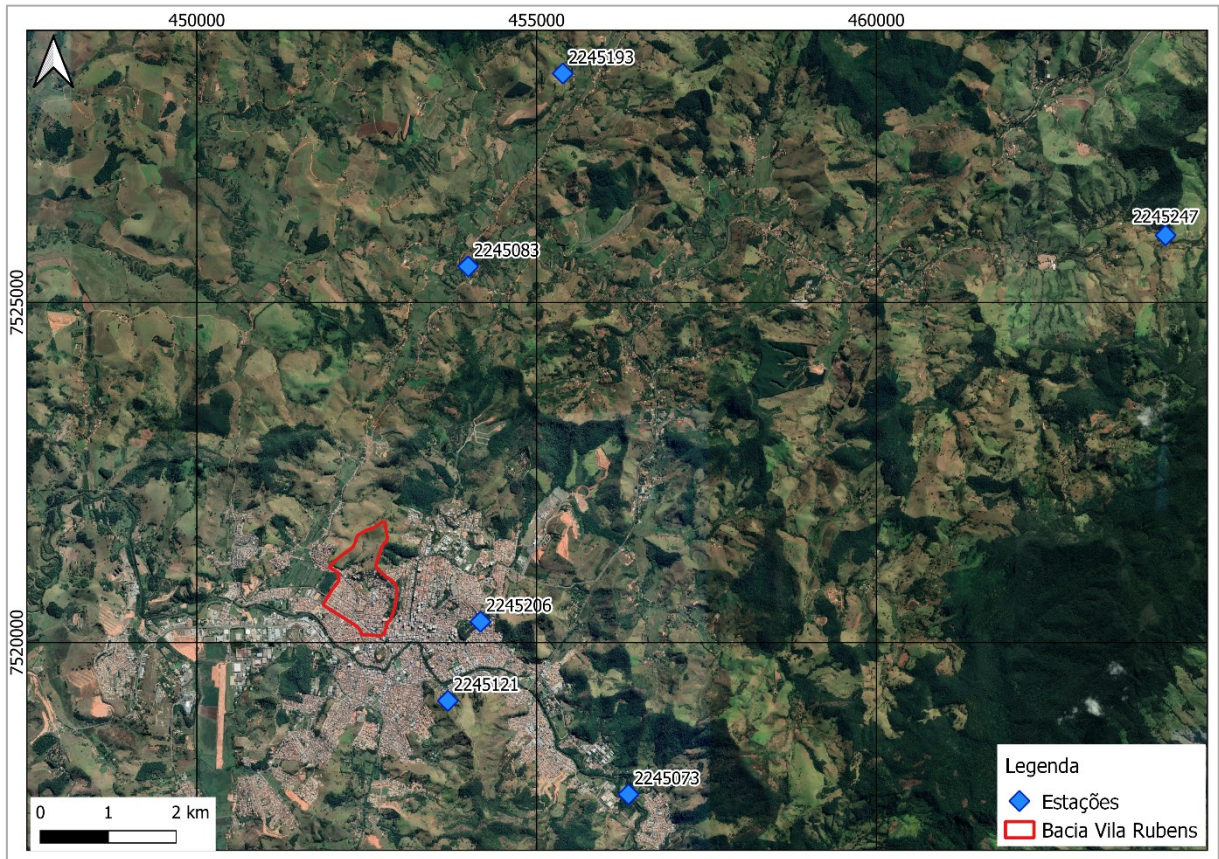


Figura 4.25 - Localização das estações pluviométricas existentes próximas a região de estudo

Quadro 4.2 – Dados das estações pluviométricas existentes próximas a área de estudo

Código	Nome	Município	Responsável	Latitude	Longitude	Período de dados
2245073	Itajubá	Itajubá/MG	ANA	-22,4458	-45,4242	1941 a 1969
2245083	São João de Itajubá	Itajubá/MG	ANA	-22,3756	-45,4469	1966 a 2021
2245121	Itajubá	Itajubá/MG	INMET	-22,4333	-45,45	1961 a 1968
2245193	UHE Luiz Dias	Itajubá/MG	CEMIG	-22,35	-45,4333	Sem dados
2245206	Itajubá	Itajubá/MG	COPASA	-22,4228	-45,4453	Sem dados
2245247	PCH Luiz Dias Barramento	Itajubá/MG	CEMIG	-22,3717	-45,3472	Sem dados

A estação escolhida foi a São João de Itajubá, código 2245083, por possuir a maior série histórica com dados consistentes. Essa estação tinha dados de janeiro de 1966 a maio de 2021 (55 anos) com a presença de algumas falhas (ANA, 2022). A Figura 4.26 apresenta o regime pluviométrico da estação selecionada.

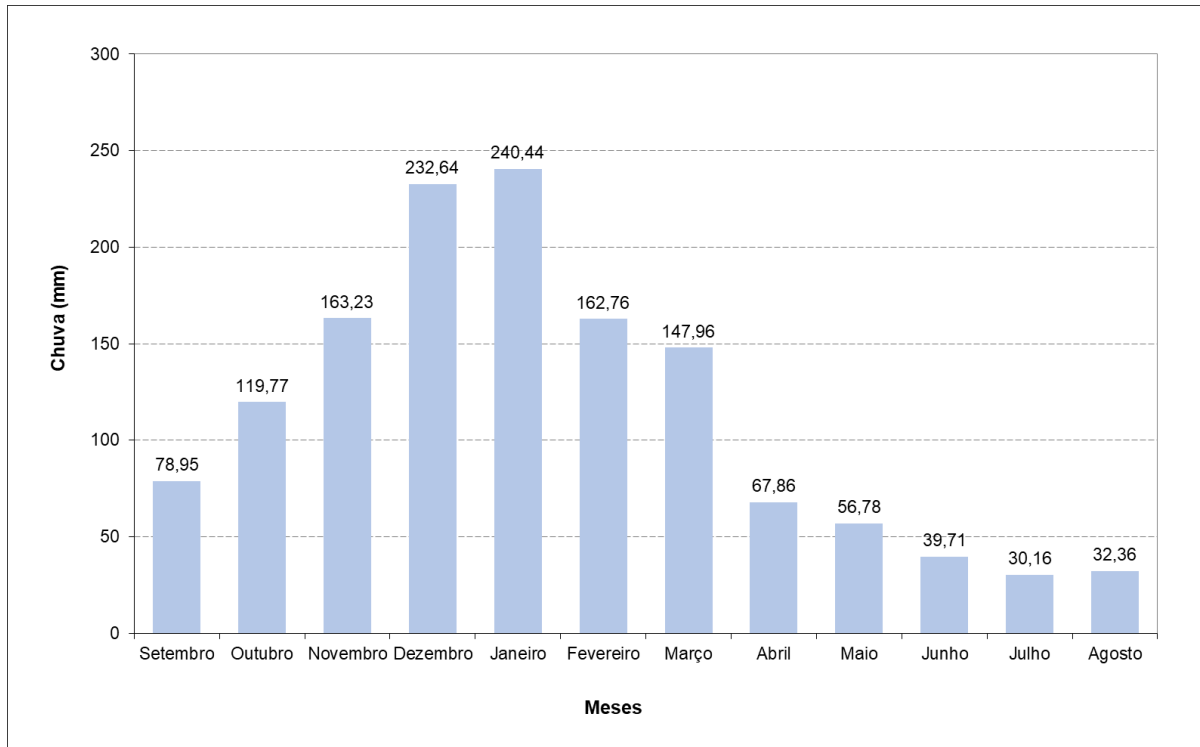


Figura 4.26 - Regime pluviométrico de Itajubá/MG com base na estação pluviométrica São João de Itajubá

Fonte: Adaptado de ANA (2022)

4.4.2 Análise de frequência de chuva

A análise de frequência de eventos hidrológicos extremos visa estimar a probabilidade de ocorrência de valores abaixo ou acima de um valor de referência. No caso de análise de chuvas máximas, a probabilidade anual de excedência de uma determina chuva é a probabilidade que essa chuva venha a ser igualada ou superada em um ano qualquer. O inverso da probabilidade de excedência é denominado tempo de retorno (TR), que é o intervalo médio de tempo que decorre entre duas ocorrências subsequentes de uma chuva (COLLISCHONN e DORNELLES, 2015). Portanto, a análise de frequência permite compreender o comportamento da precipitação e qual o intervalo de tempo que uma precipitação intensa pode ocorrer novamente.

Os dados existentes da estação escolhida foram analisados e foram selecionados os valores máximos anuais de altura de chuva para cada ano hidrológico, que se inicia em setembro. Os anos com falhas foram tratados da seguinte forma: se a falha estava presente em um mês pertencente ao período chuvoso, como outubro, novembro, dezembro, janeiro, fevereiro e março, o ano hidrológico era eliminado. Mas se a falha estava presente em meses do período seco, o ano hidrológico era considerado. Dessa forma, não teria risco de um determinado ano hidrológico ser considerado com uma chuva máxima não representativa.

A Tabela 4.2 apresenta os máximos anuais de altura de chuva diária ocorridos na estação São João de Itajubá.

Tabela 4.2 - Altura de chuva diária máxima anual

Ano hidrológico	Chuva máxima do ano hidrológico (mm)	Ano hidrológico	Chuva máxima do ano hidrológico (mm)
1966/1967	63,0	1991/1992	96,0
1967/1968	40,0	1992/1993	118,0
1968/1969	78,2	1993/1994	73,0
1970/1971	105,2	1994/1995	64,0
1971/1972	62,4	1995/1996	80,0
1973/1974	96,0	1996/1997	54,0
1974/1975	66,2	1998/1999	81,1
1975/1976	78,0	1999/2000	48,4
1976/1977	72,4	2000/2001	84,0
1977/1978	80,4	2001/2002	62,2
1978/1979	93,0	2003/2004	49,8
1981/1982	70,0	2004/2005	68,2
1982/1983	62,0	2005/2006	58,5
1983/1984	67,0	2006/2007	63,3
1984/1985	72,0	2008/2009	64,4
1985/1986	49,0	2009/2010	65,3
1986/1987	72,0	2010/2011	76,3
1987/1988	57,0	2011/2012	141,3
1988/1989	78,0	2012/2013	73,9
1989/1990	58,0	2014/2015	51,6
1990/1991	100,0	2016/2017	74,6

Os pontos de chuva máxima foram agrupados, ordenados e plotados empregando a posição de plotagem de Weibull para a determinação das probabilidades amostrais. Aos pontos amostrais foram ajustadas as distribuições de probabilidades teóricas de Gumbel, Log-Normal com dois parâmetros, Log-Pearson Tipo III, Distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV), Exponencial e Pearson III, apresentadas na Figura 4.27.

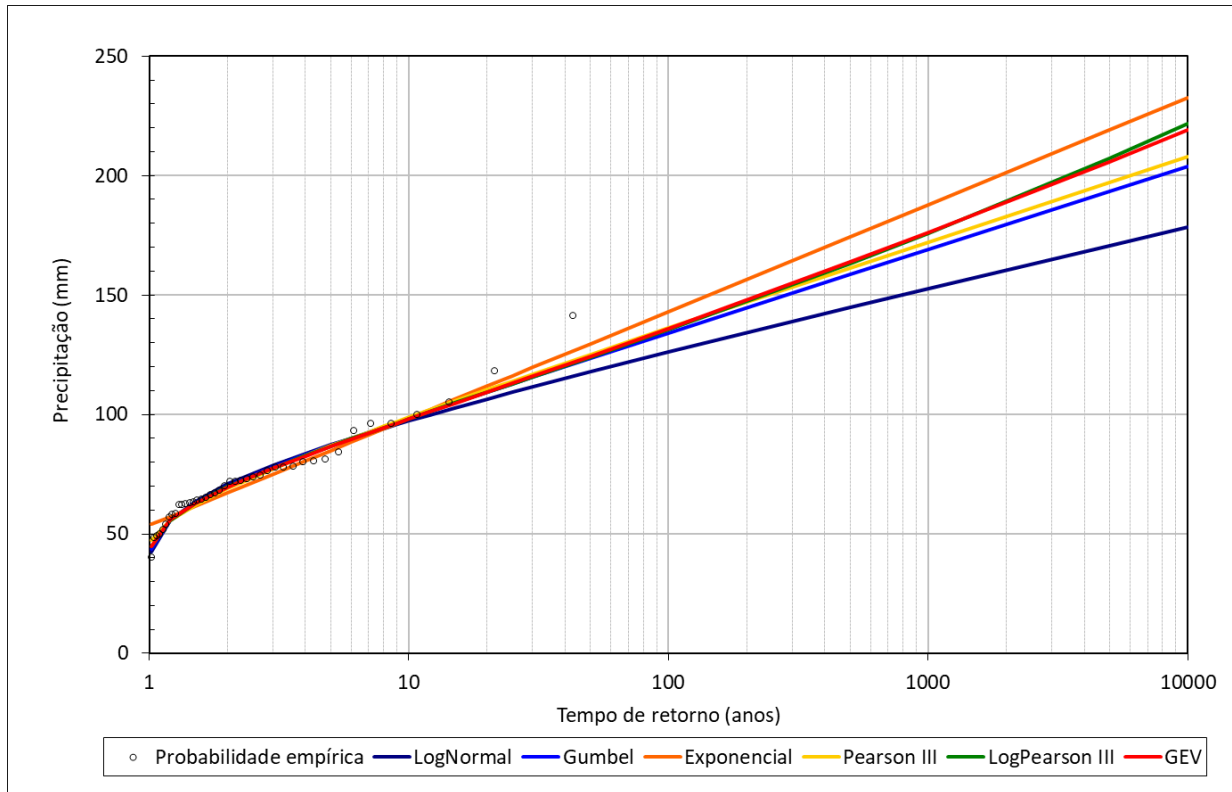


Figura 4.27 – Distribuições de probabilidade teóricas para precipitação máxima

Fonte: Própria autora (2022)

Para verificar a aderência e auxiliar na escolha da melhor distribuição teórica de probabilidades para representar as amostras estudadas, aplicou-se, além da análise visual, testes de aderência como o χ^2 (Qui-Quadrado) e o Kolmogorov-Smirnov, por meio do software de Análise de Frequência Local de Eventos Anuais (ALEA), desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG, 2012).

A distribuição teórica de probabilidades de Gumbel foi definida como representativa da amostra, por melhor ajustar-se à amostra empírica em questão e apresentar os maiores níveis de significância nos testes de aderência. Ela se mantém aderente aos dados empíricos até por volta do tempo de retorno de 15 anos e, acima disso, a aderência diminui devido a falta de uma série histórica de chuva mais extensa. Porém, como o trabalho é voltado para a microdrenagem, onde o tempo de retorno usualmente adotado varia de 2 a 10 anos (SÃO PAULO, 2012), o resultado encontrado na distribuição de Gumbel se mostrou coerente e representativo.

4.4.3 Desagregação da precipitação diária

Os quantis de precipitação obtidos através da análise de frequência realizada referem-se a precipitações diárias, sendo necessária sua transformação para chuvas de 24 horas. Para

essa transformação e desagregação em alturas de chuvas de menor duração, utilizou-se a metodologia proposta por Torrico (1974 *apud* BASSO *et al.*, 2016), conhecida por método das isozonas.

A base desse método derivou da constatação de que havia uma certa uniformidade regional entre as alturas de chuva de 6 min com 24 horas ($P_{6\text{min}}/P_{24\text{h}}$ – a fração da chuva total de 24 horas que cai em 6 minutos) e de 1 hora com 24 horas ($P_{1\text{h}}/P_{24\text{h}}$ – a fração da chuva total de 24 horas que cai em uma única hora), configurando as chamadas isozonas de igual relação entre as precipitações de diferentes durações (BASSO *et al.*, 2016). O mapa das isozonas é apresentado na Figura 4.28 e o quociente entre as alturas de chuvas de 6 min e 1 hora relativas à chuva de 24 horas é apresentado no Quadro 4.3.

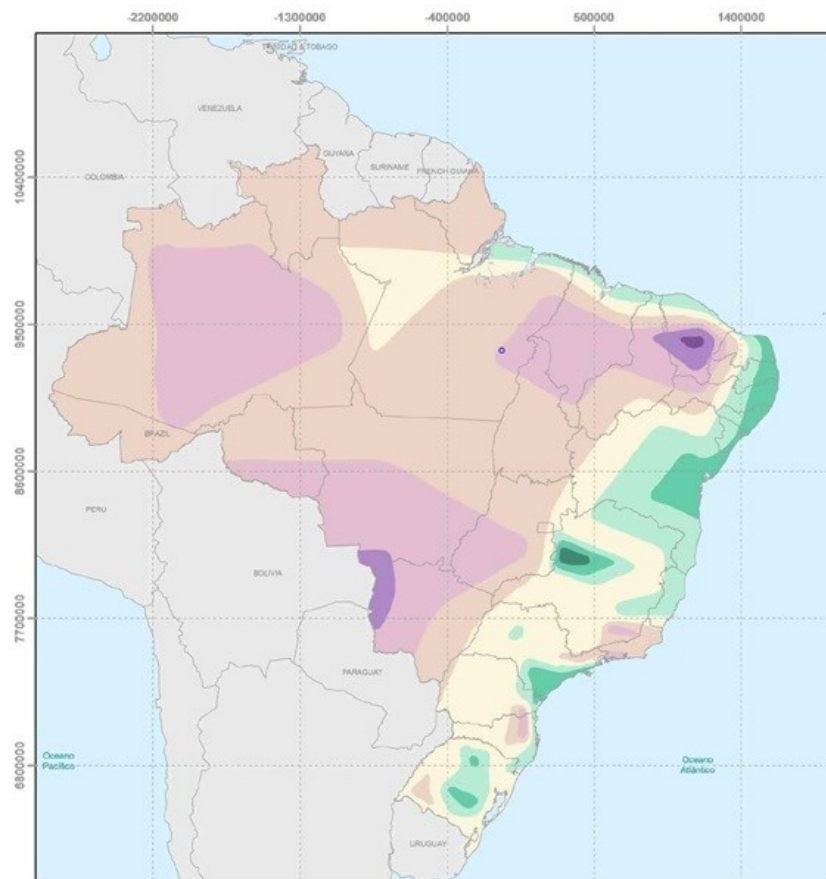


Figura 4.28 - Mapa das Isozonas
Fonte: Torrico (1974 *apud* PINHEIRO, 2011)

Quadro 4.3 – Quociente entre as alturas de chuva de 6 min e 1 h em relação à chuva de 24 h

ZONA	Legenda	Tempo de retorno (anos)											
		1 hora / 24 horas chuva										6 min / 24 horas chuva	
		5	10	15	20	25	30	50	100	1.000	10.000	5 a 50	100
A		36,2	35,8	35,6	35,5	35,4	35,3	35,0	34,7	33,6	32,5	7,0	6,3
B		38,1	37,8	37,5	37,4	37,3	37,2	36,9	36,4	37,2	36,0	8,4	7,5
C		10,1	39,7	39,5	39,3	39,2	39,1	38,8	38,4	37,2	36,0	9,8	8,8
D		12,0	41,6	41,4	41,2	41,1	41,0	40,7	40,3	39,0	37,8	11,2	10,0

E		44,0	43,6	43,3	43,2	43,0	42,9	42,6	42,2	40,9	39,6	12,6	11,2
F		46,0	45,5	45,3	45,1	44,9	44,8	44,5	44,1	42,7	41,3	13,9	12,4
G		47,9	47,4	47,2	47,0	46,8	46,7	46,4	45,9	44,5	43,1	15,4	13,7
H		49,9	49,4	49,1	48,9	48,8	48,6	48,3	47,8	46,3	44,8	16,7	14,9

Fonte: Adaptado de Torrico (1974 *apud* BASSO *et al.*, 2016)

Primeiro, transformou-se a precipitação diária, definida pela distribuição teórica de Gumbel, em altura de chuva de 24 horas de duração, pela multiplicação dos valores pelo fator 1,10, conforme recomendado por Torrico (1974 *apud* PINHEIRO, 2011). Em seguida, localizou-se a isozona da região estudada e extraiu da tabela os valores das relações entre a chuva de 24 horas e as chuvas de 1 hora e 6 minutos para cada tempo de retorno. No caso deste trabalho, a região de estudo se encontra na isozona D. Para qualquer outro TR, os quocientes dessa relação podem ser obtidos por interpolação logarítmica. Então, calculou-se a chuva de 6 minutos de duração para diferentes tempos de retorno multiplicando o quociente da relação pela chuva de 24 horas. O mesmo foi feito para a chuva de 1 hora. Para qualquer outra duração, as alturas de chuva foram obtidas por interpolação dos pontos ajustados a uma curva gráfica (PINHEIRO, 2011).

No caso deste trabalho, utilizou-se como duração da chuva os valores de tempo de concentração encontrados em cada metodologia citada anteriormente além de valores duas e três vezes maior que aqueles. Já os tempos de retorno adotados foram os definidos no Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluvias do município de São Paulo para microdrenagem, com TR variando de 2 a 10 anos (SÃO PAULO, 2012). Dessa forma, calculou-se a chuva para TR de 2, 5 e 10 anos.

A Tabela 4.3 apresenta os quantis de chuva da estação São João de Itajubá para diferentes durações e tempos de retorno após a realização da etapa de desagregação da precipitação diária.

Tabela 4.3 – Quantis de chuva para a estação São João de Itajubá

Duração	TR (anos)		
	2	5	10
20 min	21,1	26,0	29,2
30 min	25,3	31,2	35,0
40 min	28,3	34,9	39,1
55 min	31,6	38,9	43,6
1 hora	32,5	40,0	44,8
1,5 hora	38,1	47,1	52,8
2 horas	42,1	52,1	58,5
3 horas	47,7	59,1	66,6

4.4.4 Discretização temporal da chuva

Um dos métodos mais utilizados para discretização temporal de chuvas é o proposto por Huff (1990), o qual estudou 11 anos de dados de 49 pluviógrafos em uma área de aproximadamente 1.000 km², localizada no estado de Illinois, região central dos Estados Unidos. O autor observou que grande parte dos picos de chuva ocorria em uma pequena parte da duração total da precipitação, independentemente da duração da tempestade e da área média de precipitação. Devido à grande variabilidade existente, as distribuições temporais foram expressas em termos de probabilidade.

Dessa forma, as precipitações foram classificadas e agrupadas de acordo com um dos quatro quartis em que a chuva mais intensa ocorreu. Para os dados de chuva de cada quartil, fez-se uma análise estatística visando obter as curvas adimensionais de distribuição temporal, associadas a uma probabilidade de excedência, ou seja, a probabilidade da chuva de se igualar ou exceder a curva adimensional de distribuição temporal no respectivo quartil. Essa subdivisão foi efetuada de acordo com a localização do pico da precipitação em cada um dos quatro quartis (HUFF, 1990). A Figura 4.29 apresenta as curvas de probabilidade de excedência de chuva para cada quartil, conforme descrito por Huff (1990).

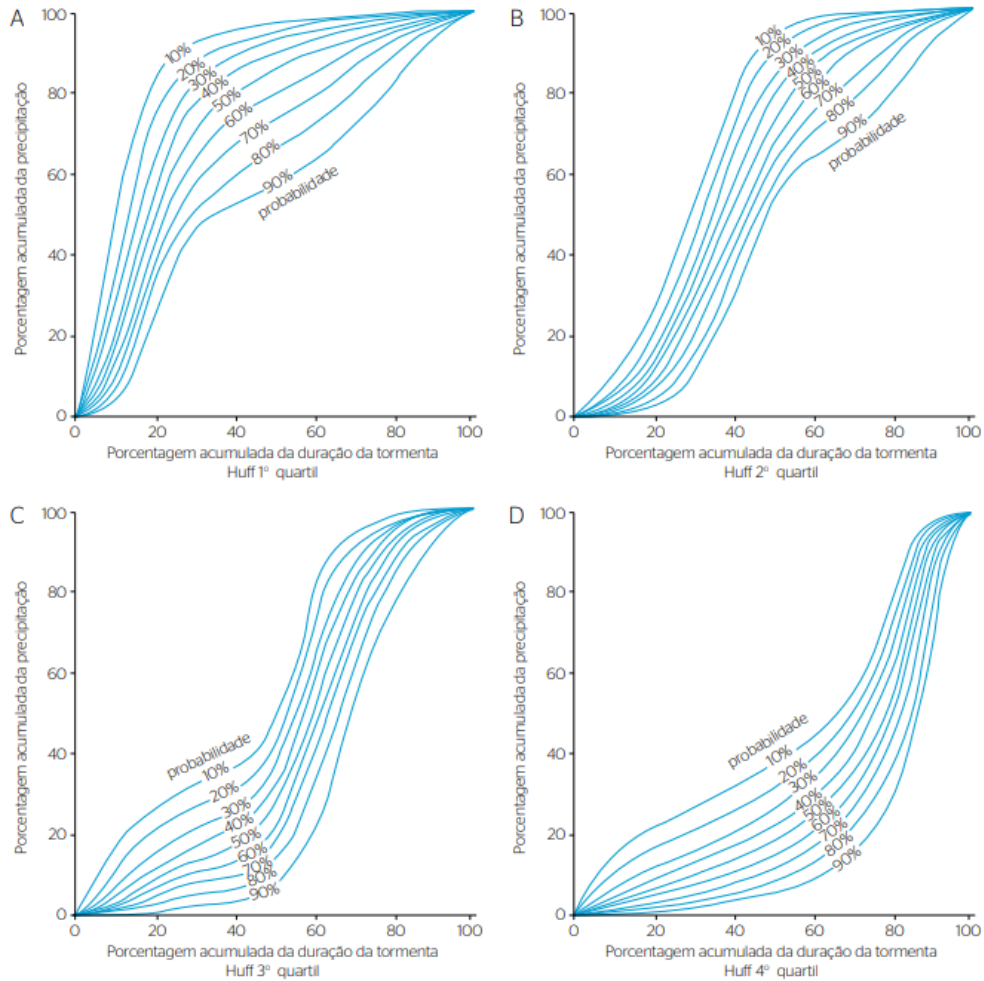


Figura 4.29 - Quartis de chuva definidos por Huff
 Fonte: Huff (1990 *apud* ABREU *et al.*, 2017)

Huff (1990) recomendou o uso do 1º quartil para chuvas de duração de até 6 horas, o 2º quartil para duração entre 6 e 12 horas, o 3º quartil para duração entre 12 e 24 horas e o 4º quartil para chuvas com duração superior a 24 horas. No presente trabalho, utilizou-se o 1º quartil de Huff para a discretização.

Com os valores obtidos na desagregação da precipitação diária, realizou-se a discretização temporal incremental da chuva pelo método de Huff em intervalos de 1 minuto para cada quantil de chuva. A Figura 4.30 apresenta um hietograma típico da discretização pelo 1º quartil de Huff.

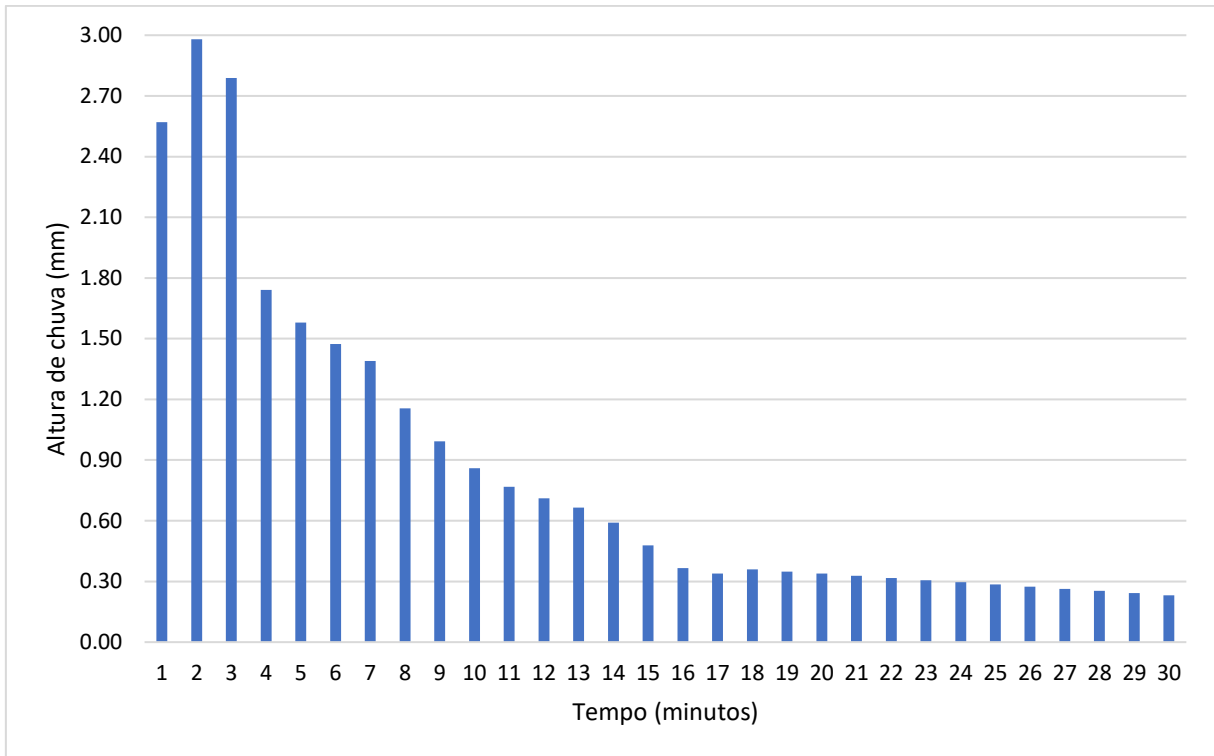


Figura 4.30 – Hietograma típico para 1º quartil de Huff

Fonte: Própria autora (2022)

4.5 Simulação hidrológica

A bacia hidrográfica Vila Rubens foi discretizada em sub-bacias para melhor representação do seu comportamento hidrológico no modelo. Os critérios para a divisão foi o uso e ocupação do solo, a topografia e a contribuição de cada sub-bacia nas ruas do bairro de forma a se aproximar da situação real.

O modelo hidrológico foi implementado baseado em métodos, critérios e parâmetros referenciados na bibliografia técnica além dos dados coletados na fase de diagnóstico, portanto ele não foi calibrado, já que não havia dados de precipitação e vazão suficientes para tal procedimento. Desse modo, para avaliar a sua aplicabilidade, utilizou-se a validação com os moradores conforme com o que foi levantado na fase de diagnóstico, sendo que os pontos críticos de alagamentos foram os critérios principais da validação.

A implementação do modelo hidrológico se deu por meio do software *Storm Water Management Model* (SWMM), desenvolvido pela U.S. EPA (*Environmental Protection Agency*), em sua versão 5.1.015 disponibilizada em 2020 (EPA, 2020). Em relação as especificações do modelo, utilizou-se o Método CN-SCS (NRCS, 2004), para o modelo de infiltração, e o Método da Onda Dinâmica, para a propagação do fluxo. Permitiu-se alagamento em cima dos nós e o passo de tempo utilizado foi de 1 segundo.

4.5.1 Dados de entrada

Para a simulação da bacia Vila Rubens no modelo SWMM, uma série de dados é necessária para caracterizá-la. A seguir são apresentados os dados de entrada dos elementos utilizados.

4.5.1.1 Pluviômetro

No pluviômetro foi necessário informar a série de chuva ao longo do tempo e o formato que esses dados estavam. No caso, inseriu-se a série de altura de chuva incremental, em milímetros, discretizada pelo método de Huff (1990) em intervalos de 1 minuto.

4.5.1.2 Sub-bacias

Para as sub-bacias, foram necessárias as seguintes informações:

- Área (ha);
- Largura (m);
- Declividade (%);
- Área impermeável (%);
- Coeficiente de rugosidade de Manning (n) para as áreas impermeáveis e permeáveis;
- Profundidade do armazenamento em depressão para superfícies impermeáveis e permeáveis (mm);
- Área impermeável sem armazenamento em depressão (%);
- O encaminhamento do escoamento: se vai da área impermeável para a permeável e vice-versa ou se todo o escoamento gerado nas duas áreas é direcionado diretamente para o exutório da sub-bacia. No caso deste trabalho, o escoamento gerado em ambas as áreas de cada sub-bacia foi direcionado ao exutório dela;
- Parâmetros do método de infiltração CN – SCS: CN e tempo seco.

Os parâmetros físicos das sub-bacias foram obtidos com o auxílio do software de geoprocessamento QGis 3.10. A largura das sub-bacias pode ser determinada pelo método do retângulo equivalente, como proposto por Villela e Mattos (1975) e apresentado na Equação 4.1. Esse método calcula a largura do retângulo de mesma área que a sub-bacia.

$$L_e = \frac{K_C \sqrt{A}}{1,12} * \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_C} \right)^2} \right] \quad \text{Equação 4.1}$$

$$K_C = 0,282 * \frac{P}{\sqrt{A}} \quad \text{Equação 4.2}$$

Onde:

- P é o perímetro da sub-bacia (m);
- A é a área da sub-bacia (m²);
- K_C é o coeficiente de compacidade da sub-bacia (Equação 4.2);
- L_e é a largura do retângulo equivalente.

Após a elaboração do mapa de declividade da bacia Vila Rubens, calculou-se a declividade de cada sub-bacia por meio de uma média ponderada por áreas (Equação 4.3). Pelo software QGis obteve-se a área de cada classe de declividade presente na sub-bacia e esta foi multiplicada pela declividade média da respectiva classe.

$$\text{Declividade média da sub - bacia (\%)} = \frac{\sum A_C * i_C}{\sum A_C} \quad \text{Equação 4.3}$$

Onde:

- A_C é a área de cada classe de declividade (m²);
- i_C é a declividade média da classe (%).

Em relação as áreas impermeáveis e permeáveis, considerou-se as áreas de vegetação densa, vegetação rasteira e pastagem como permeáveis, e as áreas de rua, telhado e solo exposto como impermeáveis, de acordo com o mapa de uso e ocupação do solo elaborado. A classificação de solo exposto em área impermeável seguiu o mesmo raciocínio do apresentado por Barros *et al.* (2016), sendo que mesmo que essa classe “não apresente cobertura pavimentada, foi considerado que o solo se apresenta bastante compactado, contribuindo, assim, para o escoamento em área impermeável”.

Com o mapa de solos e o resultado da classificação do uso e ocupação do solo da bacia, pode-se determinar os valores de CN para cada classe e, posteriormente, o de cada sub-bacia por meio de média ponderada por área. O parâmetro CN é definido em função de três condições de umidade antecedente do solo: seco (Condição I), normal (Condição II) e úmido (Condição III) (TUCCI, 2012a). O Quadro 4.4 apresenta valores de CN para a condição II, a que foi usada neste trabalho. O solo da bacia Vila Rubens se enquadra no grupo hidrológico B, conforme definido por Sartori (2010).

Quadro 4.4 - Valores de CN para condição II de umidade antecedente

Utilização ou cobertura do solo		A	B	C	D
Zonas cultivadas					
• sem conservação do solo		72	81	88	91
• com conservação do solo		62	71	78	81
Pastagens ou terrenos em más condições		68	79	86	89
Baldios: boas condições		39	61	74	80
Prado em boas condições		30	58	71	78
Bosques ou zonas florestais					
• cobertura ruim		45	66	77	83
• cobertura boa		25	55	70	77
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golfe, cemitérios, boas condições					
• com relva em mais de 75% da área		39	61	74	80
• com relva de 50 a 75% da área		49	69	79	84
Zonas comerciais e de escritórios		89	92	94	95
Zonas industriais		81	88	91	93
Zonas residenciais					
Lotes de (m ²)	%média impermeável				
<500	65	77	85	90	92
1000	38	61	75	83	87
1300	30	57	72	81	86
2000	25	54	70	80	85
4000	20	51	68	79	84
Parques de estacionamento, telhados, viadutos etc.		98	98	98	98
Arruamentos e estradas asfaltadas e com drenagem de águas pluviais		98	98	98	98
Paralelepípedos		76	85	89	91
Terra		72	82	87	89

Fonte: Adaptado de Tucci (2012a)

A Tabela 4.4 apresenta valores de CN escolhidos para cada classe de uso e ocupação do solo.

Tabela 4.4 – Valores de CN para cada classe de uso e ocupação do solo

Classe	Descrição do uso do solo	CN(II) - B
Rua	Arruamentos e estradas asfaltadas e com drenagem de águas pluviais	98
Vegetação densa	Bosques ou zonas florestais: cobertura ruim	66
Vegetação rasteira	Prado em boas condições	58
Pastagem	Baldios: boas condições	61
Telhado	Lotes residenciais <500m ² - 65% área impermeável	85
Solo exposto	Terra	82

O mesmo pode ser feito para determinar os valores de coeficiente de rugosidade de Manning (n) escolhidos para cada classe de uso e ocupação do solo. A Tabela 4.5 apresenta os valores do coeficiente de rugosidade de Manning (n) para escoamento à superfície livre para cada tipo de superfície.

Tabela 4.5 - Valores de coeficiente de rugosidade de Manning (n) para escoamento à superfície livre

Superfície	n
Asfalto liso	0,011
Concreto liso	0,012
Concreto normal	0,013
Madeira	0,014
Tijolo com cimento	0,014
Cerâmica	0,015
Ferro fundido	0,015
Tubos de metal ondulado	0,024
Cimento com superfície de pedregulho	0,024
Solo em pousio	0,05
Solos cultivados	
• Cobertos de resíduos < 20%	0,06
• Cobertos de resíduos > 20%	0,17
Campo (natural)	0,13
Grama	
• Curta, pradaria	0,15
• Densa	0,24
• Grama-bermudas	0,41
Floresta	
• Vegetação rasteira leve	0,4
• Vegetação rasteira densa	0,8

Fonte: McCuen *et al.* (1996 *apud* USEPA, 2012)

A Tabela 4.6 apresenta os valores do coeficiente “n” escolhidos para cada classe de uso e ocupação do solo.

Tabela 4.6 – Valores de coeficiente “n” para cada classe de uso e ocupação do solo

Classe	Superfície	n
Rua	Concreto normal	0,013
Vegetação densa	Floresta rasteira leve	0,40
Vegetação rasteira	Campo (natural)	0,13
Pastagem	Grama densa	0,24
Telhado	Cerâmica	0,015
Solo exposto	Solo em pousio	0,05

Outro parâmetro exigido pelo modelo SWMM para o método de infiltração CN – SCS é o tempo seco, isto é, o tempo para um solo completamente saturado se tornar totalmente seco. Optou-se por definir o valor padrão de 7 dias sugerido pelo modelo.

Para a definição da profundidade do armazenamento em depressão para superfícies impermeáveis, empregou-se a Equação 4.4 que relaciona a profundidade do armazenamento

em superfícies impermeáveis e a declividade média da sub-bacia (KIDD, 1978 *apud* BARROS *et al.*, 2016).

$$d_p = 0,0303 * S^{-0,49} \quad \text{Equação 4.4}$$

Onde:

- d_p é a profundidade do armazenamento em superfícies impermeáveis (pol);
- S é a declividade média da sub-bacia (%).

Para a definição da profundidade do armazenamento em depressão para superfícies permeáveis, utilizou-se a Tabela 4.7 como referência, definindo o valor de 5,08 mm.

Tabela 4.7 - Armazenamento em depressões

Superfícies impenetráveis	1,27 – 2,54 mm
Gramados	2,54 – 5,08 mm
Pastagem	5,08 mm
Serrapilheira	7,62 mm

Fonte: ASCE (1992 *apud* USEPA, 2012)

Por fim, para o parâmetro área impermeável sem armazenamento em depressão, empregou-se o percentual de 25%, conforme recomendado por Gironás *et al.* (2009 *apud* BARROS *et al.*, 2016), para casos em que não há informações suficientes.

4.5.1.3 Nós

Para os nós, foram necessárias as seguintes informações:

- Cota do radier (m);
- Profundidade máxima (m);
- Área alagável (m²).

Em relação a cota do radier, foi necessário definir os valores de declividade para as ruas representadas pelos canais já que a topografia existente não foi suficiente para tal detalhamento. Esses valores foram definidos com base na visita realizada ao bairro e por meio de processo iterativo no modelo hidrológico. A Tabela 4.8 apresenta as declividades definidas.

Tabela 4.8 - Declividades definidas para cada trecho

Trecho	Declividade
N1.1 a N1.2	2,00%
N1.2 a N1.11	0,25%
N2.1 a N1.2	0,25%
N3.1 a N3.2	0,90%
N3.2 a N1.4	0,15%
N4.1 a N4.2	4,93%
N4.2 a N4.3	1,52%

N4.3 a N4.4	1,00%
N4.4 a N1.6	0,15%
N5.1 a N1.8	0,15%

Fonte: Própria autora (2022)

A profundidade máxima dos nós é a mesma dos canais/trechos, os quais representam as ruas do bairro. Assim, considerou-se uma altura de 20 cm referente à altura aproximada do meio-fio. Para a rua Evaristo de Barros Filho, a rua do “valetão”, considerou-se os 20 cm mais um incremento de 40 cm na altura. Esse incremento se deve a presença de duas manilhas ao longo da rua de diâmetro aproximado de 1 m, responsáveis por direcionar o escoamento vindo do bairro Morro Chic ao ribeirão Água Preta. O valor do incremento foi definido por meio de um processo iterativo, realizando simulações no modelo SWMM com diferentes profundidades, para chuva com tempo de retorno (TR) de 2 anos. Os alagamentos resultantes foram verificados em cada simulação até se chegar em um cenário mais próximo do real.

A área alagável foi definida com o auxílio do software QGis e considerou-se uma parcela da área das ruas que cruzam o nó. Calculou-se a área alagável apenas dos nós que podiam ter alagamento.

O exutório da bacia também é um nó e ele foi considerado livre para sua condição de contorno, isto é, condição determinada pelo valor mínimo entre a altura do escoamento crítico e a do escoamento normal no canal conectado (USEPA, 2012).

4.5.1.4 Canais

Os canais/trechos representam as ruas do bairro, principalmente aquelas que tem maior ocorrência de alagamentos. Os dados solicitados para esses elementos foram:

- Forma do canal e suas dimensões;
- Comprimento (m);
- Coeficiente de rugosidade de Manning (n);
- Offset de entrada e de saída (m).

Considerou-se os canais de geometria retangular aberta, com largura de base de 7 m. Para a rua do valetão, a profundidade máxima foi de 60 cm e para as demais, de 20 cm. O comprimento foi calculado com auxílio do software QGis e para o coeficiente de Manning, considerou-se canais revestidos de concreto (Quadro 4.5), já que grande parte das ruas do bairro são de bloquete. Já o offset de entrada ou de saída se refere à altura ou cota do canal acima do radier do nó de montante ou de jusante do canal, respectivamente.

Quadro 4.5 - Coeficiente de rugosidade de Manning (n) para canais abertos

Tipo de canal	Manning n
Canais Revestidos	
• Asfalto	0,013 - 0,017
• Alvenaria	0,012 - 0,018
• Concreto	0,011 - 0,020
• Pedregulho ou enrocamento	0,020 - 0,035
• Vegetal	0,030 - 0,40
Escavado ou dragado	
• Terra, reto e uniforme	0,020 - 0,030
• Terra, sinuoso, razoavelmente uniforme	0,025 - 0,040
• Rocha	0,030 - 0,045
• Sem manutenção	0,050 - 0,140
Canais naturais (curso de água pequeno com largura máxima de inundação < 100 pés)	
• Seção razoavelmente regular	0,030 - 0,070
• Seção irregular com represamento	0,040 - 0,100

Fonte: Adaptado de Rossman (2015)

4.5.2 Definição dos cenários

O primeiro cenário definido foi o da situação atual da bacia Vila Rubens, onde foi representado o comportamento do escoamento superficial em períodos chuvosos e os alagamentos gerados. Por meio desse cenário, foi possível determinar a duração crítica da chuva, isto é, a duração de chuva que foi capaz de gerar o maior pico de vazão de saída na bacia.

A partir disso, definiu-se outros cenários com algumas medidas para minimizar o impacto causado em períodos chuvosos no bairro. Entre as medidas adotadas, estão os dispositivos LID de pavimento permeável e célula de biorretenção. A Tabela 4.9 apresenta a descrição de cada cenário.

Tabela 4.9 - Descrição dos cenários definidos para o estudo

Cenário	Descrição
0	Cenário atual da bacia Vila Rubens
1	Redirecionamento do escoamento da sub-bacia correspondente ao bairro Morro Chic (B4)
2	Adição de LIDs no bairro Morro Chic (B4)
3	Adição de LIDs nas sub-bacias do bairro Vila Rubens
4	União dos cenários 2 e 3
5	União dos cenários 1 e 3

Fonte: Própria autora (2022)

O redirecionamento do escoamento da sub-bacia 4 se refere a alteração no direcionamento das águas vindas do bairro Morro Chic. Ao invés de serem direcionadas a galeria de drenagem presente na rua Evaristo Barros Filho e desaguarem no ribeirão Água Preta,

sugere-se que elas sejam direcionadas para o bairro Boa Vista de forma a desaguar no rio Sapucaí.

4.5.3 Dimensionamento dos dispositivos LID

Os dispositivos LID utilizados neste trabalho foram o pavimento permeável e a célula de biorretenção, as quais são medidas de infiltração. No modelo SWMM, o pavimento poroso apresenta as camadas de superfície, pavimento e armazenamento. As camadas de solo e dreno de fundo são opcionais e optou-se por não as utilizar neste estudo. Já a célula de biorretenção apresenta a camada de superfície, solo e armazenamento, sendo o dreno de fundo opcional e também não utilizado neste estudo.

Miguez *et al.* (2016) recomendam um método simplificado para dimensionamento das estruturas de infiltração chamado método das chuvas ou curva envelope (Figura 4.31). Ele consiste em plotar em um mesmo gráfico a curva altura de chuva x duração e a curva de deflúvio x duração. Para a primeira curva, utilizou-se a altura de chuva para TR de 2 anos calculada no estudo de chuvas intensas.

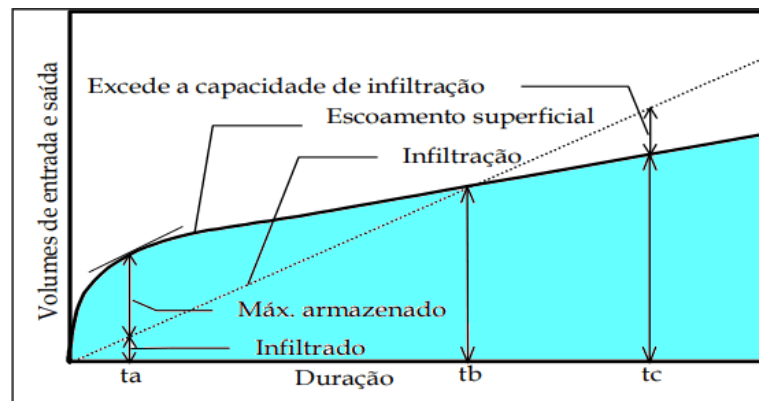


Figura 4.31 - Curva envelope ou método das chuvas

Fonte: Adaptado de Miguez *et al.* (2016)

Para a segunda curva, primeiro calculou-se a vazão efluente da estrutura pela Equação 4.5.

$$Q_S = \alpha * q_{as} * S \quad \text{Equação 4.5}$$

Onde:

- Q_S é a vazão efluente (m^3/h);
- α é o coeficiente de segurança determinado pela Tabela 4.10 (considerou-se neste trabalho a inconveniência menor);

- q_{as} é a condutividade hidráulica do solo (m/h), determinada pela Tabela 4.11 (considerou a condutividade de 0,0109 m/h para areia argilosa);
- S é a superfície de infiltração (m²).

Tabela 4.10 - Coeficiente de segurança para estruturas de infiltração

Consequências da falha do dispositivo de infiltração			
Área a ser drenada (m²)	Nenhum dano ou inconveniência	Inconveniência menor, como alagamento de um estacionamento	Danos à construção ou estrutura, inconveniência maior, como inundação em estradas
< 100	1,50	2	10
100 a 1000	1,50	3	10
> 1000	1,50	5	10

Fonte: Adaptado de Miguez *et al.* (2016)

Tabela 4.11 - Valores típicos de condutividade hidráulica para diferentes solos

Tipo de solo	Condutividade hidráulica (m/h)
Cascalho	10 - 1000
Areia	0,1 - 100
Areia argilosa	0,01 - 1
Franco-arenoso	0,05 - 0,5
Argila	0,001 - 0,1
Silto-argiloso	0,0005 - 0,05

Fonte: Adaptado de Jewell (1996 *apud* MIGUEZ *et al.*, 2016)

Em seguida, calculou-se a vazão específica de saída, dada pela Equação 4.6.

$$q_s = \frac{Q_s}{A_e} \quad \text{Equação 4.6}$$

Onde:

- q_s é a vazão específica de saída (m/h);
- Q_s é a vazão efluente (m³/h);
- A_e é a área de contribuição efetiva calculada pela Equação 4.7.

$$A_e = A * C \quad \text{Equação 4.7}$$

Onde:

- A é a área total de contribuição à estrutura (m²);
- C é o coeficiente de escoamento superficial (runoff).

Com o resultado obtido, multiplicou-se o valor da vazão específica de saída pela duração da chuva e plotou-se a curva, compondo a curva envelope

Na curva envelope, a diferença entre a altura de chuva e a vazão específica de saída representa o volume de água armazenado. Portanto, a partir do maior valor encontrado foi estimado o volume necessário a ser armazenado, aplicando a Equação 4.8.

$$V_{armazenado} = \{máx[H(D, TR) - q_S * D] \div 1000\} * A_e \quad \text{Equação 4.8}$$

Em seguida, calculou-se a profundidade útil do dispositivo de infiltração, dividindo o volume armazenado pela área superficial do dispositivo. Como as estruturas de infiltração são preenchidas com material granular, é necessário considerar a porosidade desse material para o cálculo do volume disponível. Considerou-se o material granular como brita grossa. Portanto, dividiu-se a profundidade útil encontra pela porosidade efetiva do material, determinada pela Tabela 4.12. Assim, o volume de armazenamento é recalculado com base na profundidade total. Neste trabalho, considerou-se que a profundidade encontrada nesse método se refere a camada armazenamento de cada dispositivo LID.

Tabela 4.12 - Porosidade efetiva para materiais típicos

Material	Porosidade efetiva (%)
Rocha dinamitada – brita grossa	30
Cascalho de granulometria uniforme	40
Brita graduado ($\leq 1/4$ polegadas)	30
Areia	25
Cascalho de jazida – seixo rolado	15 - 25

Fonte: Adaptado de Urbonas e Stahre (1993 *apud* MIGUEZ *et al.*, 2016)

Os demais parâmetros de cada camada foram definidos com base em valores recomendados por USEPA (2012).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Simulação hidrológica no modelo SWMM

A Figura 5.1 apresenta o resultado da discretização da bacia Vila Rubens em sub-bacias. Cada sub-bacia tem como exutório um nó que são ligados por canais/trechos, representando as ruas, que fazem o transporte do fluxo de água até o exutório da bacia, localizado no nó N1.11.

A Figura 5.2 ilustra a representação do arranjo proposto para a bacia Vila Rubens no modelo SWMM. As áreas hachuradas e com sigla iniciada por “B” são as sub-bacias, os pontos circulares pretos com sigla iniciada por “N” são os nós, os traçados em linha contínua preta com sigla iniciada por “C” são os canais/trechos, as linhas tracejadas indicam o exutório e cada sub-bacia e o ícone de nuvem com sigla “P1” se refere ao pluviômetro, a entrada de chuva no sistema.



Figura 5.1 – Sub-bacias, nós e canais definidos para o modelo

Fonte: Própria autora (2022)

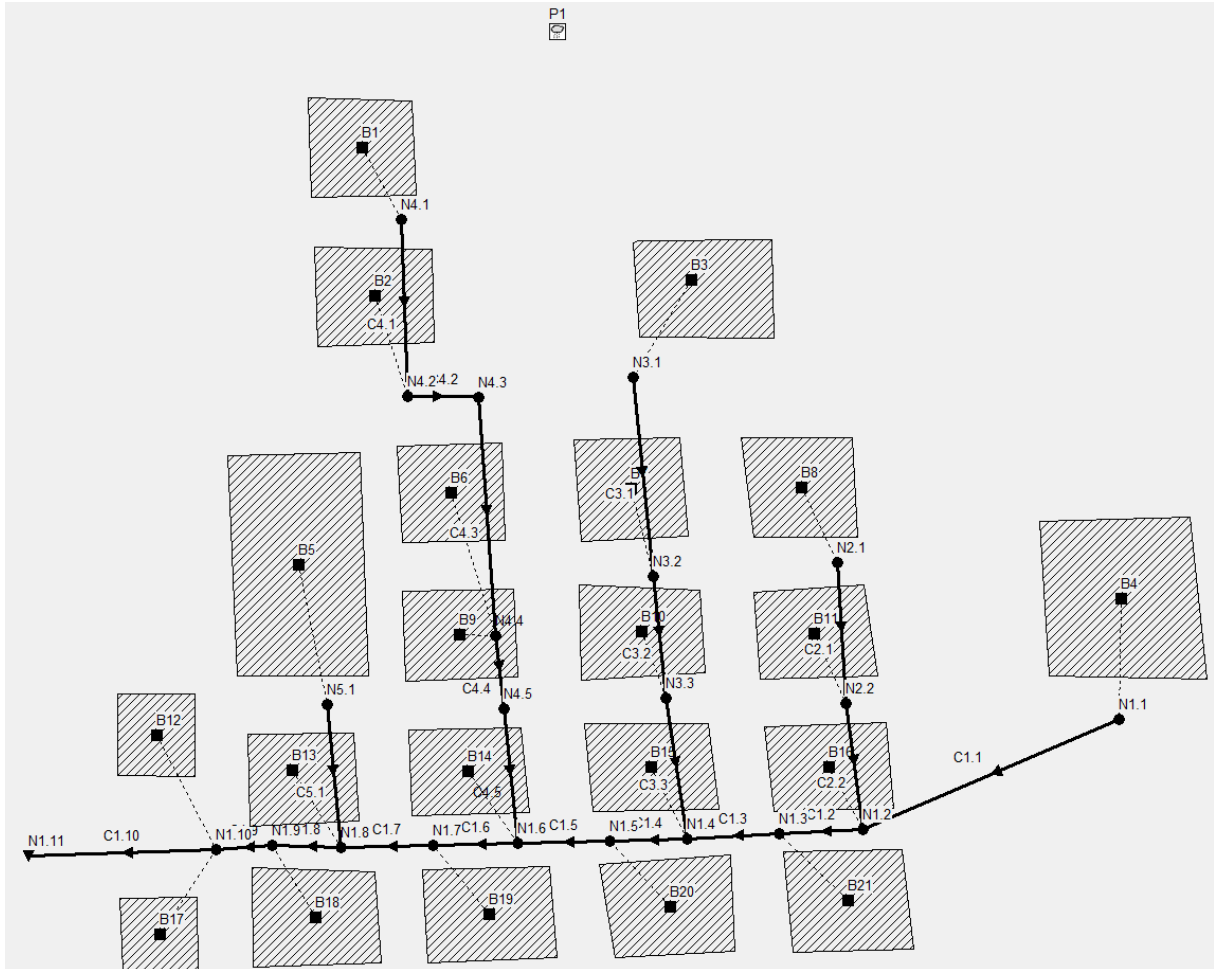


Figura 5.2 – Arranjo da bacia Vila Rubens com suas sub-bacias, nós e canais no modelo SWMM

Fonte: Própria autora (2022)

O arranjo proposto foi definido após diversas tentativas com variações na discretização espacial e foi o que mais se aproximou do cenário atual da bacia. Pode-se observar que o programa é sensível a discretização espacial da bacia e isso pode variar de acordo com a quantidade de informações adquiridas para a realização da simulação. O principal fator dificultador foi a falta de uma topografia mais detalhada que fosse possível melhor visualizar o fluxo de água na região mais plana da bacia, que é a região mais adensada do bairro Vila Rubens. Percebeu-se também que os parâmetros de largura da bacia e área impermeável tem maior sensibilidade. Isso foi comprovado em diversos trabalhos apresentados no capítulo 3.5.2 que analisaram a resposta dos modelos hidrológicos simulados no SWMM para diferentes níveis de discretização espacial, variando em concentrado, semi-distribuído e distribuído.

Portanto, a definição do fluxo da água no bairro foi feita com base no diagnóstico realizado com os moradores, por trabalhos anteriores, como o de Pinto (2014), e pela topografia existente.

Assim, considerou-se que toda a água da sub-bacia Morro Chic (B4) e das sub-bacias que fazem parte do bairro Boa Vista (B17, B18, B19, B20, B21) são direcionadas a rua Evaristo de Barros Filho, a “rua do valetão”, bem como as contribuições dos bairros Vila Isabel e Vila Betel e porção norte do bairro Morro Chic (B1, B2, B3) são direcionadas para a rua José Dias Coelho (rua da escola) e rua José Marques Duarte (rua da Associação Viva a Vida), principais ruas atingidas pelos alagamentos em períodos de chuva.

5.1.1 Dados de entrada

A Tabela 5.1 apresenta o resumo dos dados de entrada para as sub-bacias.

Tabela 5.1 – Resumo dos dados de entrada para as sub-bacias

Bacia	Área (ha)	Largura (m)	Decliv (%)	AI (%)	n - AI	n - AP	Parmaz. - AI (mm)	Parmaz. - AP (mm)	AI sem armazen.	CN	TS (dias)
1	24,27	383,57	31,78	5,6	0,015	0,23	0,14	5,08	25%	62,27	7
2	10,38	220,93	30,13	46,3	0,015	0,26	0,15	5,08	25%	73,01	7
3	8,82	212,25	28,02	58,1	0,016	0,25	0,15	5,08	25%	75,94	7
4	42,75	472,13	15,65	81,2	0,015	0,27	0,20	5,08	25%	82,34	7
5	3,94	110,82	4,98	86,4	0,016	0,17	0,35	5,08	25%	81,90	7
6	1,09	64,84	4,19	99,2	0,015	0,24	0,38	5,08	25%	86,43	7
7	1,27	83,67	4,80	99,1	0,016	0,24	0,36	5,08	25%	85,32	7
8	0,64	49,00	5,76	96,8	0,015	0,27	0,33	5,08	25%	86,68	7
9	0,93	85,20	5,34	87,5	0,015	0,20	0,34	5,08	25%	83,64	7
10	0,88	82,10	4,79	98,2	0,015	0,23	0,36	5,08	25%	85,93	7
11	1,03	80,02	7,48	100,0	0,015	-	0,29	5,08	25%	86,65	7
12	0,37	72,75	5,12	95,7	0,017	0,17	0,35	5,08	25%	84,13	7
13	0,37	71,65	4,41	99,7	0,017	0,24	0,37	5,08	25%	85,34	7
14	0,37	71,98	6,55	99,6	0,017	0,24	0,31	5,08	25%	85,73	7
15	0,46	83,64	4,26	98,6	0,017	0,24	0,38	5,08	25%	86,29	7
16	0,66	129,50	6,65	98,8	0,015	0,24	0,30	5,08	25%	86,12	7
17	1,14	72,75	5,62	96,5	0,017	0,20	0,33	5,08	25%	85,10	7
18	1,12	71,65	4,93	97,2	0,016	0,20	0,35	5,08	25%	85,61	7
19	1,13	71,98	5,90	96,7	0,015	0,24	0,32	5,08	25%	86,56	7
20	1,31	83,64	4,79	98,7	0,015	0,24	0,36	5,08	25%	87,31	7
21	2,40	153,96	4,79	98,4	0,016	0,23	0,36	5,08	25%	86,65	7

*AI = área impermeável; AP = área permeável; Parmaz = profundidade do armazenamento em depressão; TS = tempo seco

A Tabela 5.2 apresenta um resumo dos dados de entrada para os nós e a Figura 5.3 apresenta as áreas alagáveis de cada nó.

Tabela 5.2 – Resumo dos dados de entrada para os nós

Nó	Cota radier (m)	Prof. máx (m)	Área alagável (m ²)
1.1	841,40	0,6	0
1.2	839,40	0,6	902
1.3	839,32	0,6	203

Nó	Cota radier (m)	Prof. máx (m)	Área alagável (m ²)
1.4	839,20	0,6	850
1.5	839,10	0,6	260
1.6	838,98	0,6	600
1.7	838,90	0,6	187
1.8	838,82	0,6	800
1.9	838,72	0,6	308
1.10	838,60	0,6	1245
1.11	838,54	0,6	-
2.1	840,40	0,2	0
2.2	840,15	0,2	964
3.1	841,28	0,2	0
3.2	840,03	0,2	1875
3.3	839,88	0,2	1510
4.1	856,79	0,2	0
4.2	844,00	0,2	0
4.3	841,94	0,2	0
4.4	839,74	0,2	1015
4.5	839,66	0,2	1030
5.1	839,49	0,2	1463



Figura 5.3 - Áreas alagáveis em cima de cada nó

Fonte: Própria autora (2022)

A Tabela 5.3 apresenta um resumo dos dados de entrada para os canais/trechos.

Tabela 5.3 – Resumo dos dados de entrada para os canais

Trecho	Geometria	Prof. Máxima (m)	Largura (m)	Comprimento (m)	Manning	Offset entrada (m)	Offset saída (m)
1.1	Retangular	0,6	7	103,34	0,015	0	0
1.2	Retangular	0,6	7	34,02	0,015	0	0
1.3	Retangular	0,6	7	48,00	0,015	0	0
1.4	Retangular	0,6	7	39,71	0,015	0	0
1.5	Retangular	0,6	7	42,01	0,015	0	0
1.6	Retangular	0,6	7	30,65	0,015	0	0
1.7	Retangular	0,6	7	31,15	0,015	0	0
1.8	Retangular	0,6	7	41,78	0,015	0	0
1.9	Retangular	0,6	7	48,09	0,015	0	0
1.10	Retangular	0,6	7	25,90	0,015	0	0
2.1	Retangular	0,2	7	99,55	0,015	0	0
2.2	Retangular	0,2	7	51,95	0,015	0	839,800
3.1	Retangular	0,2	7	140,75	0,015	0	0
3.2	Retangular	0,2	7	99,51	0,015	0	0
3.3	Retangular	0,2	7	51,61	0,015	0	839,597
4.1	Retangular	0,2	7	269,90	0,015	0	0
4.2	Retangular	0,2	7	132,36	0,015	0	0
4.3	Retangular	0,2	7	221,56	0,015	0	0
4.4	Retangular	0,2	7	49,00	0,015	0	0
4.5	Retangular	0,2	7	51,00	0,015	0	839,376
5.1	Retangular	0,2	7	50,81	0,015	0	839,221

5.1.2 Dispositivos LID

O Quadro 5.1 apresenta a relação dos dispositivos LID implantados, quais as sub-bacias escolhidas para a implantação e os respectivos cenários.

Quadro 5.1 - Dispositivos LID implantados em cada sub-bacia para cada cenário

Cenário	Dispositivo LID	Sub-bacias
2	Pavimento permeável (PP)	B4
3	Pavimento permeável	B6, B7, B9, B10, B11, B12, B13, B14, B15 e B16
	Célula de biorretenção (CB)	B2 e B3
4	Pavimento permeável	B4, B6, B7, B9, B10, B11, B12, B13, B14, B15 e B16
	Célula de biorretenção	B2 e B3
5	Pavimento permeável	B6, B7, B9, B10, B11, B12, B13, B14, B15 e B16
	Célula de biorretenção	B2 e B3

Fonte: Própria autora (2022)

A área disponibilizada para pavimento permeável na sub-bacia B4 corresponde a 50% da área de rua existente no cenário atual da referida sub-bacia. Para os dispositivos nas demais sub-bacias, a Figura 5.4 apresenta a localização de cada um. Como a região mais plana e problemática do bairro Vila Rubens já é consideravelmente adensada, optou-se por implantar pavimentos permeáveis nas ruas mais planas e críticas e algumas células de biorretenção em

espaços que poderiam ser utilizados para esse fim. Para adoção de mais áreas com dispositivos LID e até mesmo outros tipos de dispositivos, necessitaria de estudos mais detalhados.



Figura 5.4 - Localização dos dispositivos LID

Fonte: Própria autora (2022)

Os resultados do dimensionamento dos dispositivos a fim de se obter o volume armazenado se encontram na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Volume de armazenamento para os dispositivos LID

Variáveis	CB				PP									
	B2	B3	B4	B6	B7	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B15	B16	
Área LID (m²)	230	500	28240	1300	1650	880	1100	850	970	860	900	1100	1400	
Área drenada pelo LID (m²)	1346	2871	114464	4642	5920	2940	3890	2482	2867	2534	2647	3228	4961	
Qs (m³/h)	8	16	1539	71	90	29	60	28	32	28	29	36	76	
C runoff	0,5	0,5	0,7	0,8	0,8	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	
Ae (m²)	673	1435	80125	3714	4736	2058	3112	1985	2294	2027	2117	2583	3969	
qs (m/h)	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	
Volume armazenado (m³)	14	30	1257	59	75	39	49	38	44	39	40	49	62	
Prof. útil (m)	0,06	0,06	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	
Porosidade	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	
Prof. total (m)	0,21	0,2	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	
Volume recalculado (m³)	48	101	4191	195	249	130	162	125	146	129	134	164	208	

*CB = célula de biorretenção; PP = pavimento permeável

A Tabela 5.5 e Tabela 5.6 apresentam os valores recomendados por USEPA (2012) para os demais parâmetros de cada camada dos dispositivos LID bem como o valor assumido.

Tabela 5.5 – Valores recomendados e adotados para os parâmetros de cada camada do pavimento permeável

Superfície		
Parâmetro	Valor recomendado*	Valor adotado
Profundidade de armazenamento (mm)	-	0
Fração de cobertura vegetal	-	0
Coefficiente de rugosidade "n"	0,013	0,013
Declividade da superfície (%)	-	Varia conforme a declividade do trecho
Pavimento		
Parâmetro	Valor recomendado*	Valor adotado
Espessura (mm)	100 - 150	100
Índice de vazios	0,12 - 0,21	0,165
Fração da superfície impermeável	0	0
Permeabilidade	100	100
Fator de colmatção	-	0
Armazenamento		
Parâmetro	Valor recomendado*	Valor adotado
Espessura (mm)	150 - 450	150
Índice de vazio	0,5 - 0,75	0,5
Taxa de filtração (mm/h)	250 - 750	500
Fator de colmatção	-	0

*Valores recomendados por ROSSMAN (2015)

Tabela 5.6 – Valores recomendados e adotados para os parâmetros de cada camada da célula de biorretenção

Superfície		
Parâmetro	Valor recomendado*	Valor adotado
Profundidade de armazenamento (mm)	-	5,08
Fração de cobertura vegetal	-	0,05
Coefficiente de rugosidade "n"	0,4	0,4
Declividade da superfície (%)	-	0,5
Solo		
Parâmetro	Valor recomendado*	Valor adotado
Espessura (mm)	450 - 900	450
Porosidade	0,437	0,437
Capacidade de campo	0,105	0,105
Ponto de murcha	0,047	0,047
Condutividade hidráulica (mm/h)	29,972	29,972
Declividade da condutividade hidráulica	30 - 60	30
Pressão de sucção (mm)	60,96	60,96
Armazenamento		
Parâmetro	Valor recomendado*	Valor adotado
Espessura (mm)	150 - 450	200
Índice de vazio	0,5 - 0,75	0,5
Taxa de filtração (mm/h)	250 - 750	500
Fator de colmatção	-	0

*Valores recomendados por ROSSMAN (2015)

5.1.3 Cenários simulados

Para todos os cenários simulados, os erros numéricos do modelo foram muito baixos, menores que 1%, sendo considerados insignificantes para o modelo matemático e podendo dizer que o modelo é confiável.

O cenário atual foi simulado para diferentes durações de chuva a fim de se encontrar a duração crítica. Para o tempo de retorno de 2, 5 e 10 anos, a duração crítica do escoamento foi de 30 min, como se pode observar na Figura 5.5, Figura 5.6 e Figura 5.7, respectivamente. Para o TR de 2 anos, a vazão de pico foi de 10.651 l/s, para o TR de 5 anos foi de 11.718 l/s e para TR de 10 anos foi de 12.299 l/s.

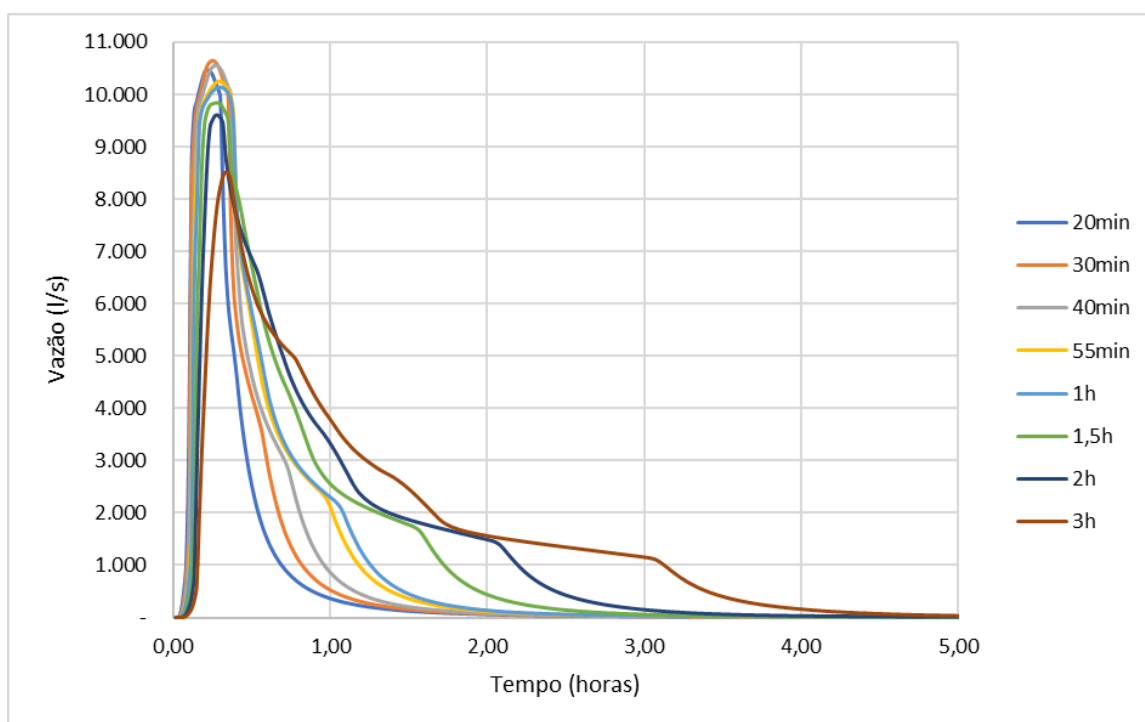


Figura 5.5 - Hidrograma defluente para TR de 2 anos
Fonte: Própria autora (2022)

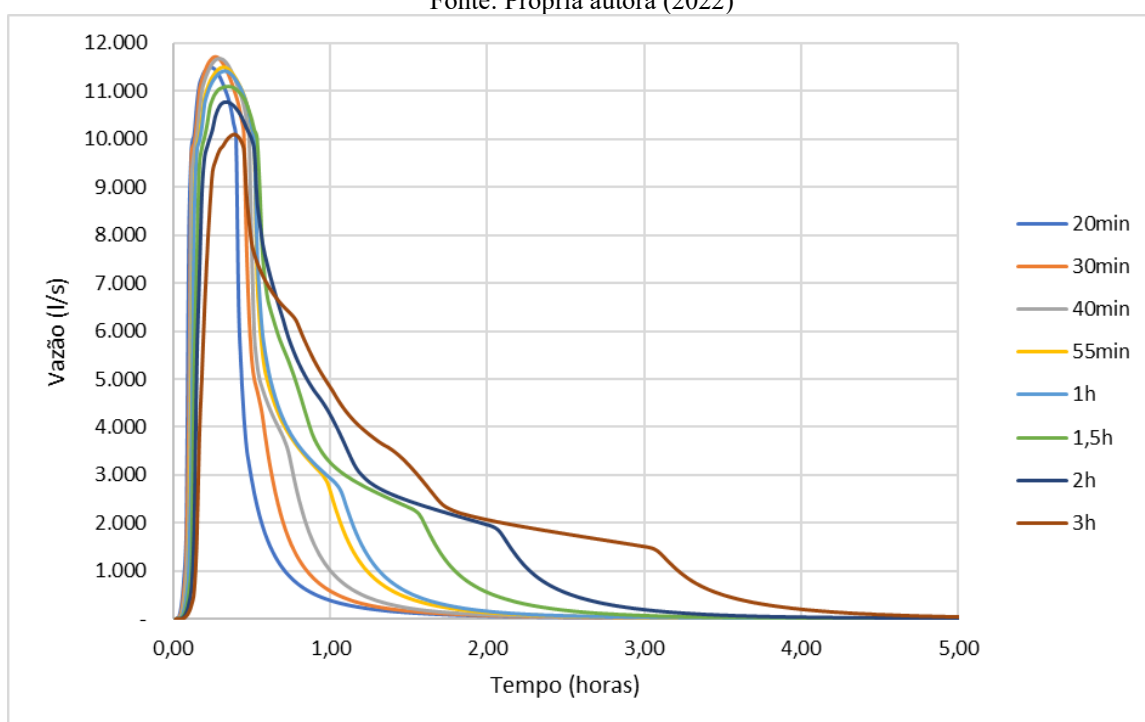


Figura 5.6 - Hidrograma defluente para TR de 5 anos
Fonte: Própria autora (2022)

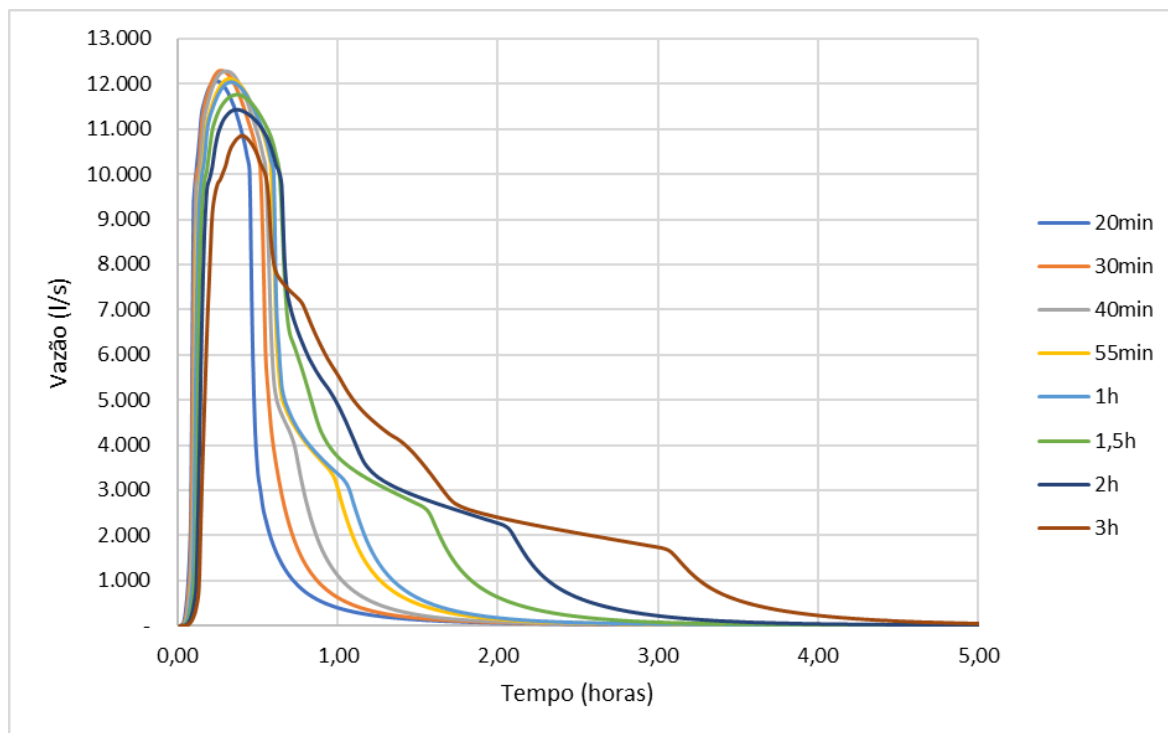


Figura 5.7 - Hidrograma defluente para TR de 10 anos
Fonte: Própria autora (2022)

Pode-se observar também a variação altura da área alagada em cima do nó (Figura 5.8, Figura 5.9 e Figura 5.10). Os principais pontos de alagamento foram na rua Evaristo Barros Filho (rua do valetão) e no nó em frente à escola e à associação, os quais são pontos críticos de alagamento conforme relatado pelos moradores. O nó N1.6 é o que apresenta maior altura alagada devido ao fluxo de água que recebe da rua da escola. Para TR de 10 anos, o nó N1.4 já passa a ter alturas de alagamento maiores devido ao fluxo de água advindo da rua da associação.

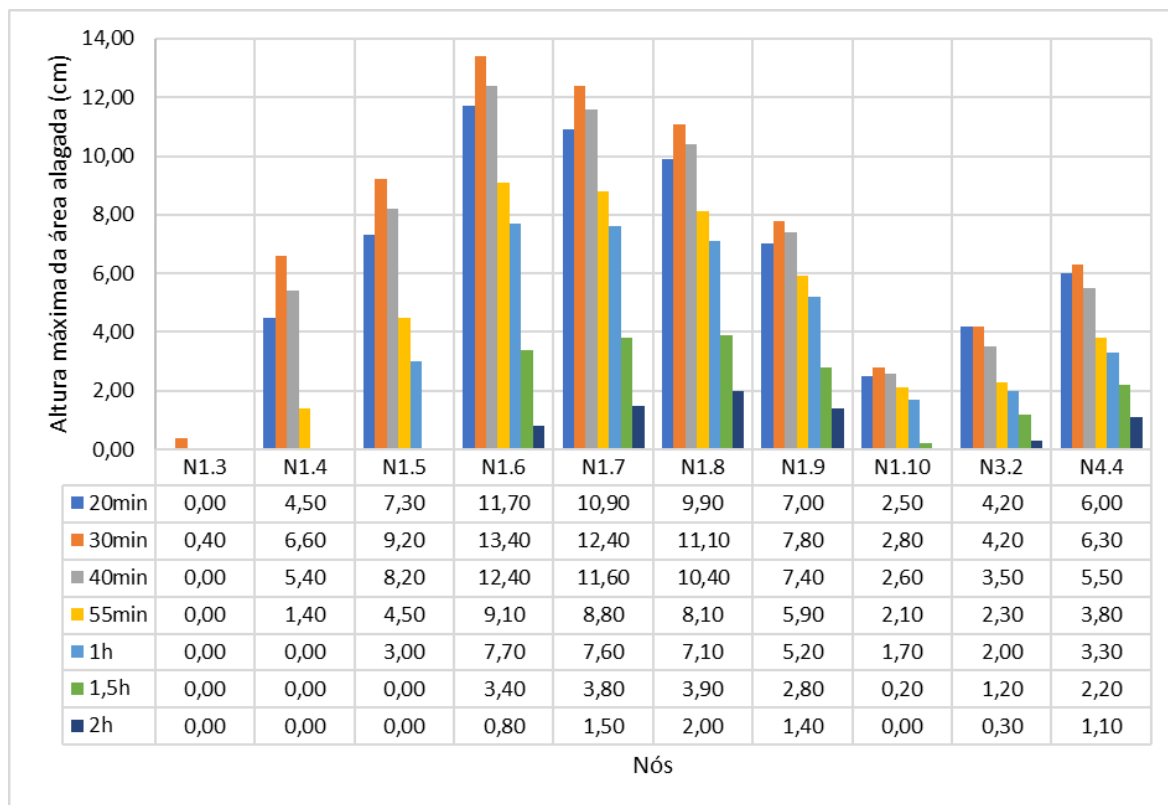


Figura 5.8 – Altura máxima da área alagada em cada nó para TR de 2 anos

Fonte: Própria autora (2022)

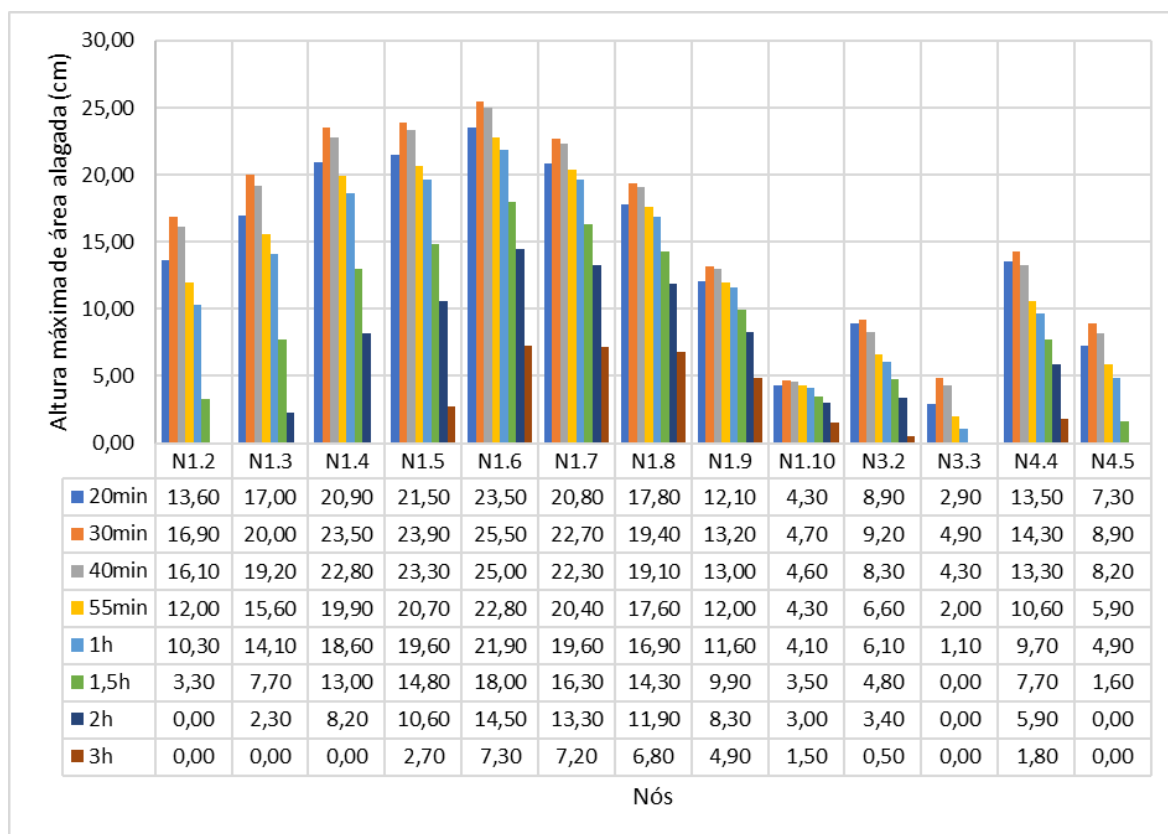


Figura 5.9 – Altura máxima da área alagada em cada nó para TR de 5 anos

Fonte: Própria autora (2022)

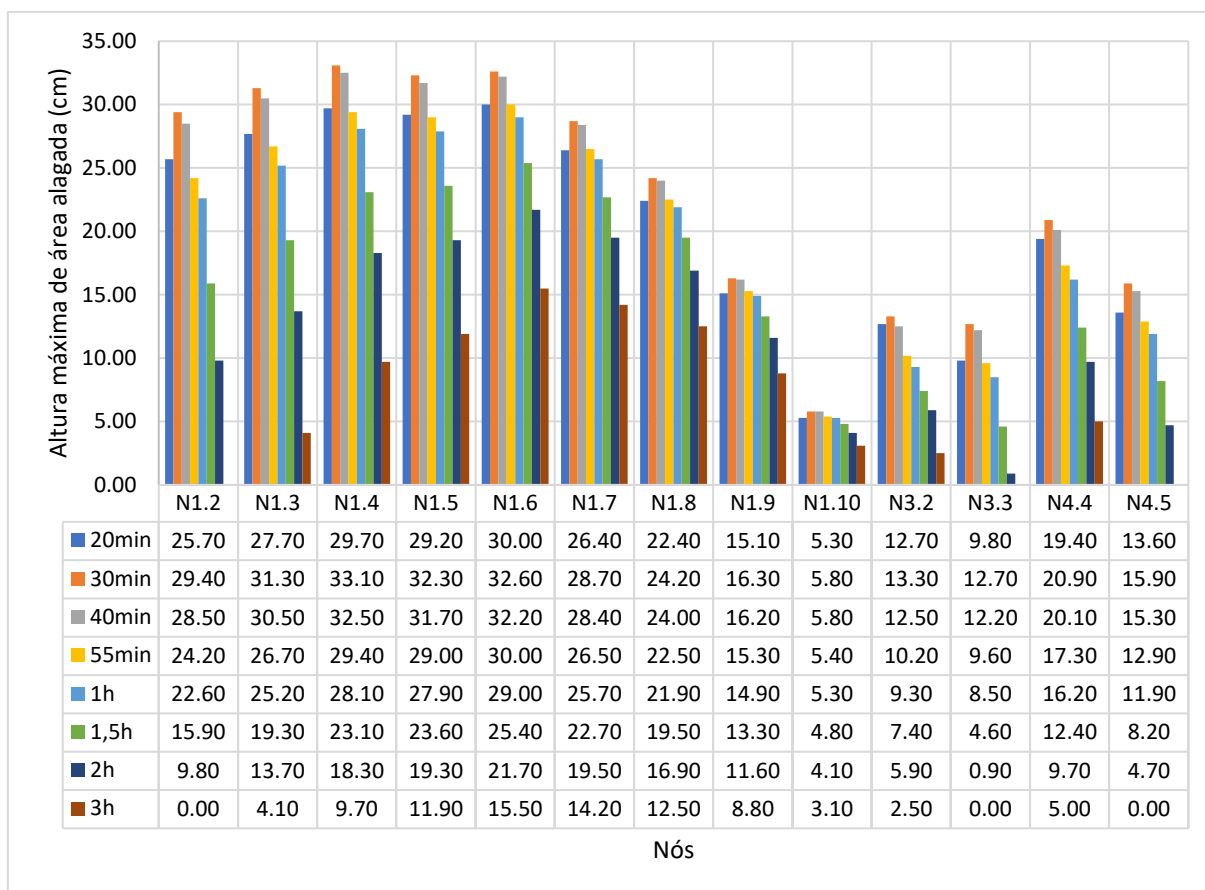


Figura 5.10 – Altura máxima da área alagada em cada nó para TR de 10 anos

Fonte: Própria autora (2022)

Pela Tabela 5.7 é possível observar que a sub-bacia que tem maior contribuição no escoamento superficial é a B4 (maior parte do bairro Morro Chic). Ela possui uma grande área de drenagem se comparado as demais sub-bacias, mas também apresenta extensa área impermeabilizada. Em seguida, as sub-bacias B2 e B3 também apresentam grande contribuição no escoamento. Apesar de possuírem grande parcela de área permeável quando comparada as demais, elas apresentam alta declividade, aumentando a velocidade do escoamento superficial e diminuindo a capacidade de infiltração.

Já a sub-bacia B1 possui a maior parcela de área permeável. Sua contribuição no escoamento superficial não é muito alta se comparada as sub-bacias já citadas, mas a vazão de pico do escoamento se aproxima ao de algumas sub-bacias que tem maior escoamento que ela ou sua vazão supera as sub-bacias com mesmo escoamento que ela. Isso se deve, principalmente, a alta declividade da sub-bacia B1.

Tabela 5.7 - Resultados de escoamento superficial por sub-bacia para o cenário atual para chuva com duração de 30 min

Bacia	TR = 2 ANOS		TR = 5 ANOS		TR 10 = ANOS	
	Escoamento superficial total (m ³)	Vazão de pico do escoamento (l/s)	Escoamento superficial total (m ³)	Vazão de pico do escoamento (l/s)	Escoamento superficial total (m ³)	Vazão de pico do escoamento (l/s)
B1	350,00	630,48	430,00	784,06	490,00	887,20
B2	1.220,00	1.477,29	1.520,00	1.950,75	1.730,00	2.263,44
B3	1.300,00	1.439,58	1.630,00	1.882,23	1.860,00	2.195,46
B4	8.770,00	6.106,18	10.950,00	7.991,32	12.380,00	9.233,02
B5	860,00	654,30	1.070,00	856,84	1.210,00	989,64
B6	270,00	253,43	340,00	326,04	380,00	375,39
B7	320,00	304,57	390,00	393,41	440,00	452,22
B8	160,00	167,13	190,00	217,80	220,00	252,26
B9	210,00	241,16	260,00	320,37	290,00	372,80
B10	220,00	240,99	270,00	314,99	300,00	368,07
B11	260,00	290,61	320,00	381,43	360,00	445,14
B12	90,00	132,07	110,00	170,94	130,00	196,12
B13	90,00	130,91	110,00	170,61	130,00	196,46
B14	90,00	141,15	110,00	181,91	130,00	208,26
B15	110,00	156,40	140,00	204,58	160,00	236,04
B16	160,00	261,24	200,00	334,28	230,00	381,28
B17	280,00	267,44	340,00	345,69	390,00	397,15
B18	270,00	263,78	340,00	340,78	380,00	391,67
B19	280,00	278,40	340,00	360,37	380,00	416,95
B20	330,00	315,92	400,00	408,85	450,00	469,48
B21	590,00	568,24	740,00	733,20	830,00	843,32

A partir dos resultados obtidos, foram simulados alguns cenários alternando as medidas de minimização dos impactos causados pelas chuvas a fim de se compreender o comportamento hidrológico da bacia frente a essas medidas e ajudar em uma futura tomada de decisão por parte do poder público municipal. As medidas propostas foram implementadas apenas para caráter de planejamento, sendo que, para sua execução, são necessários estudos de engenharia mais detalhados além de estudos de viabilidade econômica.

As simulações dos cenários foram feitas utilizando a duração crítica de chuva encontrada no cenário atual, que foi de 30 minutos.

A Tabela 5.8 apresenta o balanço hídrico para cada cenário. Observa-se que o escoamento superficial teve uma grande redução nos cenários 1 e 5 devido ao redirecionamento do escoamento da sub-bacia 4. O cenário 5 ainda conta com a presença de dispositivos LID em algumas sub-bacias do bairro Vila Rubens. Com elas, a infiltração e o armazenamento foram maiores e o escoamento superficial menor em relação ao cenário 1.

Em relação aos cenários 2, 3 e 4, os quais apresentam somente dispositivos LID como medida de controle, observa-se que no cenário 3 o escoamento superficial foi maior e a infiltração foi menor em relação ao cenário 2. Em contrapartida, o armazenamento no cenário 3 foi maior que o do cenário 2. Pode-se dizer que para a redução do escoamento superficial, seria mais válido implantar medidas de controle no bairro Morro Chic do que no bairro Vila Rubens. Já o cenário 4 representa a união dos cenários 2 e 3, sendo a solução ideal entre os três cenários analisados para melhora no fluxo da água em termos quantitativos.

Tabela 5.8 – Balanço hídrico de cada cenário simulado para chuva com duração de 30 min

Cenário	TR	Precipitação total (m ³)	Infiltração (m ³)	Escoamento superficial (m ³)	Armazenamento (m ³)
Atual	2 anos	26.640	9.850	16.220	610
	5 anos	32.840	12.080	20.210	610
	10 anos	36.820	13.410	22.850	620
1	2 anos	15.830	7.950	7.450	460
	5 anos	19.510	9.830	9.260	460
	10 anos	21.880	10.980	10.470	460
2	2 anos	26.640	12.580	13.460	640
	5 anos	32.840	15.070	17.200	620
	10 anos	36.820	16.540	19.710	630
3	2 anos	26.640	10.660	15.350	690
	5 anos	32.840	12.950	19.270	680
	10 anos	36.820	14.330	21.880	690
4	2 anos	26.640	13.370	12.620	700
	5 anos	32.840	15.920	16.310	680
	10 anos	36.820	17.420	18.780	690
5	2 anos	15.830	8.730	6.610	520
	5 anos	19.510	10.680	8.370	520
	10 anos	21.880	11.860	9.550	520

As informações discutidas acima podem ser confirmadas ao analisar as alturas máximas de área alagável (Figura 5.11, Figura 5.12 e Figura 5.13). Somente os nós N3.2 e N4.4 tiveram alagamentos em todos os cenários, pois são pontos críticos do modelo. Mesmo assim, a altura de água reduziu para alguns cenários.

No geral, para os cenários 1 e 5, não ocorreram alagamentos na rua do valetão. Já o cenário 3 apresentou alagamento em diversos nós, ficando próximo dos valores de altura de alagamento do cenário atual para TR de 5 e 10 anos. Os cenários 2 e 4 apresentaram maiores alturas de alagamento somente para TR de 5 e 10 anos, porém com valores relativamente menores que os do cenário 3.

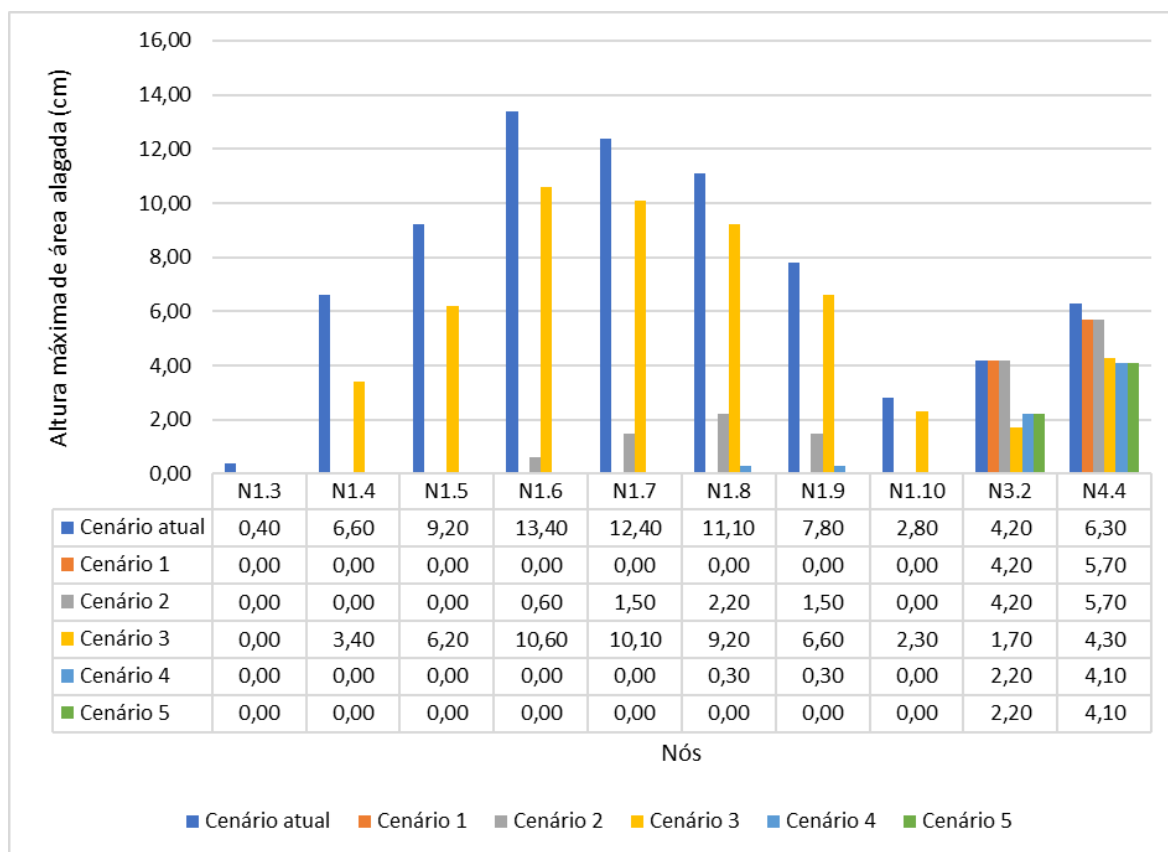


Figura 5.11 – Altura máxima da área alagada em cada cenário para chuva de duração de 30 min e TR de 2 anos
Fonte: Própria autora (2022)

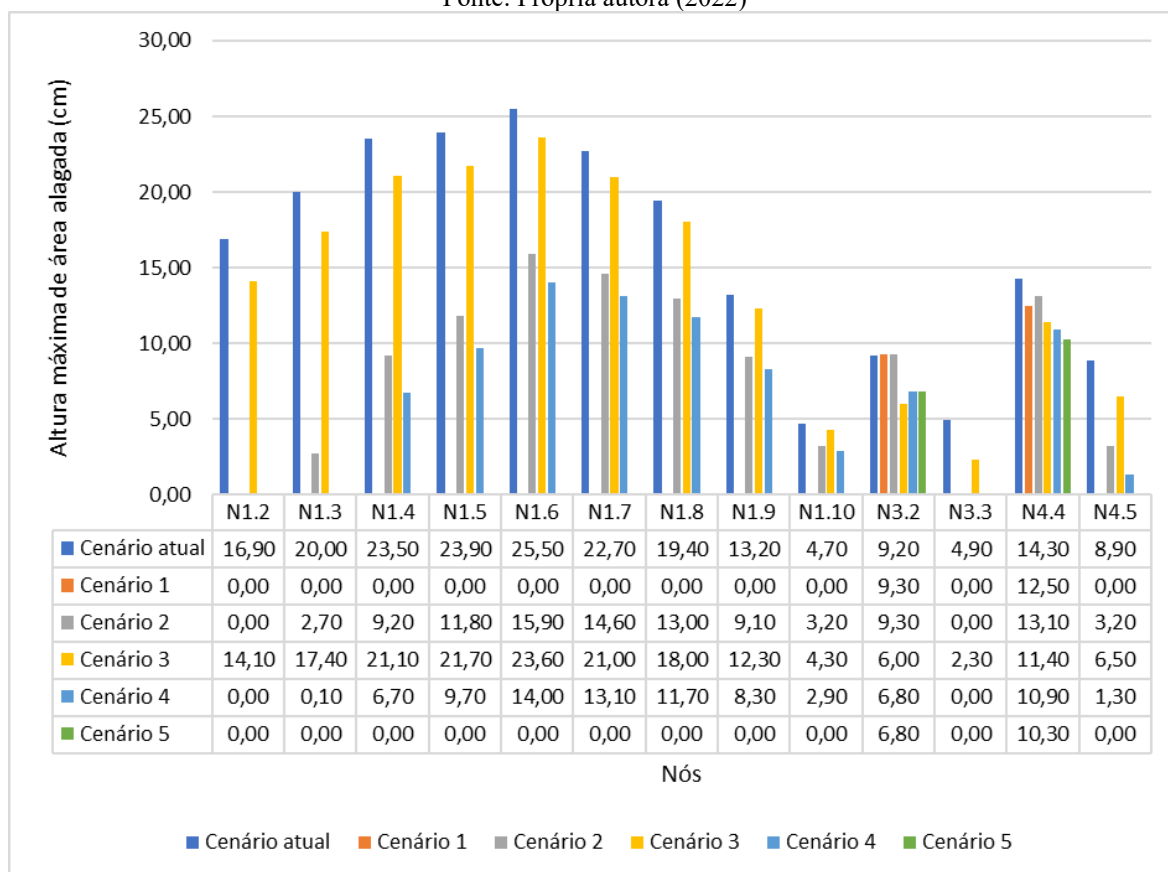


Figura 5.12 – Altura máxima da área alagada em cada cenário para chuva de duração de 30 min e TR de 5 anos
Fonte: Própria autora (2022)

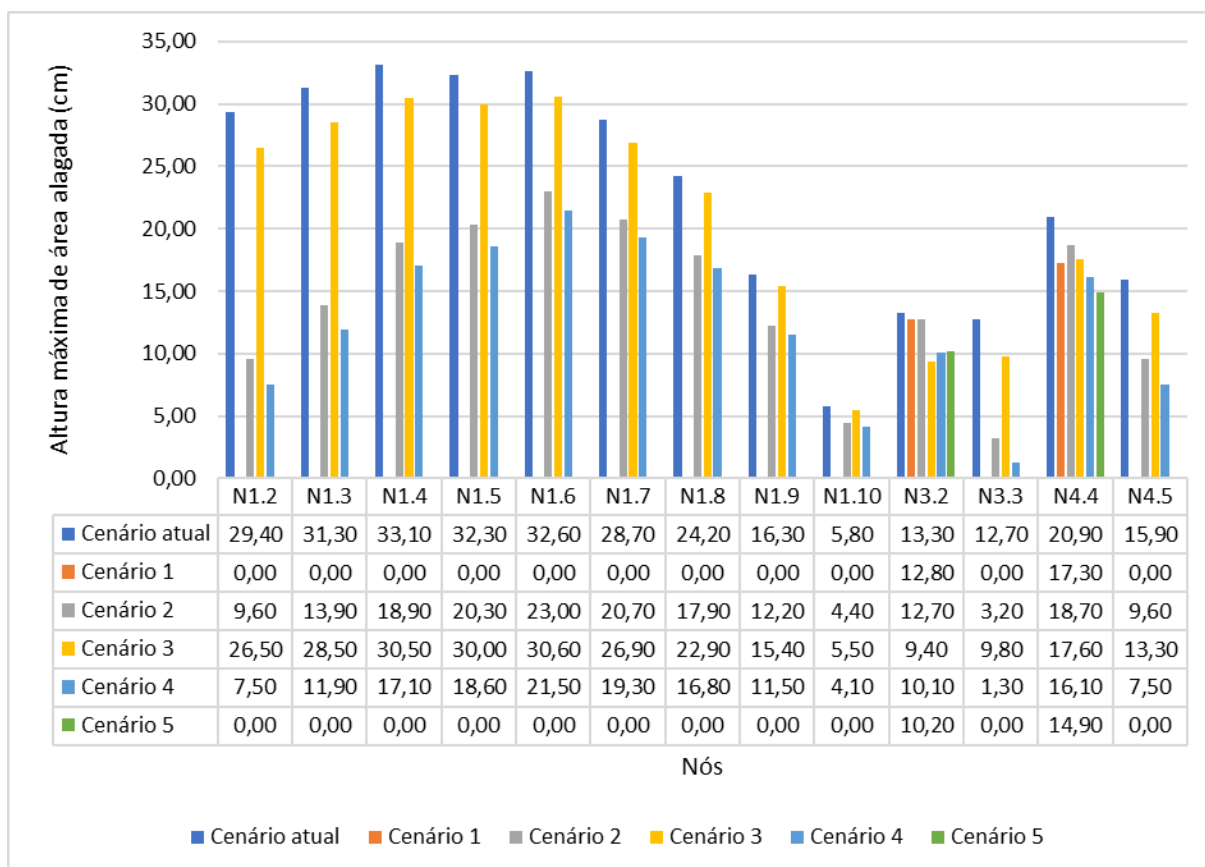


Figura 5.13 – Altura máxima da área alagada em cada cenário para chuva de duração de 30 min e TR de 10 anos
Fonte: Própria autora (2022)

A Figura 5.14, Figura 5.15 e Figura 5.16 apresentam o hidrograma defluente para cada cenário e a Tabela 5.9, Tabela 5.10 e Tabela 5.11 apresentam o volume defluente, a vazão máxima defluente e vazão média que desagua no exutório da bacia Vila Rubens. Os dados apresentados reforçam o exposto acima. No geral, o cenário 3 apresenta os maiores valores de volume, vazão máxima e vazão média defluente enquanto os valores para o cenário 2 são melhores. Já o cenário 4 seria o cenário ótimo entre os três.

O tempo de pico do hidrograma dos cenários 1 e 5 foi menor em relação aos demais devido a redução da área de drenagem, alterando o tempo de concentração.

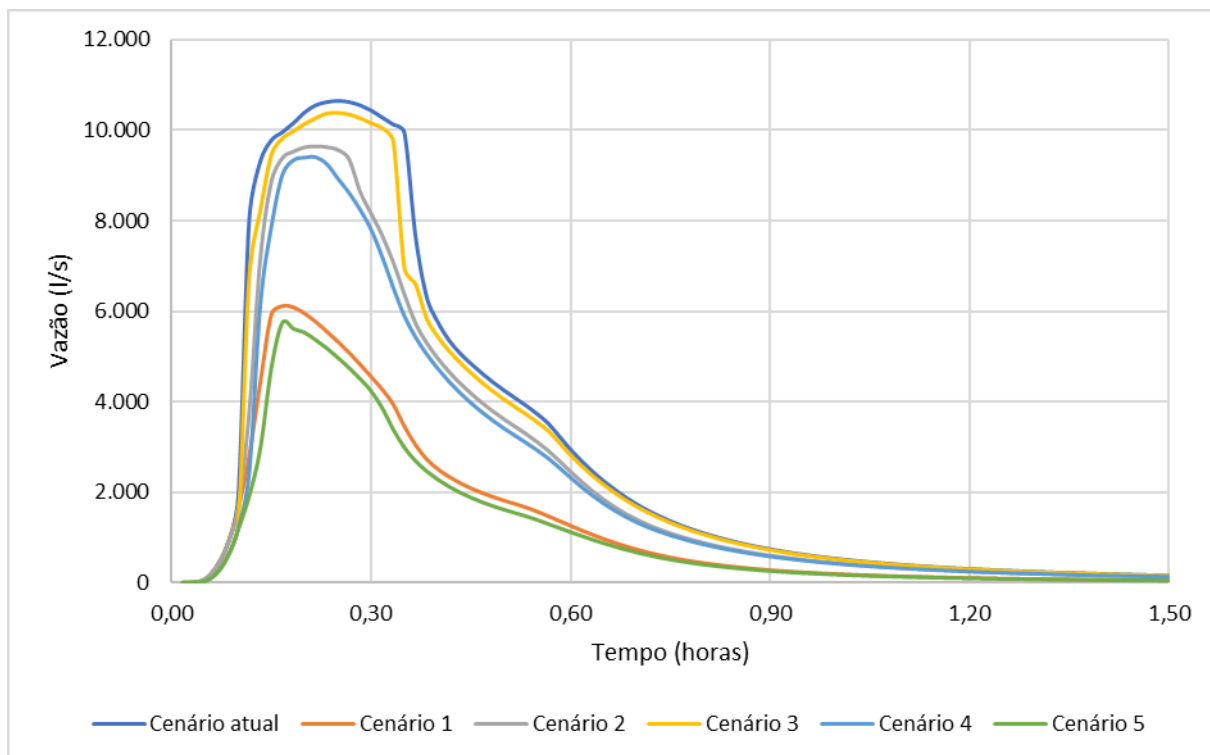


Figura 5.14 – Vazão defluente da bacia em cada cenário para chuva de duração de 30 min e TR de 2 anos

Fonte: Própria autora (2022)

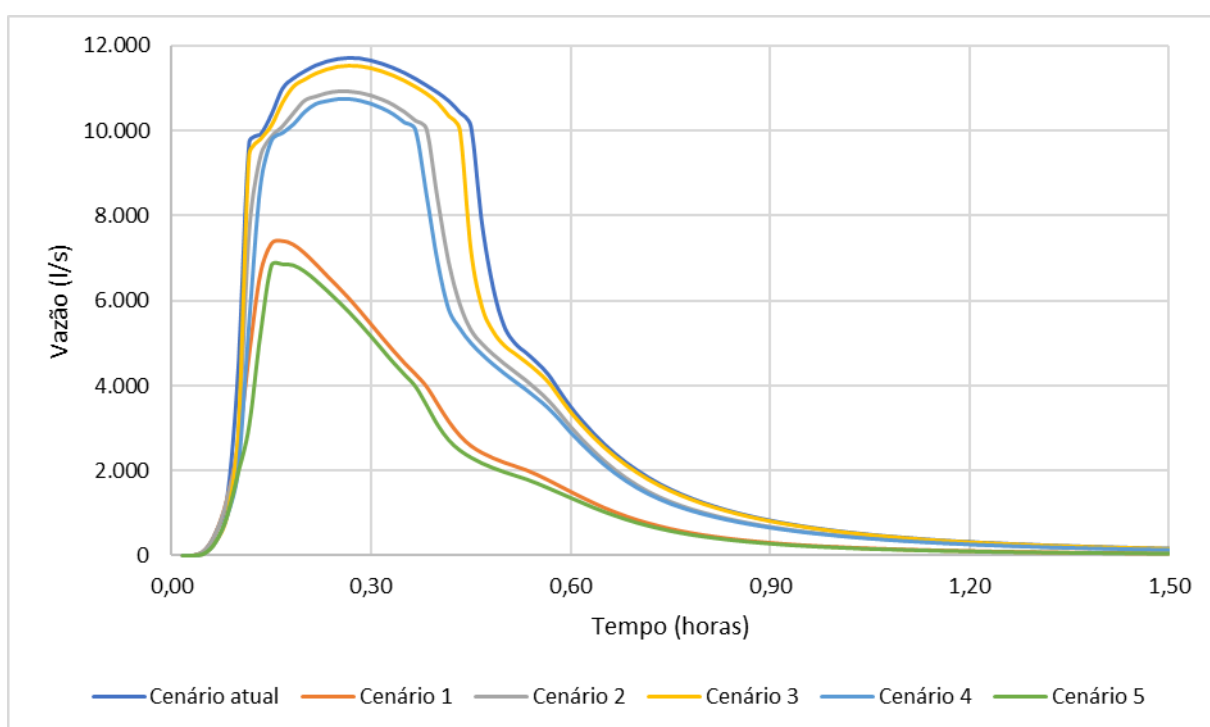


Figura 5.15 – Vazão defluente da bacia em cada cenário para chuva de duração de 30 min e TR de 5 anos

Fonte: Própria autora (2022)

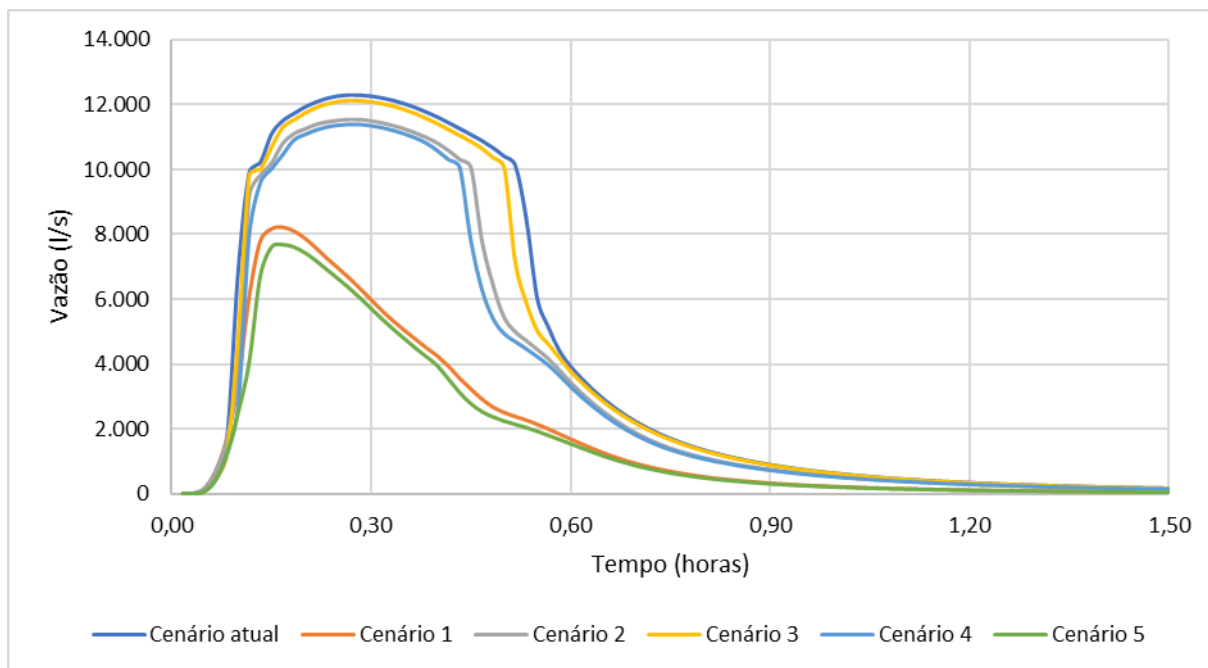


Figura 5.16 – Vazão defluente da bacia em cada cenário para chuva de duração de 30 min e TR de 10 anos
Fonte: Própria autora (2022)

Tabela 5.9 - Resultados referentes ao exutório da bacia Vila Rubens para chuva de duração de 30 min e TR de 2 anos

Cenários	Volume total (m ³)	Vazão máxima (l/s)	Vazão média (l/s)
Atual	16225,00	10651,11	105,32
1	7450,00	6151,96	84,02
2	13460,00	9645,74	91,68
3	15355,00	10388,67	100,73
4	12627,00	9409,24	86,77
5	6617,00	5751,68	76,83

Tabela 5.10 - Resultados referentes ao exutório da bacia Vila Rubens para chuva de duração de 30 min e TR de 5 anos

Cenários	Volume total (m ³)	Vazão máxima (l/s)	Vazão média (l/s)
Atual	20217,00	11718,24	131,09
1	9267,00	7407,53	104,44
2	17207,00	10931,65	117,1
3	19280,00	11535,41	126,44
4	16314,00	10754,15	112,01
5	8373,00	6878,02	97,16

Tabela 5.11 - Resultados referentes ao exutório da bacia Vila Rubens para chuva de duração de 30 min e TR de 10 anos

Cenários	Volume total (m ³)	Vazão máxima (l/s)	Vazão média (l/s)
Atual	22857,00	12299,06	148,32
1	10479,00	8229,66	118,06
2	19713,00	11548,84	134,2
3	21883,00	12132,04	143,47

4	18788,00	11397,03	129,01
5	9553,00	7684,79	110,81

Com base no que foi exposto, a bacia Vila Rubens é um típico caso da visão higienista, onde são priorizadas canalizações para que a água escoe o mais rápido possível para fora da bacia, levando os problemas para a jusante. A principal causa de alagamentos no bairro Vila Rubens, mas não somente, é o direcionamento do grande volume de água escoada no bairro Morro Chic para o ribeirão Água Preta.

As medidas implantadas na fonte, ou seja, no bairro Morro Chic, tiveram resultados mais satisfatórios do que aquelas implantadas diretamente no bairro Vila Rubens. No cenário em que se implantou medidas em ambos os bairros, houve uma redução pouco significativa no escoamento superficial comparado ao cenário 2. Assim, é necessário um estudo mais aprofundado para verificar se existem outras áreas que possam ter a implantação de LID, se seria viável economicamente e levando em consideração o nível do lençol freático da região.

Além disso, a região do bairro Vila Rubens é uma planície de inundação do rio Sapucaí e seus afluentes da margem direita, o que contribui para a formação de alagamentos nas vias. Isso também dificulta a implantação de algumas medidas de controle devido ao provável nível elevado do lençol freático que deve haver na área. Como exposto por Miguez *et al.* (2016), a utilização de pavimentos permeáveis e demais dispositivos LID com o objetivo de infiltração é restrita à dependência do nível lençol freático, do tipo de solo e de manutenção.

Vale ressaltar que a bacia em estudo é uma região com grande adensamento urbano já consolidada, o que dificulta a implantação de LIDs em espaços públicos, principalmente as de grande porte. Dessa forma, essas medidas ajudariam a minimizar os impactos causados pelos alagamentos, mas não os eliminar completamente. Alves *et al.* (2022) abordam essa questão e mostram que medidas implementadas em lotes privados podem compensar a falta de espaços públicos disponíveis. Para que isso aconteça, é necessário que a gestão urbana promova a integração dos membros da comunidade no processo de planejamento e tomada de decisão

Neste trabalho também foi desconsiderada a rede de microdrenagem existente no bairro por não se conhecer ao certo a localização dos seus componentes e suas dimensões. Ainda, como relatado pelos moradores e no plano de saneamento básico de Itajubá, os canais e galerias existentes se encontram assoreados devido a sua baixa declividade ao longo do

percurso e falta de limpeza constante. Então, uma correta manutenção da rede de drenagem do bairro poderia minimizar alguns impactos gerados no período chuvoso.

Recomenda-se também a instalação de um pluviômetro no bairro para monitorar as chuvas que ocorrem na região e, assim, obter resultados mais precisos em modelos hidrológicos.

Em relação a aplicação do modelo hidrológico SWMM para estudo de alagamentos em áreas urbanas, pode-se perceber que é possível aplicar o modelo mesmo com poucas informações. Para isso, pode-se recorrer a equações empíricas, a dados presentes na literatura e, principalmente, a levantamentos em campo e a validação com os moradores do local estudado.

No presente trabalho, utilizou-se dados de uma série histórica de chuva de uma estação pluviométrica localizada próxima a área de estudo. Porém, quando não há séries de chuvas extensas, com no mínimo 30 anos, ou nem mesmo existe uma estação pluviométrica, pode-se utilizar outros métodos, como a equação IDF (intensidade-duração-frequência) do município estudado para se determinar a chuva intensa e, em seguida, definir a chuva de projeto.

A topografia serve de base para o estudo e pode-se encontrar modelos digitais de elevação gratuitos com boa resolução, como o *Alos Palsar*. Em regiões muito planas, como o caso do bairro Vila Rubens, o MDE não foi suficiente. Nesse caso, a visita a campo aliada a validação dos moradores em relação aos pontos críticos de alagamento tornou possível a calibração do modelo.

Analisando as classes de uso e ocupação do solo definidas neste estudo, segundo Kokkonen *et al.* (2019), o nível de detalhamento da descrição da cobertura do solo pode influenciar no desempenho de um modelo hidrológico urbano, podendo impactar, principalmente, em regiões de baixa densidade com cobertura de solo mista, ou seja, áreas com casas isoladas e grandes áreas contínuas de vegetação que possuem diferentes tipos de cobertura de solo. Portanto, isso pode influenciar o escoamento entre áreas impermeáveis e permeáveis e, conseqüentemente, o resultado da vazão de saída do sistema.

Dessa forma, no presente trabalho, acredita-se que as classes de cobertura do solo definidas foram suficientes e coerentes para a definição do parâmetro CN e para a representação da área de estudo no modelo hidrológico, já que era uma região pequena e previamente conhecida. No entanto, sugere-se que trabalhos futuros analisem a sensibilidade desse

parâmetro em relação a diferentes níveis de detalhamento do apresentado nesse estudo, principalmente no quesito de áreas impermeáveis.

Os demais parâmetros de entrada do modelo podem ser obtidos por meio de softwares de geoprocessamento e baseados em estudos encontrados na literatura. Pela revisão bibliométrica, pode-se observar que há diversos estudos científicos relacionados ao tema de modelagem hidrológica para análise de alagamentos e inundações.

Porém, deve ficar claro que tanto o modelo SWMM quanto outros modelos hidrológicos possuem uma série de incertezas, como exposto por Guan *et al.* (2015) e Elga *et al.* (2015). Alguns estudos relatam que os parâmetros mais sensíveis do modelo SWMM são a impermeabilidade, o armazenamento em depressão e o coeficiente “n” de Manning para o escoamento superficial e para o escoamento em conduto. Essa sensibilidade pode variar de acordo com certas condições do estudo, como a variação temporal da chuva. No entanto, o parâmetro de impermeabilidade foi o mais sensível em qualquer simulação (Barco *et al.*, 2008; Miller *et al.*, 2014; Krebs *et al.*, 2014; Guan *et al.*, 2015).

Portanto, frente a essas incertezas, pode-se dizer que a validação com os moradores é fundamental na aplicação do modelo SWMM para áreas com poucos dados que alimentam o modelo e sem dados medidos de vazão para calibração e verificação.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a aplicabilidade do modelo hidrológico SWMM para análise de alagamentos em bairros urbanos que possuem poucos dados de entrada do modelo. Para isso, foi realizado o estudo de caso no bairro Vila Rubens, em Itajubá/MG, onde foi aplicado o modelo SWMM para analisar as principais causas de alagamento e os efeitos da adoção de algumas medidas sustentáveis de controle de drenagem urbana.

Na modelagem hidrológica da bacia Vila Rubens, a etapa de diagnóstico e caracterização da área de estudo foram fundamentais para a definição do sistema no SWMM e a discretização espacial das sub-bacias. Ressalta-se que a visita ao bairro e as informações disponibilizadas pelos moradores foram essenciais para entender a realidade da bacia. Dessa forma, essa etapa inicial é de grande importância para o desenvolvimento de modelos hidrológicos, pois auxilia na determinação de muitos critérios e parâmetros.

Apesar da grande quantidade de dados de entrada necessários e a dificuldade encontrada devido à falta de uma topografia mais detalhada, os resultados obtidos na simulação do cenário atual foram considerados coerentes para representar a situação real da bacia. A calibração do modelo foi realizada por meio da validação dos moradores em relação aos pontos críticos de alagamento do bairro.

Constatou-se que o modelo semi-distribuído permitiu visualizar as principais influências na bacia e que o modelo SWMM é capaz de apresentar bons resultados e uma grande quantidade de informações sobre cada simulação. Mesmo com poucas informações sobre o local de estudo, é possível construir um modelo coerente com a realidade por meio de levantamento de campo, estudos sobre o tema presentes na literatura e a validação com os moradores.

Os resultados da simulação hidrológica corroboram para a hipótese levantada no diagnóstico de que o escoamento superficial vindo do bairro Morro Chic é um dos principais causadores da sobrecarga do sistema de drenagem do bairro Vila Rubens e consequente alagamento das ruas. Além disso, a própria topografia do bairro e a sua localização em uma planície de inundação favorecem a geração de alagamentos.

As medidas de controle da drenagem urbana propostas (alteração do direcionamento do escoamento superficial vindo do bairro Morro Chic e dispositivos LID) mostraram resultados significativos na redução dos alagamentos no bairro Vila Rubens. Essas medidas servem,

principalmente, para subsidiar o planejamento urbano e a tomada de decisões, com foco em implantação de técnicas compensatórias de controle na fonte.

Dessa forma, o presente trabalho poderá servir de base para entender o comportamento hidrológico da bacia Vila Rubens estudada e subsidiar futuros trabalhos para melhora das condições de drenagem do bairro. Além disso, poderá ser usado como uma ferramenta inicial de planejamento e para cobrança ao poder público que medidas sejam tomadas para melhoria da qualidade de vida dos moradores que ali residem.

Esse estudo pode ser aplicado em outras áreas urbanas de Itajubá que sofrem com alagamentos para avaliar se há outros gargalos e lacunas que merecem atenção. Sugere-se que em trabalhos futuros sejam feitos estudos comparativos em regiões com mais dados, ou até mesmo detalhar a topografia do bairro Vila Rubens e comparar os resultados, a fim de refinar a metodologia aqui proposta. Ainda, pode ser feita uma análise de sensibilidade dos parâmetros de entrada do modelo a fim de verificar quais deles podem gerar maior divergência nos resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, L. G. F.; GALVÃO, C. O.; SANTOS, B. L. F.; OLIVEIRA, E. F.; MORAES, D. A. *Modelling and assessment of sustainable urban drainage systems in dense precarious settlements subject to flash floods*. **LHB**, v. 108, n.1, p. 1-11, 2022.

AMBVR – ASSOCIAÇÃO DE MORADORES DO BAIRRO VILA RUBENS. **Visita técnica realizada em 09 de junho de 2021 e material fornecido**. 2021.

ANA. **Portal Hidroweb**. 2022. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/apresentacao.jsf>. Acesso: 20/01/2022.

AQUINO, A. F.; NÓBREGA, M. R.; GOMES, M. E. S. S.; SILVA, M. V. A urbanização no Brasil: dos primórdios aos processos de industrialização e transição demográfica. *In*: Simpósio Regional de Geografia, 4., 2019, Catalão. **Anais eletrônicos...** Catalão: UAEIGEO/UFG/RC, 2019. p. 8-20. Disponível em: https://fb95e2cd-116d-47cf-b993-eff36ef98bed.filesusr.com/ugd/714a45_e88d87f74e304860af3b1360a10d0cea.pdf. Acesso em: 28 abr. 2021.

ASF - *ALASKA SATELLITE FACILITY*. **Data Search Vertex**. Disponível em: <https://search.asf.alaska.edu/#/>. Acesso em: 10 mar. 2021.

BARBOSA, V. R. F.; CICERELLI, R. E.; ALMEIDA, T. 2019. Análise comparativa entre modelos digitais de elevação (mde) do satélite Alos. *In*: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Santos, 19., 2019, **Anais...** Santos, 2019, p. 3327- 3330.

BARCO, J.; WONG, K.; STENSTROM, M. *Automatic Calibration of the U.S. EPA SWMM Model for a Large Urban Catchment*. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 134, p. 466-474, 2008.

BARROS, A. M.; NEVES, M. G. F. P.; HENRIQUE, D. C. Variabilidade e Causa na Geração de Vazão em Bacias Urbanas: Estudo de Caso do Riacho do Sapo, Maceió-AL. **Revista Eletrônica de Gestão de Tecnologias Ambientais – GESTA**, v. 4, n. 2, p. 220-231, 2016.

BASSO, R. E.; ALLASIA, D. G.; TASSI, R.; PICKBRENNER, K. Revisão das isozonas de chuvas intensas do Brasil. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 4, p. 635-641. 2016.

BRASIL. Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/110257.htm. Acesso em: 28 abr. 2021.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007a. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.666, de 21 de junho de 1993, e 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978. (Redação pela Lei nº 14.026, de 2020). Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/L11445compilado.htm. Acesso em: 28 abr. 2021.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento, a Lei nº 10.768, de 19 de novembro de 2003, para alterar o nome e as atribuições do cargo de Especialista em Recursos Hídricos, a Lei nº 11.107, de 6 de abril de 2005, para

vedar a prestação por contrato de programa dos serviços públicos de que trata o art. 175 da Constituição Federal, a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, para aprimorar as condições estruturais do saneamento básico no País, a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, para tratar dos prazos para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, a Lei nº 13.089, de 12 de janeiro de 2015 (Estatuto da Metrópole), para estender seu âmbito de aplicação às microrregiões, e a Lei nº 13.529, de 4 de dezembro de 2017, para autorizar a União a participar de fundo com a finalidade exclusiva de financiar serviços técnicos especializados. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Lei/L14026.htm#art6. Acesso em: 28 abr. 2021.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm. Acesso em: 28 abr. 2021.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios**. Brasília, 2007b. 176 p.

BROEKUIZEN, I.; MUTHANNA, T.M.; LEONHARDT, G.; VIKLANDER, M. *Urban drainage models for green areas: Structural differences and their effects on simulated runoff*. *Journal of Hydrology*, 2019.

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

CANHOLI, A. P. **Drenagem Urbana e Controle de Enchentes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014. 2. ed. 302 p.

CASTANHO, R. B.; TEIXEIRA, M. E. S. A evolução da agricultura no mundo: da gênese até os dias atuais. *Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium*, Ituiutaba, v. 8, n. 1, p. 136-146, jan./jun. 2017.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH). 2.ed. 2015. 336p.

COLLODEL, M. G. **Aplicação do Modelo Hidrológico SWMM na avaliação de diferentes níveis de detalhamento da bacia hidrográfica submetida ao processo de transformação chuva-vazão**. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2009.

CONEXÃO ITAJUBÁ. **Secretário de Defesa Social faz relato dos danos provocados pelas chuvas**. 2021. Disponível em: <https://conexaoitajuba.com.br/secretario-de-defesa-social-faz-relato-dos-danos-provocados-pelas-chuvas/>. Acesso em: 14 jun. 2021.

ELGA, S.; JAN, B.; OKKE, B. *Hydrological modelling of urbanized catchments: A review and future directions*. *Journal of Hydrology*, v. 529, p. 62-81, 2015.

EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Storm Water Management Model (SWMM) – Software, compatibility and documents**. Disponível em: <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>. Acesso em: 22 abril 2021.

GARCIA, J. I. B. **Monitoramento hidrológico e modelagem da drenagem urbana da bacia hidrográfica do Arroio Cancela**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

GARCIA, J. I. B.; PAIVA, E. M. C. D.; BRITES, A. P. Z.; PAIVA, R. C. D. Avaliação da Discretização em uma Bacia Hidrográfica Urbana, Através do Modelo SWMM. *In: XXI Congresso Latino-americano de Hidráulica*, 21., 2004. **Anais...**São Paulo, 2004.

GONTIJO, N. T. **Avaliação das Relações de Frequência entre Precipitações e Enchentes Raras por Meio de Séries Sintéticas e Simulação Hidrológica**. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

GRACIOSA, M. C. P. **Modelo de seguro para riscos hidrológicos com base em simulação hidráulico-hidrológica como ferramenta de gestão de risco de inundações**. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

GUAN, M.; SILLANPÄÄ, N.; KOIVUSALO, H. *Modeling and assessment of hydrological changes in a developing urban catchment*. **Hydrological Processes**, v. 29, 2015.

GUEDES, V. L. S.; BORSCHIVER, S. Bibliometria: uma ferramenta estatística para a gestão da informação e do conhecimento, em sistemas de informação, de comunicação e de avaliação científica e tecnológica. **Encontro Nacional de Ciência da Informação**, v. 6, n. 1, p. 18, 2005.

HUFF, F. A. *Time Distribution of Heavy Rainstorms in Illinois*. *Illinois State Water Survey, Champaign, Circular 173*, 1990.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **População rural e urbana**. 2015. Disponível em: <https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/populacao/18313-populacao-rural-e-urbana.html>. Acesso em: 28 abr. 2021.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Câmeras **Imageadoras CBERS 04A**. 2019. Disponível em: <http://www.cbers.inpe.br/sobre/cameras/cbers04a.php>. Acesso em: 09 ago. 2021.

ITAJUBÁ. Lei nº 3.352, de 17 de dezembro de 2019. Aprova o Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado do Município de Itajubá e dá outras providências. 2019. Disponível em: <http://www.itajuba.mg.gov.br/secretariaspmi/semup/plano-diretor/>. Acesso em: 14 jun. 2021.

KOKKONEN, T.; WARSTA, L.; NIEMI, T. J.; TAKA, M.; SILLANPÄÄ, N.; PUSA, M.; KESÄNIEMI, O.; SALO, H.; KOIVUSALO, H. *Impact of alternative land cover descriptions on urban hydrological model simulations*. **Urban Water Journal**, v. 16, n. 2, p. 103-113, 2019.

KREBS, G.; KOKKONEN, T.; VALTANEN, M.; SETÄLÄ, H.; KOIVUSALO, H. *Spatial resolution considerations for urban hydrological modelling*. **Journal of Hydrology**, v. 512, p. 482-497, 2014.

MARCIANO, A. G. **Modelagem Hidrodinâmica com a integração do mapeamento das inundações do rio Sapucaí do município de Itajubá/MG**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hídrica) – Universidade Federal de Itajubá, 2019.

- MARTINS, J. R. S. Obras de Macrodrenagem. *In*: TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L.; BARROS, M. T. (org.). **Drenagem urbana**. 1. ed. Porto Alegre: ABRH/Editora da Universidade/UFRGS, 1995. p. 167-240.
- MDR – MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO. **Do SNIS ao SINISA: Informações para planejar o Saneamento Básico**. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2020.
- MIGUEZ, M. G.; VERÓL, A. P.; REZENDE, O. M. **Drenagem urbana: do projeto tradicional à sustentabilidade**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.
- MILLER, J. D.; KIM, H.; KJELDTSEN, T. R.; PACKMAN, J.; GREBBY, S.; DEARDEN, R. *Assessing the impact of urbanization on storm runoff in a peri-urban catchment using historical change in impervious cover*. *Journal of Hydrology*, v. 515, p. 59-70, 2014.
- MINAS GERAIS. Fundação Estadual do Meio Ambiente. Secretária de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (org.). **Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais**. Universidade Federal de Viçosa, 2010.
- MINAS PCH PCH S/A. GUERRA LAGE ENGENHEIROS ASSOCIADOS LTDA. **Revisão dos Estudos de Inventário Hidrelétrico do Rio Sapucaí**. 2013.
- MINERVINO, A. C.; DUARTE, E. C. Danos materiais causados à Saúde Pública e à sociedade decorrentes de inundações e enxurradas no Brasil, 2010-2014: dados originados dos sistemas de informação global e nacional. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 21, n. p. 685-694, 2016.
- MOGES, E.; DEMIMSSIE, Y.; LARSEN, L.; YASSIN, F. *Review: Sources of Hydrological Model Uncertainties and Advances in Their Analysis*. *Water*, v. 13, 2021.
- MOURA, E. N.; FRENZEL, A. S.; MOURA, I. I. Inundações no meio urbano e vulnerabilidade social: estudo de caso em Curitiba, Brasil. **Redes (Santa Cru do Sul Online)**, v. 24, n. 2, p. 122-142, 2019.
- NASCIMENTO, F.; MOURA, P. M.; SILVA, F. E. O. Análise Comparativa Entre as Respostas de Modelos Chuva-Vazão Concentrados e Semi-Distribuídos. *In*: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis, 22., 2017, **Anais...Florianópolis**, 2017, p. 1-8.
- NRCS - NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE). **National Engineering Handbook. Part 630: Hydrology. Chapter 10 – Estimations of Direct Runoff from Storm Rainfall**. United States Department of Agriculture, 2004.
- NUNES, E. D.; ROSA, L. E. Compactação e impermeabilização do solo e implicações nos canais fluviais urbanos. **Mercator**, v. 19, Fortaleza, 2020.
- PINHEIRO, M. C. **Diretrizes para Elaboração de Estudos Hidrológicos e Dimensionamento Hidráulicos em Obras de Mineração**. Belo Horizonte: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2011. 304p.
- PINHEIRO, M. V. Avaliação técnica e histórica das enchentes em Itajubá – MG. **Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) – Universidade Federal de Itajubá, 2005**.
- PINTO, A. M. S. **Proposições para controle de enchentes e alagamentos – Estudo de caso: Vila Rubens, Itajubá, MG**. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Itajubá, 2014.

PONTES, V. C. **Análise Comparativa dos Hidrogramas de Saída da Bacia do Riacho Reginaldo Quanto a Discretização Espacial da Chuva**. Dissertação (Mestrado Recursos Hídricos e Saneamento). Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2019.

PORTO, R. L.; ZAHED FILHO, K.; TUCCI, C. E. M.; BIDONE, F. Drenagem Urbana. *In*: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2012. p. 805-848.

PREFEITURA MUNICIPAL DE ITAJUBÁ. **Forte tempestade atinge Itajubá e Prefeitura age imediatamente**. 2021. Disponível em: <http://www.itajuba.mg.gov.br/eventos/forte-tempestade-atinge-itajuba-e-prefeitura-age-imediatamente/>. Acesso em: 14 jun. 2021.

REBOITA, M.S.; MARIETTO, D.M.G.; SOUZA, A.; BARBOSA, M. Caracterização atmosférica quando da ocorrência de eventos extremos de chuva na região sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 21, p. 20-37, 2017.

RIGHETTO, A. M. **Manejo de Águas Pluviais Urbanas**. 1. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2009.

RODRIGUES, G. C.; SANTINI JR, M. A. Avaliação do Emprego de Técnicas Compensatórias na sub-bacia urbana Ribeirão do Santa Rita do Município de Fernandópolis, São Paulo. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**. v.26, n. 2, p. 231-237, 2021.

ROSSMAN, L. A. **Storm Water Management Model: User's Manual Version 5.1**. United States Environmental Protection Agency. Cincinnati, 2015.

SANTIN, J. R.; CORTE, T. D. Planejamento urbano e águas: o plano diretor e a gestão dos recursos hídricos. *In*: Encontro Nacional do CONPEDI, 19., 2010, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 2010, p. 1529-1543.

SÃO PAULO. **Manual de drenagem e manejo de águas pluviais: Aspectos tecnológicos e fundamentos**. SMDU, 2012.

SARTORI, A. **Desenvolvimento de critérios para classificação hidrológica de solos e determinação de valores de referência para o parâmetro CN**. Tese (Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

SILVA, B. C.; VIRGÍLIO, R. M.; MARTINS, A. M. Determinação de limiares de precipitações extrema relacionadas à ocorrência de inundações: estudo de caso da bacia do rio Sapucaí em Itajubá-MG. **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental**, v. 7, p. 29-35, 2017.

SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 5-23, 2005.

SOUZA, T. C. T. **Avaliação de vazões máximas estimadas a partir dos modelos HEC-HMS e SWMM – Estudo de caso para o núcleo urbano e região periurbana de Muniz Freire**. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável) – Universidade Federal do Espírito Santo, 2017.

SOUZA, W. M.; DE AZEVEDO, P. V.; DE ARAÚJO, L. E. Classificação da Precipitação Diária e Impactos Decorrentes dos Desastres Associados às Chuvas na Cidade do Recife - PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.5, n.2, p.250 - 268, 2012.

- TASCA, F. A.; POMÊO, C. A.; FINOTTI, A. R. Evolução da gestão da drenagem urbana na bacia hidrográfica do rio Itajaí Açu. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 7, n. 2, p. 264-283, 2018.
- TUCCI, C. E. M. Água no meio urbano. *In*: REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. (org.). **Águas doces no Brasil: Capital ecológico, uso e conservação**. São Paulo: Escrituras Editora, 1999.
- TUCCI, C. E. M. Águas urbanas. **Estudo Avançados**, v. 22, n. 63, p. 97-112, 2008.
- TUCCI, C. E. M. Controle de enchentes. *In*: _____. (org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2012c. p. 621-658.
- TUCCI, C. E. M. Drenagem Urbana. *Cienc. Cult.*, São Paulo, v. 55, n. 4, p. 36-37, 2003. Disponível em: http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252003000400020&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 28 abr. 2021.
- TUCCI, C. E. M. **Gestão da drenagem urbana**. Brasília: CEPAL. Escritório no Brasil/IPEA, 2012b. 50p.
- TUCCI, C. E. M. **Gestão de águas pluviais urbanas**. Brasília: Ministério das Cidades, 2006. 194p.
- TUCCI, C. E. M. Hidrologia: Ciência e Aplicação. *In*: _____. (org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2012a. p. 25-34.
- TUCCI, C. E. M. Inundações urbanas. *In*: TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L.; BARROS, M. T. (org.). **Drenagem urbana**. 1. ed. Porto Alegre: ABRH/Editora da Universidade/UFRGS, 1995. p. 15-36.
- TUCCI, C. E. M. Plano diretor de drenagem urbana: princípios e concepção. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 2, p. 5-12, 1997.
- TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. **Inundações Urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.
- TUCCI, C. E. M.; GENZ, F. Controle do impacto da urbana. *In*: TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L.; BARROS, M. T. (org.). **Drenagem urbana**. 1. ed. Porto Alegre: ABRH/Editora da Universidade/UFRGS, 1995. p. 277-348.
- UNIFEI – UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ. **Planos municipais e regional de saneamento básico dos municípios entes do consórcio CIMASAS – Produto 2: Diagnóstico da situação do saneamento básico de Itajubá-MG**. Itajubá, 2016.
- USEPA, U.S. *Environmental Protection Agency. Storm Water Management Model – User’s manual USEPA/600/R-05/040 – July 2010. National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development, U.S Environmental Protection Agency Cincinnati, OH 45268, U.S.A.* Versão Brasileira do Manual e Programa do SWMM 5.0 – Modelo de Gestão de Drenagem Urbana. Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento. Universidade Federal da Paraíba, UFPB, João Pessoa: 2012.
- VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1975.
- YOSHIDA, N. D. Análise bibliométrica: um estudo aplicado à previsão tecnológica. **Future Studies Research Journal: Trends and Strategies**, v. 2, n. 1, p. 52-84, 2010.

ZHOU, Q; LENG, G; SU, J; REN, Y. *Comparison of urbanization and climate change impacts on urban flood volumes: Importance of urban planning and drainage adaptation. Science of the Total Environment.* v. 658, p. 24-23, 2019.