



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
ENGENHARIA AMBIENTAL

LARYSSA BARBOSA FERNANDES

**MODELAGEM HIDRÁULICA DO INTERCEPTOR LESTE DE
FORTALEZA UTILIZANDO O SWMM**

FORTALEZA

2017

LARYSSA BARBOSA FERNANDES

MODELAGEM HIDRÁULICA DO INTERCEPTOR LESTE DE FORTALEZA
UTILIZANDO O SWMM

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheira Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza
Filho

Coorientador: Dr. Silvano Porto Pereira

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- F399m Fernandes, Laryssa Barbosa.
Modelagem Hidráulica do Interceptor Leste utilizando o SWMM / Laryssa Barbosa Fernandes. – 2017.
89 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Ambiental, Fortaleza, 2017.
Orientação: Prof. Dr. Francisco de Assis Souza Filho.
Coorientação: Prof. Dr. Silvano Porto Pereira.
1. Modelagem Hidráulica. 2. SWMM. 3. Esgotamento Sanitário. 4. Sistemas separativos e combinados. I. Título.

CDD 628

LARYSSA BARBOSA FERNANDES

MODELAGEM HIDRÁULICA DO INTERCEPTOR LESTE DE FORTALEZA
UTILIZANDO O SWMM

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheira Ambiental.

Aprovada em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Silvano Porto Pereira (Coorientador)
Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE)

Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por ser meu grande orientador em toda essa caminhada, me guiando e protegendo sempre.

A minha família, por todo o apoio nesses anos, por nunca me fazer desistir dos meus objetivos, principalmente, aos meus pais, Hercilio Tomaz Fernandes Neto e Denise Barbosa Fernandes, que sempre estiveram ao meu lado, mesmo nas situações mais adversas, me orientando e servindo de exemplo de dignidade.

A Universidade Federal do Ceará (UFC), e todo seu corpo docente, que me permitiram crescer tanto profissionalmente quanto pessoalmente, me proporcionando experiências ímpares durante todos esses anos.

Ao meu gerente, supervisor de estágio e coorientador desse trabalho, Silvano Porto Pereira, por idealizar esse projeto e sempre me orientar com paciência e compreensão, otimizando meu aprendizado.

Ao meu orientador, Dr. Francisco de Assis Souza Filho, por acreditar nesse trabalho e dividir comigo muitos dos seus conhecimentos, de forma simples e humilde, sempre atencioso em todos os detalhes.

Ao Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto, por aceitar participar dessa banca e no início, mesmo com poucas chances de sucesso, auxiliar na tomada de decisões.

A Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE) e todos seus colaboradores, por me proporcionarem uma experiência profissional ímpar, na qual pude otimizar meu conhecimento na área de saneamento, principalmente em esgotamento sanitário.

A todas as gerências e unidades da CAGECE envolvidas nesse trabalho. Gerência de Projetos (GPROJ) por disponibilizarem todas as plantas necessárias, Gerência de Faturamento (GEFAR) por disponibilizarem os dados de cadastro e faturamento da região, toda a equipe do IGEO, em especial Narcélio de Sá Pereira Filho, por sempre auxiliar, com paciência, na utilização do QGIS, a Unidade de Negócios de Macrocoleta e Tratamento de Esgoto (UNMTE), em especial Anastácio José Freitas Moreira, por acreditar nesse trabalho e auxiliar nos levantamentos realizados em campo.

A minha coordenadora de estágio, Claudiane Quaresma Pinto, da Gerência de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (GEPED), por acolher, auxiliar e acreditar no meu potencial.

A minha supervisora de estágio, Andréia de Freitas Lima, da GEPEd, por sempre priorizar as demandas desse trabalho, por muitas vezes deixar algumas tarefas de lado para auxiliar na coleta de dados e tomadas de decisões, além de acreditar no meu potencial e sempre me estimular a correr atrás dos meus objetivos.

A todos os colaboradores da GEPEd, que me fizeram crescer cada dia mais, em especial Jéssyca Costa Barros e Herivanda Gomes de Almeida, por todas as sugestões dadas na confecção desse trabalho, que foram fundamentais para o resultado final.

A minha grande amiga, companheira de curso e estágio, Lara Campana, que dividiu comigo momentos únicos, tanto dentro como fora de aula, me acalmando quando eu mais precisava, e estando ao meu lado em todos os momentos, dividindo experiências sensacionais ao meu lado.

A todos meus amigos que ingressaram na Engenharia de Energias e Meio Ambiente comigo, em 2012, em especial à Lara Timbó, Allan Callou, Renan Galvão e Bernardo Gomes, por toda a ajuda, principalmente no começo do curso, todos os grupos de estudo, madrugadas de ensinamento e todas as confraternizações inesquecíveis, essa conquista também é de vocês.

A todos meus colegas, que assim como eu, escolheram seguir a Engenharia Ambiental, em especial Lucas Abreu, Daniel Mota, Breno Queiroz, Vinicius Caldas, Matheus Jucá, Carla Pinheiro, Allan Maia, Mariana Vidal, Sarah Pianowski e Marina Santiago, por dividirem comigo aprendizados, aperiros, trabalhos, e, principalmente, muitas risadas.

A todos os professores do curso de Engenharia Ambiental da UFC, por toda a dedicação aos alunos, em especial ao Prof. Ronaldo Stefanutti, por ter acreditado em mim e me orientado na minha iniciação científica, projeto no qual tive a oportunidade de aprofundar meus conhecimentos e colocar em prática meus aprendizados em sala de aula.

A todos que de forma direta ou indireta fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigada.

RESUMO

A aplicação de modelos computacionais vem ganhando cada vez mais espaço no cotidiano de pesquisadores, pois, através de simulações é possível mimetizar processos ou operações, sem interferir no seu funcionamento. Por meio dessas simulações pode-se analisar o comportamento, tirar conclusões ou, até mesmo, utilizar informações para prever comportamentos futuros de determinado sistema. Considerando esse contexto, a Companhia de Água e Esgoto do Ceará (Cagece) vem buscando alternativas para aprimorar a gestão e possíveis intervenções no interceptor leste (IL), localizado na bacia da vertente marítima no município de Fortaleza – CE. Na Cagece, o IL foi escolhido como pioneiro para realizar simulações hidráulicas devido a sua grande importância para o macrossistema de coleta de esgoto sanitário de Fortaleza, atendendo aproximadamente 450.000 habitantes. A companhia considera o estudo do interceptor um desafio, pois além de apresentar alto nível de assoreamento, devido à excessiva entrada e ao acúmulo de sedimento e resíduos sólidos na tubulação, este vem atuando como sistema unitário, recebendo parcela da drenagem urbana artificial de Fortaleza devido a ligações indevidas de sistemas pluviais na rede de coleta de esgoto. Este estudo tem como finalidade construir um modelo hidráulico da área com o software de simulação hidráulica *Storm Water Management Model (SWMM)*, auxiliado por um software de Sistema de Informações Geográficas (SIG), visando entender o funcionamento do IL e condições de interferências indevidas das águas pluviais e do aporte de areia que impliquem em riscos de extravasamento de esgoto na região. Além de auxiliar na análise hidráulica do interceptor, o trabalho objetiva o levantamento e atualização do cadastro técnico do sistema em estudo, com a realização de batimetria e levantamento topográfico da área, a fim de aproximar-se ao máximo da realidade. Após a elaboração de diversos cenários, com e sem interferência de fatores externos (sedimentos e águas pluviais), foi possível verificar o extravasamento em alguns pontos, ocasionados pela influência desses elementos no interceptor, além de apontar medidas corretivas, como por exemplo, limpeza rotineira em poços de visita (PV) criticamente obstruídos e ações de fiscalização e educação para o combate a ligações de águas pluviais neste sistema.

Palavras-chave: Modelagem hidráulica. SWMM. Esgotamento sanitário. Sistemas separativo e combinado.

ABSTRACT

The application of computational models has been achieving more space in the daily life of researchers, since, through simulations, it is possible to mimic processes or operations, without interfering with their functioning. Through these simulations, it's possible to analyze the behavior, draw conclusions or even use the information to predict future behavior of a given system. Considering this context, the Water and Sewage Company of Ceara (Cagece) has been looking for alternatives to improve the management of the east interceptor, located in the basin of the Vertente Marítima in the municipality of Fortaleza - CE. At Cagece, the east interceptor was chosen as a pioneer to perform hydraulic simulations due to its great importance for the sanitary sewage collection, serving approximately 450,000 inhabitants. The company considers the study of the interceptor a challenge because, besides presenting a high level of sedimentation, due to the accumulation of sediment in the pipeline, this one has been working as a combined sewer, receiving part of the artificial urban drainage of Fortaleza. This study aims to build a hydraulic model of the area in a geographic information system (GIS) software and integrate with the Storm Water Management Model (SWMM), a hydraulic simulation software, aiming to understand its operation and conditions of undue rainwater interference and of the contribution of sand that imply in risks of extravasation at the region. In addition to assisting in the hydraulic analysis of the interceptor, the work aims to survey and update the technical register of the system under study, with the accomplishment of bathymetry and topographical survey of the area, to get as close to reality as possible. After elaboration of several scenarios, with and without interference of external factors (sediment and rainwater), it was possible to verify the extravasation in some points, caused by the influence of these sources in the interceptor, besides pointing out corrective measures, such as routine cleaning in critically obstructed manholes and actions to reduce the entrance of rain water in this system.

Keywords: Hydraulic Modelling. SWMM. Sanitary System. Combined and Separate System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Percentual de municípios com rede coletora de esgoto, segundo as Grandes Regiões - 2000 / 2008.....	13
Figura 2 - Relação de drenagem com população e meio ambiente	18
Figura 3 - a) Drenagem Natural. b) Drenagem Urbana.....	19
Figura 4 - Terminologia dos elementos básicos do sistema pluvial de microdrenagem	20
Figura 5 - Bacias hidrográficas de Fortaleza - CE.....	22
Figura 6 - Vertente Marítima com suas sub-bacias oficiais delimitadas pela Prefeitura Municipal de Fortaleza.....	23
Figura 7 - Delimitação criada das sub-bacias da Vertente Marítima a partir do modelo digital do terreno.....	24
Figura 8 - Cloaca Máxima	25
Figura 9 - Sistema de esgotamento sanitário unitário (1) e sistema de esgotamento sanitário separador absoluto (2)	27
Figura 10 - Partes convencionais de um sistema de coleta de esgoto	29
Figura 11 - Medição realizada no sistema de esgoto sanitário da cidade de Tatuí – SP	31
Figura 12 - Evolução do serviço de água e esgoto	32
Figura 13 - Fluxograma de identificação da situação de esgotamento sanitário	33
Figura 14 - Verificação de soluções de esgotamento sanitário	33
Figura 15 - Bacias de esgotamento sanitário de Fortaleza	34
Figura 16 - Estação de pré-condicionamento de esgoto (EPC).....	35
Todos os dados são obtidos através de modelos matemáticos. A figura 17 ilustra um fluxograma da estrutura nas quais os diferentes processos hidrológicos são agrupados a fim de representar as diversas partes do ciclo hidrológico.	37
Figura 18 - Ilustração das variáveis	41
Figura 19 - Conceito de escoamento superficial no SWMM 5	45
Figura 20 - Modelo de sub-bacia utilizada no SWMM.....	45
Figura 21 - Ciclo de um modelo hidráulico sustentável.....	48
Figura 22 - Fluxograma da estratégia metodológica	50
Figura 23 - Interceptor Leste	51
Figura 24 - Batimetria Manual	52
Figura 25 - Quadras da CAGECE e rede de esgoto do PMSB 2014.....	54

Figura 26 - Parâmetros requisitados pelo software	55
Figura 27 - Hidrograma EPC	56
Figura 28 - Sub-bacias Vertente Marítima e suas respectivas reduções	58
Figura 29 - Parâmetros requisitados de cada sub-bacia pelo SWMM.....	59
Figura 30 - Pluviômetro automáticos CEMADEN.....	60
Figura 31 - Opções de simulação no SWMM	61
Figura 32 - Parâmetros de condutos e poços de visita no SWMM.....	62
Figura 33 - Excel utilizado para conversão de dados	63
Figura 34 - Seções do <i>Storm Water Management Model</i>	64
Figura 35 - Topografia do Interceptor Leste.....	65
Figura 36 - Perfil Hidráulico do Interceptor Leste	66
Figura 37 - Modelo construído no QGIS	68
Figura 38 - Delimitação das contribuições domésticas ao IL.....	69
Figura 39 - Somatório das vazões afluentes ao IL.....	69
Figura 40 - Modelo construído no SWMM	72
Figura 41 - Média de extravasamento cenário 01.....	73
Figura 42 - Perfil Hidráulico cenário 01 no dia 11 de fevereiro às 13 horas.....	74
Figura 43 - Média de extravasamento cenário 02.....	75
Figura 44 - Perfil Hidráulico cenário 02 no dia 11 de fevereiro às 13 horas.....	76
Figura 45 - Perfil Hidráulico cenário 02 no dia 11 de fevereiro às 13 horas, após limpeza.....	76
Figura 46 - Média de extravasamento cenário 03.....	77
Figura 47 - Mapa termal de precipitação (mm/hr) em fevereiro 2017	78
Figura 48 - Mapa termal de extravasamento PV 15 no mês de fevereiro de 2017	79
Figura 49 - Mapa termal de extravasamento no PV 14 no mês de fevereiro de 2017	79
Figura 50 - Perfil Hidráulico cenário 03	80
Figura 51 - Média extravasamento cenário 04	81
Figura 52 - Perfil Hidráulico cenário 04.....	82
Figura 53 - Perfil Hidráulico cenário 4, após limpeza entre PV 22 e PV 24.....	82
Figura 54 - Perfil Hidráulico cenário 4, após limpeza entre PV 10 e PV 60.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Softwares de modelagem hidráulica - hidrológica	43
Tabela 2 - Vazões médias estimadas das elevatórias	56
Tabela 3 - "Valor base" para cada poço de visita.....	70
Tabela 4 - "Padrão temporal" para cada poço de visita	71
Tabela 5 - Horas com extravasamento cenário 2	75

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SWMM	Storm Water Management Model
IL	Interceptor leste
SIG	Sistema de informação geográfica
PV	Poços de visita
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia Espacial
EPA	Environmental Protection Agency
UNMTE	Unidade de Negócios de Macrocoleta e Tratamento de Esgoto
EPC	Estação de Pré Condicionamento de Esgoto
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento de Desastres Naturais
SEMACE	Secretaria do Meio Ambiente do Ceará
CAGECE	Companhia de Água e Esgoto do Ceará
SEUMA	Secretaria de Urbanismo e Meio Ambiente
ETE	Estação Tratamento Esgoto
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SDOES	Sistema de disposição oceânica de esgotos
EEE	Estação Elevatória de Esgoto
ETO	Estação de Tratamento de Odores
GEPED	Gerência de Pesquisa, Inovação e Desenvolvimento
CECOE	Centro de Controle Operacional de Esgoto
PMSB	Plano Municipal de Saneamento Básico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos.....	16
1.1.1	<i>Objetivo Geral.....</i>	<i>16</i>
1.1.2	<i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>16</i>
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Sistema de Drenagem Urbana	17
2.1.1	<i>Histórico da drenagem urbana</i>	<i>17</i>
2.1.2	<i>Tipos de drenagem urbana.....</i>	<i>18</i>
2.2	Sistemas de Drenagem Pluvial.....	19
2.2.1	<i>Efeitos da urbanização na drenagem pluvial.....</i>	<i>19</i>
2.2.2	<i>Microdrenagem e Macrodrenagem</i>	<i>19</i>
2.2.2.1	<i>Microdrenagem.....</i>	<i>19</i>
2.2.2.2	<i>Macrodrenagem.....</i>	<i>20</i>
2.2.3	<i>Qualidade das águas e drenagem urbana</i>	<i>21</i>
2.2.4	<i>Sistema de monitoramento da qualidade da água marinha em Fortaleza</i>	<i>22</i>
2.3	Sistema de esgotamento sanitário	24
2.3.1	<i>Histórico do esgotamento sanitário</i>	<i>24</i>
2.3.2	<i>Tipos de sistema de esgoto.....</i>	<i>26</i>
2.3.3	<i>Partes de um sistema de coleta de esgoto</i>	<i>28</i>
2.3.4	<i>Problemática relacionada com o sistema separador combinado</i>	<i>29</i>
2.3.5	<i>Situação do esgotamento sanitário no Brasil.....</i>	<i>31</i>
2.3.6	<i>Macrossistema de esgotamento sanitário de Fortaleza</i>	<i>34</i>
2.4	Modelação hidráulica – hidrológica.....	36
2.4.1	<i>Modelos Hidrológicos</i>	<i>37</i>
2.4.2	<i>Modelos Hidráulicos</i>	<i>39</i>
2.5	Softwares de Modelagem Hidráulica/Hidrológica.....	42
2.5.1	<i>SWMM.....</i>	<i>44</i>
2.5.1.1	<i>Cálculo do escoamento superficial no SWMM.....</i>	<i>44</i>
2.5.1.2	<i>Modelos de simulação hidráulica-hidrológico no SWMM.....</i>	<i>46</i>
2.6	Utilização de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) no Pré-processamento da Modelagem Hidráulica	46
3	METODOLOGIA.....	49
3.1	Estratégia Metodológica.....	49

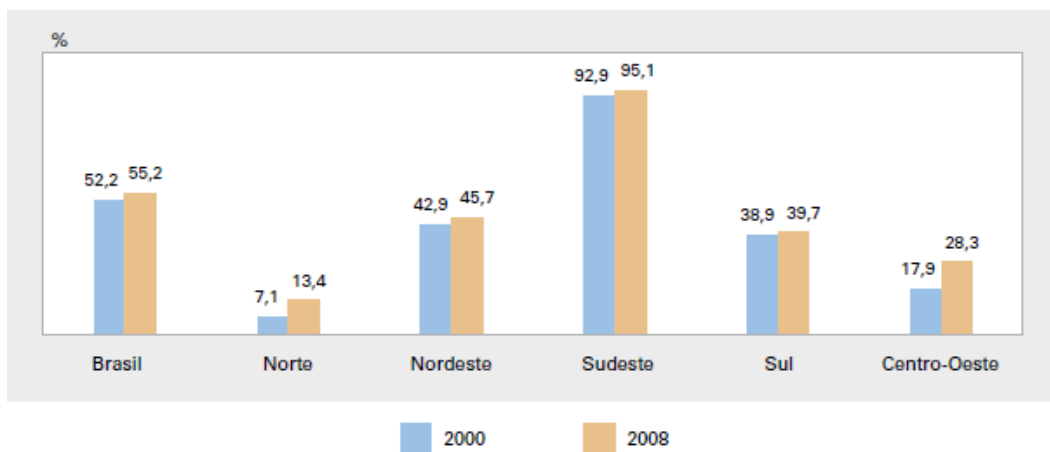
3.2	Definição da Área de Estudo e Levantamento de Informações Cadastrais	50
3.2.1	Área de estudo	50
3.2.2	Levantamento de informações cadastrais	51
3.2.3	Análise da precisão dos dados cadastrais.....	52
3.3	Definição do Período Histórico e Georreferenciamento de Quadras e Setores	53
3.4	Vazões Diretas de Esgoto a Rede.....	53
3.4.1	Delimitação das áreas de influência e levantamento da vazão de esgoto das quadras que contribuem para o interceptor	53
3.5	Levantamento da vazão lançada pelas estações elevatórias de esgoto no interceptor .	55
3.6	Modelo Hidrológico	57
3.6.1	Definição da parcela de chuva que infiltra a rede de esgoto.....	57
3.6.2	Levantamento de dados de chuva da região.....	59
3.7	Modelo Hidráulico	60
3.8	Pré-processamento: Conversão de Dados e Realização de Simulação em Diversos Cenários	62
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
4.1	Verificação da confiabilidade dos dados de cadastro	65
4.2	Construção do Modelo no QGIS	67
4.3	Áreas e Vazões Domésticas que Contribuem para o Interceptor Leste	68
4.4	Modelagem Hidráulica.....	71
4.4.1	Cenário 1 – situação ideal.....	72
4.4.2	Cenário 2 – tubulação assoreada.....	74
4.4.3	Cenário 3 – infiltração de chuva	77
4.4.4	Cenário 4 – tubulação assoreada e infiltração de chuva.....	80
5	CONCLUSÃO.....	84
	REFERÊNCIAS.....	86

1 INTRODUÇÃO

O saneamento básico, no Brasil, é um direito assegurado pela Constituição e definido pela Lei nº. 11.445/2007 como, o conjunto dos serviços, infraestrutura e instalações operacionais de abastecimento de água, limpeza urbana, esgotamento sanitário, drenagem urbana, manejos de resíduos sólidos e de águas pluviais. Tem como objetivo a prevenção e controle de doenças, incentivo de hábitos higiênicos e saudáveis, melhorias da limpeza pública básica e, conseqüentemente, da qualidade de vida da população.

Esgotamento sanitário pode ser entendido como o conjunto de obras e instalações com a finalidade de coletar, afastar, tratar e retornar o efluente gerado, seja ele residencial ou industrial, para um corpo hídrico próximo. Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia Espacial (IBGE), o Brasil passou de 52,2% de distritos atendidos pelo serviço de coleta de esgoto em 2000 para 55,2% em 2008, um avanço mínimo comparado com a distribuição de água, que em 2008 totalizava 78,6%. Além disso, o IBGE constatou que o percentual de coleta de esgoto é bem distinto em cada região, como pode ser visualizado no gráfico abaixo.

Figura 1 - Percentual de municípios com rede coletora de esgoto, segundo as Grandes Regiões - 2000 / 2008



Fonte: IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais, Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2000/2008.

Por meio desses dados é possível concluir que existe a necessidade de maior investimento no esgotamento sanitário brasileiro, tanto no âmbito da coleta como no

tratamento, visando uma melhor condição de vida para a população e garantindo a conservação dos recursos hídricos. Mesmo com todo esse cenário, recursos financeiros distribuídos pelos órgãos públicos para investimento em programas de saneamento básico são restritos, conseqüentemente, a necessidade de buscar novas alternativas que melhorem o desempenho de projetos aumenta substancialmente.

Atualmente, o Ceará vive uma insuficiência de investimento no setor de saneamento básico que interfere diretamente na qualidade de vida da população e na preservação do meio ambiente local, consequência do fato de que a insuficiência da coleta, transporte e tratamento de esgoto acabam disseminando várias doenças, além de comprometer a qualidade dos corpos hídricos.

Nesse contexto, visando bons resultados sem utilizar métodos destrutivos, surge a importância da aplicação de modelos de simulação hidráulica, pois os resultados apresentados pelas simulações de um modelo fornecem auxílio para o desenvolvimento de métodos operacionais eficazes, ao invés de julgamentos empíricos e pessoais do operador (CARRIJO, 2004).

A aplicação dos modelos de simulação hidráulica tem se intensificado, pois permite avaliações de diversos cenários dos sistemas em estudo. Simulações de potenciais problemas, alternativas de operação, suporte na elaboração de planos diretores, controle da qualidade do efluente são algumas das possíveis aplicações da modelagem hidráulica computacional (ROSSMAN, 2000; COELHO, LOUREIRO e ALEGRE, 2006; GAIO, 2010).

Além da simulação hidráulica, atualmente, o geoprocessamento também tem ganhado destaque entre as tecnologias da informação utilizadas em inúmeros setores, como em instituições de pesquisa, concessionárias de serviços públicos, analistas de mercado, dentre outros.

Os sistemas de informações geográficas (SIG) podem simplificar o gerenciamento de dados e interliga-los, como por exemplo, auxiliar na identificação de possíveis pontos de furto de água, onde uma área com grande concentração populacional coincide com uma zona de pouco consumo de água. O SIG permite representar de maneira apropriada o conjunto de dados necessários à tomada de decisões em assuntos relacionados com a distribuição de água e coleta de esgoto.

Nesse contexto, a introdução do SIG nas companhias de saneamento, além de auxiliar na solução e gestão de questões que exigem análise espacial, também pode contribuir para padronizar procedimentos. Atualmente, visando uma análise mais crítica dos sistemas de distribuição de água e coleta de esgoto, a Companhia de Água e Esgoto do Ceará busca realizar

a integração entre software SIG e softwares de simulação hidráulica, como o *Storm Water Management Model*, ferramenta utilizada nesse trabalho para modelar uma parcela do esgotamento sanitário captado pela CAGECE.

O *Storm Water Management Model* conhecido como SWMM, é uma plataforma de livre acesso, criada pela *Environmental Protection Agency* (EPA), amplamente utilizada ao redor do mundo para planejamento, análise e design de projetos relacionados ao escoamento de águas pluviais, esgotos combinados e esgotos sanitários. O software foi escolhido por ser um modelo dinâmico hidrológico-hidráulico de qualidade de água, capaz de rastrear a quantidade e qualidade do escoamento gerado dentro de cada sub bacia, além de controlar a taxa de fluxo, a profundidade e a qualidade do efluente em cada tubo e canal durante um período de simulação composta por várias etapas de tempo (Rossman, 2010).

No presente estudo, a análise hidráulica foi realizada no interceptor leste, localizado na bacia da vertente marítima em Fortaleza – CE e operado pela Unidade de Negócios de Macrocoleta e Tratamento de Esgoto (UNMTE) da CAGECE. O IL recebe efluente de duas estações elevatórias: Praia do Futuro II e Parque Ecológico e, posteriormente, encaminha-os para a Estação de Pré - Condicionamento de esgoto (EPC) para sua disposição final por meio de um emissário submarino.

A escolha deste interceptor para ser o pioneiro da região na modelagem hidráulica foi motivada pela ocorrência de extravasamentos nessa área e pela sua significativa importância na macrocoleta de esgoto da capital, atendendo aproximadamente 450.000 habitantes.

Um modelo hidráulico do interceptor leste da Vertente Marítima de Fortaleza, que represente a realidade, se torna um valioso instrumento de apoio à gestão operacional da CAGECE, possibilitando assim melhorias na qualidade do serviço prestado à população e auxiliando na preservação de corpos hídricos e proliferação de doenças. Além de sua importância à operação do sistema, o modelo hidráulico também pode ser usado como ferramenta importantíssima à avaliação de alternativas de intervenção que visem à ampliação ou correção do projeto original do IL.

1.1 Objetivos

1.1.1 *Objetivo Geral*

Construir um modelo computacional do Interceptor Leste, localizado na bacia da vertente marítima, em Fortaleza - CE, com o software de simulação hidráulica (SWMM) que, auxiliado por um software SIG (QGIS), permite avaliar a interferência da chuva e da presença de sedimentos na ocorrência de extravasamentos na região.

1.1.2 *Objetivos Específicos*

Os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- Cadastrar e atualizar dados técnicos da macrocoleta de esgoto da bacia vertente marítima de Fortaleza no QGIS (.shp);
- Delimitar as áreas de contribuição de esgoto doméstico em poços de visita (PV) responsáveis por receber o efluente gerado da região leste;
- Estimar as vazões de esgoto doméstico que contribuem para as áreas delimitadas, utilizando dados do sistema de informações comerciais (SIC);
- Simular escoamento superficial da região leste da bacia, utilizando dados de chuvas proveniente do pluviômetro Vicente Pinzon (disponibilizados pelo Centro Nacional de monitoramento de desastres naturais - CEMADEN);
- Realizar simulação em tempo seco e chuvoso a fim de avaliar a diferença do comportamento hidráulico da rede durante esses períodos;
- Realizar simulação com e sem influência de sedimentos na tubulação a fim de avaliar a diferença do comportamento hidráulico da rede nessas condições;
- Desenvolver um modelo-piloto para posterior calibração, visando a sua utilização na otimização da operação e como ferramenta auxiliar na elaboração de projetos de intervenção no macrossistema da bacia vertente marítima de Fortaleza.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sistema de Drenagem Urbana

2.1.1 *Histórico da drenagem urbana*

A preocupação com a drenagem de águas superficiais e subterrâneas vem acompanhando as civilizações desde sua origem. A transição entre a vida nômade e a vida sedentária, onde o homem buscava instalar-se em localidades fixas, tornou-se possível devido a técnicas de manejo de água sobre o solo, para estabelecer os primeiros processos de irrigação e produção de alimentos, independente de condições atmosféricas. Através de registros arqueológicos é possível observar que os primeiros sinais de drenagem foram descobertos nas civilizações da Mesopotâmia (sumérios), Minóica e Grega.

Os sistemas primitivos de drenagem consistiam exclusivamente de esgoto a céu aberto que atravessavam as terras, porém, aos poucos, surgiu a ideia de construir dutos cobertos para a drenagem urbana. A experiência das civilizações antigas foi aprimorada pelos fenícios, gregos e romanos, sendo esse último, responsável pela maior revolução tecnológica da drenagem. Os romanos criaram galerias de transporte de água para as ruas da cidade e banhos públicos. Burian e Edwards (2002) afirmam que a civilização romana foi a pioneira a estabelecer um ciclo de água urbano interligando o abastecimento e a drenagem da água.

Já na idade moderna, a América do Norte destacou-se pelas extensas obras de drenagem, aperfeiçoamento de redes de esgoto subterrânea, e pela preocupação na drenagem das vias de transporte. Iniciando o que se tornaria as redes de drenagem urbana, padronizadas no futuro (Burian e Edwards, 2002).

Atualmente, com toda a evolução do sistema de drenagem urbana, foram sintetizados por Lima et al. (2013) alguns benefícios:

- Diminuição de áreas inundadas;
- Redução de doenças e mortalidade decorrente do contato com água contaminada;
- Melhoria na condição de vida das populações;
- Redução de impactos visuais na paisagem urbana;
- Eventual reaproveitamento da água pluvial.

Em síntese, a drenagem visa garantir, em condições apropriadas, o recolhimento, transporte e o descarte nos corpos receptores das águas pluviais (Lima et al., 2013).

2.1.2 Tipos de drenagem urbana

Segundo Butler e Davies (2011), a necessidade de drenagem urbana surgiu devido as interações entre a atividade humana e o ciclo natural da água. Os autores dividem essa interação de duas formas principais: diminuição da água do ciclo hidrológico para prover e suprir às necessidades humanas, e alteração do curso natural da água de chuva devido a cobertura da terra com superfícies impermeáveis.

Ainda de acordo com Butler e Davies (2011), em decorrência desses dois tipos de interações, dois tipos de drenagem se fazem necessários: de águas residuárias, conhecida como sistema de esgotamento sanitário, e de águas pluviais.

Esses dois tipos são tratados como únicos quando são concebidos, projetados ou em eventos indesejados, por exemplo, quando devido a ineficácia da drenagem urbana de águas pluviais, boa parte do escoamento superficial gerado após um evento chuvoso acaba adentrando à rede de drenagem de águas residuárias, ocasionado extravasamento, além de causar diversos riscos à saúde pública e ao meio ambiente.

Figura 2 - Relação de drenagem com população e meio ambiente



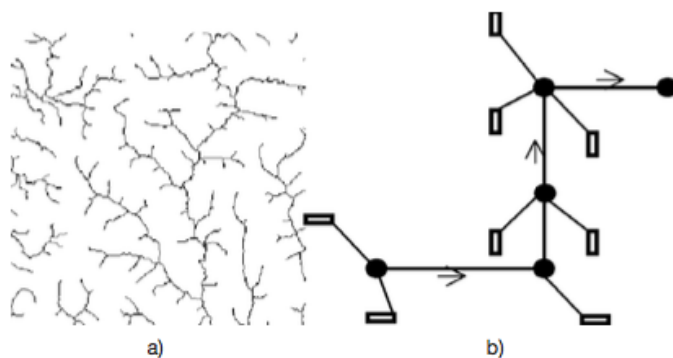
Fonte: Adaptada de Butler e Davies, 2011

2.2 Sistemas de Drenagem Pluvial

2.2.1 Efeitos da urbanização na drenagem pluvial

Devido à urbanização surgiu a necessidade de desviar a água precipitada dos locais de onde, no passado, escoava naturalmente. Assim, os sistemas de drenagem podem ser classificados em naturais e artificiais/urbanos.

Figura 3 - a) Drenagem Natural. b) Drenagem Urbana



Fonte: Lima et al. 2013

Por levar a um aumento considerável da área impermeável, a urbanização acarreta uma diminuição no caudal infiltrado e, em decorrência disso, um aumento no caudal à superfície. Esse aumento da quantidade de água escoada aliada a falhas no funcionamento da rede de drenagem artificial acarreta significativamente no risco de inundações nas cidades.

Para diminuir o risco de inundações, as águas pluviais precisam ser devidamente drenadas através de sistemas, classificados em microdrenagem e macrodrenagem.

2.2.2 Microdrenagem e Macrodrenagem

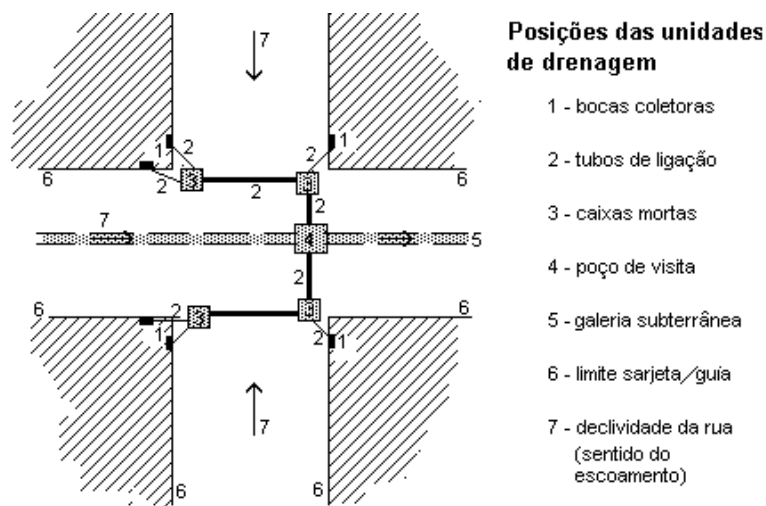
2.2.2.1 Microdrenagem

A microdrenagem é responsável por criar condições razoáveis de circulação de veículos e pedestres, além de coletar e transportar a água da chuva até o sistema de macrodrenagem. Sendo constituída pelo sistema de condutos pluviais relacionados aos espaços

dos loteamentos ou de rede primária urbana.

O traçado das ruas define seu trajeto, ou seja, as vazões são guiadas pela arquitetura urbana da área que o sistema está inserido. É constituída por boca de lobo, responsável pela captação de águas pluviais, sarjetas, elemento da drenagem localizado nas vias públicas, poço de visita, acessório que permite a mudança de direção, mudança de diâmetro, além de limpeza das tubulações, tubos de ligações, canalizações que encaminham a água da boca de lobo ao poço de visita e condutos, que são obras destinadas à condução das águas superficiais coletadas (BRASIL, 2006).

Figura 4 - Terminologia dos elementos básicos do sistema pluvial de microdrenagem



Fonte: DEC. UFCG

2.2.2.2 Macrodrenagem

O sistema de macrodrenagem tem como objetivo o escoamento final das águas superficiais, inclusive as coletadas pela microdrenagem. Brasil (2006) adiciona que, em uma zona urbana, a macrodrenagem corresponde a todo o conjunto de drenagem natural já existente no local, como igarapés, córregos, riachos e rios localizados nos talwegues e valas.

As obras de macrodrenagem são constituídas por (BRASIL 2006):

- Ajustamento e/ou alargamento das seções de cursos naturais.
- Implantação de canais artificiais ou galerias de grandes dimensões.
- Estruturas adicionais para proteção contra erosão e assoreamento

2.2.3 *Qualidade das águas e drenagem urbana*

Devido ao lançamento de efluentes domésticos e industriais, os corpos hídricos veem sofrendo impactos negativos decorrente da alteração natural causada pelo aumento das áreas impermeáveis.

De acordo com Porto (1995), pode-se verificar que uma parcela da poluição geradas em centros urbanos origina-se no escoamento superficial sobre áreas impermeáveis, áreas em fase de construção, depósitos de lixo ou resíduos industriais, entre outros. Nesses locais, a água que escoar na superfície carrega o material solto e solúvel, transportando cargas poluidoras que geram impactos significativos nos corpos hídricos.

Esse tipo de contaminação urbana inicia-se com o ciclo hidrológico, pois, após eventos chuvosos, a água provoca uma limpeza na superfície urbana, encaminhando componentes orgânicos e inorgânicos a um receptor final, normalmente rios e lagos. Uma vez que deriva de atividades que depositam contaminantes de forma esparsa, a poluição gerada pelo escoamento superficial é dita de origem difusa.

Os poluentes gerados têm diversas fontes, entre os quais Bollmann e Marques (2006) enumeraram:

- Resíduos de combustíveis e lubrificantes proveniente de automóveis;
- Folhas e galhos de árvores (resíduos de vegetação);
- Resíduo acumulado em vias e calçadas;
- Resíduos orgânicos de pássaros e animais domésticos;
- Construção e indústria;
- Efluentes que não são coletados e escoam através da drenagem;
- Deposição de poluentes atmosféricos.

2.2.4 Sistema de monitoramento da qualidade da água marinha em Fortaleza

O sistema de macrodrenagem da cidade de Fortaleza – CE é segregado em dois grandes rios que desaguam no mar, o rio Ceará, localizado ao oeste, e o rio Cocó, localizado ao leste. Entre esses dois corpos hídricos existe uma orla de aproximadamente 25 quilômetros, com diversas galerias pluviais que recebem contribuição tanto de águas pluviais como de esgotos não tratados, área denominada de vertente marítima. Além dessas três grandes bacias, Fortaleza também conta de uma pequena, ao sul, designada Bacia do Rio Pacoti.

Figura 5 - Bacias hidrográficas de Fortaleza - CE



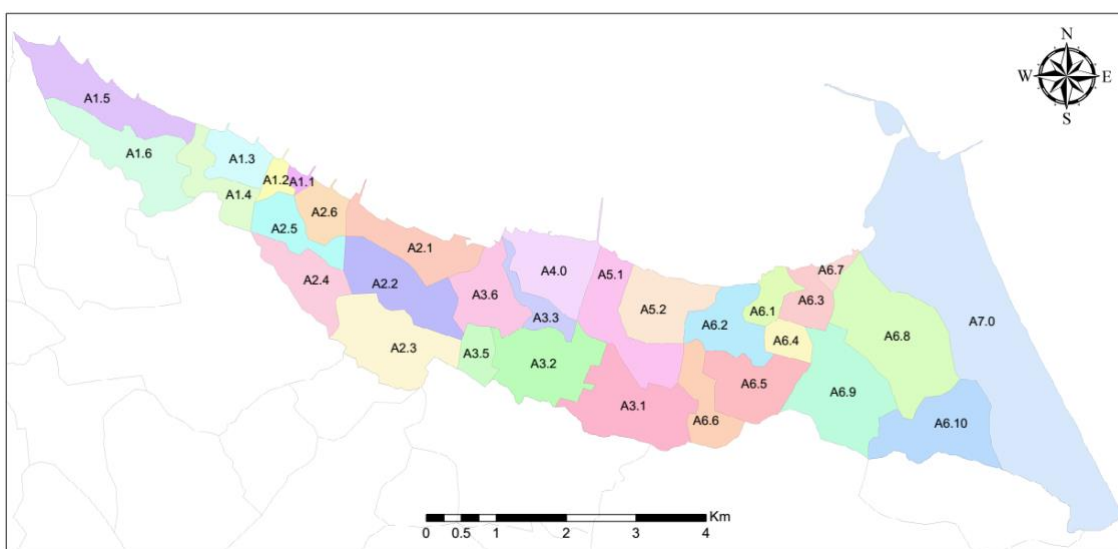
Fonte: Prefeitura Municipal de Fortaleza

Preocupados com a grande extensão da orla, conseqüentemente a presença de muitos córregos e riachos, o governo do Ceará construiu, no final da década de 70, um emissário submarino a fim de evitar que descargas de esgoto não tratados contaminassem as praias de Fortaleza. Contudo, apenas metade do esgoto produzidos atualmente nas bacias contribuintes deságua no emissário, ou seja, o restante continua sendo lançado no solo, em galerias pluviais e em riachos ou rios, tendo as praias como corpo receptor final (Pereira, 2012).

Atualmente, a Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE) é responsável por monitorar a qualidade da água em torno do emissário. Já a Secretaria do Meio Ambiente do Ceará (SEMACE) é encarregada do monitoramento de 32 pontos ao longo de toda a orla. Os principais objetivos de tais monitoramentos são a identificação de possíveis efeitos das descargas dessas fontes no ambiente marinho e a preservação da saúde dos banhistas.

Mesmo com todo o esforço do poder público para garantir um bom acompanhamento desses pontos, os parâmetros de qualidade avaliados são pontuais, não representando o cenário real de um dia todo. Neste sentido, a CAGECE, representada por Silvano Porto Pereira, juntamente com a Secretaria de Urbanismo e Meio Ambiente (SEUMA) realizou a modelagem destes ambientes, criando uma ferramenta para auxiliar no desenho e seleção de alternativas de intervenção nas fontes de poluição, permitindo uma melhor avaliação do grau de importância dos fatores e pressões envolvidas.

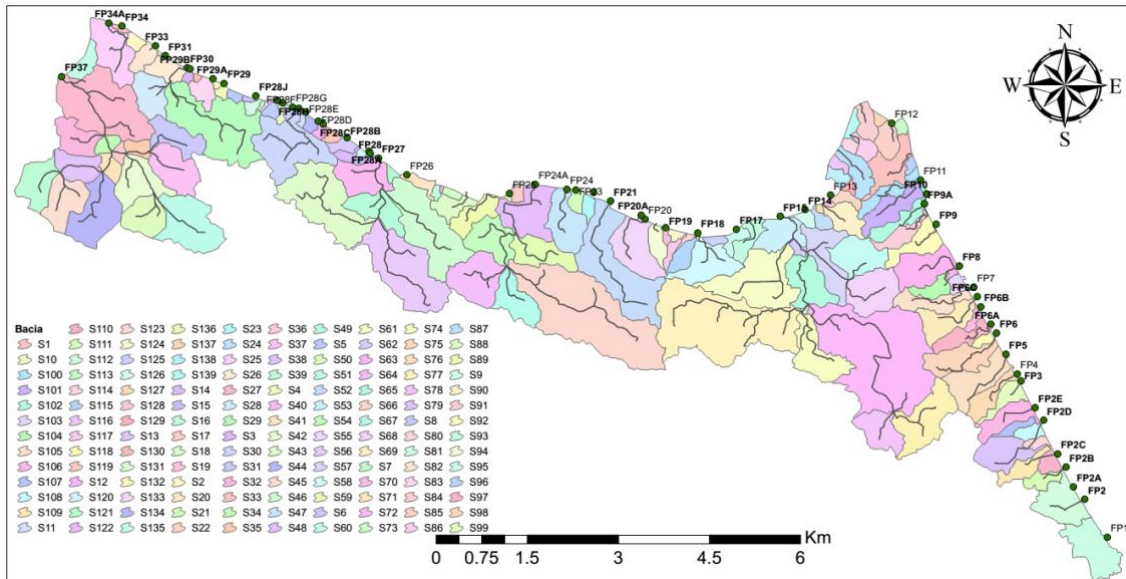
Figura 6 - Vertente Marítima com suas sub-bacias oficiais delimitadas pela Prefeitura Municipal de Fortaleza



Fonte: Prefeitura Municipal de Fortaleza

Um plano inicial, necessário para essa modelagem, foi a subdivisão das bacias apresentadas na Figura 6, pois, muitas das galerias pluviais não possuíam suas respectivas bacias delimitadas. O resultado dessa delimitação mais apurada pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 - Delimitação criada das sub-bacias da Vertente Marítima a partir do modelo digital do terreno



Fonte: SEUMA

2.3 Sistema de esgotamento sanitário

2.3.1 Histórico do esgotamento sanitário

O esgotamento sanitário tem seus primeiros registros por volta do século XI antes de Cristo. Segundo Chanson (2015), os romanos foram a primeira civilização responsável por construir uma rede de esgoto com escoamento permanente, permitindo à população encaminhar resíduos para longe das zonas habitacionais. Esse sistema foi conhecido como Cloaca Máxima, onde o mesmo recebia parte do efluente doméstico das áreas próximas ao fórum Romano e possibilitava a drenagem superficial de uma área bem maior, sendo indispensável para o controle da Malária (Tsutiya, 2011).

Figura 8 - Cloaca Máxima



Fonte: thehistoryblog@2013

A Europa e os Estados Unidos construíram seus próprios sistemas de drenagem, nos quais eram responsáveis apenas por coletar e transportar águas pluviais, pois o lançamento de excretas humanas era expressamente proibido nesses condutos.

Somente em 1815 Londres foi autorizada a iniciar o descarte de efluentes domésticos nas galerias subterrâneas, sendo em 1830 o lançamento de esgotos domésticos no rio Tâmsa permitido, e, em 1847 o despejo das águas domésticas nas galerias pluviais era compulsório, saturando toda a rede (Azevedo Netto, et al. 1983). O sistema de galerias de Londres não obteve sucesso, e em 1855 iniciou-se o desenvolvimento de um sistema coletor de efluente adequado para a cidade.

Um dos avanços mais relevantes na história moderna do esgotamento sanitário foi realizado na Alemanha, em 1842, na cidade de Hamburgo. Esse tipo de sistema de coleta, responsável por receber contribuições pluviais, domésticas e, casualmente, industriais foi denominado de sistema unitário de esgotamento sanitário. Após o sucesso na Alemanha, foram implementados sistemas unitários em diversas cidades importantes, destacando-se Boston (1833), Rio de Janeiro (1857) e Paris (1880) (Tsutiya, 2011).

De acordo com Azevedo Netto *et al* (1983) o sistema construído no Rio de Janeiro recebia e encaminhava as águas de chuva precipitadas no interior de prédios e em áreas

pavimentadas, além de esgoto doméstico. Esse tipo de sistema responsável apenas por uma parte da drenagem pluvial foi denominado “Separador Parcial”, foi implementado no Rio de Janeiro devido tanto as limitações de recursos financeiros da região, como devido a ocorrência de chuvas de alta intensidade.

Já o sistema do tipo “Separador Absoluto” surgiu em 1879 nos Estados Unidos, na cidade de Memphis, onde o engenheiro responsável decidiu implantar um sistema com capacidade menor, resultando em obras com custo bem menos elevados, caracterizado pela utilização de uma rede coletora exclusiva para a água da chuva e outra exclusiva para efluentes domésticos.

Atualmente, podemos considerar como sistema de esgotamento sanitário um conjunto de infraestruturas e instalações operacionais que visam coletar, transportar, tratar e dispor de forma adequada os esgotos sanitários, considerando aspectos ambientais e de saúde pública.

Então, podemos dividir o sistema de esgotamento sanitário em três tipos:

- Sistema Separador Absoluto.
- Sistema Misto/Parcial.
- Sistema Unitário ou Combinado.

Para que seja considerado eficaz, o sistema de esgotamento sanitário deve cumprir com a coleta e remoção rápida e segura dos efluentes, antecipando sua disposição final, de forma a reduzir ou eliminar doenças de propagação hídrica, proporcionando melhoria das condições de conforto e bem-estar da população.

2.3.2 Tipos de sistema de esgoto

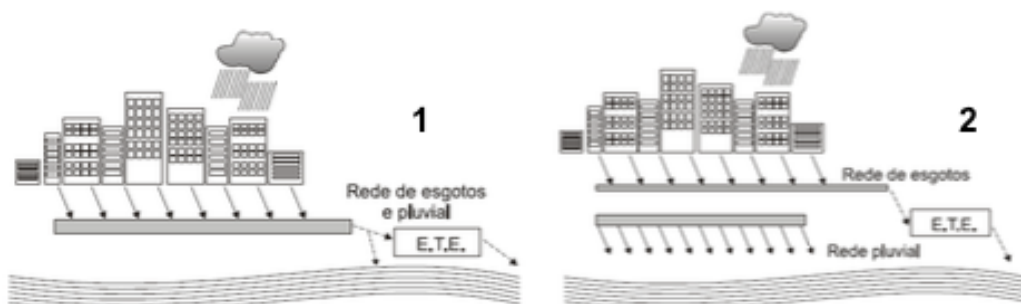
Como apresentado anteriormente, os sistemas de coleta de esgotos urbanos podem ser de três tipos: sistema unitário (ou combinado), sistema separador parcial e sistema separador absoluto. Cada um é definido por Tsutiya (2011) abaixo:

- a) *Sistema de esgotamento unitário, ou sistema combinado, em que as águas residuárias (doméstica e industriais), as águas de infiltração (água de subsolo que penetra no sistema através de tubulações e órgãos acessórios) e águas pluviais veiculam por um único sistema.*
- b) *Sistema de esgotamento separador parcial, em que uma parcela das águas de chuva, provenientes de telhados e pátios das economias*

são encaminhadas juntamente com as águas residuárias e águas de infiltração do subsolo para um único sistema de coleta e transporte dos esgotos.

c) *Sistema separador absoluto, em que as águas residuárias (domésticas e industriais) e águas de infiltração (água do subsolo que penetra através das tubulações e órgãos acessórios), que constituem o esgoto sanitário, veiculam em um sistema independente, denominado sistema de esgoto sanitário. As águas pluviais são coletadas e transportadas em um sistema de drenagem pluvial totalmente independente.*

Figura 9 - Sistema de esgotamento sanitário unitário (1) e sistema de esgotamento sanitário separador absoluto (2)



Fonte: Von Sperling 2005

No Brasil a utilização de sistema separador absoluto é obrigatória, pois, os sistemas onde as águas pluviais e as residuárias são veiculadas por meio de um único meio requerem, inicialmente, elevados investimentos, devido ao grande diâmetro das tubulações. Além de apresentar alguns obstáculos (BRASIL,2006):

- Dificulta o controle da poluição a jusante aumentando o custo do tratamento, devido aos grandes volumes de esgotos coletados e transportados em épocas de chuva.
- Inicialmente exige altos investimentos na construção de grandes galerias necessárias ao transporte das vazões máximas do projeto.
- Riscos de refluxo do esgotamento sanitário para o interior das residências, em épocas de cheias.

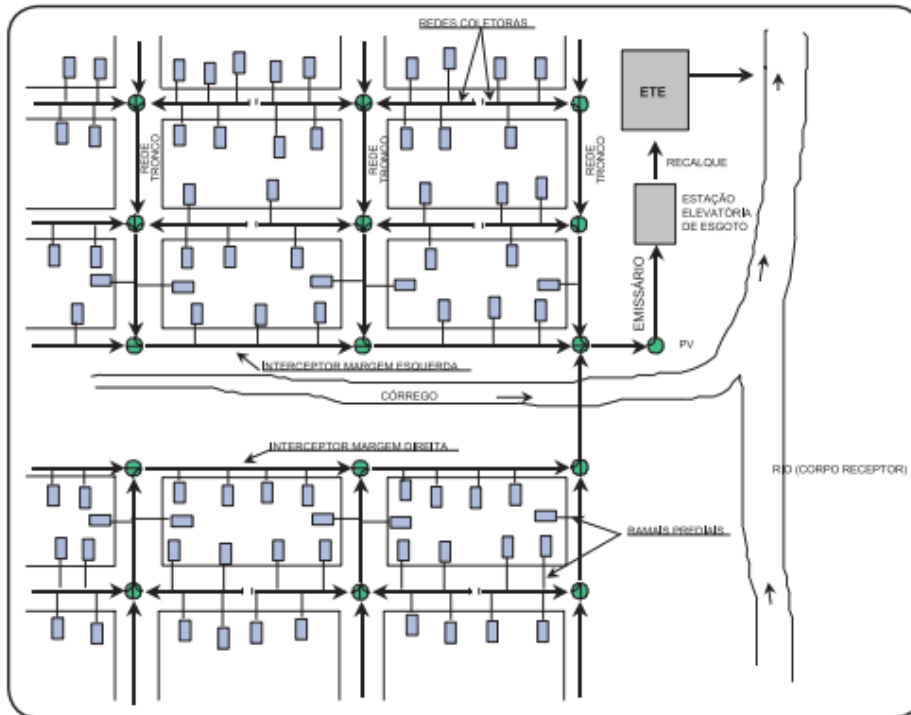
2.3.3 Partes de um sistema de coleta de esgoto

De acordo com Dias (2003) a rede responsável pela coleta e pelo transporte dos esgotos é constituída por:

- Ramais prediais: ligação que une o limite do terreno com a rede coletora de esgoto;
- Coletor de esgoto: tubulação: responsável por receber e conduzir os esgotos dos edifícios, ocorre a ligação direta dos domicílios à rede em qualquer de seu comprimento;
- Coletor Tronco: Tubulação da rede coletora responsável por receber contribuição de outros coletores e enviar para um interceptor ou emissário;
- Interceptor: Conduto que recebe contribuição dos coletores ao longo de sua extensão;
- Emissário: Tubulação que recebe esgoto apenas em sua extremidade, ponto responsável por conduzir o efluente a um destino conveniente, podendo se tratar de uma estação de tratamento ou de um corpo receptor;
- Estação elevatória: Instalações responsáveis pelo recalque do esgoto de uma cota inferior para uma cota superior;
- Acessórios: Tubos de inspeção e tubos de inspeção e limpeza, terminais de limpeza, sifão invertido, poços de visitas e caixas de passagem.

A figura 10 ilustra as partes construtivas de um sistema convencional de coleta de esgoto de uma cidade.

Figura 10 - Partes convencionais de um sistema de coleta de esgoto



Fonte: (BRASIL, 2006)

Ainda segundo a NBR 9649, a canalização de todos os coletores deve funcionar em lâmina livre, ou seja, sem trabalhar sobre pressão. Já a PNB 569 expressa que as linhas de recalque das estações elevatórias devem funcionar como condutos forçados.

2.3.4 Problemática relacionada com o sistema separador combinado

Como mencionado anteriormente, no Brasil é adotado o sistema separador absoluto, as águas pluviais não deveriam adentrar ao sistema de esgoto, mas, na prática, temos um sistema separador absoluto funcionando como separador parcial.

Segundo NBR 9648/86, o conceito de esgoto sanitário é:

Despejo líquido constituído de esgotos doméstico e industrial, água de infiltração e a contribuição pluvial parasitária.

Ou seja, a norma já inclui no esgoto uma parcela de contribuição clandestina ou acidental de águas pluviais, o que, conceitualmente, não deveria acontecer.

De acordo com Rosso et al. (2011), essa combinação ocorre devido principalmente

a falta de prioridade aos serviços de operação, manutenção e conservação das instalações do sistema. Fato que acarreta a continuidade de infiltrações indesejadas, falta de controle das ligações prediais irregulares, desencadeados pela ausência de planejamento urbano, além de aspectos culturais.

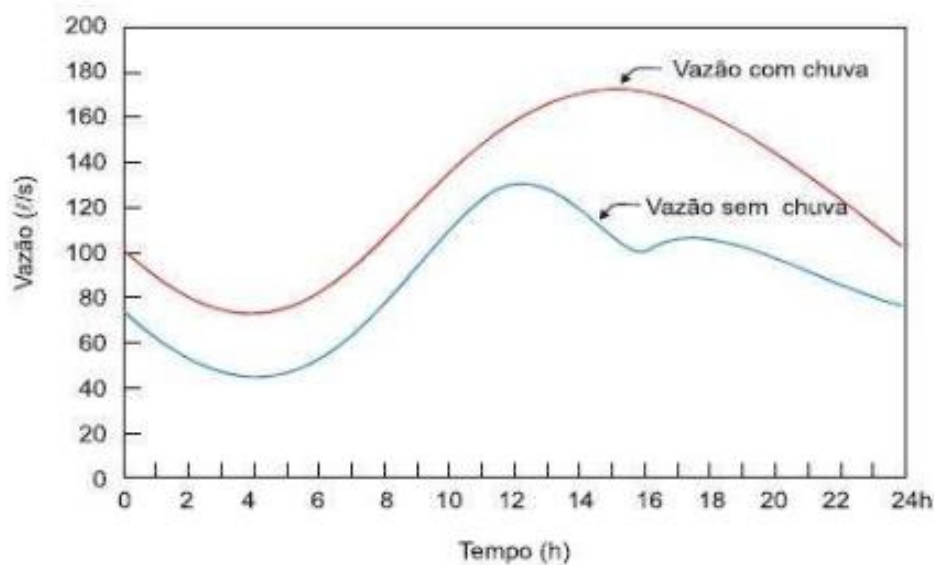
Tsutiya et al. (2003) afirma que os sistemas de esgoto sanitários brasileiros não funcionam segundo previsto nas normas. As expressivas parcelas de contribuições irregulares podem prejudicar o processo de tratamento, provocando um maior assoreamento na rede, ou até mesmo extravasamentos. Em decorrência desses eventos, corpos receptores situados próximos a estrutura da rede podem ser comprometidos, provocando problemas ambientais.

Em áreas com urbanização muito intensa, onde a drenagem natural, realizada por corpos hídricos, é escassa e o escoamento superficial, decorrente da alta impermeabilização do solo, é elevado, cenários de extravasamento na rede de esgoto são comuns, pois, uma grande parcela da água, juntamente com sedimentos, é carregada até o sistema de esgotamento sanitário.

Consciente dessa problemática, muitos centros urbanos optam por construir extravasores na rede, estruturas projetadas para extravasar ocasionalmente este excesso diretamente em córregos, rios, estuários e águas costeiras, antes da chegada à estação de tratamento ou ao corpo receptor (EPA, 2004).

A fim de validar a teoria da influência direta de chuva na rede de esgotamento sanitário do tipo separador absoluto, em setembro de 1992, foi realizado um levantamento de dados locais na ETE na cidade de Tatuí/SP, com objetivo de caracterizar quantitativamente o esgoto sanitário que contribui às redes de esgotamento e foi concluído um aumento de 31% no pico de vazão devido às águas pluviais (TSUTIYA; BUENO, 2004). A figura 11 demonstra o aumento de vazão que contribui para a rede sanitária em períodos de chuva em Tatuí.

Figura 11 - Medição realizada no sistema de esgoto sanitário da cidade de Tatuí – SP



Fonte: TSUTIYA; BUENO (2004)

Apesar de a operação de sistemas separadores absolutos não funcionar perfeitamente no Brasil, Volschan et al. (2009) acredita que, através da comparação do sistema unitário com o separador absoluto, é possível observar inúmeras vantagens técnicas, econômicas e ambientais do sistema separador. Concluindo que o mesmo deve ser mantido, apesar de, na maioria dos casos, sistemas projetados como separadores absolutos, estejam atuando como unitários devido às contribuições clandestinas de águas pluviais.

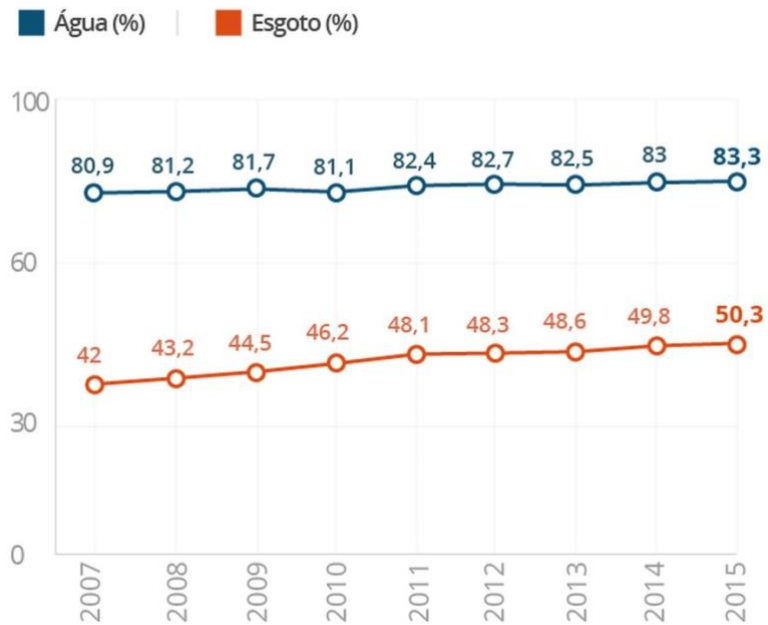
2.3.5 Situação do esgotamento sanitário no Brasil

O Brasil, com população total de aproximadamente 208 milhões de habitantes, apresenta uma imensa carência no que se refere ao esgotamento sanitário. O marco regulatório do saneamento no Brasil ocorreu em 2007, com a sanção da Lei nº 11.445/2007, que estabeleceu as diretrizes nacionais para o saneamento básico e instituiu a Política Nacional de Saneamento Básico.

A imagem abaixo mostra a evolução desse serviço nos últimos 10 anos, podendo ser observado que, segundo os dados mais recentes do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), divulgados em janeiro de 2017, apenas 50,3% dos brasileiros têm acesso à coleta de esgoto. O que significa que mais de 100 milhões de brasileiros utilizam medidas

alternativas de disposição de dejetos, seja por meio de fossas, ou até mesmo lançamento de esgoto diretamente em corpos hídricos.

Figura 12 - Evolução do serviço de água e esgoto



Fonte: Instituto Trata Brasil e SNIS (g1.com.br)

Por meio do fluxograma abaixo, é possível observar as diversas estruturas que o sistema de esgotamento sanitário pode apresentar (BERNARDES; SOARES, 2004).

Figura 13 - Fluxograma de identificação da situação de esgotamento sanitário



Fonte: Bernandes; Soares, 2004

Segundo o autor, quatro situações diferentes podem ser visualizadas, desde a situação de total ausência de infraestrutura sanitária (1) passando pelas soluções individuais (2) e sistema misto (3) até a condição ideal, correspondente ao sistema separador absoluto (4).

Já o fluxograma da figura 8 apresenta o rascunho de um problema comum no Brasil, a falta de recursos para execução de um sistema de esgoto, considerando a situação existente. O autor propõe uma alternativa para cada cenário, a fim de levar o acesso a coleta, transporte a tratamento de esgotos às comunidades.

Figura 14 - Verificação de soluções de esgotamento sanitário

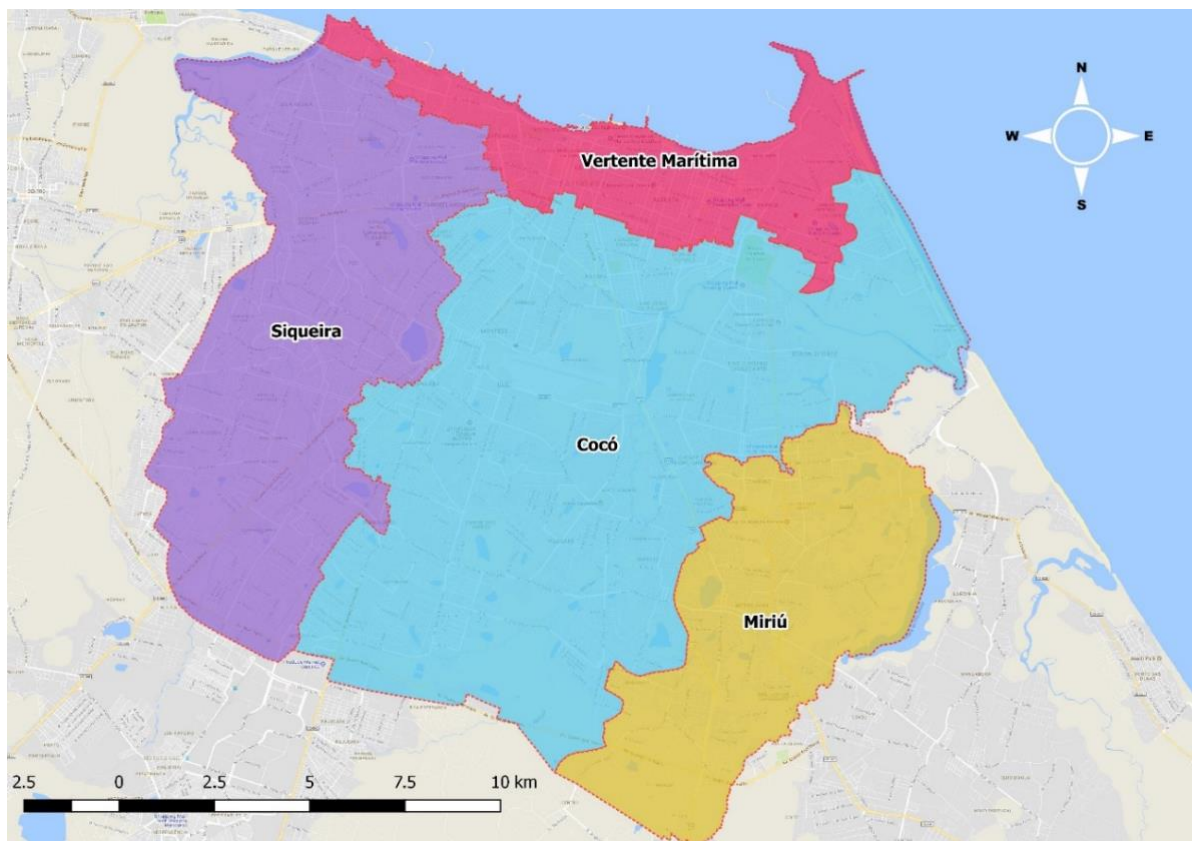


Fonte: Bernandes; Soares, 2004

2.3.6 Macrossistema de esgotamento sanitário de Fortaleza

Atualmente, a região metropolitana de Fortaleza é subdividida em quatro bacias de esgotamento sanitário: Bacia da Vertente Marítima, Bacia do Siqueira, Bacia do Miriú e Bacia do Cocó.

Figura 15 - Bacias de esgotamento sanitário de Fortaleza



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

A parcela com maior urbanização pertence a bacia vertente marítima, localizada na orla de Fortaleza. O esgoto produzido nessa bacia é conduzido através de dois interceptores, um localizado ao leste, denominado interceptor leste (IL), com aproximadamente 7.5 quilômetros de extensão, e tubulações que variam de 900 a 1.750 milímetros e o outro localizado ao oeste, denominado interceptor oeste (IO), com aproximadamente 5 quilômetros de extensão, e tubulações que variam de 1000 a 1.750 milímetros. Após a passagem pelos interceptores, as águas residuais são lançadas na estação de pré – condicionamento (EPC), que tem por finalidade remover o material sólido e o material flutuante no esgoto. Esse tipo de

sistema é conhecido como sistema de disposição oceânica de esgotos sanitários de Fortaleza (SDOES).

Completamente automatizada, a EPC tem capacidade de tratar 4,8 metros cúbicos por segundo, mas, atualmente, trata em torno de 2,8 metros cúbicos por segundo de esgoto. A estação é constituída de um gradeamento mecanizado, sete peneiras rotativas de grande porte e desarenadores, como pode ser observado na figura 16.

Figura 16 - Estação de pré-condicionamento de esgoto (EPC)



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Após o gradeamento mecanizado, o esgoto é encaminhado às peneiras rotativas pela primeira estação elevatória de esgoto (EE1), formada por quatro conjuntos motobombas de 400 cv cada, em regime de funcionamento de 3+1 operadas por inversores de frequência. Após as peneiras, segue-se a remoção de areia por quatro células aeradas com sistema de remoção de areia em batelada e por Clamshell.

Uma segunda elevatória (EE2), à jusante das caixas de areia e formada por igual número e potência de motobombas, direciona os efluentes ao emissário submarino de Fortaleza onde são diluídos e afastados do litoral de Fortaleza pelas correntes marítimas a cerca de 3.330 metros da costa e a uma profundidade de 16 metros. Os materiais insalubres (poluente e areia) são transportados para o aterro sanitário de Caucaia.

Além disso, acoplada à estação de pré - condicionamento, existe a Estação de Tratamento de Odores (ETO), com a finalidade de diminuir o mau cheiro característico do esgoto sanitário. Os gases produzidos nas unidades que compõem a EPC são confinados e, posteriormente, conduzidos em dutos e lavados em solução alcalina clorada, com os odores minimizados, são lançados na atmosfera.

2.4 Modelação hidráulica – hidrológica

Os modelos computacionais têm o objetivo de mimetizar processos ou operações, sem interferir no seu funcionamento, facilitando assim, o entendimento de certos fenômenos, concedendo a possibilidade de testes em diferentes cenários. Segundo Lima et al (2013) um bom modelo deve ser o mais simples e compreensível possível, possibilitando a simulação em vários cenários e os resultados devem ser expostos de forma clara e intuitiva, permitindo uma fácil e rápida interpretação dos dados obtidos.

De acordo com Tucci (1998) os modelos podem ser classificados como:

- Concentrados ou distribuídos: Para os concentrados a variabilidade espacial da bacia não é considerada, já os distribuídos consideram variáveis de tempo e/ou espaço;
- Conceitual ou Empírico: Os modelos conceituais consideram os conceitos físicos relacionados aos processos hidrológicos, já os modelos empíricos os valores calculados são ajustados aos valores observados sem interferência dos processos físicos envolvidos;
- Estocásticos ou determinísticos: Em modelos estocásticos a chance de ocorrência das variáveis é levada em consideração, e o conceito de probabilidade é introduzido, ou seja, para um mesmo dado de entrada pode ser gerados vários dados de saída, dependendo da simulação. Os modelos determinísticos geram resultados constantes para um mesmo dado de entrada, independentemente da quantidade de simulações.

Na modelagem hidráulica-hidrológica é utilizado o modelo determinístico, pois, já que o modelo não leva em consideração fatores de aleatoriedade, possui uma maior capacidade de capturar as variabilidades da bacia hidrográfica.

Santos (2009) define modelos hidráulicos-hidrológicos como modelos baseados em abordagens físicas dos processos hidrológicos, fazendo uso das equações de conservação de massa e da equação da quantidade de movimento em sua forma completa ou simplificada.

A principal aplicação dos modelos hidráulicos-hidrológicos é simular comportamentos de sistemas já existentes ou analisar projetos futuros, pois possibilitam a

quantificação de variáveis de importância para a análise e tomada de decisões. Sendo possível avaliar o correto ou incorreto dimensionamento da rede, respostas do sistema a várias alterações e formas de melhoria.

Um exemplo desse tipo de modelo é o de chuva-vazão, que tem por objetivo descrever a parte do ciclo hidrológico entre a precipitação e a vazão (Tucci, 1998). Segundo Santos (2009), uma das vantagens do uso de modelos hidráulicos-hidrológicos é o alcance da modelagem do processo hidrológico. Em outras palavras, enquanto modelos puramente hidrológicos destinam-se fundamentalmente a obter o hidrograma de cheia na saída do exutório de uma bacia, os modelos hidráulicos-hidrológicos visam o entendimento dos processos hidráulicos e hidrológicos que ocorrem no interior da bacia.

2.4.1 Modelos Hidrológicos

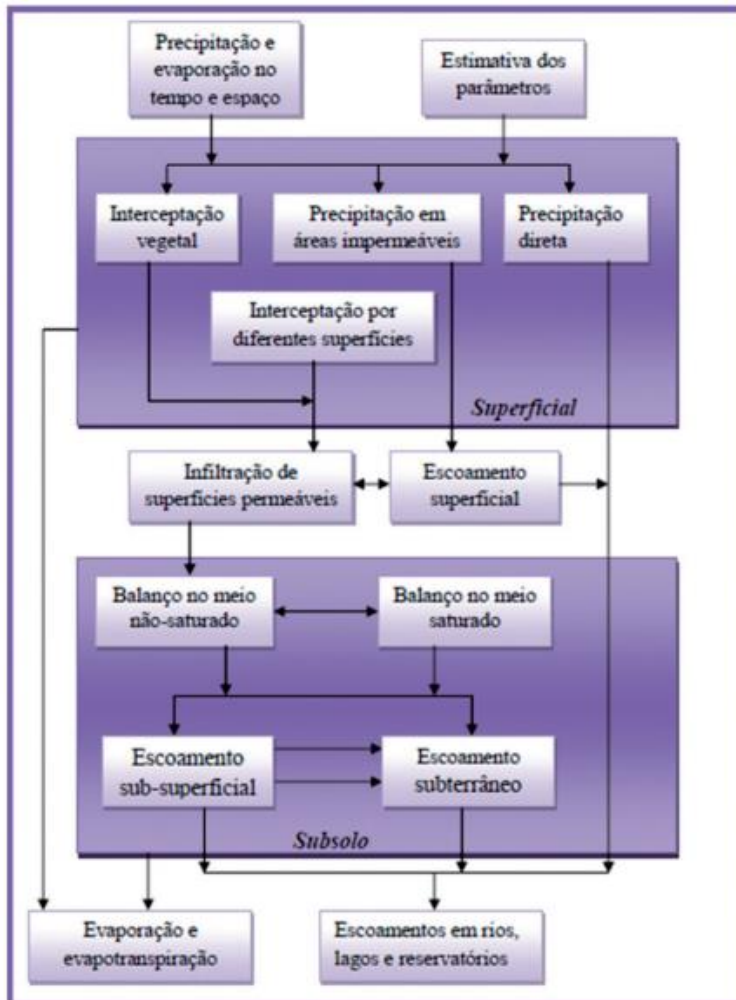
Segundo Cadier et al (1987), modelos hidrológicos se definem como a representação de algum elemento ou sistema em uma configuração ou linguagem que seja de forma acessível e usual, tendo como objetivo a compreensão e análise de dados, em função de obter respostas para diferentes entradas. Tucci (1998) complementa que, modelos hidrológicos são utilizados como ferramentas para retratar os processos ocorridos em bacias hidrográficas e compreender a influência de diferentes parâmetros em um sistema.

Para obtenção de resultados que se aproximem de sistemas reais, a modelagem hidrológica demanda conhecimentos aprofundados sobre o ciclo hidrológico dos elementos que compõem o sistema, como (Santos, 2009):

- Precipitação;
- Evapotranspiração;
- Infiltração;
- Escoamento Superficial;
- Intercepção.

Todos os dados são obtidos através de modelos matemáticos. A figura 17 ilustra um fluxograma da estrutura nas quais os diferentes processos hidrológicos são agrupados a fim de representar as diversas partes do ciclo hidrológico.

Figura 17 – Fluxograma do ciclo hidrológico



Fonte: Tucci, 2005

De acordo com Leitão et al. (2008) os métodos matemáticos mais utilizados pelo modelo hidrológico são: método racional, modelo da curva tempo-área, método do hidrograma unitário e modelo de reservatório. Onde, de acordo com Tucci (2000), o método racional é o mais usualmente utilizado para determinar o caudal máximo em condutos pluviais de pequena área, obtido pela equação:

$$Q = C * i * A \quad (1)$$

No qual, C corresponde ao coeficiente de escoamento, i é a intensidade de chuva e A é a área total da bacia.

O modelo da curva tempo-área, também conhecido como método de Clark, vem sendo utilizado em pequenas áreas de bacias, substituindo, em algumas ocasiões, o método Racional, além de ser utilizado por alguns programas americanos, como HEC-1 e HEC-HMS (Tomaz, 2016). Segundo Leitão et al. (2008), o escoamento nesse modelo é controlado por três

fatores: perdas iniciais, área da bacia e pela perda hidrológica contínua.

O método do hidrograma unitário depende de dois elementos, a separação do volume de escoamento superficial e a propagação desse volume para jusante. Tucci (2003), ao falar da utilização do método do hidrograma unitário, comenta algumas limitações, como por exemplo:

- Representação linear do escoamento superficial, que, na realidade, tem um comportamento não-linear;
- Considera uma distribuição uniforme da precipitação;
- Erros durante a separação do escoamento superficial e subterrâneo fornecem valores hidrológicos para determinação do hidrograma unitário.

Tucci (2003) afirma que, todas essas limitações têm como consequência a geração de diferentes hidrogramas, de acordo com cada evento.

No modelo de reservatório, é desconsiderado a equação da conservação da quantidade de movimento, sendo calculada baseada apenas na lei de conservação da massa. No modelo, a bacia tem um comportamento de um reservatório, onde a vazão de exutório está linearmente relacionada com o volume de armazenamento Leitão et al. (2008).

2.4.2 Modelos Hidráulicos

A modelagem hidráulica em sistemas de coleta e transporte de esgoto sanitários vem sendo bastante aplicada, principalmente por proporcionarem uma maior rapidez e facilidade no cálculo proporcionados pelo desenvolvimento tecnológico da informática, com o uso de hardware e software (Tsutiya,2011).

Os modelos hidráulicos, são caracterizados por simular o comportamento da água em um sistema e as interações físicas com o local. Para isso, é necessário o uso da conservação da quantidade de movimento juntamente com a equação da continuidade, princípios que comandam a modelagem (Pereira, 2012).

Quando o objeto de estudo é uma superfície livre, ou seja, onde o escoamento é gravitatório, as equações matemáticas unidimensionais e bidimensionais mais empregadas para descrever o comportamento do fluido são as equações de Saint-Venant. Segundo Lima et al (2013) as hipóteses simplificadas utilizadas nestas equações são:

A componente da velocidade e aceleração no eixo vertical são desprezáveis, a pressão é hidrostática, o fundo é fixo com uma

inclinação pequena, numa secção a velocidade horizontal é constante ao longo da vertical e os efeitos da turbulência e das tensões tangenciais podem ser considerados de uma forma agregada.

O uso dessas equações permite analisar a altura e a velocidade média do escoamento ao longo de uma secção transversal Lima et al (2013).

Em tubulações de esgoto, a aceleração e velocidade das partículas na direção vertical são muito pequenas comparado com sua aceleração e velocidade na direção horizontal. Sendo assim, apenas uma força atuará na direção vertical, a força resultante da aceleração da gravidade (Kowalska, 2013). Lima et al (2013) afirma que, por se tratar de um escoamento com direção bem definida, é permitido o uso de modelos unidimensionais para cálculos hidráulicos dentro de coletores.

As formas diferenciável e conservativa das equações de Saint-Venant podem ser expressas como (Negrão,2015):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\beta Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gA(Sf - S0) = 0 \quad (3)$$

Aceleração local	Aceleração Advectiva	Força de ressão	Força de atrito e gravitacional
---------------------	-------------------------	--------------------	------------------------------------

Onde:

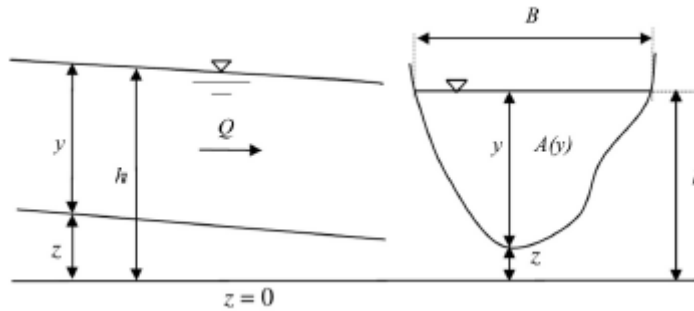
- A (m²) é equivalente a área molhada;
- Q (m³/s) a vazão;
- t (s) o tempo;
- x (m) a distância na direção do escoamento;
- q (m²/s) a vazão de contribuição lateral por unidade de comprimento;
- g (m/s²) a aceleração da gravidade;
- y (m) a profundidade da água;
- β o fator de correção de momento;
- Sf (m/m) a inclinação da linha de energia;
- S0 (m/m) a inclinação longitudinal de fundo.

Para cálculo da inclinação da linha de energia são utilizadas as leis de resistência, como a fórmula de Manning ou fórmula de Chézy. Na equação de Manning, podemos determinar que:

$$Sf = \frac{n^2 P^{4/3} |Q|}{A^{10/3}} \quad (4)$$

Onde n ($\text{s/m}^{1/3}$) corresponde ao coeficiente de rugosidade de Manning e P (m) ao perímetro molhado.

Figura 18 - Ilustração das variáveis



Fonte: Negrão, 2015

As equações de Saint Venant podem ser utilizadas de diversas maneiras, dependendo do objeto em estudo. Então de acordo com a aplicação e a precisão pretendida, podem ser utilizadas versões simplificadas destas equações.

Se for desconsiderado as variações ao longo do tempo, então o escoamento é considerado em regime permanente. As equações podem ser reescritas da seguinte forma (Lima et al, 2013):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} = g(S0 - Sf) \quad (6)$$

Quando é utilizado o modelo da onda difusa, a equação dinâmica pode ser simplificada, não levando em consideração os termos da aceleração local e convectiva (Lima et al, 2013):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} = (Sf - S0) \quad (8)$$

Por fim, quando é utilizado o modelo da onda cinética pode-se desprezar os termos da aceleração e inércia, considerando apenas os termos relativos ao declive e ao atrito (Lima et al, 2013):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

$$Sf - S0 = 0 \quad (10)$$

2.5 Softwares de Modelagem Hidráulica/Hidrológica

Atualmente diversos softwares são utilizados para realizar simulação dinâmica da rede de drenagem e esgoto. Estes softwares consistem em programas computacionais capazes de reproduzir as condições de operação dos sistemas, com todas as suas peculiaridades físicas, topográficas e hidráulicas.

Estas poderosas ferramentas permitem ao operador conhecer amplamente a condição operacional da rede, bem como encontrar rapidamente soluções para problemas contingenciais, e planejar cientificamente as intervenções no sistema, sejam elas de curto, médio ou longo prazo. Os softwares desenvolvidos têm a capacidade de trabalhar com um amplo número de dados, permitindo simular uma rede com milhares de nós e trechos. Além de permitir a associação entre período seco e chuvoso, ou seja, possibilitam modelar com entrada de vazão de chuva no sistema de esgoto (Tsutiya,2011).

O primeiro software criado para modelagem hidráulica de sistemas de drenagem foi o *Storm Water Management Model* (SWMM), desenvolvido pela *Environmental Protection Agency* (EPA) em 1971. Software de acesso livre que, desde sua criação, vem sofrendo diversas modificações.

Após o lançamento do SWMM pela EPA, diversas empresas começaram a comercializar seus próprios softwares, como um aperfeiçoamento da ferramenta criada em 1971, como exemplo da Innovyze, DHI e Bentley. A Tabela 1 compara alguns softwares desenvolvidos para modelagem de drenagem de águas pluviais e esgotamento sanitário.

Tabela 1 - Softwares de modelagem hidráulica - hidrológica

Software	Combinação modelo hidrológico e hidráulico	Modelo de qualidade de água	Domínio Público	Empresa
HydroCAD			Não	HYDROCAD
PondPack	X		Não	Bentley
EPA SWMM	X	X	Sim	EPA
PCSWMM	X	X	Não	CHI WATER
InfoSWMM	X	X	Não	INNOVYZE
xpswmm	X	X	Não	XP SOLUTIONS
MIKE URBAN (SWMM or MOUSE)	X	X	Não	MIKE
InfoWorks ICM	X	X	Não	INNOVYZE
MIKE 11	X		Não	MIKE
CivilStorm	X		Não	BENTLEY

Fonte: Adaptada de Minnesota Pollution Control Agency

Como pode ser observado na tabela, apesar da criação de diversos softwares mais modernos, o único que continua contando com uma plataforma de livre acesso é o EPA SWMM. Pelo fácil acesso ao software, muitos centros de pesquisa optam por utilizá-lo em análise, planejamento e projetos de sistemas de drenagem de águas pluviais em áreas urbanas e em sistemas coletores de águas residuárias (podendo ser separadores absolutos, unitários ou mistos).

2.5.1 SWMM

O *Storm Water Management Model* (SWMM) é um modelo de simulação dinâmica chuva-vazão usado para eventos singulares ou de longa duração, permitindo a simulação quantitativa e qualitativa de áreas urbanas (Rossman, 2010). Foi criado em 1971 e desenvolvido pelo Divisão de Distribuição de Água e Recursos Hídricos da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), como resultado da ação conjunta de trabalho e pesquisa, realizados para avaliar e reduzir os riscos à saúde humana e ao meio ambiente, e, desde então tem sido atualizado, atualmente encontra-se em sua versão 5.1.012.

Desde sua criação, o programa vem sendo utilizado em diversos programas de estudos em esgoto e águas pluviais ao redor do mundo. Rossman (2010) relata as principais aplicações do software:

- Dimensionamento de sistemas de drenagem para controle de inundações;
- Dimensionamento de instalações de retenção e suas dependências para controle de inundações e proteção de qualidade da água;
- Projetar estratégias de controle para minimizar extravasamentos na rede de esgoto
- Avaliar o impacto de infiltração na rede de esgoto com a ocorrência de extravasamentos;
- Avaliar a eficácia de melhores práticas de gestão para reduzir as cargas de poluentes em tempo úmido.

Como pode ser observado, além de acompanhar os parâmetros qualitativos e quantitativos, calcula a vazão e nível das águas residuárias tanto dentro das tubulações como em estações elevatórias em cada momento da simulação. Com a aplicação do software é possível analisar detalhadamente sistemas de esgoto sanitário, escoamento de águas pluviais e combinar os dois fenômenos.

2.5.1.1 Cálculo do escoamento superficial no SWMM

O escoamento superficial pode ser entendido como o fluxo de águas que ocorre na superfície das sub-bacias, esse fluxo pode ser originado através de eventos chuvosos, derretimento de gelo ou escoamento proveniente de outras sub-bacias. O programa assume que,

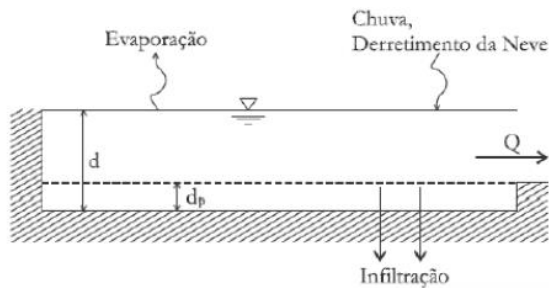
o escoamento em um sub-bacia ocorre quando a profundidade da água excede a sua capacidade de retenção (Kowalska, 2013). O SWMM calcula esse escoamento através da equação de Manning (Rossman, 2010).

$$Q_s = Wc * \frac{1}{nc} (d + dp)^{\frac{5}{2}} * Ss^{1/2} \quad (11)$$

Onde, Q_s equivale ao escoamento na superfície (m^3/s), Wc largura da sub bacia (m), nc o coeficiente de rugosidade da sub bacia (-), dp capacidade máxima de retenção (m), d altura da água acima da sub bacia (m), Ss corresponde a inclinação da sub bacia (m/m).

As variáveis podem ser observadas na figura abaixo.

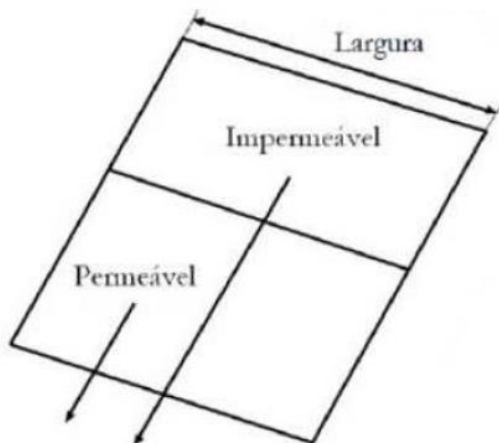
Figura 19 - Conceito de escoamento superficial no SWMM 5



Fonte: Adaptado de Rossman (2010)

O programa representa cada bacia com uma largura e comprimento definidos, sendo que a mesma é dividida em zona permeável e impermeável, como é possível visualizar na figura 20.

Figura 20 - Modelo de sub-bacia utilizada no SWMM



Fonte: Adaptado de Rossman (2010)

2.5.1.2 Modelos de simulação hidráulica-hidrológico no SWMM

O SWMM pode realizar simulações utilizando 3 modelos diferentes: regime permanente, onda cinética e onda dinâmica.

- Modelo de regime permanente: Procedimento bastante simples, ideal para sistemas ramificados, onde cada junção possui apenas um canal de saída. Este método pode fornecer a primeira aproximação para uma análise inicial utilizando simulações contínuas de longo prazo.

- Modelo da onda cinética: Simula a variação espacial e temporal do escoamento em um conduto, utiliza a equação de Saint-Venant juntamente com a equação da continuidade, mas é simplificada através da omissão da inércia e das forças hidrostáticas. Não leva em consideração acumulação de fluxo, ou seja, apenas pode ser utilizado para condutos com inclinação positiva.

- Modelo da onda dinâmica: É o único modelo que leva em consideração as equações de Saint-Venant sem simplificações, ou seja, considera o fluxo sob pressão, mudança de direção e acúmulo do fluxo. Além disso, fornece ao utilizador o nível de água nos nós e na tubulação ao longo dos condutos, podendo ser utilizado em qualquer tipo de rede.

2.6 Utilização de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) no Pré-processamento da Modelagem Hidráulica

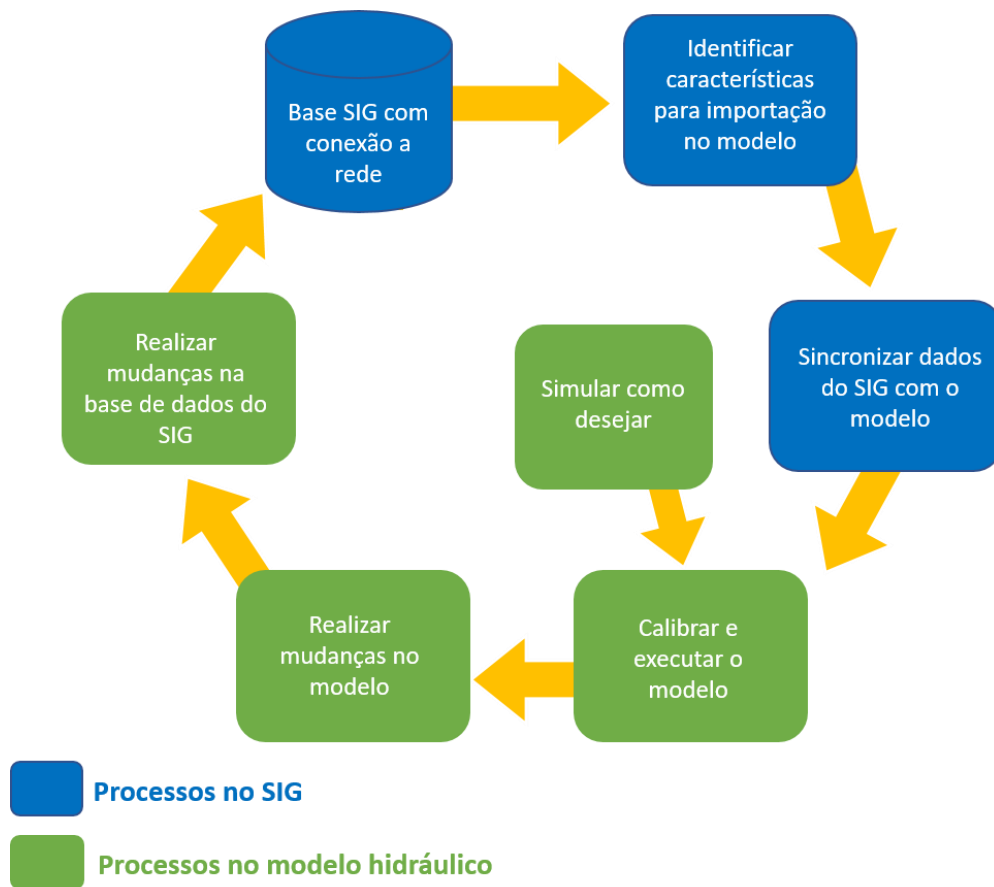
Um dos grandes obstáculos na obtenção de êxito durante a utilização de softwares de modelagem hidráulica diz respeito a união de todos os dados de entrada, pois, na maioria das empresas de saneamento básico, as informações estão difusas nos mais diversos setores. Para facilitar a compilação de dados, através de uma plataforma única que agregue informações físicas, como localização, histórico de ocorrência e manutenções executadas, muitas companhias utilizam os sistemas de informações geográficas (SIG).

Tsutiya (2011) define SIG como sistemas de gerenciamento de informações, com funções de captura, armazenamento, recuperação, análise e visualização de dados, que têm por característica sua localização espacial, ou seja, dados posicionalmente definidos. Além disso, Tsutiya (2011) lista algumas facilidades alcançadas com o uso de softwares de modelagem associados a um SIG:

- Maior velocidade na união dos dados necessários à simulação, inclusive com a indexação espacial dos mesmos;
- Rapidez e segurança no nível de atualização dos dados;
- Autenticidade das informações pela associação do banco de dados com o sistema de manutenção e serviços executados em campo;
- Utilização das informações do sistema de cadastro dos consumidores permitindo a espacialização dos mesmos e sua integração aos respectivos trechos de tubulação da rede e o cálculo das vazões utilizados no modelo, com base nos consumos medidos nos hidrômetros;
- Rápida análise para determinar o impacto que uma situação de emergência pode causar ao sistema, como por exemplo, isolamento de uma adutora para manutenção, ou entupimento de uma tubulação de esgoto.

Para um modelo hidráulico ser sustentável e atual, respeitando as mudanças dinâmicas do sistema, uma abordagem integrada é essencial (Edwards, 2011). Edwards (2011) afirma que, uma abordagem integrada elimina a necessidade de atualizar manualmente conjuntos de dados separados para o modelo hidráulico e bando de dados GIS, o maior benefício dessa integração é a maior confiabilidade dos dados, auxiliando na avaliação das deficiências existentes e em possíveis mudanças para otimização dos sistemas.

Figura 21 - Ciclo de um modelo hidráulico sustentável



Fonte: Adaptado de Edwards (2011)

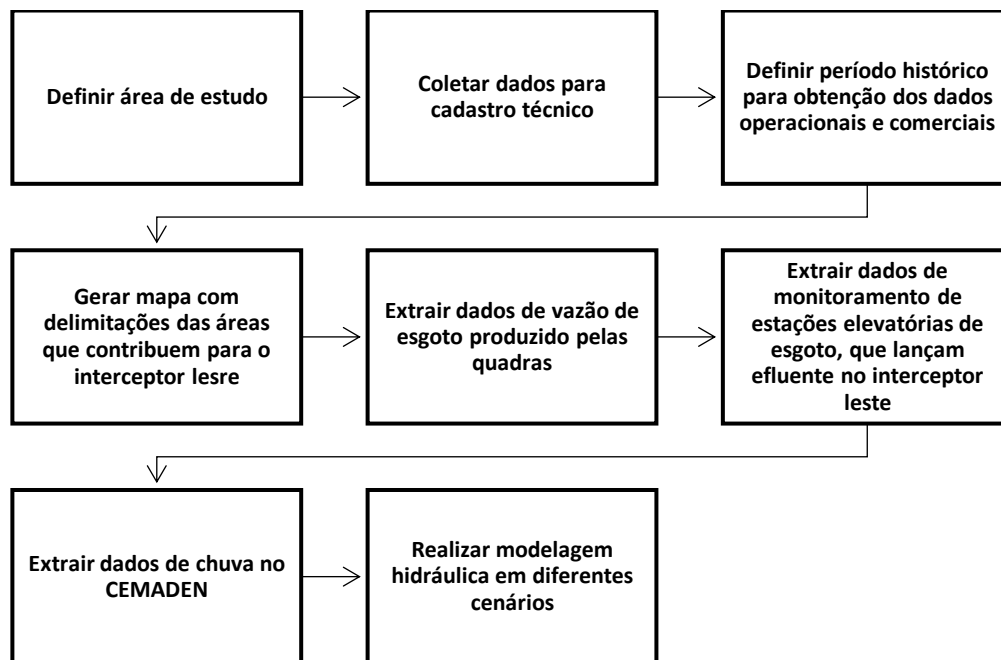
3 METODOLOGIA

3.1 Estratégia Metodológica

Visando atingir todos os objetivos do trabalho e obter resultados satisfatórios com a modelagem hidráulica do interceptor leste da bacia vertente marítima de Fortaleza, foi necessário seguir as etapas abaixo:

- Etapa 1: Definir área de estudo;
- Etapa 2: Coletar dados para cadastro técnico;
- Etapa 3: Definir período histórico para obtenção dos dados operacionais e comerciais
- Etapa 4: Obter arquivos vetoriais (.shp) do cadastro técnico da CAGECE, contendo as delimitações dos setores e quadras de Fortaleza;
- Etapa 5: Gerar mapa com delimitações das áreas que contribuem para o interceptor leste;
- Etapa 6: Extrair dados de vazão de esgoto produzido pelas quadras;
- Etapa 7: Extrair dados de monitoramento de estações elevatórias de esgoto que lançam efluente no interceptor;
- Etapa 8: Extrair dados de chuva no CEMADEN;
- Etapa 9: Realizar Modelagem Hidráulica em diferentes cenários

Figura 22 - Fluxograma da estratégia metodológica



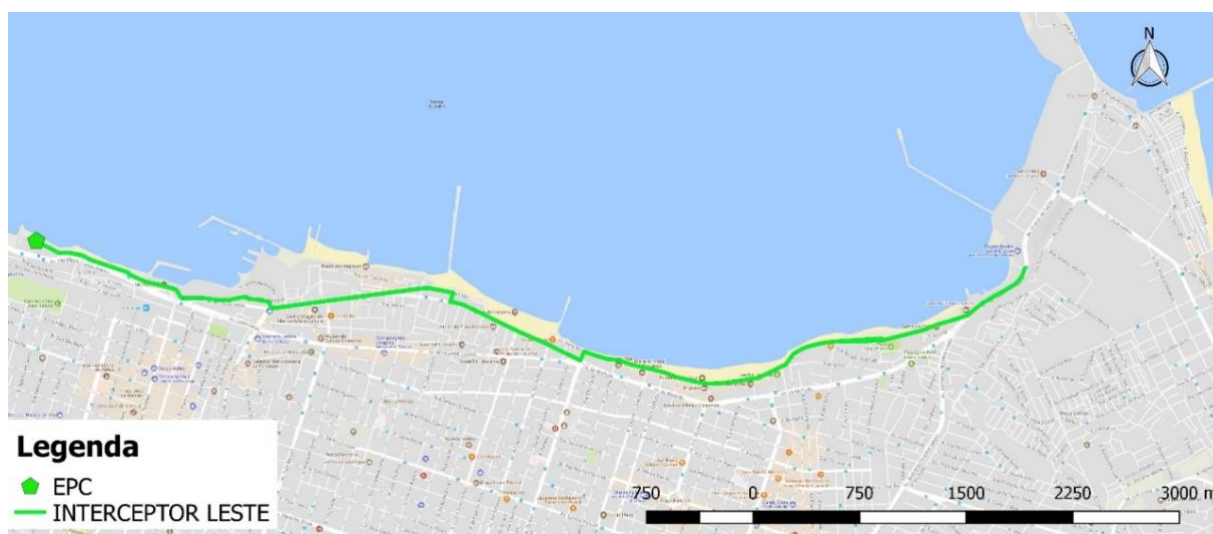
Fonte: Elaborado pela autora (2017)

3.2 Definição da Área de Estudo e Levantamento de Informações Cadastrais

3.2.1 Área de estudo

O interceptor leste (IL), localizado na bacia vertente marítima de Fortaleza, responsável por encaminhar o efluente gerado na região à EPC, foi escolhido como o objeto de estudo desse trabalho e pode ser observado na figura abaixo.

Figura 23 - Interceptor Leste



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

O IL foi escolhido pois, além de ter grande importância para o macrossistema de coleta de esgoto sanitário de Fortaleza, atendendo aproximadamente 450.000 habitantes, o mesmo apresenta um comportamento hidráulico duvidoso, apresentando um grande número de ocorrência de extravasamento em sua extensão.

Essa incerteza é decorrente da falta de atualização do cadastro técnico, pois, os dados físicos do interceptor, como profundidade e localização dos poços de visita, não vêm sendo renovado na mesma velocidade que a cidade vem se modificando. Dificultando a tomada de decisões em certas ocasiões, por exemplo, na escolha de pontos importantes para a limpeza rotineira do interceptor.

Por motivos em parte desconhecidos, a tubulação tem trabalhado em seção plena em certos horários, apesar de que, mesmo em horários de pico de produção de esgoto, o interceptor deveria ter condições de atendimento com folga. Esse comportamento aliado com infiltrações adversas, como ligações indevidas de águas pluviais, ligações clandestinas, e aporte considerável de areia, tem como consequência no extravasamento em alguns pontos.

3.2.2 Levantamento de informações cadastrais

Para elaborar o modelo hidráulico, a primeira etapa se caracterizou por obter dados técnicos cadastrais, pois os mesmos são responsáveis pela precisão e confiabilidade dos

resultados gerados através do programa utilizado. A base cadastral técnica foi disponibilizada, na extensão CAD (.dwg), pela área de faturamento e arrecadação da CAGECE (GEFAR) e importada para o software QGIS (.shp) pela área de Geoprocessamento (IGEO). Após a conversão do arquivo .dwg para .shp foi realizada a alimentação manual de todas as informações da tubulação, como extensão e declividade, e dos poços de visita, como profundidade, cota do terreno e cota do fundo.

Além do interceptor, foi realizado o cadastro de linhas que contribuem diretamente ao macrossistema, como o coletor tronco proveniente da estação elevatória de esgoto do parque ecológico (E.E.E Parque Ecológico), a linha de recalque da estação elevatória Praia do Futuro II (E.E.E PF II) e a linha de recalque proveniente da estação elevatória do Pajeú (E.E.E Pajeú).

3.2.3 *Análise da precisão dos dados cadastrais*

A primeira etapa para análise da veracidade dos dados cadastrais se caracterizou pela realização da batimetria, procedimento executado para levantamento da profundidade, da altura da coluna de areia e do nível de efluente nos poços de visita.

A batimetria foi realizada pela Unidade de Macro Coleta e Tratamento de Esgoto (UNMTE) e pela Gerência de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (GEPED) da CAGECE. O procedimento foi executado de forma manual, com a utilização de haste para medição, como pode ser observado na figura abaixo, em todos os 87 poços de visita do Interceptor Leste.

Figura 24 - Batimetria Manual



Fonte: Autora (2017)

Ao realizar a batimetria, foram coletadas as coordenadas horizontais de cada poço de visita, para seu futuro georreferenciamento, utilizando o GPS da marca Garmin, modelo eTrex HC series.

Além desses processos, a UNMTE realizou o nivelamento geométrico, utilizando o equipamento topográfico de nível, para conferir as cotas do tampão dos poços de visita. Após a coleta desses dados foi realizado uma análise juntamente com o resultado da batimetria para checar a declividade da tubulação do interceptor e, com isto, corrigir possíveis falhas ou inconsistências dos dados originais existentes ou ausentes no projeto. Adicionalmente este procedimento serviu para identificar possíveis áreas de remanso.

3.3 Definição do Período Histórico e Georreferenciamento de Quadras e Setores

O interceptor foi avaliado durante os seis primeiros meses do ano de 2017, de modo a gerar resultados atuais para a análise e tomada de decisões.

Após a definição do período foi levantado o consumo de água no Sistema de Informações Comerciais (SIC) da CAGECE e, a partir deste dado, a produção de esgoto domiciliar lançada no IL. Além disso, também foi coletado dados operacionais, referentes a vazão de esgoto veiculada por cada elevatória ao interceptor leste, disponibilizados pelo Centro de Controle Operacional de Esgoto (CECOE) da CAGECE.

3.4 Vazões Diretas de Esgoto a Rede

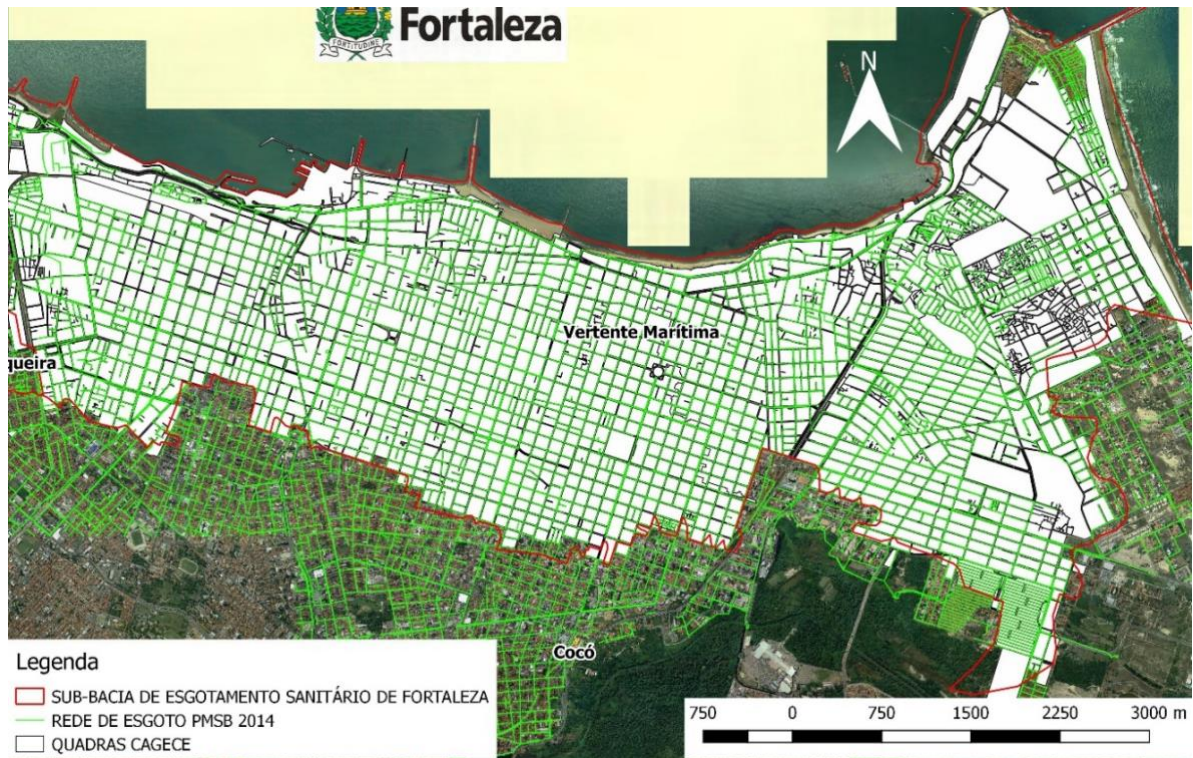
3.4.1 Delimitação das áreas de influência e levantamento da vazão de esgoto das quadras que contribuem para o interceptor

Para estudar o comportamento do interceptor com maior detalhamento, foi necessária a identificação das áreas responsáveis por lançar efluente direta ou indiretamente ao interceptor. A fim de identificar essas áreas, foi feita uma análise utilizando o cadastro de toda a rede de esgoto de Fortaleza, disponibilizados pelo Plano Municipal de Saneamento Básico de Fortaleza (PMSB) de 2014, e as quadras e setores georreferenciados, disponibilizadas pelo IGEO/Cagece.

Essas duas camadas foram analisadas em conjunto no software de informações geográficas, QGIS, e, através do encaminhamento de cada trecho da rede de esgoto, pôde-se

compreender para onde cada uma das 1935 quadras veiculava seu efluente.

Figura 25 - Quadras da CAGECE e rede de esgoto do PMSB 2014

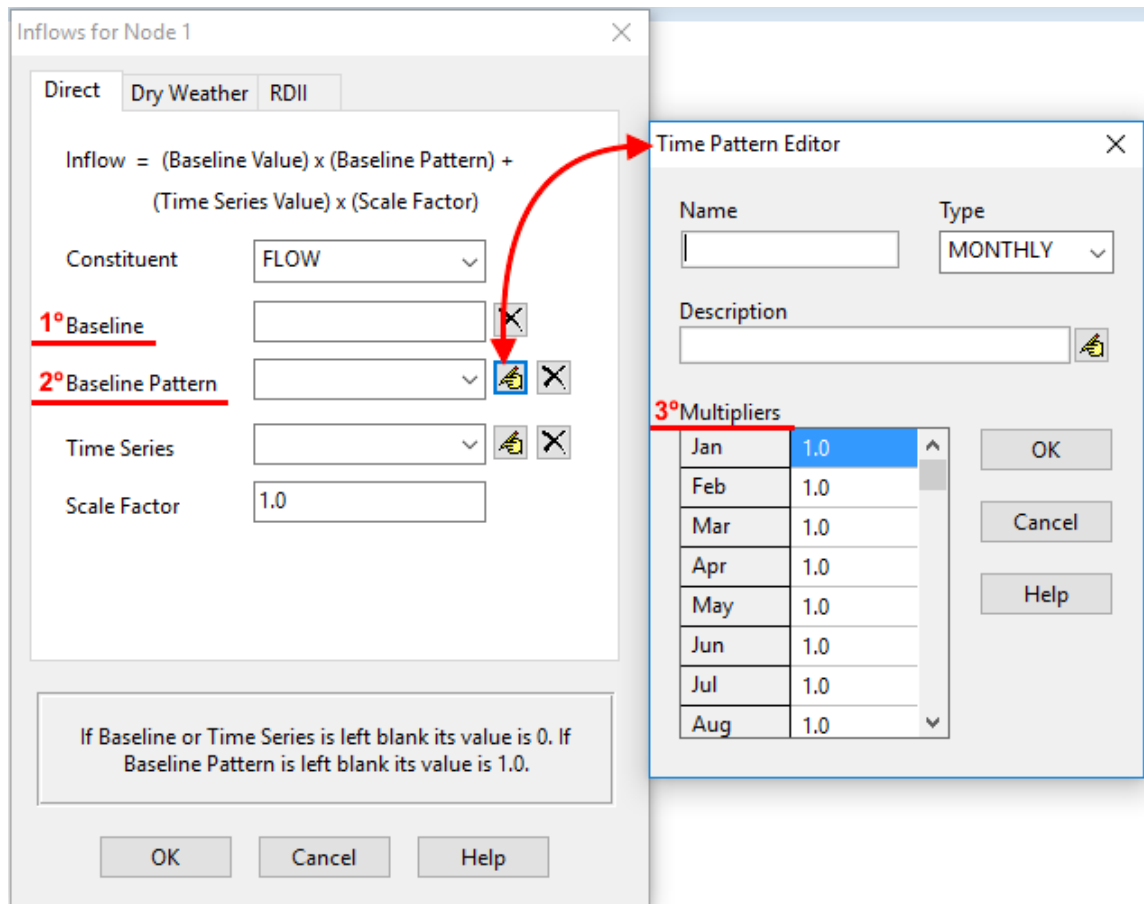


Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Após delimitação das áreas, foi fornecido pelo SIC os volumes de esgoto calculado para cada quadra, onde, segundo colaboradores da CAGECE, esse volume é calculado baseado no coeficiente de retorno (0,8) do consumo de água. Em outras palavras, para calcular o volume de esgoto lançado em um mês, foi considerado o volume de água consumido no mesmo mês multiplicado por 0,8.

Para modelagem hidráulica utilizando o SWMM, essa vazão fornecida pela CAGECE em metros cúbicos por mês deve ser convertida para litros por segundo (unidade utilizada pelo programa). A fim de realizar a modelagem durante os seis primeiros meses do ano, esses valores mensais foram segregados, gerando um “valor base” e um “padrão temporal” mensal, onde cada mês é referente a um multiplicador, requisitados pelo software.

Figura 26 - Parâmetros requisitados pelo software



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

3.5 Levantamento da vazão lançada pelas estações elevatórias de esgoto no interceptor

Atualmente a CAGECE não realiza a medição da vazão lançada pelas elevatórias. Devido à ausência de dados, foi considerado que as E.E.Es obedeciam um comportamento padrão de funcionamento similar á EPC, ou seja, assumiu-se um hidrograma para cada uma das elevatórias com forma idêntica ao da EPC.

Foi disponibilizado pelo CECOPE da CAGECE os dados de vazão média estimada das elevatórias que contribuem diretamente ao interceptor, E.E.E Praia do Futuro II e E.E.E Parque Ecológico.

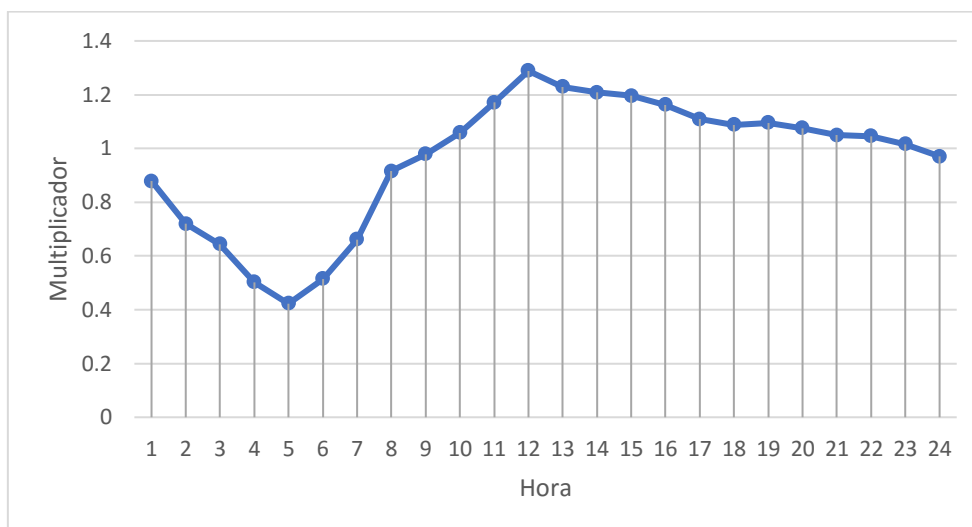
Tabela 2 - Vazões médias estimadas das elevatórias

Estação Elevatória de Esgoto	Vazão Média Estimada (L/s)
Praia do Futuro II	119,43
Parque Ecológico	174,82

Fonte: CECOE/CAGECE (2017)

Para calcular qual fração da vazão média seria lançada por hora, a EPC disponibilizou a curva temporal de recebimento de esgoto. Assim foi realizada a calibração inversa, forçando uma curva a montante, que tem como escopo o IL, que reflita a jusante, compreendida pela EPC.

Figura 27 - Hidrograma EPC



Fonte: EPC/CAGECE (2017)

O software calcula a vazão das elevatórias da mesma forma que a vazão domiciliar, através de um “valor base” e de um “padrão temporal” horário, nesse caso o valor base seria a vazão média estimada e o padrão temporal seria obedecer a curva de comportamento da EPC.

3.6 Modelo Hidrológico

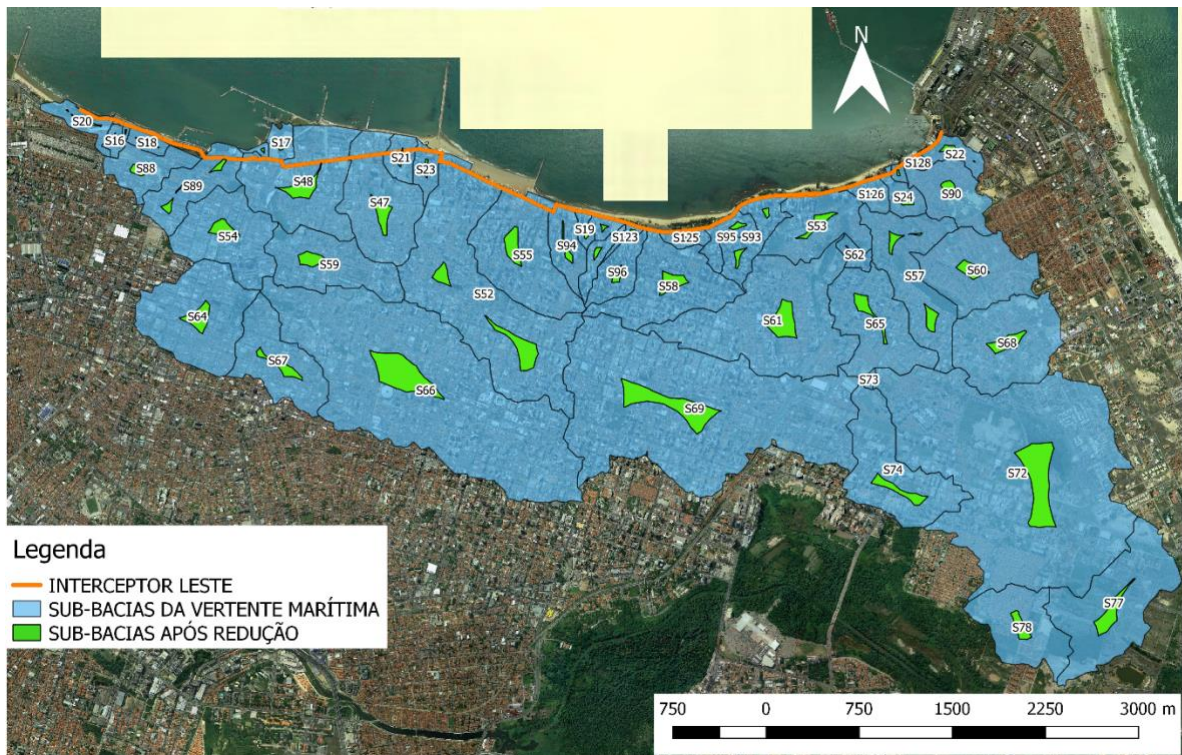
No SWMM o modelo hidrológico utilizado admite as sub-bacias como elementos de reserva de água não lineares. A vazão resultante de cada sub-bacia é calculada através de um balanço hídrico e hidráulico, onde a água que entra provém da precipitação e do escoamento superficial de sub-bacias a montante e a saída de água inclui infiltrações, evaporação e escoamento superficial.

3.6.1 Definição da parcela de chuva que infiltra a rede de esgoto

Devido a ligações indevidas de águas pluviais de uma parcela de imóveis urbanos no sistema de esgotamento, uma fração da água da chuva que escoaria na superfície infiltra na rede de esgoto e é carregada juntamente com o esgoto sanitário, forçando o IL a trabalhar como um sistema separador parcial. Esse fenômeno aumenta a vazão afluente à tubulação, elevando, conseqüentemente, o risco de extravasamento na rede.

Para determinar qual parcela de chuva adentraria a rede de esgoto, contruiu-se um modelo hidrológico com base nas sub-bacias da Vertente Marítima, elaborada pela CAGECE e SEUMA. Devido à ausência de dados de vazão do interceptor em tempo seco e em tempo chuvoso, que pudessem ser usados como estimativa de acréscimo de fluxo promovido pela parcela pluvial que infiltra no IL, adotou-se arbitrariamente que um percentual de 5% do escoamento superficial infiltraria na rede. Para tanto, essas bacias foram reduzidas utilizando o plugin *Buffer by percentage* no software QGIS a uma percentagem de 5% da área original. O resultado dessa redução pode ser observado na figura 28.

Figura 28 - Sub-bacias Vertente Marítima e suas respectivas reduções



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Para a modelagem hidrológica de cada sub-bacia, o SWMM necessita da entrada de certos parâmetros, ilustrados abaixo. Nesse trabalho, cada um desses parâmetros foi disponibilizado pela CAGECE e pela SEUMA .

Figura 29 - Parâmetros requisitados de cada sub-bacia pelo SWMM

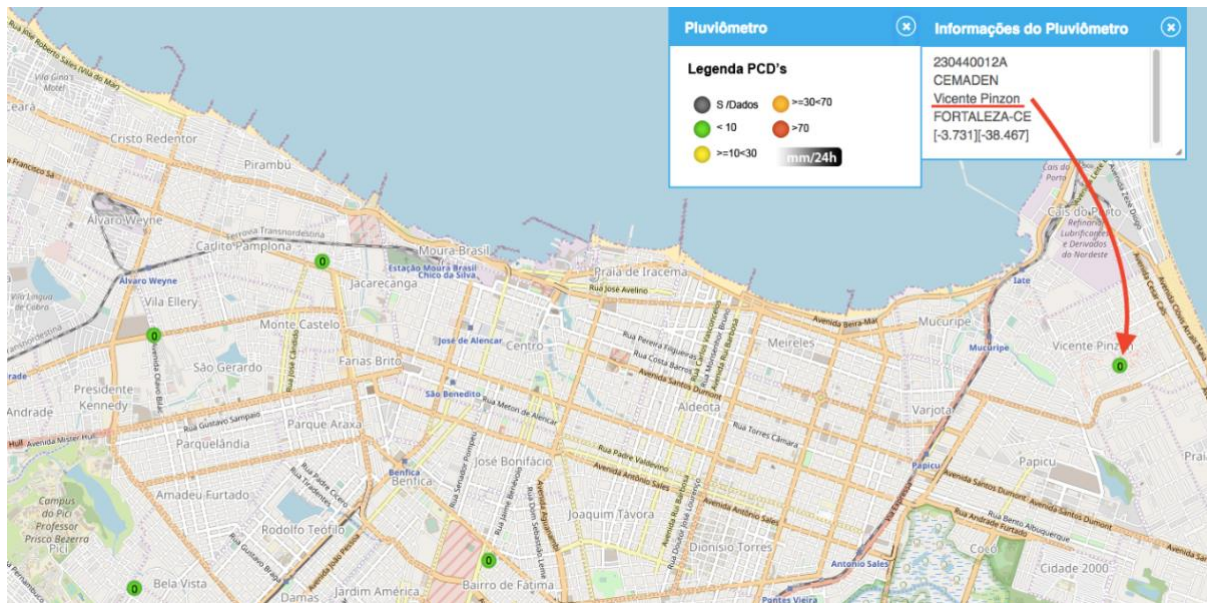
Subcatchment S52			
Property	Value		
Name	S52		
X-Coordinate	554560.937	Dstore-Imperv	1.062
Y-Coordinate	9587638.197	Dstore-Perv	3.067
Description		%Zero-Imperv	25
Tag		Subarea Routing	OUTLET
Rain Gage	Pici	Percent Routed	100
Outlet	PV50	Infiltration	CURVE_NUMBER
Area	43.947	Groundwater	NO
Width	522.30525	Snow Pack	
% Slope	1.2	LID Controls	0
% Imperv	46.81	Land Uses	0
N-Imperv	0.007	Initial Buildup	NONE
N-Perv	0.098	Curb Length	0

Fonte: Elaborado pela autora (2017)

3.6.2 Levantamento de dados de chuva da região

Os dados de chuva foram disponibilizados pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), através de sua plataforma digital. O centro dispõe de diversas estações pluviométricas, como pode ser observado na imagem abaixo, o qual registram dados a cada 10 minutos durante um evento chuvoso.

Figura 30 - Pluviômetro automáticos CEMADEN



Fonte: CEMADEN (2017)

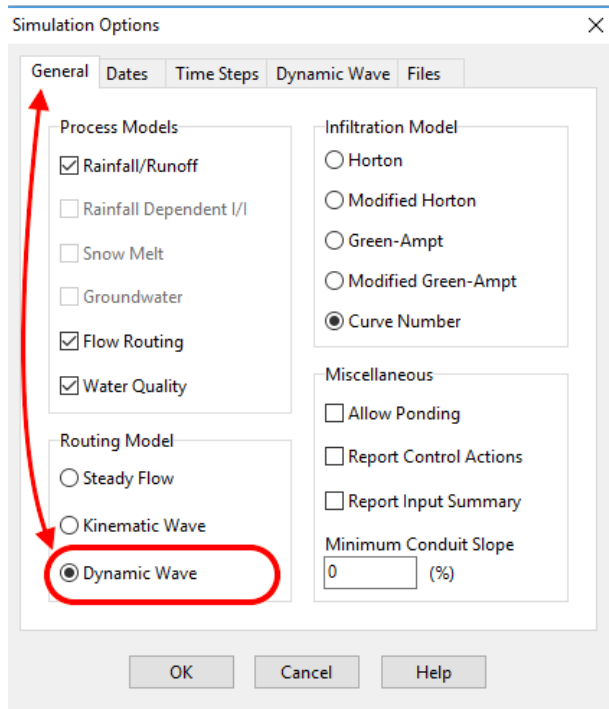
Devido a sua maior proximidade à área, o pluviômetro escolhido foi o Vicente Pinzon, evidenciado na figura 30. Após coleta de dados, foi necessária uma adaptação do formato disponibilizado pelo centro, para que as informações sejam lidas e calculadas pelo software, SWMM.

3.7 Modelo Hidráulico

Esse trabalho utilizou o modelo de transporte da onda dinâmica para realização das simulações, pois, é o único disponibilizado pelo software que leva em consideração as equações completas unidimensionais de Saint-Venant, gerando resultados mais precisos.

Através desse modelo é possível representar o fluxo sob pressão quando um conduto fechado se encontra completamente cheio, nesse caso, o excesso de vazão acarreta no extravasamento do nó. Também é possível reproduzir mudança de direção e acúmulo do fluxo, além disso, fornece ao utilizador o nível de água nos nós e na tubulação ao longo dos condutos, podendo ser utilizado em qualquer tipo de rede.

Figura 31 - Opções de simulação no SWMM



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Para a simulação hidráulica é necessário a alimentação de alguns parâmetros físicos tanto da tubulação, como dos poços de visita, ilustrados abaixo. As informações dos poços de visita foram adquiridas através da batimetria e do nivelamento geométrico, já as informações da tubulação foram adquiridas através do cadastro disponibilizados pela GEFAR.

Figura 32 - Parâmetros de condutos e poços de visita no SWMM

Junction PV		Conduit TUBULAÇÃO	
Property	Value	Property	Value
Name	PV	Name	TUBULAÇÃO
X-Coordinate	-20.520	Inlet Node	PV
Y-Coordinate	8166.895	Outlet Node	1
Description		Description	
Tag		Tag	
Inflows	NO	Shape	CIRCULAR
Treatment	NO	Max. Depth	1
Invert El.	0	Length	400
Max. Depth	0	Roughness	0.01
Initial Depth	0	Inlet Offset	0
Surcharge Depth	0	Outlet Offset	0
Ponded Area	0	Initial Flow	0
User-assigned name of junction		User-assigned name of Conduit	

Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Além de informações como extensão do conduto, formato da tubulação, deve-se entrar com um coeficiente de rugosidade de manning. Segundo o *U.S Department of Transportation* (1985), para tubulação de concreto utilizado em esgotamento sanitário o coeficiente de manning é entre 0,012 e 0,016. Devido à vida útil do interceptor, foi considerado uma rugosidade de 0,015 para todos os condutos.

3.8 Pré-processamento: Conversão de Dados e Realização de Simulação em Diversos Cenários

A conversão de dados foi realizada através do *software* EXCEL, onde foi criada uma planilha obedecendo o código fonte do SWMM, como pode ser observado na figura abaixo.

Figura 33 - Excel utilizado para conversão de dados

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	[TITLE]																
2		Modelagem Hidráulica do Interceptor Leste															
3																	
4	[OPTIONS]																
5		::Option	Value														
6		FLOW_UNITS	LPS														
7		INFILTRATION	CURVE_NUMBER														
8		FLOW_ROUTING	DYNWAVE														
9		LINK_OFFSETS	DEPTH														
10		MIN_SLOPE	0														
11		ALLOW_PONDING	NO														
12		SKIP_STEADY_STATE	NO														
13																	
14		START_DATE	4/1/2016														
15		START_TIME	0:00:00														
16		REPORT_START_DATE	4/1/2016														
17		REPORT_START_TIME	0:00:00														
18		END_DATE	4/30/2016														
19		END_TIME	23:00:00														
20		SWEEP_START	1-Jan														
21		SWEEP_END	31-Dec														
22		DRY_DAYS	0														
23		REPORT_STEP	0:15:00														
24		WET_STEP	0:05:00														
25		DRY_STEP	1:00:00														
26		ROUTING_STEP	0:00:30														
27																	
28		INERTIAL_DAMPING	PARTIAL														

Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Cada aba da planilha equivale a um parâmetro utilizado pelo software de modelagem hidráulica, como características de cada sub-bacia, extensão de cada trecho, cotas dos poços de visita, além das coordenadas de cada elemento do programa.

Após alimentação de todas as informações foi realizada a união de todas as abas da planilha e exportada para o bloco de notas, onde é possível salvar o arquivo de texto na extensão .inp, utilizada pelo SWMM.

Posteriormente, foi decidido realizar simulações em quatro diferentes cenários:

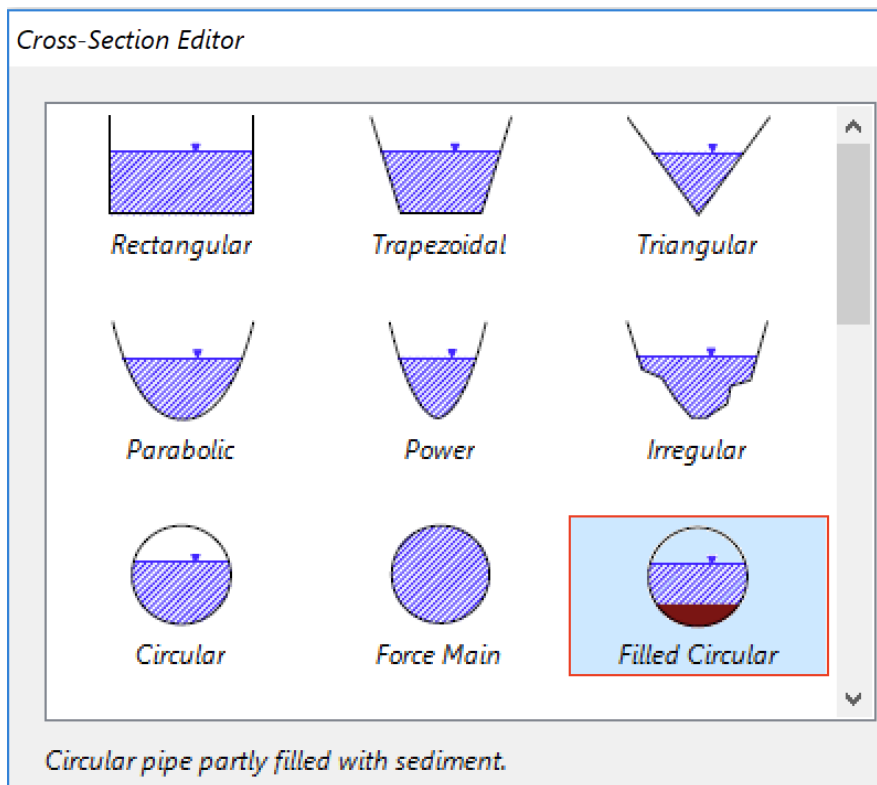
- **Cenário 1:** Interceptor exposto à situação ideal, sem infiltração de chuva e deposição de sedimento na tubulação.
- **Cenário 2:** Interceptor operando sem infiltração de chuva, mas com deposição de sedimento na tubulação.
- **Cenário 3:** Interceptor operando com infiltração de chuva, mas sem deposição de sedimento na tubulação
- **Cenário 4:** Interceptor operando com infiltração de chuva e deposição de sedimento na tubulação.

Para simulação dos cenários 2 e 4, os dados de deposição de sedimento na tubulação foram alimentados manualmente, utilizando o shape chamado de “FILLED_CIRCULAR”, forma geométrica utilizada pelo programa para descrever condutos parcialmente preenchidos de sedimentos, ilustrada na figura 34, onde é necessário alimentar tanto dado de altura total da

tubulação (diâmetro) quanto altura da coluna de sedimentos. Devido a dificuldade em medir a altura de sedimento (areia e partes sólidas) dentro da tubulação, foi utilizado o valor médio da camada de areia do poço de visita tanto a montante como a jusante, e distribuído linearmente ao longo dos condutos, como pode ser observado na fórmula abaixo:

$$H_{tub} = \frac{(H_{pvmontante} + H_{pvjusante})}{2} \quad (12)$$

Figura 34 - Seções do *Storm Water Management Model*



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

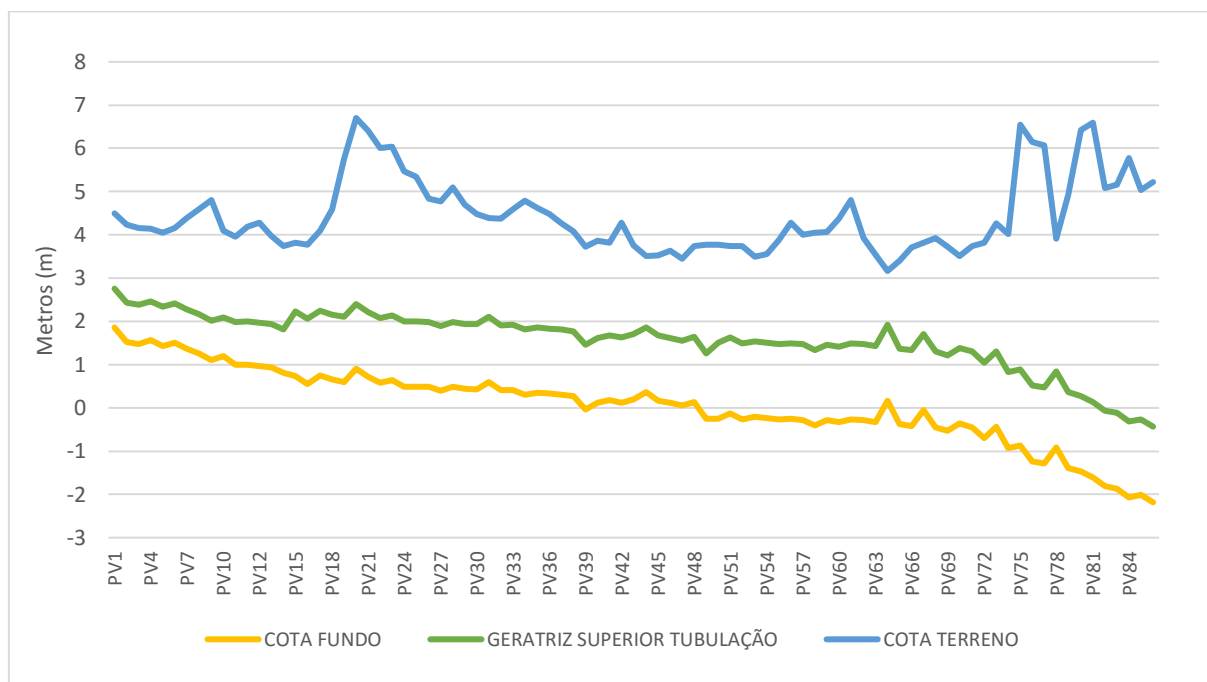
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Verificação da confiabilidade dos dados de cadastro

Após a análise dos dados fornecidos pela CAGECE foi questionado a declividade em alguns trechos, levando a necessidade da realização de procedimentos para verificar a veracidade desses dados, comentados anteriormente no item 3.2.3 desse trabalho.

Através da batimetria obteve-se a profundidade, a altura de areia e o nível do efluente em cada poço de visita do interceptor. Ao unir os dados de profundidade levantados através desse procedimento com as cotas dos tampões obtidas através do nivelamento geométrico, pôde-se calcular tanto a cota do fundo dos poços de visita, como a declividade da tubulação, pois, no interceptor leste, a geratriz inferior da tubulação coincide com o fundo do poço de visita. A figura 35 mostra o resultado da união dessas informações.

Figura 35 - Topografia do Interceptor Leste



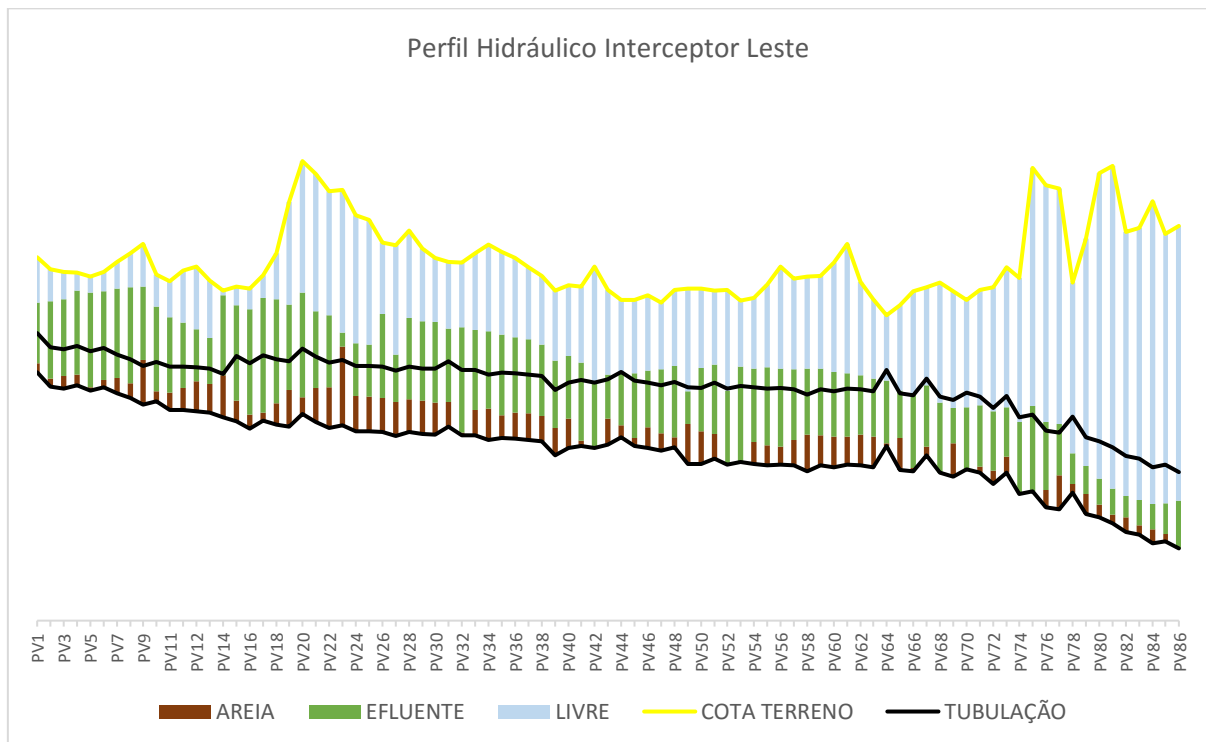
Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Ao analisar o gráfico é possível notar que algumas áreas apresentam declividade negativa, confirmando alguns dados disponibilizados pela GEFAR/Cagece, é importante

ressaltar que, o gráfico não está em escala e não ilustra a distância real entre os poços de visita.

Como já mencionado, além da profundidade, foi medido o nível do efluente e a altura de areia em cada poço de visita. Ao combinar todos os dados obtidos pelo processo de nivelamento geométrico e batimetria foi elaborado o perfil hidráulico do interceptor, ilustrado na figura 36.

Figura 36 - Perfil Hidráulico do Interceptor Leste



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Observando o gráfico podemos concluir que o interceptor, que deveria ser uma rede gravitária, está trabalhando quase que em sua totalidade em carga, pois a tubulação (representada pela linha preta) se mantém afogada até aproximadamente o poço de visita 77.

Além da sobrecarga na tubulação, é possível notar um alto índice de assoreamento, pois alguns poços de visita, como o PV23 e o PV9, possuem uma coluna de areia acima, ou no mesmo nível, da tubulação, funcionando como uma barreira para o escoamento livre do efluente.

Vale frisar que, devido à grande extensão do IL, a batimetria foi realizada no decorrer de uma semana, sempre no período da manhã, entre 8 e 12 horas. Essa variação horária acarreta em uma descontinuidade no fluxo, como pode ser observado entre o PV12 e o PV14

na figura acima, onde o procedimento no 14 foi encerrado ao meio dia e o 13 foi iniciado as 8 horas do dia posterior, caminhando até o primeiro poço de visita. Esse fato explica o nível do efluente mais baixo em alguns poços de visita a montante em comparado com poços de visita a jusante.

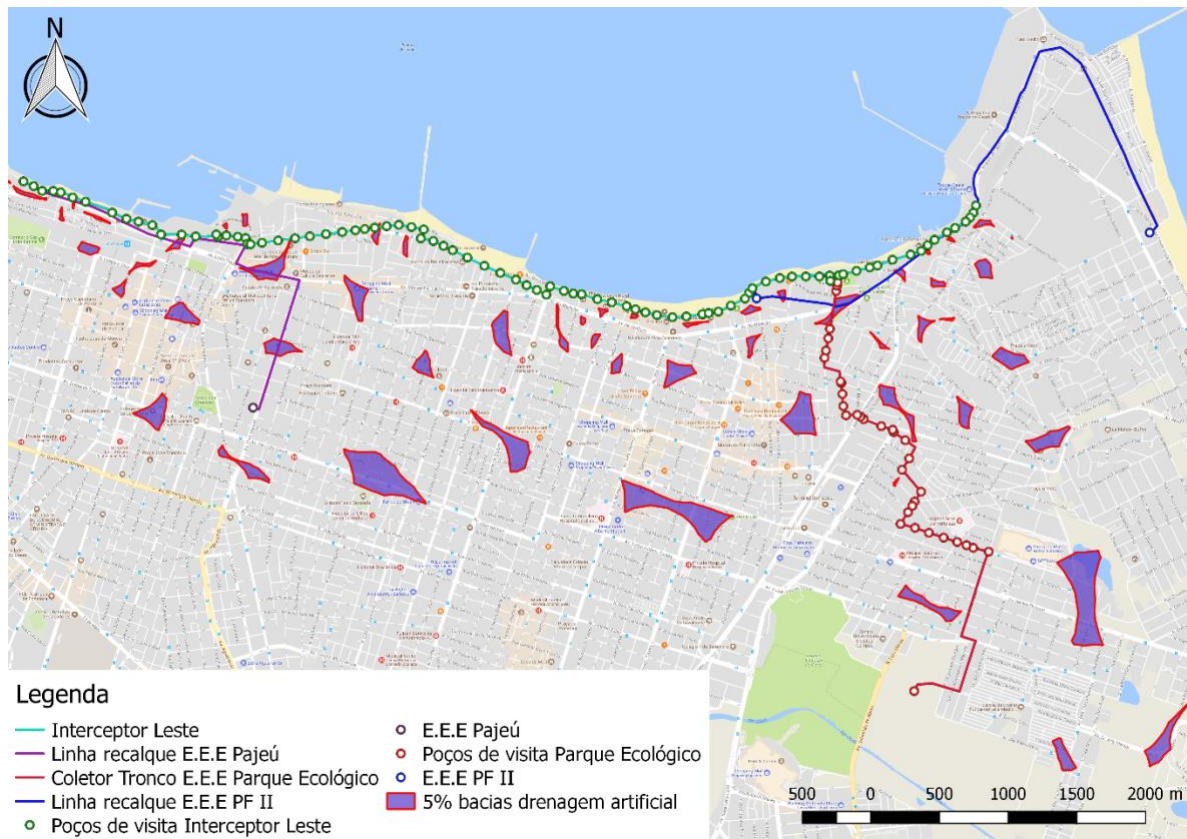
4.2 Construção do Modelo no QGIS

Durante a batimetria, foi realizado o georreferenciamento dos poços de visita do interceptor leste. As coordenadas obtidas foram exportadas para o *software* de geoprocessamento, QGIS, e então cada ponto foi alimentado com os parâmetros obtidos através dos procedimentos mencionados no item anterior. Após a orientação exata de cada poço de visita, a tubulação foi traçada manualmente, unindo os PVs, e os parâmetros foram alimentados a partir do cadastro da GEFAR/Cagece.

Além do interceptor, três linhas também foram cadastradas no QGIS, o coletor tronco proveniente da E.E.E parque ecológico e duas linhas de recalque, uma proveniente da E.E.E PF II e outra da E.E.E Pajeú, sendo essa última ligada diretamente à EPC, não lançando esgoto no IL. Tanto a tubulação dessas linhas complementares como os poços de visita foram cadastrados manualmente e os parâmetros foram alimentados com base no cadastro da GEFAR/Cagece.

O resultado do cadastro do interceptor e das linhas complementares é apresentado abaixo. As sub bacias de drenagem ilustradas em roxo são referentes ao processo descrito no item 3.5.1 desse trabalho.

Figura 37 - Modelo construído no QGIS

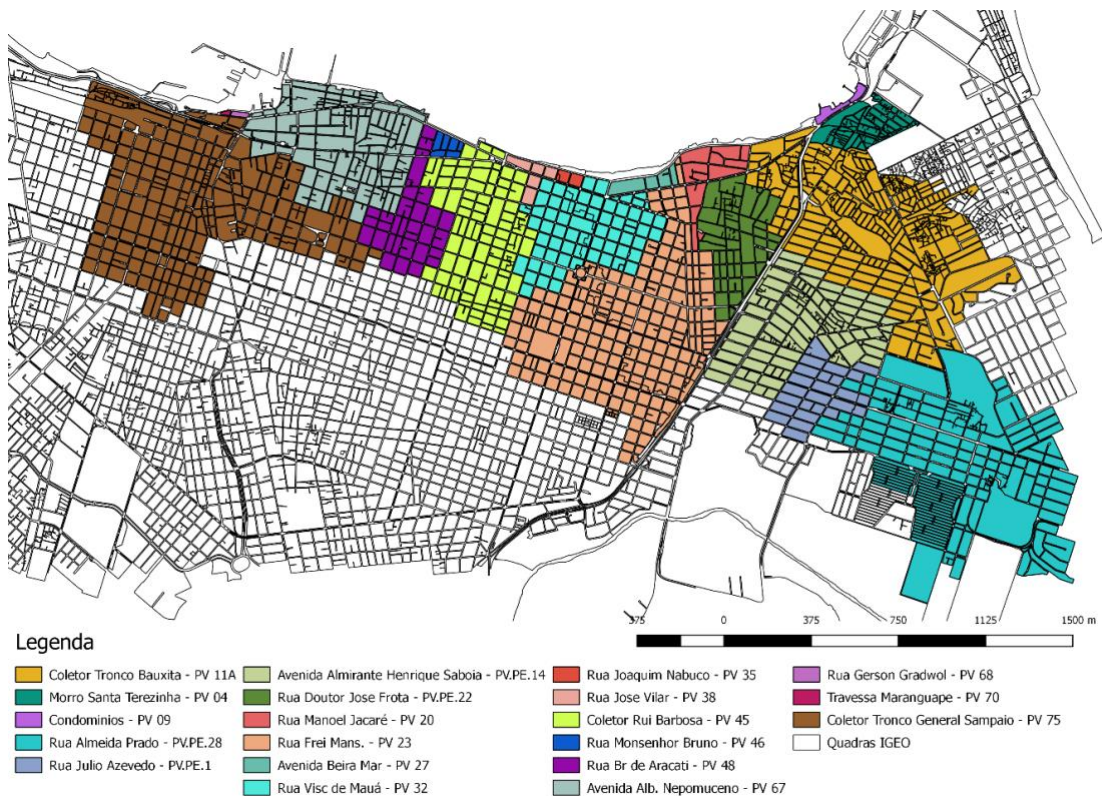


Fonte: Elaborado pela autora (2017)

4.3 Áreas e Vazões Domésticas que Contribuem para o Interceptor Leste

Para determinar as vazões afluente ao interceptor, algumas áreas foram delimitadas, como mencionado no item 3.4 desse trabalho. O resultado do acompanhamento da rede é mostrado abaixo.

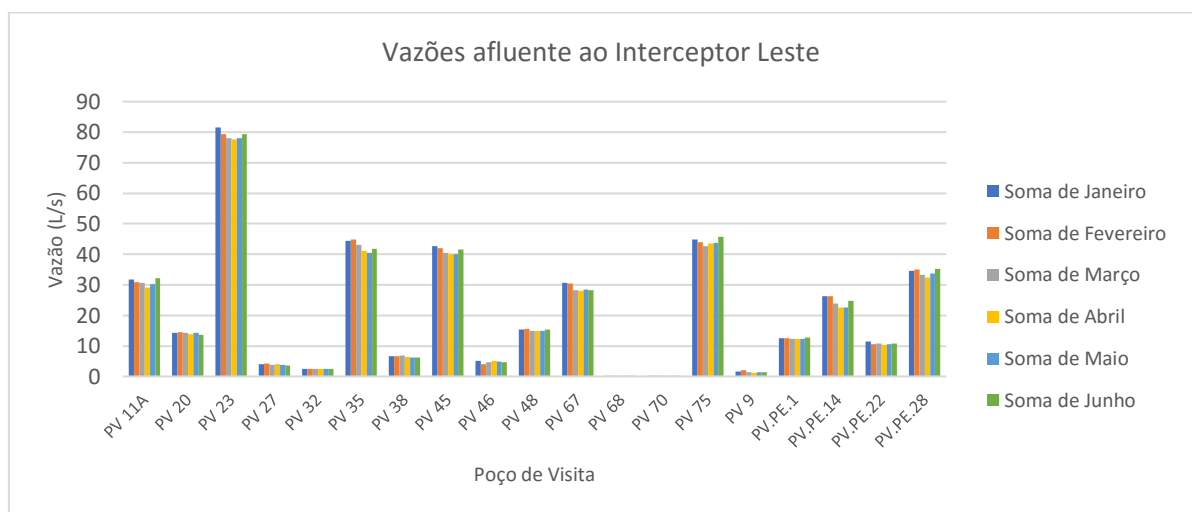
Figura 38 - Delimitação das contribuições domésticas ao IL



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Após a análise e determinação de onde as quadras dessa região, cadastrada na CAGECE, lançavam seu efluente, foi requisitado no SIC/Cagece a vazão de esgoto calculada de cada quadra nos primeiros seis meses do ano de 2017.

Figura 39 - Somatório das vazões afluentes ao IL



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

O gráfico acima mostra o somatório das vazões lançadas em cada poço de visita do interceptor entre janeiro e junho de 2017. Pode-se observar que, as contribuições do PV4 referente ao morro de Santa Terezinha não foram calculadas, pois, os valores não constam no banco de dados do SIC/Cagece.

Como especificado na metodologia desse trabalho, para a simulação no SWMM deve-se criar um “padrão temporal” e um “valor base” para cada PV que contem aflúncias. O “valor base” corresponde a vazão total, em litros por segundo, que o poço de visita recebe durante todo o período em análise, já o “padrão temporal” corresponde ao percentual, encima do valor total, lançado a cada mês nos poços de visita. Os valores são apresentados nas tabelas abaixo.

Tabela 3 - "Valor base" para cada poço de visita

Poço de Visita	Total (L/s)
PV 11A	184.89
PV 20	84.71
PV 23	474.05
PV 27	23.42
PV 32	14.76
PV 35	255.54
PV 38	38.75
PV 45	246.95
PV 46	28.39
PV 48	90.95
PV 67	173.83
PV 68	0.37
PV 70	0.06
PV 75	264.63
PV 9	8.93
PV.PE.1	74.77
PV.PE.14	146.31
PV.PE.22	64.28
PV.PE.28	204.01

Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Tabela 4 - "Padrão temporal" para cada poço de visita

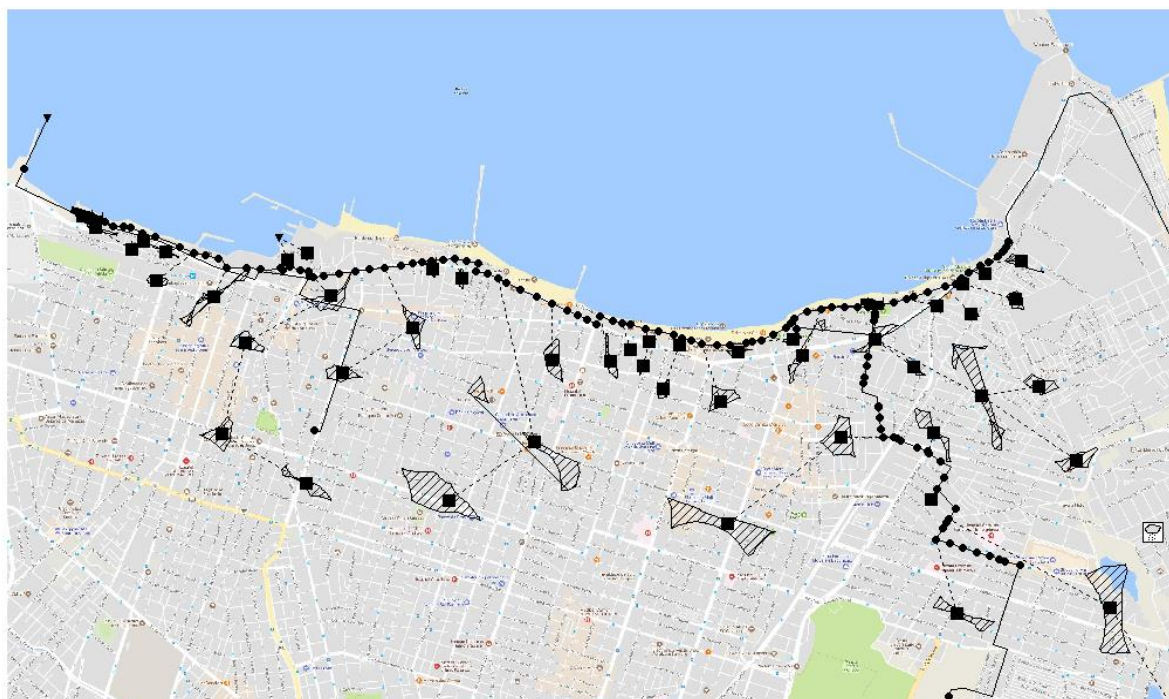
Poço de Visita	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maiο	Junho
PV 11A	0.1720	0.1673	0.1656	0.1581	0.1631	0.1739
PV 20	0.1693	0.1711	0.1690	0.1629	0.1674	0.1602
PV 23	0.1722	0.1672	0.1648	0.1637	0.1648	0.1674
PV 27	0.1734	0.1792	0.1642	0.1674	0.1617	0.1541
PV 32	0.1698	0.1673	0.1662	0.1635	0.1625	0.1708
PV 35	0.1739	0.1751	0.1684	0.1606	0.1583	0.1638
PV 38	0.1708	0.1693	0.1788	0.1628	0.1574	0.1609
PV 45	0.1730	0.1704	0.1635	0.1626	0.1622	0.1684
PV 46	0.1809	0.1419	0.1612	0.1813	0.1744	0.1603
PV 48	0.1681	0.1720	0.1630	0.1637	0.1643	0.1688
PV 67	0.1761	0.1746	0.1626	0.1615	0.1632	0.1620
PV 68	0.1641	0.1836	0.1979	0.0944	0.1815	0.1785
PV 70	0.1801	0.1925	0.1366	0.1491	0.1553	0.1863
PV 75	0.1692	0.1665	0.1613	0.1643	0.1657	0.1729
PV 9	0.1768	0.2166	0.1565	0.1412	0.1492	0.1597
PV.PE.1	0.1675	0.1689	0.1643	0.1641	0.1655	0.1698
PV.PE.14	0.1792	0.1792	0.1629	0.1547	0.1543	0.1697
PV.PE.22	0.1765	0.1659	0.1666	0.1611	0.1638	0.1660
PV.PE.28	0.1690	0.1720	0.1628	0.1589	0.1649	0.1725

Fonte: Elaborado pela autora (2017)

4.4 Modelagem Hidráulica

Após a organização dos dados no EXCEL, como mostrado no item 3.7 desse trabalho, e conversão para a extensão .inp, contendo todos os parâmetros requeridos pelo SWMM, foi obtido o modelo ilustrado na figura 40.

Figura 40 - Modelo construído no SWMM



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Segundo colaboradores da CAGECE, os poços de visita número 14 e 15, localizados próximos ao cruzamento da avenida Beira Mar com a rua Tereza Hinko, são os pontos de maior ocorrência de extravasamento, por estarem localizados nas proximidades do riacho Maceió onde a cota do terreno é baixa em relação aos demais PVs. Em decorrência desse fato, tanto o PV 14 quanto o PV 15 serão utilizados como base para análise de extravasamento nas simulações.

4.4.1 *Cenário 1 – situação ideal*

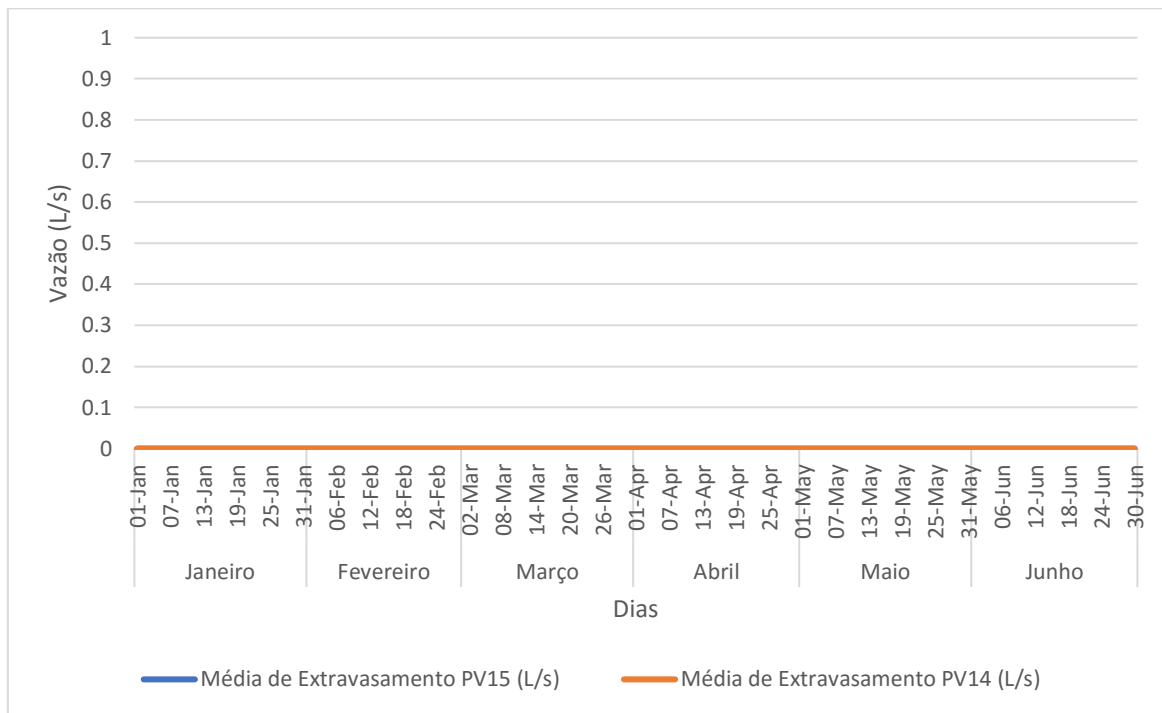
O cenário 1 foi elaborado visando compreender o funcionamento do interceptor leste sem a ação de agentes externos, como areia e chuva. O principal objetivo dessa simulação é observar se o IL suporta a carga hidráulica de efluente que recebe diariamente.

Para a elaboração desse cenário, as sub bacias foram excluídas do programa, não ocorrendo o escoamento superficial. Todos os condutos gravitatórios foram designados como “CIRCULAR”, forma geométrica atribuída as tubulações circulares que não são preenchidas de sedimento. Os condutos provenientes das estações elevatórias foram designados como

“FORCE_MAIN” com coeficiente de Hazen-Williams de 105, atribuído as tubulações de concreto que trabalham pressurizadas.

Através do gráfico abaixo é possível concluir que, com a ausência de fatores externos, eventos indesejados, como extravasamentos, não ocorreriam. Evitando a contaminação de rios e a proliferação de doenças por meio da exposição do efluente na via.

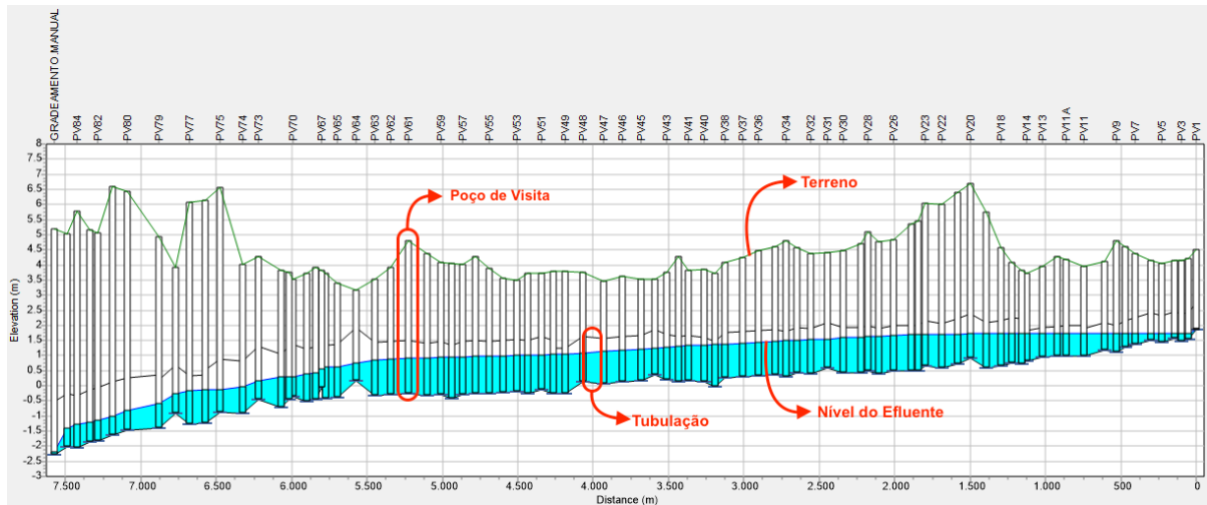
Figura 41 - Média de extravasamento cenário 01



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

A figura 42 ilustra o perfil hidráulico do interceptor, ferramenta disponível no SWMM para análise mais detalhada do sistema. É possível concluir que, o interceptor tem capacidade de suportar toda a vazão lançada, sem que a tubulação trabalhe afogada e sem extravasamento nas vias.

Figura 42 - Perfil Hidráulico cenário 01 no dia 11 de fevereiro às 13 horas



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

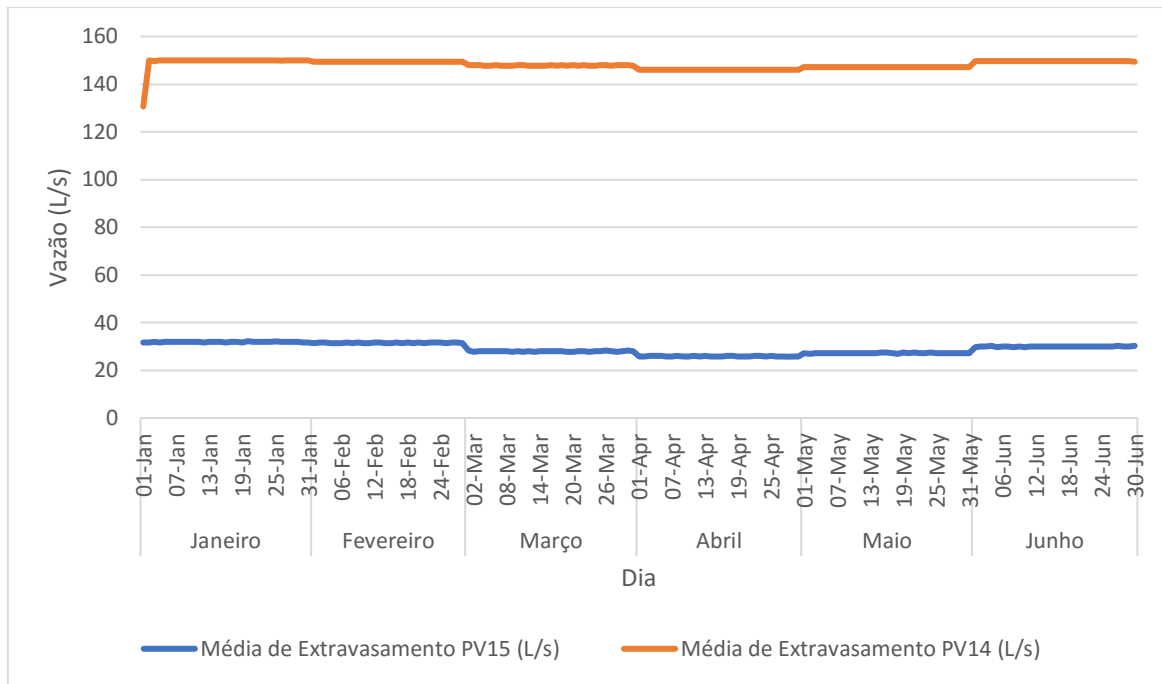
4.4.2 Cenário 2 – tubulação assoreada

Para simulação do cenário 2 foi acrescentado areia na tubulação, baseado nos dados obtidos pela batimetria. A altura da coluna de areia dentro de cada conduto foi calculada utilizando a média da coluna de areia entre o poço de visita a montante e a jusante, como comentado no item 3.7 desse trabalho.

Assim como no cenário 1, as sub bacias de drenagem foram excluídas do programa, impossibilitando o escoamento artificial, nessa simulação, os condutos gravitatórios do interceptor leste foram designados como “FILLED_CIRCULAR”, forma utilizada pelo SWMM para tubulações parcialmente comprometidas de areia. Os condutos provenientes das estações elevatórias continuaram designados como “FORCE_MAIN”, com as mesmas propriedades do cenário anterior.

Ao analisar o gráfico gerado com os valores médios de extravasamento em cada mês, percebe-se uma relação direta entre areia na tubulação e ocorrência de eventos indesejáveis no sistema. Além disso, o SWMM gera um relatório no fim de cada simulação, onde é possível constatar o total de horas extravasados por cada poço de visita em análise, ilustrado na tabela 5.

Figura 43 - Média de extravasamento cenário 02



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

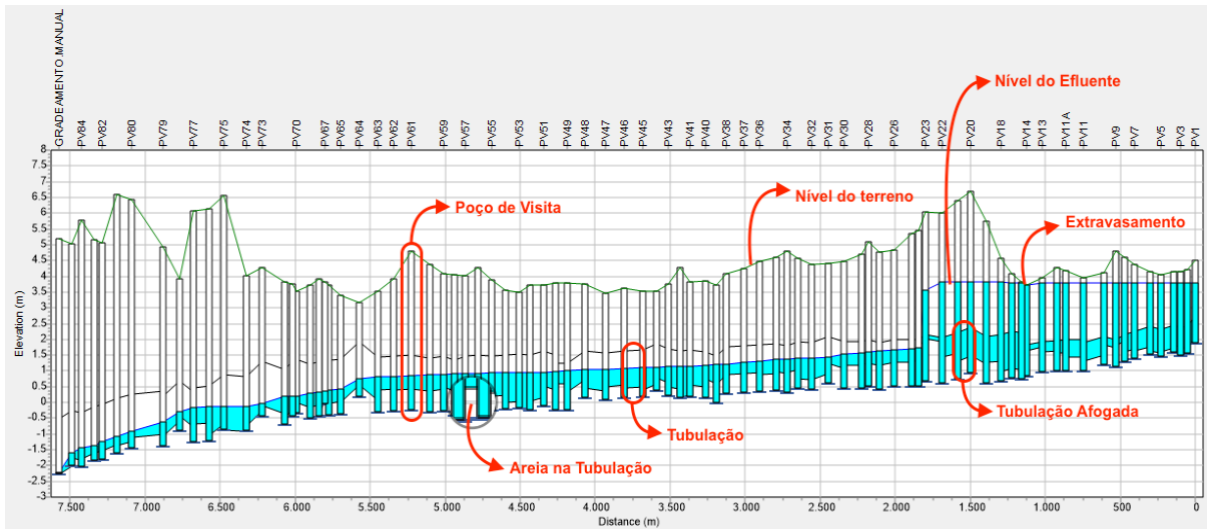
Tabela 5 - Horas com extravasamento cenário 2

Poço de Vista	Horas Extravasadas	Dias Extravasados	Dias Totais
PV 14	4320	180	180
PV 15	2773.83	116	180

Fonte: Elaborado pela autora (2017)

O perfil hidráulico gerado a partir do cenário 2 é ilustrado abaixo. Pode-se observar que, com o assoreamento, o interceptor começa a trabalhar afogado, pois os depósitos de sedimentos funcionam como barreiras para o fluxo gravitatório do efluente, ocasionando remanso e, conseqüentemente, causando extravasamento nos poços de visita que possuem cota do terreno mais baixa.

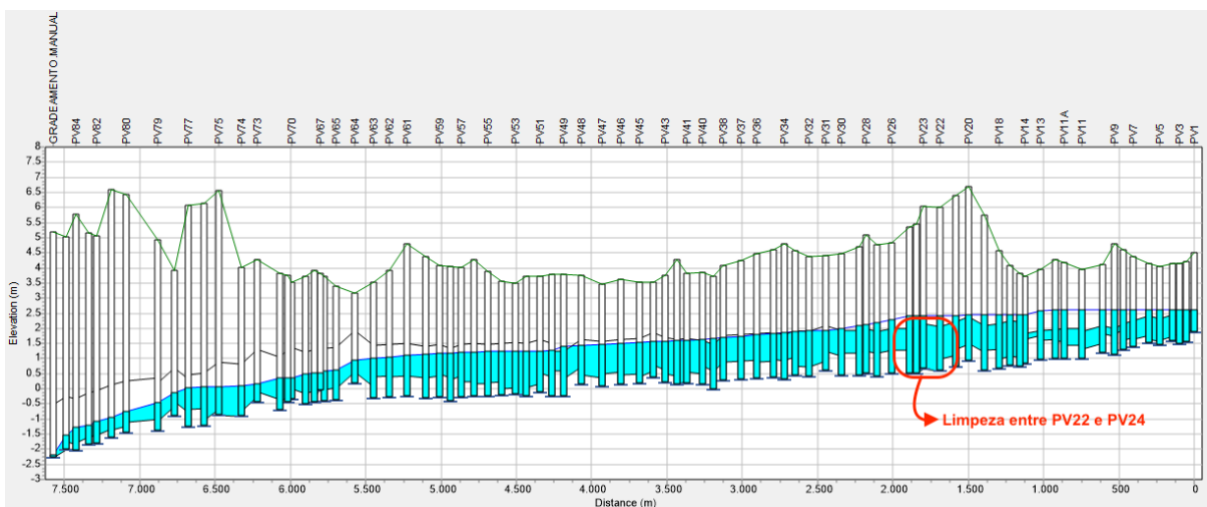
Figura 44 - Perfil Hidráulico cenário 02 no dia 11 de fevereiro às 13 horas



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

A fim de evitar a ocorrência de extravasamento, foi realizada a simulação com a limpeza em alguns pontos, ilustrados na figura 45. É possível notar que, com a retirada das barreiras de sedimento acumulada nos trechos compreendidos entre os poços de visita 22 e 24, o efluente pôde seguir seu fluxo natural, aliviando a tubulação a montante. Nesta situação houve uma redução de 100% de horas extravasadas, podendo afirmar que, segundo a simulação hidráulica, em um cenário com interferência exclusivamente de sedimentos, a limpeza nos dois trechos apontados acima impediria ocorrência de extravasamentos na rede.

Figura 45 - Perfil Hidráulico cenário 02 no dia 11 de fevereiro às 13 horas, após limpeza



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

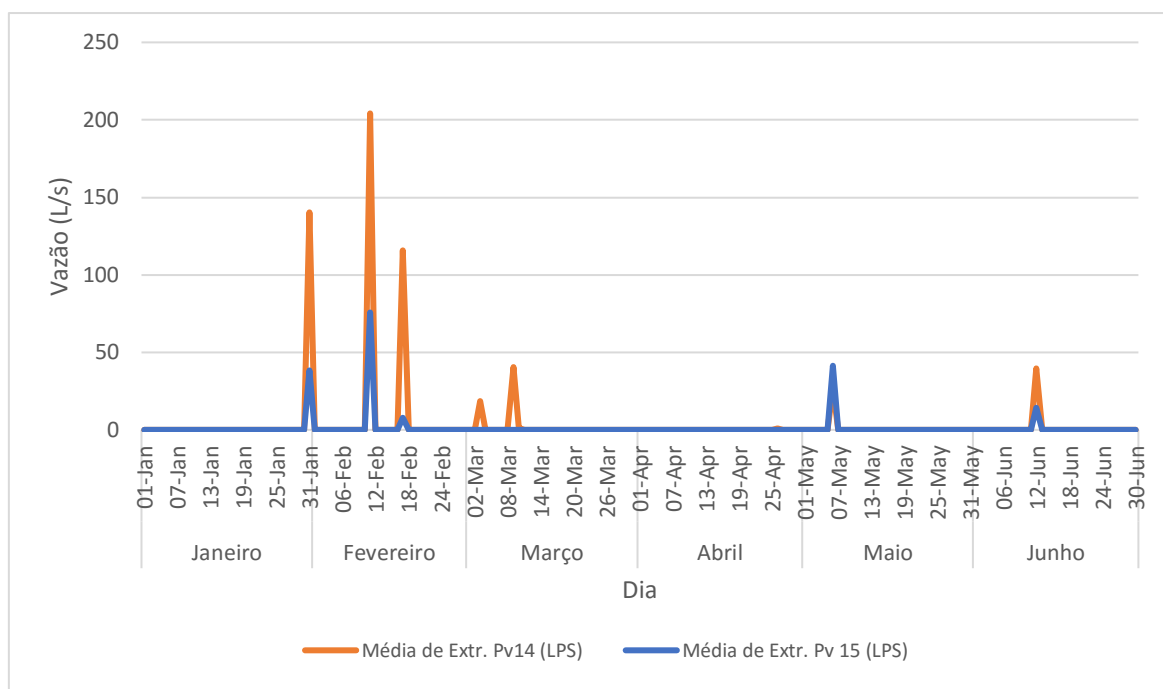
4.4.3 Cenário 3 – infiltração de chuva

No cenário 3, foi avaliado apenas a interferência de eventos chuvosos no interceptor, utilizando as bacias criados no item 3.5.1 desse trabalho, além dos dados da estação pluviométrica Vicente Pinzon.

Diferente dos cenários anteriores, nessa simulação as bacias foram incluídas, cada uma com suas características, as quais foram disponibilizadas pela SEUMA e CAGECE, como comentado na metodologia. Todos os condutos gravitários foram designados como “CIRCULAR” e todos as tubulações provenientes das elevatórias foram designadas “FORCE_MAIN”, utilizando os mesmos parâmetros das demais simulações.

Ao analisar o gráfico abaixo, podemos concluir que, eventos chuvosos, isoladamente, acarretam extravasamento na via, pois, o interceptor não foi dimensionado para trabalhar como sistema unitário, o qual recebe água residual e água da drenagem.

Figura 46 - Média de extravasamento cenário 03

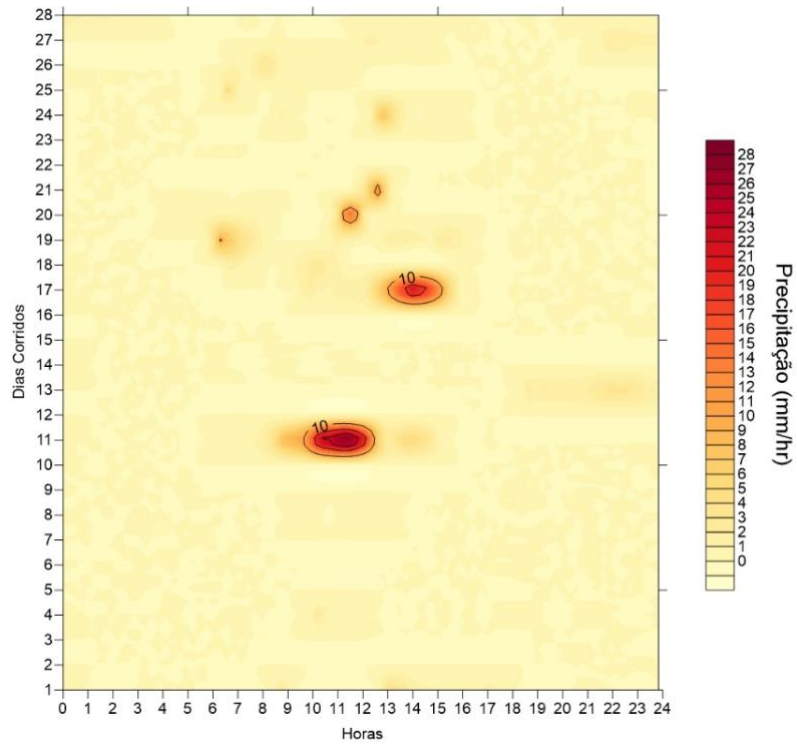


Fonte: Elaborado pela autora (2017)

É possível constatar que a maior média diária de extravasamento ocorreu em fevereiro. Visando uma melhor análise, a fim de verificar qual intensidade máxima que o interceptor suportar antes de começar a extravasar, foram desenvolvidos três gráficos termais

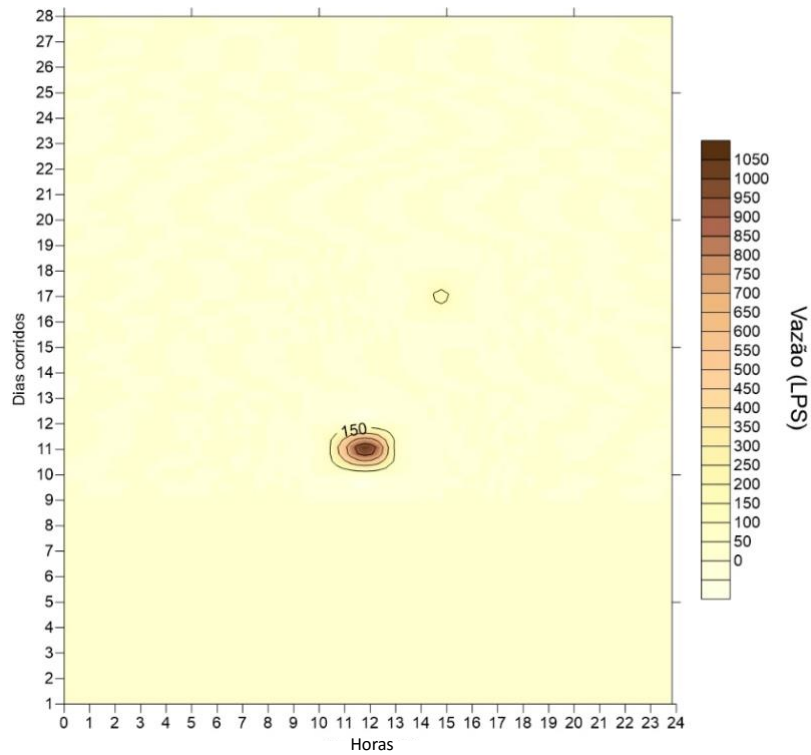
utilizando o software Surfer, versão 14.3.691, comparando a intensidade de precipitação com a vazão de extravasamento no poço de visita 14 e 15.

Figura 47 - Mapa termal de precipitação (mm/hr) em fevereiro 2017



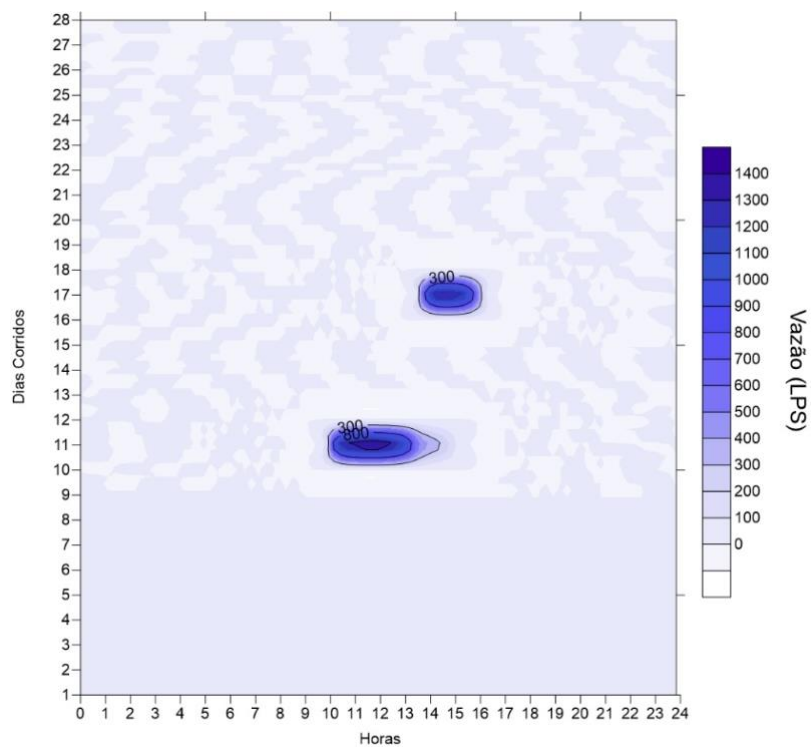
Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Figura 48 - Mapa termal de extravasamento PV 15 no mês de fevereiro de 2017



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

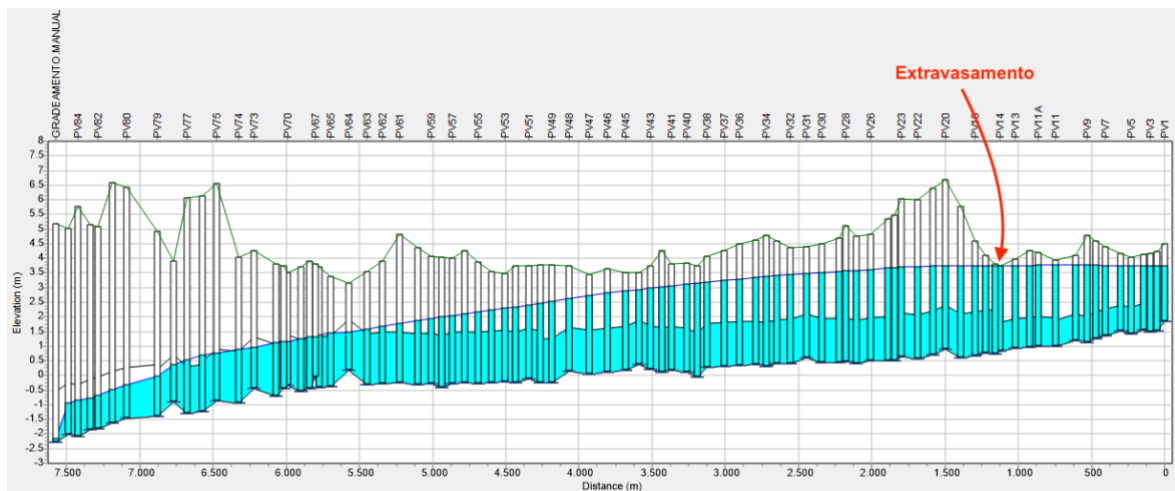
Figura 49 - Mapa termal de extravasamento no PV 14 no mês de fevereiro de 2017



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Realizando o comparativo dos três mapas acima, nota-se que, o interceptor tem capacidade física de suportar eventos chuvosos com intensidade menor que 10 mm/hora, desde que não mais que 5% da área das sub-bacias contribuíssem indevidamente para o IL. Abaixo é ilustrado o perfil hidráulico no dia 11 de fevereiro de 2017, as 10 da manhã, quando a intensidade de chuva já passava de 10 mm/hora.

Figura 50 - Perfil Hidráulico cenário 03



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Vale ressaltar que, para as simulações em eventos chuvosos, o escoamento superficial de 5% da área de cada sub bacia foi direcionada a rede de esgoto. Esse percentual foi escolhido de forma arbitrária, devido à ausência de dados de vazão no interceptor em períodos secos e chuvosos.

4.4.4 Cenário 4 – tubulação assoreada e infiltração de chuva

No cenário 4 a tubulação foi exposta a dois fenômenos externos, tanto o acúmulo de areia, quanto a infiltração de chuva. Forçando o sistema de esgotamento trabalhar como separador parcial, pois, uma parcela da chuva adentra a rede sanitária.

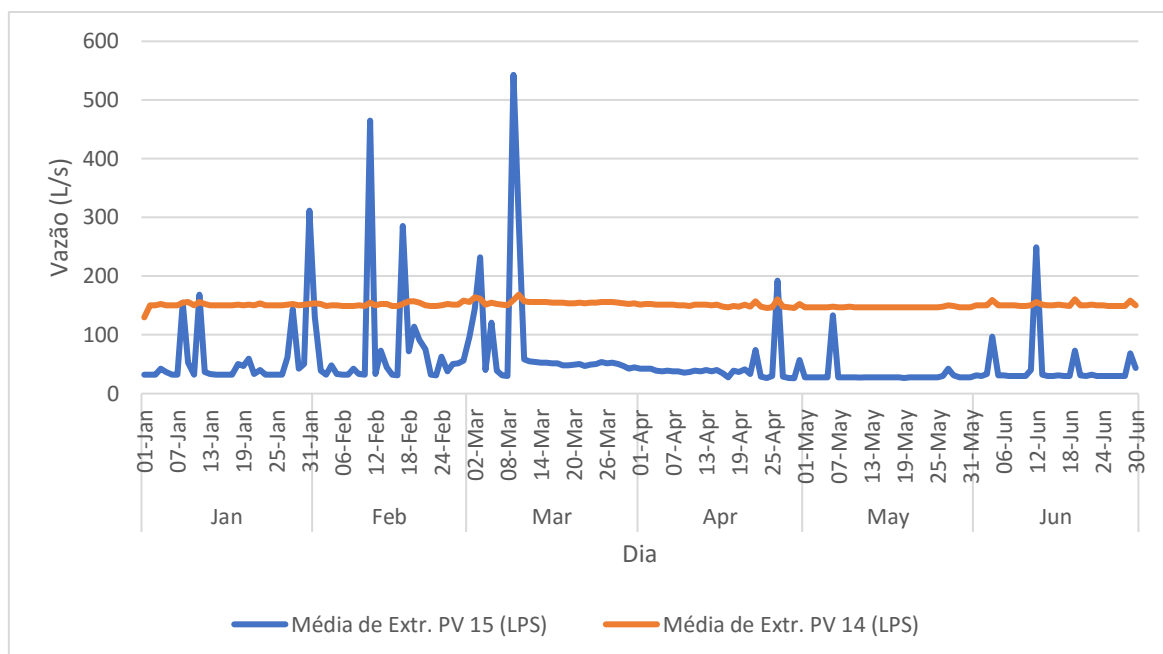
Para simular a coluna de areia na tubulação foram utilizados os mesmos dados do cenário 2, onde todos os trechos gravitários do interceptor leste foram designados como “FILLED_CIRCULAR”, e a altura de areia foi proveniente dos dados obtidos através da batimetria. As características das tubulações das estações elevatórias foram inseridas conforme

as simulações anteriores.

A fim de acrescentar a infiltração de chuva, foi aplicado a mesma metodologia do cenário 3, utilizando 5% da área das sub bacias fornecidas pela SEUMA e CAGECE, além dos dados pluviométricos da estação do Vicente Pinzon.

Como demonstrado no cenário 2, devido ao grande assoreamento nas tubulações, eventos de extravasamento ocorreram, e, foram agravados com a entrada de chuva. O gráfico abaixo mostra a vazão média, em litros por segundo, que extravasou em cada poço de visita em análise.

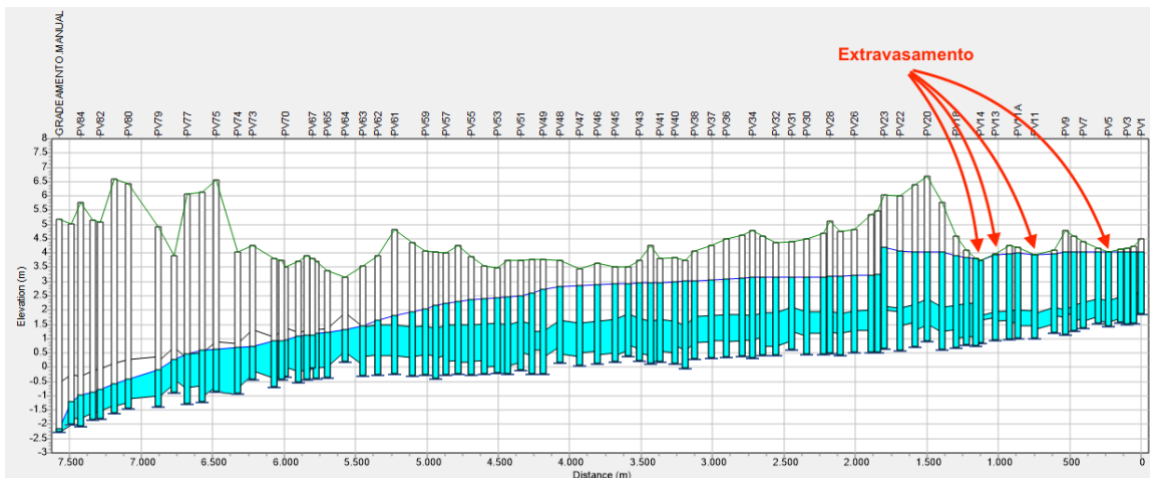
Figura 51 - Média extravasamento cenário 04



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

É possível notar um aumento na vazão extravasada em relação aos cenários anteriores, além disso, percebe-se um extravasamento contínuo no poço de visita 14 e a ocorrência de picos no 15, isso ocorre, pois, como ilustrado na figura 51, poços de visita a montante do PV14 começam a extravasar, em decorrência de dois motivos principais; o aumento de vazão, devido à chuva, e a tubulação que antecede o PV14 estar quase que completamente obstruída, devido ao grande aporte de sedimentos. A fim de comparar com o cenário 3, o perfil hidráulico às 10 horas da manhã do dia 11 de fevereiro de 2017 é ilustrado abaixo.

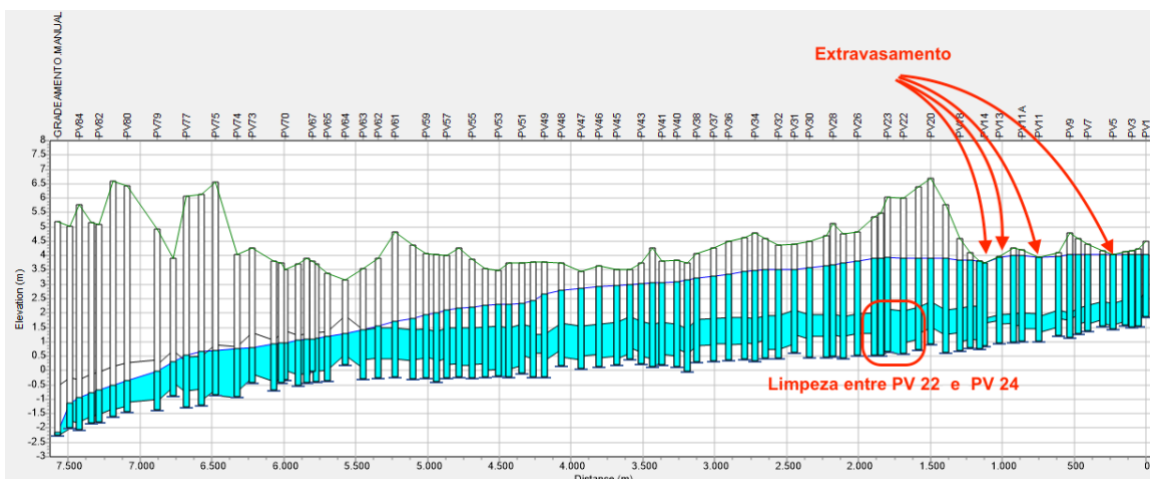
Figura 52 - Perfil Hidráulico cenário 04



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Como comentado anteriormente, enquanto, no cenário 3, eventos chuvosos, isoladamente, com intensidade maior que 10 mm/hora provocavam extravasamento em dois poços de visita, no cenário 4, inserido areia na tubulação, passaram a provocar extravasamento em cinco poços de visita. A fim de diminuir esses eventos indesejáveis, foi simulado a limpeza nos trechos compreendidos entre o poço de visita 22 e 24, como no cenário 2. A figura abaixo mostra o perfil hidráulico após a limpeza, demonstrando que, em casos da entrada de chuva na tubulação, a limpeza de apenas 2 condutos não é suficiente.

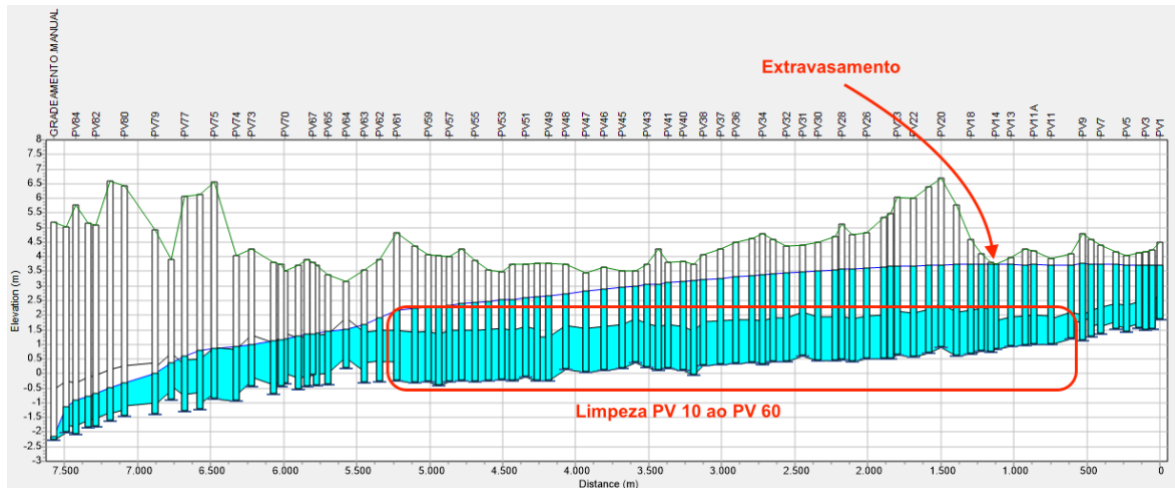
Figura 53 - Perfil Hidráulico cenário 4, após limpeza entre PV 22 e PV 24



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

Realizando a simulação hidráulica com vários pontos de limpeza diferente, foi obtido que, para minimizar o extravasamento no interceptor em tempos chuvosos, fazendo com que o mesmo se comporte similarmente ao cenário 3, deve-se realizar a limpeza no trecho compreendido entre o poço de visita 10 e o poço de visita 60. Como ilustrado na figura abaixo.

Figura 54 - Perfil Hidráulico cenário 4, após limpeza entre PV 10 e PV 60



Fonte: Elaborado pela autora (2017)

5 CONCLUSÃO

Com base no trabalho, conclui-se que a construção de um modelo hidráulico é de suma importância para análise e tomada de decisões.

Apesar do SWMM ser um software simples, com uma interface bastante interativa, a criação do modelo hidráulico demanda bastante tempo e um caráter crítico do desenvolvedor para julgar as informações de cadastro, que, nem sempre, parecem coerentes com a realidade.

Através do trabalho, também foi possível destacar o benefício de se trabalhar com uma plataforma SIG na construção física do modelo, pois, o mesmo auxilia no cadastro técnico de características tanto da tubulação quanto dos poços de visita, facilitando tanto a alimentação de novos dados em trabalhos futuros, como na localização de cada componente do sistema.

Além disso, constatou-se que devido à ausência ou incoerência de alguns dados, bem como a vazão correta das elevatórias, diferença de vazão em tempo seco e tempo chuvoso, o modelo não está satisfatoriamente representando a realidade. Segundo Coelho (2006), várias podem ser as origens dos erros que levam os resultados do modelo divergirem da realidade observada, qualquer possível fonte de erro pode se tornar um potencial parâmetro de calibração. As fontes mais comuns de erro, segundo o autor, se devem a incerteza do coeficiente de rugosidade da tubulação, a diferença entre o diâmetro nominal e diâmetro interno de cada conduto, e os erros de cadastro que levam a acreditar em informações errôneas da realidade.

Porém, mesmo com os dados não calibrados, é possível concluir que o interceptor, atualmente, trabalha com alto índice de assoreamento e recebe elevada taxa de infiltração de chuva, considerando que, em um cenário ideal, livre de sedimentos e sem infiltração, o sistema necessitaria de uma grande contribuição para provocar alagamento nos nós.

Também é possível constatar que a limpeza no interceptor é indispensável, pois, foi observado tanto no cenário 2 como no cenário 4, que após a limpeza a taxa de extravasamento foi minimizada. Sendo constatado que, durante períodos secos, a limpeza periódica no trecho compreendido entre o poço de visita 22 e o poço de visita 24 seria suficiente, já em períodos chuvosos, a limpeza seria necessária em toda a extensão da tubulação compreendida entre o poço de visita 10 e o poço de visita 60.

No geral, a fim de melhorar o sistema, algumas sugestões são destacadas para futuros trabalhos:

- Realizar medição das vazões de lançamento das estações elevatórias na rede coletora;
- Realizar medição de vazão em alguns pontos em tempo chuvoso e em tempo seco, a fim de calcular a fração de chuva que adentra o sistema de esgotamento sanitário;

- Acrescentar os demais coletores troncos que são ligados ao interceptor
- Realizar medição de vazão na chegada de cada coletor que deságua no interceptor;
- Realizar filmagem ao longo do interceptor a fim de identificar possíveis fissuras na tubulação que acarretem entrada de sedimento;
- Utilizar traçadores químicos a fim de estimar a vazão do Interceptor Leste;
- Incluir contribuições parasitárias na rede segundo NBR 9648/86;
- Calibrar e validar o modelo para operação.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9649**: Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **PNB 569**: Projeto de Estações Elevatórias de Esgoto Sanitário

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9648**: Estudos de Concepção de Sistemas de Esgoto Sanitário

AZEVEDO NETTO, J.M. de; BOTELHO, M.H.C.; GARCIA, M. A evolução dos sistemas de esgoto. v. 22, n. 2. Rio de Janeiro: **Revista da Engenharia Sanitária**, 1983. 226-228 p.

BERNARDES, Ricardo; SOARES, Sérgio. **Esgotos combinados e controle da poluição: estratégia para planejamento do tratamento da mistura de esgotos sanitários e águas pluviais**. Brasília. CAIXA ECONÔMICA FEDERAL, 2004. 160 p.

BOLLMANN, Harry Alberto; MARQUES, David M.L. Da Motta. Influência da densidade populacional nas relações entre matéria orgânica carbonácea, nitrogênio e fósforo em rios urbanos situados em áreas com baixa cobertura sanitária. **Engenharia Sanitária Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 11, n. 4, p. 343-352, ago. 2006.

BRASIL. Manual de saneamento. 3. ed. rev. - Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2006. 408 p.

BURIAN, Steven J.; EDWARDS, Findlay G.. Historical Perspectives of Urban Drainage. **Global Solution for Urban Drainage**, p. 1-16, 2002.

BUTLER, David; DAVIES, Jonh W.. **Urban drainage**. 3 ed. New York: Spon Press, 2011.

CADIER, E.; LANNA, A. E; MENEZES, M.; CATNPELLO, M. S. Avaliação dos estudos referentes aos recursos hídricos das pequenas bacias do Nordeste Brasileiro. **Anais do VII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH**, Salvador, v. 2, p. 225-239, jan. 1987.

CARRIJO, Ivaltemir Barroso. **Extração de regras operacionais ótimas de sistemas de distribuição de água através de algoritmos genéticos multiobjetivo e aprendizado de máquina**. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

CHANSON, Hubert. HYDRAULIC ENGINEERING AND ROMAN AQUEDUCTS: MODERN PERSPECTIVES. **JIA**, 2015. Disponível em: <<http://www.uco.es/jia2015/ponencias/invitadas/invitada1.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2017.

COELHO, Sérgio Teixeira; LOUREIRO, Dália; ALEGRE, Helena. **Modelação e análise de sistemas de abastecimento de água.** Instituto Regulador de Águas e Resíduos (IRAR) e Laboratório nacional de Engenharia Civil (LNEC), 2006.

DIAS, A. P. **Análise da interconexão dos sistemas de esgotos sanitário e pluvial da cidade do Rio de Janeiro:** Valorização das coleções hídricas sob perspectiva sistêmica. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2003.

EDWARDS, J. et al. **Hydraulic modeling and gis.** U.S: Lori Armstrong, 2011. 82 p.

EPA. **Impacts and Control of CSOs and SSOs.** Washington, 2004.

GEORGE, J; ARCEMENT., JR.; VERNE, R. SCHNEIDER. **Guide for selecting manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains.** U.S: United States Department of Transportation, Federal Highway Administration, 1985. 38 p.

KOWALSKA, Beata; ŁAGÓD, Dariusz Kowalski Grzegorz; WIDOMSKI, Marcin K.. **Modelling of hydraulics and pollutants transport in sewer systems:** With Exemplary Calculations in SWMM. 1 ed. Lublin: Lublin University of Technology, 2013. 131 p.

LEITÃO, J. P.; MATOS, J. S.; MAKSIMOVIC, C.; PRODANOVIC, D. **Modelos de simulação do escoamento superficial em meio urbano** - potencialidades e limitações. 13º Encontro Nacional de Saneamento Básico, Covilhã, 2008.

LIMA, J. P.; SÁ MARQUES, J. A.; SOUSA, J. **Hidrologia urbana:** Sistemas de drenagem de águas pluviais urbanas. 1 ed. Lisboa: Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos Universidade de Coimbra, 2013. 147 p.

NEGRÃO, Anne Caroline. **Modelagem hidrodinâmica unidimensional da passagem de onda de cheia em um córrego urbano considerando escoamento.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2015.

PEREIRA, Silvano Porto. **Modelagem da qualidade bacteriológica das águas costeiras de Fortaleza (Nordeste do Brasil).** Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

PORTO, M. F. A. **Aspectos qualitativos do escoamento superficial em áreas urbanas.** In: BRAGA, B.; TUCCI, C. E. M; TOZZI, M. Drenagem Urbana: gerenciamento, simulação, controle. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/ABRH. v 5. p.387-428. 1995.

ROSSMAN, Lewis A.. **Storm water management model: User's Manual Version 5.1.** 5 ed. U.S: Office of Research and Development Water Supply and Water Resources Division, 2015. 352 p.

ROSSMAN, Lewis. **EPANET 2 – User's Manual.** Tradução de Heber Pimentel GOMES e Moisés Menezes SALVINO. Cincinnati: National Risk Management Research Laboratory – United States Environmental Protection Agency (EPA), 2000. 200 p. Traduzido pelo Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) – Brasil – 2009.

ROSSO, Thereza Christina De Almeida; DIAS, Alexandre Pessoa; GIORDANO, Gandhi. Vulnerabilidade dos sistemas de esgotamento sanitário da cidade do Rio de Janeiro, RJ, brasil – relato de um caso de estudo. **Recursos Hídricos**, Rio de Janeiro, v. 32, n. 2, p. 45-52, nov. 2011.

SANTOS, Laércio Leal Dos. **MODELOS HIDRÁULICOS-HIDROLÓGICOS: Conceitos e Aplicações.** **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 2, n. 3, p. 1-19, set./dez. 2009.

SISTEMA DE DRENAGEM PLUVIAL. **Capítulo I.** Disponível em: <<http://www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/dren01.html>>. Acesso em: 10 out. 2017.

SPERLING, Marcos Von. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 3 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.

THE HISTORY BLOG. **Rome's cloaca maxima sewer needs love.** Disponível em: <<http://www.thehistoryblog.com/archives/21511>>. Acesso em: 19 out. 2017.

TSUTIYA, M. T. ; BUENO, R. C. R. . **Contribuição de águas pluviais em sistemas de esgoto sanitário no Brasil.** In: Redes de esgotos sanitários e galerias de águas pluviais: interferências e interconexões, 2004, São Paulo. Anais do Seminário da Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. São Paulo: AIDIS, 2004.

TSUTIYA, M.T.; BUENO, R.C.R.; CINTRA, E. M.; REAMI, L. **Contribuição de águas pluviais em sistemas de esgotos sanitários. Estudo de caso da cidade de Franca, Estado de São Paulo.** 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Santa Catarina, setembro 2003. 13p.

TSUTIYA, Milton Tomoyuki; SOBRINHO, Pedro Além. **Coleta e transporte de esgoto sanitário.** 3 ed.: Fundo Editorial, 2011. 548 p.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos.** 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGs, 2005. 678 p.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Ed. Universidade /UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, 1998. 668p.

TUCCI, Carlos E. M.. COEFICIENTE DE ESCOAMENTO E VAZÃO MÁXIMA DE BACIAS URBANAS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 5, n. 1, p. 61-68, jan./mar. 2000.

TUCCI, Carlos E. M.. Parâmetros do Hidrograma Unitário para Bacias Urbanas Brasileiras. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n. 2, p. 195-199, abr./jun. 2003.

VOLSCHAN, Isaac; TSUTIYA, Milton Tomoyuki; MARTINS, Rosa Helena de Oliveira; YAZAKI, Luiz Fernando Orsini. Sistema unitário x sistema separador absoluto: qual o mais atraente para as condições brasileiras? . **Revista DAE**, São Paulo, v. 2009, n. 180, p. 40-43, dez. 2009.