

UFPA

PPGEC

Universidade Federal do Pará



João Diego Alvarez Nylander

**Avaliação da Utilização de Comporta em
Eventos Extremos de Precipitação
Pluviométrica e de Maré no Canal de
Drenagem da Tamandaré**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Instituto de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Dissertação orientada pelo Professor José Almir Rodrigues Pereira

Belém – Pará – Brasil

2019

João Diego Alvarez Nylander

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE COMPORTA EM EVENTOS
EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA E DE MARÉ NO
CANAL DE DRENAGEM DA TAMANDARÉ**

Dissertação apresentada para obtenção do grau em Mestre em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará.
Área de concentração: Engenharia Hídrica.
Linha de Pesquisa: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.
Orientador: Prof. Dr. José Almir Rodrigues Pereira.

Belém

2019

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

N993a Nylander, João Diego Alvarez

Avaliação da Utilização de Comporta em Eventos Extremos de Precipitação Pluviométrica e de Maré no Canal de Drenagem da Tamandaré / João Diego Alvarez Nylander. — 2019.
179 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. José Almir Rodrigues Pereira
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

1. Canal da Tamandaré . 2. Inundação. 3. SWMM. 4. Comporta. I. Título.

CDD 628



AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE COMPORTA EM EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA E DE MARÉ NO CANAL DE DRENAGEM DA TAMANDARÉ

AUTOR:

JOÃO DIEGO ALVAREZ NYLANDER

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA
EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL NA
ÁREA DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO
AMBIENTAL.

APROVADO EM: 24 / 04 / 2019.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. José Almir Rodrigues Pereira
Orientador (UFPA)

Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra
Membro Externo (UFPE)

Prof. Dr. Hélio da Silva Almeida
Membro Interno (UFPA)

Visto:

Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

RESUMO

Simulação hidrodinâmica do impacto de eventos de inundação em canal de drenagem urbana ocasionados por coincidência de precipitações pluviométricas e oscilações de maré. A área de estudo foi a bacia de drenagem da Tamandaré, localizada na região central do município de Belém/PA. A pesquisa foi desenvolvida em três etapas. Inicialmente, foram investigadas as principais informações relacionadas ao manejo de águas pluviais na bacia estudada, sendo obtidos dados de topografia, hidrológicos e do sistema de drenagem. Em seguida, no software *Storm Water Management Model 5.0* foram realizadas 14 simulações de cenários de escoamento na estrutura de macrodrenagem, considerando: a) precipitação pluviométrica, com duração de 1,5 h, 3 h, 6 h e 12 h; b) maré, condição de maré alta e baixa; e c) precipitação pluviométrica com efeitos de maré. Finalmente, foram realizadas novas simulações com a utilização de comporta nos cenários que apresentaram inundações. Com a pesquisa foi constatado que a área de contribuição da bacia da Tamandaré é menor do que a apresentada em fontes oficiais, bem como que ocorrem precipitações pluviométricas intensas, grande elevação do nível de maré e inundações de vias. Com os resultados das simulações foi verificado que a capacidade do canal da Tamandaré é suficiente para escoar, isoladamente, os volumes precipitados e os volumes de maré baixa. Contudo, quando a maré alta é acima de 3,39 m ocorre inundação, situação agravada na coincidência com precipitação pluviométrica. O cenário com maior magnitude de inundação ocorreu durante precipitação pluviométrica de 6 h e maré alta atingindo 3,44 m, gerando nível de água de até 1,07 m acima do solo nas vias próximas ao canal da Tamandaré. Apesar da utilização de comporta ter amenizado essa condição, também foram verificados eventos de inundações, com a pior situação ocorrendo durante precipitação pluviométrica de 12 h e maré alta, formando nível de água de até 0,69 m sobre o terreno. Assim, a aplicação de comporta deve ser complementada por outros dispositivos técnicos de contenção e/ou de bombeamento do volume excedente de água pluvial, para evitar a ocorrência de inundações na coincidência de eventos intensos de precipitação pluviométrica e de maré alta nesse canal de drenagem da área urbana densamente ocupada do município de Belém.

Palavras-chave: Inundação; Canal da Tamandaré; Maré alta; Comporta.

ABSTRACT

Hydrodynamic simulation of the impact of flood events in urban drainage channel caused by coincidence of rainfall and tidal oscillations. The study area was Tamandaré drainage basin, located in the central region of the city of Belém / PA. The research was developed in three stages. Initially, the main information related to the management of rainwater in the basin was investigated, obtaining topography, hydrological data and the drainage system. Then, in the SWMM 5.0 software, 14 simulations of runoff scenarios were carried out in the macrodrainage structure, considering: a) rainfall, lasting 1.5 h, 3 h, 6 h and 12 h; b) tide, high and low tide conditions; and c) rainfall + tide. Finally, new simulations were performed with the use of floodgate in the scenarios that presented floods. With the research, it was verified that the contribution area of the Tamandaré basin is smaller than the one presented in official sources, as well as intense rainfall, high tidal levels and flooding of roads. With the results of the simulations, it was verified that the capacity of the Tamandaré channel is sufficient to leak the precipitated volumes and low tide volumes separately. However, when the high tide is above 3.39 m flood occurs, situation aggravated in coincidence with rainfall. The highest flood magnitude occurred during rain of 6 h and high tide reaching 3.44m, generating a water level up to 1.07 m above the ground in the roads near the Tamandaré channel. In spite of the use of the dam, flood events were also observed, with the worst situation occurring during 12 h rain and high tide, forming a water level of up to 0.69 m above the ground. Therefore, the floodgate application must be complemented by other technical devices for containment and / or pumping the surplus volume of rainwater, to avoid the occurrence of floods in the coincidence of intense rainfall and high tide events in this drainage channel of the densely occupied urban area of the municipality of Belém.

Keywords: Flooding; Tamandaré's drainage channel; high tide; Floodgate.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| LISTA DE ESQUEMAS | 10 |
| LISTA DE FIGURAS..... | 11 |
| LISTA DE GRÁFICOS | 13 |
| LISTA DE MAPAS | 15 |
| LISTA DE QUADROS..... | 16 |
| LISTA DE TABELAS..... | 17 |
| LISTA DE SIGLAS..... | 18 |
| 1 INTRODUÇÃO | 19 |
| 2 OBJETIVOS | 21 |
| 2.1 GERAL | 21 |
| 2.2 ESPECÍFICOS..... | 21 |
| 3 REVISÃO DA LITERATURA..... | 22 |
| 3.1 A OCORRÊNCIA DE INUNDAÇÃO NO ESPAÇO URBANO..... | 22 |
| 3.1.1 Características morfométricas para avaliar a suscetibilidade de eventos de inundação em bacias..... | 26 |
| 3.1.2 Quanto à origem: Inundações Ribeirinhas e Decorrentes da Urbanização | 30 |
| 3.1.3 Quanto à velocidade de ocorrência: Inundações Bruscas e Graduais | 32 |
| 3.1.4 Quanto às Perdas Ocasionaladas: Inundações com Danos Tangíveis e Intangíveis | 34 |
| 3.2 MEDIDAS DE CONTROLE DE INUNDAÇÃO | 38 |
| 3.2.1 Medidas Não Estruturais | 38 |
| 3.2.2 Medidas Estruturais | 41 |
| 3.3 SISTEMA DE DRENAGEM URBANA | 43 |
| 3.3.1 Estruturas de Microdrenagem e de Macrodrenagem | 45 |
| 3.4 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS PARA AVALIAÇÃO DE INUNDAÇÕES EM SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA | 50 |
| 3.4.1 Storm Water Management Model (SWMM) – Estado da Arte | 55 |
| 3.4.2 Estrutura Computacional do SWMM | 57 |
| 3.4.2.1 Escoamento Superficial | 59 |
| 3.4.2.2 Infiltração..... | 60 |
| 3.4.2.3 Propagação do escoamento nas estruturas de drenagem urbana..... | 63 |

| | | |
|--------------|---|------------|
| 4 | METODOLOGIA..... | 65 |
| 4.1 | ÁREA DE ESTUDO | 65 |
| 4.2 | ETAPAS DA PESQUISA | 69 |
| 4.2.1 | Etapa 1 – Estudo das Condições Relacionadas à Drenagem Urbana da Bacia da Tamandaré | 72 |
| 4.2.1.1 | Características Topográficas da Bacia da Tamandaré (Fase 1) | 72 |
| 4.2.1.2 | Fatores Hidrológicos (Fase 2)..... | 73 |
| 4.2.1.3 | Condições Estruturais do Sistema de Drenagem Urbana (Fase 3) | 75 |
| 4.2.2 | Etapa 2 – Simulação Hidrodinâmica das Condições de Escoamento do Canal de Drenagem da Bacia da Tamandaré..... | 75 |
| 4.2.3 | Etapa 3 – Avaliação da Utilização de Comporta como Medida Estrutural de Contenção de Eventos de Inundação em Bacia de Drenagem Urbana..... | 81 |
| 5 | RESULTADOS | 82 |
| 5.1 | ESTUDO DAS CONDIÇÕES RELACIONADAS À DRENAGEM URBANA DA BACIA DA TAMANDARÉ..... | 82 |
| 5.1.1 | Topografia da bacia (Fase 1) | 82 |
| 5.1.2 | Fatores hidrológicos (Fase 2) | 87 |
| 5.1.2.1 | Precipitação Pluviométrica | 87 |
| 5.1.2.2 | Maré | 91 |
| 5.1.3 | Condições Estruturais do Sistema de Drenagem Urbana (Fase 3) | 94 |
| 5.1.3.1 | As Fragilidades da Principal Estrutura de Macrodrenagem da Tamandaré..... | 102 |
| 5.2 | SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA DAS CONDIÇÕES DE ESCOAMENTO DO CANAL DE DRENAGEM DA MICROBACIA DA TAMANDARÉ..... | 105 |
| 5.2.1 | Divisão de Sub-bacias e Dados de Entrada | 105 |
| 5.2.2 | Hidrogramas das sub-bacias da Tamandaré | 107 |
| 5.2.3 | Simulações Hidrodinâmicas das Condições de Escoamento do Sistema de Macrodrenagem da Tamandaré..... | 113 |
| 5.2.3.1 | Simulações do Escoamento das Precipitações Pluviométricas sem Efeitos de Maré no Canal de Drenagem..... | 115 |
| 5.2.3.2 | Simulação do Escoamento das Marés Baixa e Alta sem Eventos de Precipitações Pluviométricas no Canal de Drenagem..... | 121 |

| | | |
|---------|---|------------|
| 5.2.3.3 | Simulação do Escoamento de Precipitações Pluviométricas com Efeitos de Maré Baixa no Canal de Drenagem..... | 126 |
| 5.2.3.4 | Simulação do Escoamento das Precipitações Pluviométricas com Efeitos de Maré Alta no Canal de Drenagem..... | 133 |
| 5.3 | AVALIAÇÃO DE COMPORTA NA CONTENÇÃO DE EVENTOS DE INUNDAÇÃO EM BACIA DE DRENAGEM URBANA..... | 145 |
| 5.3.1 | Acionamento de Comporta em Situação de Precipitação Pluviométrica e Maré Alta..... | 146 |
| 5.3.2 | Proposição de equações de tendência para avaliação dos riscos de inundação da Microbacia da Tamandaré..... | 157 |
| 5.3.3 | Proposição de Alternativas para Impedir a Ocorrência de Inundações na Microbacia da Tamandaré..... | 159 |
| 6 | CONCLUSÃO..... | 161 |
| | REFERÊNCIAS | 164 |

LISTA DE ESQUEMAS

| | |
|--|----|
| Esquema 1 – Medidas para mitigação de danos em eventos de inundação..... | 37 |
| Esquema 2 – Arranjos das unidades do sistema de drenagem urbana..... | 50 |
| Esquema 3 – Cenários de escoamento no canal da Tamandaré. | 80 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|-----|
| Figura 1 – Frequência de desastres ambientais por continente. | 24 |
| Figura 2 – Leitos de escoamento. | 30 |
| Figura 3 – Influência da urbanização no hidrograma de bacias hidrográficas. | 32 |
| Figura 4 – Estruturas de microdrenagem em áreas urbanas. | 46 |
| Figura 5 – Estruturas de macrodrenagem. | 48 |
| Figura 6 – Modelo hidráulico-hidrológico para avaliação da microdrenagem. | 52 |
| Figura 7 – Estrutura de módulos constituintes do SWMM. | 58 |
| Figura 8 – Sistema de escoamento superficial em modelos computacionais. | 59 |
| Figura 9 – Taxa de infiltração de acordo com o Modelo de Horton. | 60 |
| Figura 10 – Perfil de Umedecimento do solo durante a infiltração (Green-Ampt). | 61 |
| Figura 11 – Formação histórica da malha urbana belenense separada pelo Alagado do Piri... 68 | |
| Figura 12 – Ruas com chegada na Estação das Docas e seus perfis longitudinais da Bacia do Comércio. | 83 |
| Figura 13 – Galerias que chegam ao canal da Tamandaré. | 96 |
| Figura 14 – Dimensões do Sistema de Comporta da Tamandaré em planta e em corte. | 98 |
| Figura 15 – Dimensões da seção transversal do trecho de montante (Seção 1) do canal da Tamandaré. | 99 |
| Figura 16 – Seccionamento dos trechos do canal da Tamandaré. | 100 |
| Figura 17 – Problemas identificados no canal de drenagem da Tamandaré. | 102 |
| Figura 18 – Problemas identificados no canal da Tamandaré. | 104 |
| Figura 19 – Identificação das sub-bacias da microbacia da Tamandaré. | 105 |
| Figura 20 – Seção transversal de montante (Seção 1) do canal da Tamandaré no SWMM 5.0. | 113 |
| Figura 21 – Seção transversal de jusante (Seção 10) do canal no SWMM 5.0. | 114 |
| Figura 22 – Nível de água máximo alcançado no canal da Tamandaré durante precipitação pluviométrica com duração de 1,5 h (Simulação 1). | 116 |
| Figura 23 – Nível de água máximo alcançado no canal da Tamandaré durante precipitação pluviométrica com duração de 3 h (Simulação 2). | 117 |
| Figura 24 – Nível de água máximo alcançado no canal da Tamandaré durante precipitação pluviométrica com duração de 6 h (Simulação 3). | 118 |

| | |
|---|-----|
| Figura 25 – Nível de água máximo alcançado no canal da Tamandaré durante precipitação pluviométrica com duração de 12 h (Simulação 4)..... | 119 |
| Figura 26 – Nível máximo de água gerado por efeitos de maré baixa no canal da Tamandaré (Simulação 5)..... | 122 |
| Figura 27 – Nível máximo de água gerado por efeitos de maré alta no canal da Tamandaré (Simulação 6)..... | 123 |
| Figura 28 - Nível de água máximo alcançado no canal da Tamandaré durante precipitação pluviométrica com duração de 1,5h e maré baixa (Simulação 7)..... | 127 |
| Figura 29 - Nível de água máximo alcançado no canal da Tamandaré durante precipitação pluviométrica com duração de 3h e maré baixa (Simulação 8)..... | 128 |
| Figura 30 - Nível de água máximo alcançado no canal da Tamandaré durante precipitação pluviométrica com duração de 6h e maré baixa (Simulação 9)..... | 129 |
| Figura 31 - Nível de água máximo alcançado no canal da Tamandaré durante precipitação pluviométrica com duração de 12h e maré baixa (Simulação 10)..... | 130 |
| Figura 32 – Nível de água máximo alcançado no canal da Tamandaré durante eventos de precipitação pluviométrica e maré alta..... | 133 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|-----|
| Gráfico 1 - Média Mensal da Precipitação Pluviométrica de Belém (1987-2017). | 87 |
| Gráfico 2 – Intensidade de precipitação pluviométrica de Belém para diferentes tempos de retorno..... | 88 |
| Gráfico 3 – Hietograma de precipitação pluviométrica de 1,5h (a), 3h (b), 6h (c) e 12h (d) no município de Belém (TR-25)..... | 90 |
| Gráfico 4 – Níveis máximos diários registrados no Porto de Belém entre 1961 e 1987..... | 91 |
| Gráfico 5 – Alturas máximas e médias anuais das marés registradas no Porto de Belém (1961-1987)..... | 92 |
| Gráfico 6 – Média Máxima Mensal de Maré e de Precipitação Pluviométrica do município de Belém..... | 93 |
| Gráfico 7 – Comportamento horário do maior e do menor nível de maré registrado no Porto de Belém. | 94 |
| Gráfico 8 – Hidrogramas das sub-bacias gerados pela precipitação pluviométrica de 1,5h de duração..... | 108 |
| Gráfico 9 – Hidrogramas das sub-bacias gerados pela precipitação pluviométrica de 3h de duração..... | 109 |
| Gráfico 10 – Hidrogramas das sub-bacias gerados pela precipitação pluviométrica de 6h de duração..... | 110 |
| Gráfico 11 – Hidrogramas das sub-bacias gerados pela precipitação pluviométrica de 12h de duração..... | 111 |
| Gráfico 12 – Hidrograma de vazão da comporta do canal da Tamandaré durante precipitação pluviométrica de 1,5 h e maré alta..... | 148 |
| Gráfico 13 – Hidrograma de vazão da comporta do canal da Tamandaré durante precipitação pluviométrica de 3 h e maré alta..... | 148 |
| Gráfico 14 – Hidrograma de vazão da comporta do canal da Tamandaré durante precipitação pluviométrica de 6 h e maré alta..... | 149 |
| Gráfico 15 – Hidrograma de vazão da comporta do canal da Tamandaré durante precipitação pluviométrica de 12 h e maré alta..... | 149 |
| Gráfico 16 – Volume de Inundação na microbacia da Tamandaré na coincidência de eventos extremos de precipitação pluviométrica e de maré. | 154 |

| | |
|---|-----|
| Gráfico 17 – Capacidade de contenção do canal | 158 |
| Gráfico 18 – Altura máxima do NA em evento de inundação | 158 |

LISTA DE MAPAS

| | |
|--|-----|
| Mapa 1 – Registros de inundação no Brasil de 1991 a 2012..... | 25 |
| Mapa 2 – Divisão das bacias hidrográficas do município de Belém..... | 66 |
| Mapa 3 – Localização da Bacia Hidrográfica da Tamandaré..... | 67 |
| Mapa 4 – Hipsometria da Bacia da Tamandaré e de Áreas Próximas..... | 82 |
| Mapa 5 – Área de Contribuição da Microbacia da Tamandaré..... | 84 |
| Mapa 6 – Mancha de inundação provocada pela maré alta..... | 124 |
| Mapa 7 – Vias afetadas por inundação provocada pela maré alta e precipitação pluviométrica de 1,5 h..... | 135 |
| Mapa 8 – Vias afetadas por inundação provocada pela maré alta e precipitação pluviométrica de 3 h..... | 137 |
| Mapa 9 – Vias afetadas por inundação provocada pela maré alta e precipitação pluviométrica de 6 h..... | 139 |
| Mapa 10 – Vias afetadas por inundação provocada pela maré alta e precipitação pluviométrica de 12 h..... | 141 |
| Mapa 11 – Mancha de inundação gerada pela interação de maré alta e eventos de precipitação pluviométrica de diferentes durações..... | 144 |
| Mapa 12 – Mancha de inundação provocada pela maré alta, precipitação pluviométrica de 1,5h e comporta..... | 150 |
| Mapa 13 – Mancha de inundação provocada pela maré alta, precipitação pluviométrica de 3h e comporta..... | 151 |
| Mapa 14 – Mancha de inundação provocada pela maré alta, precipitação pluviométrica de 6h e comporta..... | 152 |
| Mapa 15 – Mancha de inundação provocada pela maré alta, precipitação pluviométrica de 12h e comporta..... | 153 |
| Mapa 16 – Mancha de inundação gerada pelo fechamento de comporta durante precipitações pluviométricas em momento de maré alta..... | 155 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|-----|
| Quadro 1 – Principais danos socioeconômicos relacionados às inundações..... | 34 |
| Quadro 2 – Classificação da intensidade de prejuízos das inundações. | 35 |
| Quadro 3 – Medidas não estruturais para controle de inundações. | 39 |
| Quadro 4 – Medidas estruturais para controle de inundações. | 42 |
| Quadro 5 – Característica de modelos computacionais utilizados na drenagem urbana..... | 55 |
| Quadro 6 – Classe hidrológica dos solos..... | 62 |
| Quadro 7 – Variáveis morfométricas avaliadas na bacia da Tamandaré..... | 73 |
| Quadro 8 – Valores de coeficiente de Manning para canais em diferentes condições de escoamento. | 78 |
| Quadro 9 – Regras de controle de comporta para o canal da Tamandaré. | 145 |
| Quadro 10 – Correlação dos dados extraídos das simulações. | 157 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 – Valores de CN para diferentes superfícies, por grupo hidrológico. | 63 |
| Tabela 2 – Valores de armazenamento em depressões..... | 76 |
| Tabela 3 – Caracterização Morfométrica da Microbacia da Tamandaré..... | 85 |
| Tabela 4 – Volume precipitado em precipitações pluviométricas de TR de 25 anos no município de Belém..... | 88 |
| Tabela 5 – Comparação do volume precipitado no município de Belém (monitorado e calculado)..... | 89 |
| Tabela 6 – Dimensões do canal da Tamandaré. | 101 |
| Tabela 7 – Características das sub-bacias que contribuem para o escoamento no canal da Tamandaré. | 106 |
| Tabela 8 – Vazões de pico das sub-bacias da Tamandaré, em m ³ /s. | 112 |
| Tabela 9 – Resumo das simulações de escoamento da microbacia da Tamandaré. | 142 |
| Tabela 10 – Avaliação do sistema de comporta na redução de efeitos de inundação durante eventos de precipitação e maré alta. | 156 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|-----------------|--|
| Δa | Variação da altitude do canal |
| A | Área |
| Av. | Avenida |
| cm | Centímetro |
| CN | <i>Curve Number</i> |
| CODEM | Companhia de Desenvolvimento e Administração da Área Metropolitana de Belém |
| CRED/UNISDR | <i>Centre for Research on the Epidemiology of Disaster/United Nations Office for Disaster Risk Reduction</i> |
| CRN | Comprimento das curvas de nível |
| Dd | Densidade de drenagem |
| DR | Duração |
| Dv | Extensão |
| Eq | Equidistância das curvas de nível |
| F | Fator de Forma |
| G | Índice de Gradiente do Canal |
| h | Hora |
| I | Declividade |
| i | Intensidade Pluviométrica |
| IC | Índice de Circularidade |
| IDF | Intensidade-Duração-Frequência |
| Is | Índice de Sinuosidade |
| KC | Coefficiente de compacidade |
| km | Quilômetro |
| km ² | Quilômetro quadrado |
| L | Comprimento do canal |
| Lc | Comprimento do canal principal |
| Lex | Comprimento do eixo da bacia |
| Lt | Comprimento total dos rios ou canais |
| m | Metro |
| m ² | Metro quadrado |
| min | Minuto |
| mm | Milímetro |
| n | Coefficiente de Manning |
| NA | Nível de água |
| P | Perímetro |
| RN | Referência de Nível |
| SESAN | Secretaria Municipal De Saneamento |
| Sim | Simulação |
| SWMM | <i>Stormwater Management Model</i> |
| t | Tempo |
| TR | Tempo de Retono |
| UFSC | Universidade Federal de Santa Catarina |

1 INTRODUÇÃO

Muitas cidades brasileiras foram formadas de maneira acelerada, com crescimento populacional que resultou em problemas ambientais e socioeconômicos no espaço urbano, sem que os gestores municipais conseguissem implantar a infraestrutura básica necessária para atender as demandas crescentes da sociedade (MARTINS, 2012; RAMOS, 1999).

O binômio falta de infraestrutura e expansão desordenada impactou negativamente em diversos setores e, ainda hoje, dificulta o desenvolvimento de ações públicas eficientes nos municípios. Entre os setores mais afetados da infraestrutura e, portanto, com maior necessidade de investimentos estão habitação, energia, segurança, transporte, saúde e saneamento.

As deficiências do setor de saneamento afetam diretamente a saúde pública e a qualidade de vida, sendo o grande desafio dos gestores públicos de universalizarem o atendimento da população com água potável, evitando a contaminação dos corpos hídricos, definindo o manejo adequado de resíduos sólidos e eliminando os alagamentos e inundações nas áreas urbanas.

Os problemas de saneamento básico estão interligados em maior ou menor escala, sendo os relacionados às inundações e alagamentos que afetam a salubridade na área urbana e requerem grande volume de recursos financeiros para obras e dispositivos de drenagem urbana. Segundo Brasil (2017), esses problemas de drenagem urbana ainda acabam por servir como mecanismos de transmissão de doenças de veiculação hídrica; dificultam a mobilidade urbana ao impedir o tráfego de veículos e pedestres; podem causar danos ao patrimônio, impactando na especulação imobiliária de áreas diretamente ou indiretamente afetadas.

Vale destacar que as diretrizes nacionais para o saneamento básico no Brasil foram instituídas apenas em 2007, com a promulgação da Lei n. 11.445/2007, quando foram estabelecidas as responsabilidades dos titulares no desenvolvimento de práticas relacionadas à drenagem urbana para a proteção do bem-estar da população.

Apesar da evidente carência e a importância dos sistemas de drenagem e manejo de águas pluviais, a escolha das medidas de intervenção eficazes não é largamente estudada, fazendo com que a escolha de soluções técnicas não seja tarefa fácil e suficiente para eliminar os casos de inundação no espaço urbano.

Esse cenário é verificado em diversas bacias de drenagem densamente urbanizadas, sendo os eventos de inundação potencializados em cidades brasileiras localizadas as margens e/ou com corpos d'água permeando as áreas urbanas. Isso é explicado com a elevação do nível da maré no interior do canal de drenagem em períodos de maior intensidade pluviométrica

Além disso, o emprego de técnicas tradicionais de canalização de corpos d'água não tem sido suficiente para controlar esses eventos de inundação, razão para a utilização de ferramentas computacionais ser uma alternativa para o estudo instrumentos que confirmem a mudança da atual realidade de muitas cidades.

Para fundamentar a escolha das medidas propostas deve ser verificada a eficácia e a eficiência da contenção de eventos de inundação. Nesse contexto, as ferramentas computacionais de modelagem merecem destaque, por ter a capacidade de simular o comportamento hidráulico e hidrodinâmico dos sistemas de drenagem, permitindo a avaliação das medidas de controle antes dos investimentos em projetos e obras de engenharia.

Desse modo, o estudo consiste em avaliar com auxílio de ferramentas computacionais a eficácia da utilização de comporta na contenção de eventos de inundação em bacias de drenagem, analisando a combinação dos efeitos extremos do regime de marés e dos diferentes eventos de precipitação pluviométrica, a fim de diminuir gastos públicos desnecessários e melhorar a gestão de águas pluviais no meio urbano.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Analisar por simulação hidrodinâmica o impacto de eventos de inundação em canal de drenagem urbana ocasionados por coincidência de precipitações pluviométricas e oscilações de maré.

2.2 ESPECÍFICOS

- a) Caracterizar a bacia hidrográfica de estudo (Tamandaré, Belém/PA), identificando os dispositivos do sistema de drenagem urbana existente e as condicionantes relevantes para o escoamento de águas pluviais;
- b) Simular as condições hidrodinâmicas no canal de drenagem da bacia da Tamandaré, relacionando os eventos de precipitação pluviométrica para diferentes durações e a condição de influência da maré no interior do canal;
- c) Avaliar o desempenho da utilização de comporta na contenção de eventos de inundação, a partir da modelagem hidrodinâmicas do canal de drenagem.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos relacionados ao tema de inundações, enfocando o processo de urbanização e de medidas de contenção em bacia de drenagem urbana para fundamentar a abordagem do problema da pesquisa.

3.1 A OCORRÊNCIA DE INUNDAÇÃO NO ESPAÇO URBANO

Para Galvão (2014) e Marques, Silva e Acácio (2015), a falta de planejamento e de controle do espaço urbano, resultou no desenvolvimento de grandes áreas construídas sem levar em consideração o índice de impermeabilização do solo, acabando por contribuir para as ocorrências de inundações em áreas urbanas. Segundo Ostrowsk e Zmitrowicz (1991), as inundações apresentam a seguinte definição:

A inundação é um fenômeno natural, que ocorre cada vez que a vazão a ser escoada, é superior a capacidade de descarga da calha do curso d'água. Esse fenômeno torna-se inconveniente quando a planície de inundação passa a ser ocupada por atividades humanas.

Tucci (2008) reforça a ideia ao afirmar que a cheia natural de cursos d'água (enchente), no qual o rio passa para o seu leito maior de escoamento motivado por eventos sazonais, é definida como inundação quando atinge áreas ocupadas pelo homem e ocasiona prejuízos socioambientais e econômicos.

Portanto, as inundações estão associadas à urbanização, pois estas interferem no ciclo hidrológico de bacias hidrográficas¹. Com isso, no processo de modificação do espaço urbano devem ser observados os impactos da impermeabilização do solo, da canalização do rio, da retirada da mata ciliar e a ocupação de áreas de várzea, como ações antrópicas que intensificam a ocorrência de inundações.

Para Amaral e Ribeiro (2009), as enchentes e inundações são eventos naturais, derivados de fenômenos hidrometeorológicos que ocorrem periodicamente nos cursos d'água, tendo relação com a intensidade, distribuição e frequência desses eventos, além de estarem associadas com as características físicas de cada região, como a taxa de infiltração de água no solo, a condutividade hidráulica, o grau de saturação, a presença ou ausência de cobertura vegetal. Somado às características naturais, as alterações antrópicas do meio podem intensificar os eventos de inundação, mediante a ocupação irregular das planícies e margens

¹ A bacia hidrográfica é o principal elemento da análise hidrológica, pois é nesse espaço onde ocorre a interação entre o meio terrestre e os fenômenos hidrometeorológicos. Segundo Agência Nacional de Águas (2012), a bacia hidrográfica pode ser definida como área de captação natural (superfícies vertentes) de água de precipitação que faz convergir o escoamento para um único ponto de saída, exutório.

de rios, as alterações das características da bacia hidrográfica (retificação e canalização dos rios e impermeabilização), a disposição irregular de lixo e o assoreamento dos cursos d'água.

Além disso, no meio científico é identificada a necessidade de distinção conceitual dos termos enchente e inundação. Para Maia (2009), a distinção é dada da seguinte forma:

Há uma diferença entre enchente (cheias) e inundação (alagamento). O primeiro se refere a águas que extravasam o leito menor dos rios; a inundação é um fenômeno geomorfológico que ocorre no período de cheia, quando as águas fluviais extravasam o canal fluvial, inundando a região.

Enquanto para o Ministério das Cidades (2007) e Mendonça e Silva (2017), as enchentes são definidas pela elevação do nível da massa líquida do canal de drenagem ou do corpo d'água, atingindo sua cota máxima, mas, sem extravasamento. Já as inundações ocorrem quando há o transbordamento, atingindo a planície de inundação ou área de várzea.

Também é oportuno observar que, muitas vezes, os termos inundação e alagamentos são utilizados como sinônimos. Contudo, os alagamentos são problemas decorrentes do sistema de drenagem em si, quando não há capacidade de escoamento ou armazenamento e acaba por gerar acúmulo indevido de águas pluviais em certos pontos, enquanto as inundações são entendidas como a elevação do nível de água no canal até o seu extravasamento, causando consequências mais severas para as áreas urbanas (AMARAL; GUTJAHR, 2011). Botelho (2017) complementa o conceito de alagamento ao afirmar que esses problemas ocorrem quando o sistema de microdrenagem não suporta a vazão que chega de pontos à montante, impedindo o escoamento adequado, o que gera acúmulo momentâneo de água pluvial no leito carroçável e até sobre os passeios.

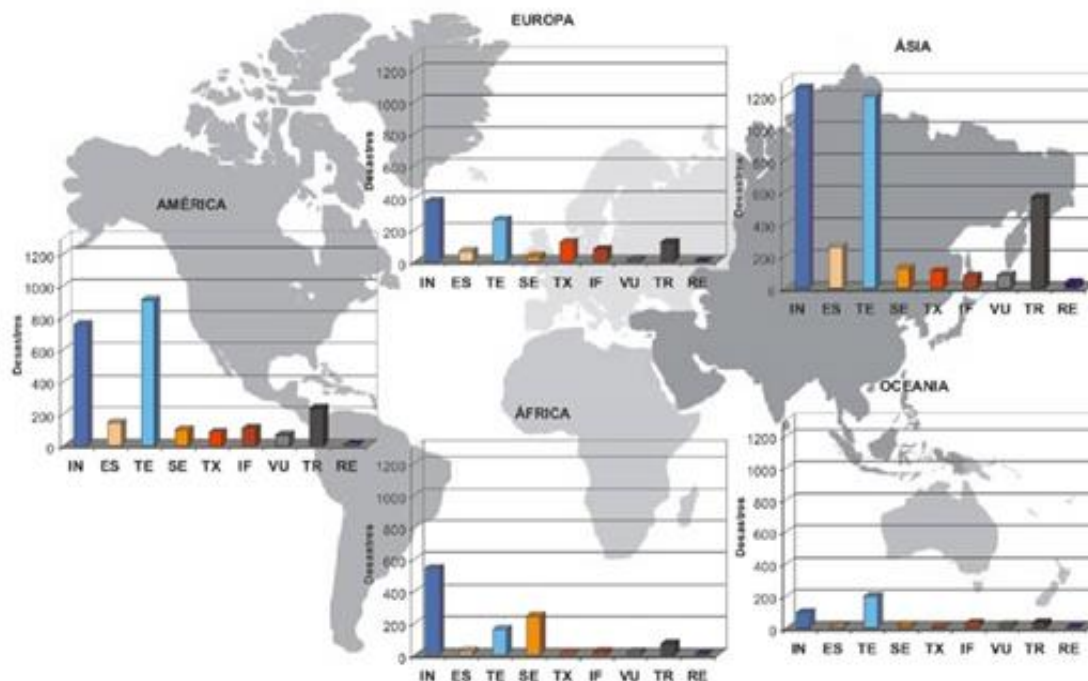
A utilização da terminologia correta é importante para a identificação de qual dos problemas relacionados ao manejo e drenagem de águas pluviais (enchente, inundação e alagamento) atinge a área urbana ao redor do globo.

Segundo a United Nations World Water Assessment Programme (2018), cerca de 1,2 bilhões de pessoas correm risco de inundação. Também foi estimado que esses números aumentarão nas próximas décadas, passando para 1,6 bilhão em 2050, valor equivalente à 20% da população mundial projetada.

Vale comentar que as inundações foram responsáveis por 47% do total de desastres relacionados ao clima desde 1995, afetando de 2.300 milhões de pessoas. O número médio de inundações aumentou para 171 eventos por ano durante o período 2005-2014, acima do valor médio anual de 127 da década anterior (CRED/UNISDR, 2015). Na Figura 1 é possível

verificar que as inundações estão entre os desastres ambientais mais frequentes ao redor do globo.

Figura 1 – Frequência de desastres ambientais por continente.



Legenda: IN – Inundação, ES – Escorregamento, TE – Tempestade, SE – Seca, TX – Temperatura Extrema, IF – Incêndio Florestal, VU – Vulcanismo, TR – Terremoto e RE – Ressaca.

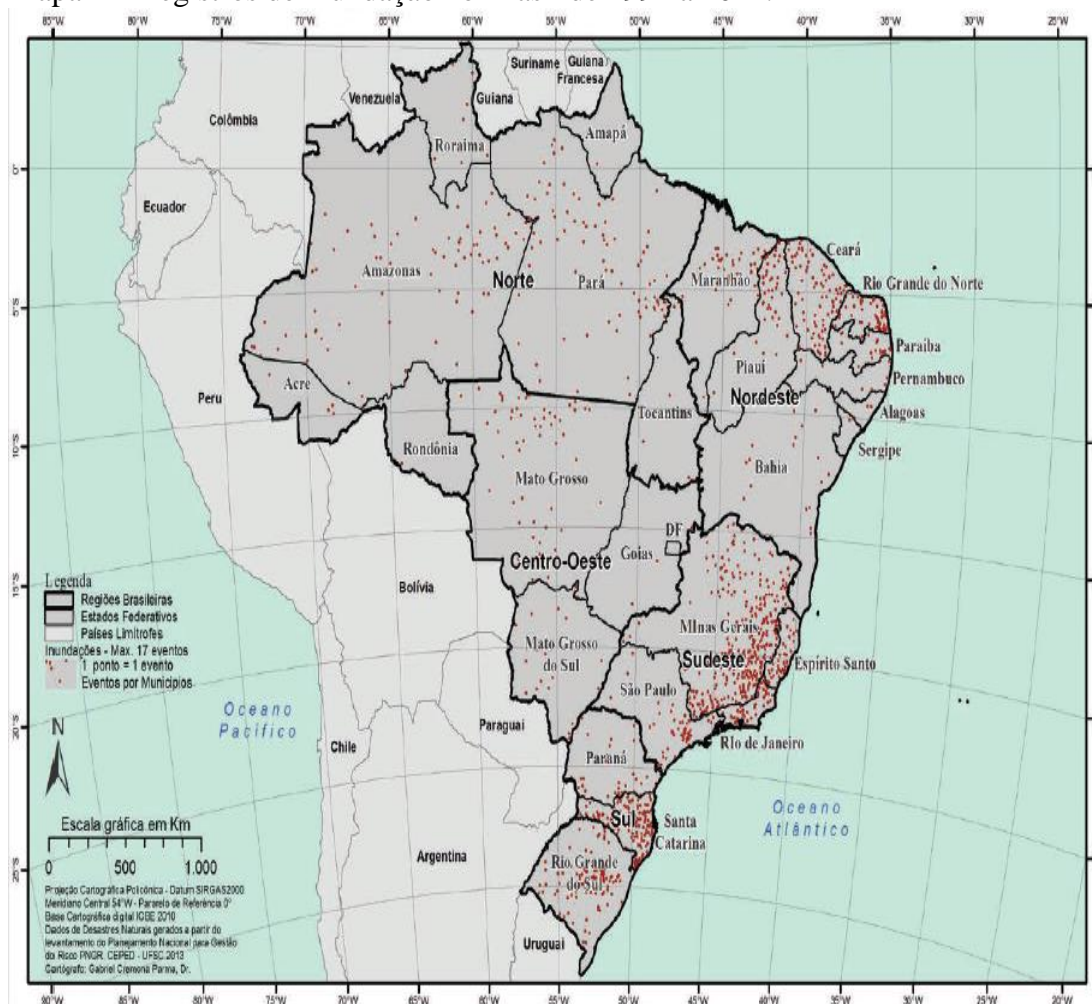
Fonte: Marcelino (2007).

De acordo com o estudo do *Annual Disaster Statistical Review (2017)*, dos 342 desastres ambientais registrados em todo o globo em 2016, a maior parcela foi de eventos de inundação, com 47,90%. A média anual de eventos de inundação e de deslizamentos na década de 2006 - 2015 representou 50,5% dos desastres ambientais. Nesse mesmo estudo foi relatado que no Brasil ocorreram apenas dois eventos de inundação em 2016. Contudo, esses números são distantes da realidade, pois eventos de inundação ocorrem anualmente em todo o país, mas com magnitudes variadas, o que pode justificar a ausência de dados no estudo desenvolvido.

Segundo o Ministério da Integração Nacional, por meio do Sistema Integrado de Informação sobre desastres – S2ID, 74 eventos de inundação ocorreram em 10 dos 26 estados do Brasil no ano 2016, sendo eles: Bahia, Ceará, Espírito Santo, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul, Santa Catarina e São Paulo. Todavia, os problemas de inundação não são característica apenas desses estados, como é

possível verificar no Mapa 1, em que são apresentados os registros de inundação por todo o Brasil, entre 1991 e 2012.

Mapa 1 – Registros de inundação no Brasil de 1991 a 2012.



Fonte: UFSC (2013).

Para Tucci (2003), a frequência e a intensidade das inundações variam anualmente, demonstrando a necessidade de aplicação de medidas de intervenção nos centros urbanos brasileiros, podendo estar associadas à necessidade de utilização de medidas estruturais e/ou estruturantes para a solução dos problemas gerados.

Segundo ANA (2018), 2.680 municípios brasileiros (48% do total) chegaram a decretar Situação de Emergência ou Estado de Calamidade Pública devido à cheias pelo menos uma vez entre 2003 e 2017, enquanto, apenas em 2017, o número de registros de cheias chegaram à 661, afetando cerca de 3 milhões de pessoas. O reflexo desse cenário é o aumento dos impactos negativos gerados por inundações, como perdas humanas, danos ao patrimônio, veiculação de doenças etc.

É estimado que a ocorrência de inundações em municípios brasileiros seja maior do que as apresentadas pelas fontes governamentais, visto que, muitas vezes, há deficiências do poder público com o registro desses eventos.

Os registros também tem grande importância para a gestão de eventos de inundação. Para Reis (2014), a falta de cuidado com os registros de inundação tem repercussão nas medidas adotadas para impedir a sua ocorrência ou mitigar seus efeitos negativos, já que se tornam desconhecidos os reais impactos causados à malha urbana, fazendo com que as ações tomadas posteriormente sejam menos efetivas.

Para Tachini (2010), o levantamento de dados informacionais de inundações permite o desenvolvimento de zoneamento das áreas afetadas e estimativas de áreas de risco, sendo indispensável para a prevenção, o controle e o planejamento de ações relacionadas ao manejo de águas pluviais. Portanto, é fundamental ter informação de qualidade para a análise da área afetada por evento de inundação.

3.1.1 Características morfométricas para avaliar a suscetibilidade de eventos de inundação em bacias

De acordo com Masoud (2015) e Antonelli e Thomaz (2007), as bacias hidrográficas podem ser estudadas com base em parâmetros morfométricos e permitem estimar a suscetibilidade de eventos de inundação, obtidos por técnicas de geoprocessamento.

Para Teodoro et al. (2007) e Santos, Carvalho e Antoneli (2016), as diversas variáveis morfométricas podem ser divididas em três categorias, no caso geométricas, relevo e rede de drenagem

a) Geométrica

As variáveis geométricas estão relacionadas às dimensões da bacia, dando indicativo de área para captação de águas pluviais e a propensão à ocorrência de enchentes. Essas variáveis são compostas por dois dados (área e perímetro) e três indicadores (Compacidade, Forma e Circularidade).

A Área é a variável morfométrica mais importante, uma vez que reflete de modo geral o volume de água que será escoado pela bacia. Quanto maior for a área da bacia, maior será o volume de água que passará pelo seu exutório, incrementando o efeito das enchentes no

interior da bacia e a jusante da mesma. Enquanto, o Perímetro da bacia é o comprimento de uma linha imaginária ao longo do divisor de água da bacia.

O Coeficiente de Compacidade relaciona a forma da bacia com um círculo, é um número adimensional que varia com a forma da bacia, independente de seu tamanho, expresso na Equação 1.

$$Kc = 0,28 \times \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (1)$$

Onde:

Kc: Coeficiente de compacidade;

P: Perímetro (m);

A: Área de drenagem (m²).

O Índice de Forma indica a forma da bacia, que influencia na retenção da água, expresso na Equação 2.

$$F = \frac{A}{Lex^2} \quad (2)$$

Onde:

F: Fator forma;

A: Área da bacia (m²);

Lex: Comprimento do eixo (m).

O Índice de circularidade também está relacionado à forma da bacia, quanto mais circular, maior a retenção de água na bacia no exutório, aumentando a suscetibilidade às enchentes e reduzindo os efeitos a jusante, expresso na Equação 3.

$$IC = \frac{12,57 \times A}{P^2} \quad (3)$$

Onde:

IC: Índice de Circularidade;

A: Área da bacia considerada (km²);

P: Perímetro (km).

b) Relevo

As variáveis de relevo estão relacionadas às variações topográficas da bacia, dando indicativo de altimetria, informação importante para o escoamento das águas pluviais, que

modifica a velocidade de transporte da massa líquida. Essas variáveis são compostas por três dados (declividade, altitude e amplitude altimétrica).

A Declividade está associada à velocidade de escoamento superficial, afetando o tempo de concentração das bacias, sendo que os picos de enchente, infiltração e susceptibilidade para erosão dos solos dependem da rapidez com que ocorre o escoamento sobre os terrenos da bacia. Para Mello e Silva (2013), uma das maneiras mais práticas de se determinar a declividade média de bacias é com a utilização equação baixo:

$$I = \frac{Eq}{A} \times (\sum CRN) \quad (4)$$

Onde:

I: Declividade (m/m);

Eq: Equidistância das curvas de nível (m);

A: Área da bacia considerada (m²);

CRN: Comprimento das curvas de nível da bacia (m).

A Altitude está associada à precipitação, evaporação e transpiração, conseqüentemente sobre o deflúvio médio. Grandes variações de altitude alteram temperatura média, impactando na evapotranspiração, e precipitação pluviométrica anual na bacia.

A Amplitude Altimétrica é variação entre a altitude máxima e a altitude mínima da bacia. Define, em parte, a velocidade de escoamento. Quanto maiores forem os valores, mais rápido é o escoamento, reduzindo o acúmulo de água na bacia. Geralmente, quando existe elevada amplitude altimétrica, o declive é mais acentuado, a infiltração tende a diminuir e a velocidade de escoamento a aumentar. Por outro lado, esse fluxo em alta velocidade pode incrementar o efeito das enchentes a jusante da bacia, em pontos mais baixos e planos.

c) Rede de Drenagem

As variáveis de rede de drenagem estão relacionadas aos canais da bacia, região de vale que concentra o volume escoado na bacia e encaminha para o exutório. Essas variáveis são compostas por três indicadores (densidade de drenagem, índice de sinuosidade e índice de gradiente de canal).

A Densidade de Drenagem está associada à extensão do canal e a área da bacia, quanto maior o valor de densidade de drenagem, menor o volume disponível em canais para comportar a quantidade de água pluvial escoada. Em bacias com substrato rochoso mais

impermeável, a capacidade de formação de canais é reduzida, diminuindo a densidade de drenagem, conforme a Equação 5.

$$Dd = \frac{Lt}{A} \quad (5)$$

Onde:

Dd: Densidade de drenagem (km/km²);

Lt: Comprimento total dos rios ou canais (km);

A: Área da bacia (km²).

O Índice de Sinuosidade é a relação entre o comprimento verdadeiro do canal e o seu comprimento vetorial permite identificar a sinuosidade. Quanto maior o índice, menor a velocidade do escoamento e, conseqüentemente, menor a suscetibilidade a enchentes a jusante da bacia (maior retenção de água no interior da bacia), conforme é apresentado na Equação 6.

$$Is = \frac{L}{Dv} \quad (6)$$

Onde:

Is: Índice de sinuosidade;

L: Comprimento do canal principal (km);

Dv: Comprimento em linha reta do canal principal (km).

O Índice de Gradiente de Canal é utilizado para a avaliação dos perfis longitudinais de canais de drenagem, sendo a relação entre a altimetria e o comprimento do canal, conforme é apresentado na Equação 7.

$$G = \frac{\Delta a}{Lc} \times 100 \quad (7)$$

Onde:

G: Índice de Gradiente de Canal;

Δa : Variação da altitude (m);

Lc: Comprimento do canal principal (m).

Essas variáveis morfométricas (geométrica, relevo e rede de drenagem) são indicativos para o cuidado na forma de ocupação das bacias, visto que possibilitam avaliar se essas áreas apresentam tendência à ocorrência de inundações, que, normalmente, afetam grande número de indivíduos, diretamente e indiretamente.

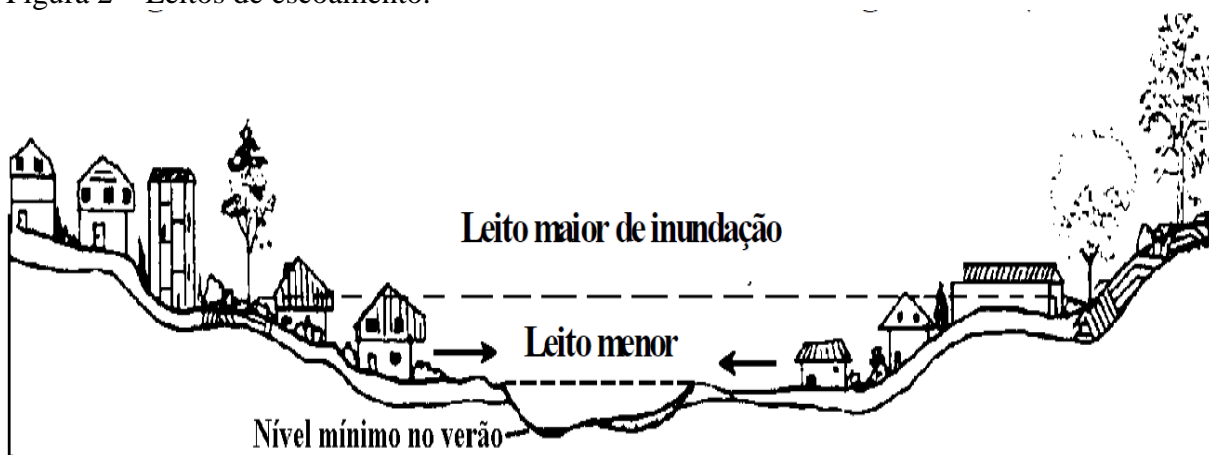
É importante ressaltar que as inundações podem ocorrer por fatores distintos e com intensidades variadas. Diversos autores procuraram classificar esses eventos para facilitar a caracterização de diferentes ocorrências de inundação no espaço urbano, relacionando as influências naturais e antrópicas ou a magnitude dos danos causados por esses eventos, por exemplo, podendo ser divididos em três grupos, quanto à origem, à velocidade de ocorrência e às perdas ocasionadas. x

3.1.2 Quanto à origem: Inundações Ribeirinhas e Decorrentes da Urbanização²

As motivações para a ocorrência de inundações podem ser divididas em duas categorias, as inundações ribeirinhas e decorrentes da urbanização (TUCCI, 2008). Guirano, Cisotto e Barbosa (2012) comentam que, basicamente, os rios possuem dois leitos de escoamento: a) o leito menor, no qual o curso d'água ocupa a maior parte do tempo; e b) o leito maior, também definido como área de várzea, no qual o rio passa a ocupar periodicamente, motivado por eventos sazonais.

Desse modo, as inundações ribeirinhas ocorrem quando há ocupação urbana das áreas de várzea, que podem ser afetadas pelas variações hidrometeorológicas dos corpos d'água, sendo mais recorrentes em bacias de médio e grande porte, conforme a Figura 2.

Figura 2 – Leitos de escoamento.



Fonte: Tucci (2005).

² A União Europeia (2007), pela Diretiva n. 2007/60/CE, define que existem quatro tipos de inundações (cheias de origem fluvial, inundações marítimas em zonas costeiras, inundações urbanas e cheias repentinas). Contudo, os dois primeiros tipos de inundação podem ser categorizados como inundações ribeirinhas, em função da necessidade de influência hidrometeorológica natural para a sua ocorrência. Além disso, as inundações repentinas estão associadas à velocidade com que esses eventos ocorrem, podendo ser uma condição tanto das inundações ribeirinhas quanto das inundações decorrentes da urbanização.

O fato das inundações ribeirinhas estarem sujeitas às variações hidrometeorológicas de precipitação pluviométrica e maré, torna mais difícil a delimitação do leito maior de escoamento, pois o tempo de retorno de eventos fluviais e/ou pluviais pode trazer inundações com magnitudes ainda não registradas, fazendo com que o monitoramento de precipitações pluviométricas, de níveis e de vazão de rios seja de grande importância no estudo de medidas de intervenção e zoneamento da área de risco.

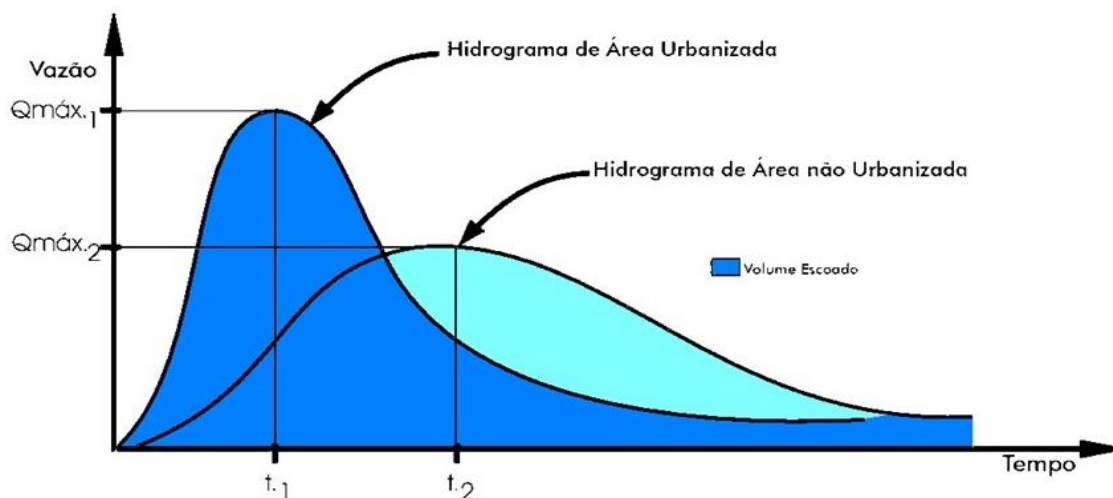
Para exemplificar essa situação podem ser citados os casos do município de Marabá. Nessa cidade, situada as margens do Rio Tocantins e Itacaiúnas, problemas de inundações ribeirinhas acontecem principalmente nos meses entre Dezembro e Abril. Os casos mais recentes nesse município ocorreram em 2014, quando o rio Tocantins atingiu nível de água de 11,78 m, e em 2018, quando o rio alcançou nível de 10,90 m (G1, 2018a; G1, 2018b).

O outro tipo de inundação que pode assolar os municípios é a inundação decorrente da urbanização. Segundo Cruz, Souza e Tucci (2007), esse tipo de inundação passa a ocorrer quando há a impermeabilização do solo e a construção de redes de condutos pluviais, o que altera a forma de escoamento das águas pluviais.

De acordo com Lechiu, Oliveira Filho e Sousa (2012), o aumento de área construída em bacias de hidrográficas tem grande impacto no volume escoado superficialmente, pois impede a infiltração de águas pluviais no solo e diminui a rugosidade da bacia, fazendo com que aumentem o volume e a velocidade de escoamento que chega aos pontos mais baixos.

Paralelamente, os condutos de águas pluviais são implantados no espaço urbano para diminuir o volume que escoar sobre as ruas, ocasionando impacto negativo à nível de bacia, visto que essas estruturas de drenagem aumentam ainda mais a velocidade de escoamento (gerando efeitos ainda maiores em centros urbanos com relevo acentuado) até pontos mais a jusante da bacia. O impacto da urbanização é observado na vazão máxima que escoar em pequeno espaço de tempo até o exutório da bacia (Figura 3), fazendo com que os problemas de inundação mais sejam frequentes nos pontos baixos à jusante.

Figura 3 – Influência da urbanização no hidrograma de bacias hidrográficas.



Fonte: Fonte Hídrica (2011).

O principal impacto negativo da urbanização é a redução do tempo de concentração da bacia, levando grandes volumes de águas pluviais em curto espaço de tempo até o curso d'água ou canal de drenagem, sem que estes tenham capacidade de escoamento. Superada a capacidade de vazão do rio/canal ocorre o extravasamento das águas de seu leito tradicional, ocorrendo os eventos de inundação. Tucci (2012) ressalta que esses eventos são vistos como inundações locais, já que, normalmente, ocorrem em bacias urbanas pequenas.

Além disso, a urbanização ainda pode gerar inundações pontuais, que ocorrem por obstrução de canais, estando associados à falta de dragagem de material acumulado (manutenção e limpeza) ou a construção de pontes, com diminuição da seção do escoamento, acarretando eventos de inundações inesperadas.

3.1.3 Quanto à velocidade de ocorrência: Inundações Bruscas e Graduais

As inundações também podem ser classificadas pela velocidade de ocorrência desses eventos, podendo ser de dois tipos: a) bruscas, repentinas ou enxurradas e b) graduais, de planície ou lenta (AMORIM; REIS; FERREIRA, 2017).

De acordo com Licco e Dowell (2015), as inundações bruscas estão associadas à elevação súbita dos níveis de água dos canais ou cursos d'água, geradas por fenômenos pluviométricos intensos ou rompimento de barragens. Normalmente, ocorrem em regiões de relevo acidentado ou em fundos de vale, pois a declividade do terreno mais acentuada faz com que águas pluviais cheguem mais rapidamente à jusante. Nesses casos, a retirada da vegetação

e a urbanização também contribuem para a redução do tempo de concentração, aumentando a frequência desse tipo de inundação.

O grande deslocamento de locais elevados e o pequeno tempo percorrido pelas águas pluviais para chegar à jusante agregam grande quantidade energia cinética à massa líquida, fazendo com que as inundações bruscas ocorram rapidamente, com pouco ou nenhum tempo de alerta (RIGHI, 2016). Dessa forma, as inundações bruscas resultam em impactos mais severos à população, podendo facilmente causar traumas e óbitos (ALFIERI; THIELEN, 2015).

De acordo com Freitas et al. (2014), entre 1991 e 2010 houve aumento na frequência das inundações bruscas no Brasil, com picos nos anos de 1997, 2004, 2009 e 2010, enquanto, os meses de maior ocorrência foram janeiro e fevereiro. Grande parte dos registros de inundação foi das regiões sul (36,5%), sudeste (30%) e nordeste (24,5%). Contudo, foi na região sudeste que ocorreu o maior percentual de pessoas afetadas, e levadas a óbito (52%).

O município de Paragominas/PA sofreu as consequências de inundação brusca em Abril de 2018, levando o gestor municipal a decretar calamidade pública. A ocorrência desse episódio está associada à precipitação pluviométrica de grande intensidade, fazendo com que o nível de água do Rio Urain, que corta a área urbana da cidade, aumentasse 4 metros e provocasse rompimento de barragens rurais. As enxurradas geradas destruíram parte da BR-010 e da PA-256 e inundaram rapidamente 14 bairros, resultando em prejuízos para 300 famílias (G1, 2018b).

Por sua vez, as inundações graduais ocorrem quando o extravasamento do canal ou curso d'água até o seu ápice acontece lentamente e, muitas vezes, de maneira previsível, ocorrendo mais frequentemente em áreas de planície. Essas inundações se mantêm por determinado período e gradualmente vão escoando, normalmente motivadas por eventos sazonais, característica de inundações ribeirinhas (MAGNAGO et al., 2015). Segundo Brasil (2017), as inundações graduais podem ocorrer por períodos mais longos e expor grande número de pessoas a esses eventos, além de poder ocasionar modificação no ciclo de certas doenças.

Segundo Freitas et al. (2014), que as inundações graduais aumentaram significativamente no Brasil entre 1990 e 2000, entretanto, os picos de ocorrência foram nos

anos de 2004 e 2009. A frequência desse tipo de inundações foi registrada em diversas regiões, no caso, Sudeste (31,5%), Nordeste (28%) e Sul (22,6%) e Norte (11,7%).

3.1.4 Quanto às Perdas Ocasionadas: Inundações com Danos Tangíveis e Intangíveis

De acordo com Cançado (2009), as inundações podem ser classificadas pelos danos causados às áreas urbanas, podendo ser definidas como tangíveis ou intangíveis. Os danos tangíveis são aqueles passíveis de avaliação em termos monetários, normalmente estimados por meio dos preços de mercado. Já as perdas intangíveis, são mais difíceis de precificar, visto que a valoração dessas perdas, por questões éticas, ideológicas ou sentimentais, é considerada indesejável ou inapropriada. O mesmo autor ainda define que os danos tangíveis e intangíveis, podem ser subdivididos em diretos e indiretos.

Para Machado (2005), os danos diretos ocorrem quando há o contato físico de bens e/ou pessoas com a água da inundação, já os danos indiretos são entendidos como as consequências dos danos diretos, podendo ser exemplificado em interrupções e perturbações das atividades sociais e econômicas, conforme pode ser observado no Quadro 1.

Quadro 1 – Principais danos socioeconômicos relacionados às inundações.

| Danos Tangíveis | |
|---|--|
| Direto | Indireto |
| Aos domicílios: construção e conteúdo das residências | Custos de limpeza, alojamento e medicamentos. Realocação do tempo e dos gastos na reconstrução. Perda de renda. |
| Ao comércio e serviços: construção e conteúdo (mobiliário, estoques, mercadorias em exposição, etc.). | Lucros cessantes, perda de informações e base de dados. Custos adicionais de criação de novas rotinas operacionais pelas empresas. Efeitos multiplicadores dos danos nos setores econômicos interconectados. |
| Aos equipamentos e plantas industriais. | Interrupção da produção, perda de produção, receita e, quando for o caso, de exportação. Efeitos multiplicadores dos danos nos setores econômicos interconectados |
| À infraestrutura | Perturbações, paralisações e congestionamento nos serviços, custos adicionais de transporte, efeitos multiplicadores dos danos sobre outras áreas. |
| Danos Intangíveis | |
| Direto | Indireto |
| Ferimentos e perda de vida humana. | Estados psicológicos de <i>stress</i> e ansiedade. |
| Doenças pelo contato com a água, como resfriados e infecções. | Danos de longo prazo à saúde. |
| Perda de objetos de valor sentimental. | Falta de motivação para o trabalho. |
| Perda de patrimônio histórico ou cultural. | Inconvenientes de interrupção e perturbações nas atividades econômicas, meios de transporte e comunicação. |

Fonte: Cançado (2009).

Para Barbat e Carreño (2004), a magnitude dos efeitos indiretos de desastres naturais está associada ao do tipo de desastre, podendo estar relacionado à água ou não. No caso das inundações, os danos indiretos são capazes de corresponder até 50% dos seus danos diretos. Segundo van der Veen et al. (2003), a magnitude dos efeitos indiretos na economia depende basicamente de três fatores: da disponibilidade de fonte alternativa de oferta e demanda, da duração da perturbação e da possibilidade de aumento da produção.

De acordo com Berz (2000), muitos eventos de inundação ocorreram entre 1990 e 2000, trazendo grandes gastos aos cofres públicos e privados para o ressarcimento dos danos causados por inundações no mundo, totalizando mais de 250 bilhões de dólares para a remediação dos problemas gerados pelas inundações.

Minervino e Duarte (2016) observam que foram registrados 4.070 desastres hidrológicos (inundações, enxurradas e alagamentos) no Brasil entre 2010 a 2014, resultando em gastos de R\$ 331,4 bilhões. Deste montante, estão relacionados danos às habitações (58,70%), às obras de infraestrutura pública (27,90%) e às instalações públicas de uso comunitário (9,90%).

Tucci (2005) afirma que até 2005 somente as inundações representavam 50% dos desastres naturais relacionados com a água, dos quais 20% ocorreram nas Américas. Nos Estados Unidos, os gastos decorrentes de inundações variam de 0,02 a 0,48 do Produto Interno Bruto (PIB), com valor médio de 0,081%, correspondendo a US\$ 8,1 bilhões de dólares durante o século XX.

Segundo CRED/UNISDR (2015), os custos gerados por eventos de inundação são mais catastróficos para países com menor robustez econômica, causando grandes problemas às despesas públicas de reparo dessas áreas. Para a República Popular Democrática da Coreia (Coreia do Norte) e o Iémen, os prejuízos gerados pelas inundações representam 39% e 11% dos PIBs, respectivamente.

Para Kobiyama et al. (2006), a classificação relacionada às perdas por inundações, e por outros desastres ambientais, é dada pela intensidade dos prejuízos econômicos gerados por esses eventos ao PIB municipal, conforme pode ser observado no Quadro 2.

Quadro 2 – Classificação da intensidade de prejuízos das inundações.

| Nível | Intensidade | Prejuízos | Situação |
|-------|-------------|-----------|----------|
|-------|-------------|-----------|----------|

| | | | |
|-----|--|---|--|
| I | Desastre de pequeno porte, onde os impactos causados são pouco importantes e os prejuízos pouco vultosos. | Prejuízos \leq 5% do PIB | Facilmente superável com os recursos do município. |
| II | De média intensidade, onde os impactos são de alguma importância e os prejuízos são significativos, embora não sejam vultosos. | $5\% < \text{Prejuízo} \leq 10\%$ do PIB | Superável pelo município, desde que envolva uma mobilização e administração especial. |
| III | De grande intensidade, com danos importantes e prejuízos vultosos. | $10\% < \text{Prejuízo} \leq 30\%$ do PIB | A situação de normalidade pode ser restabelecida com recursos locais, desde que complementados com recursos estaduais e federais. (Situação de Emergência – SE). |
| IV | Com impactos muito significativos e prejuízos muito vultosos. | Prejuízo $> 30\%$ do PIB | Não é superável pelo município, sem que receba ajuda externa. Eventualmente necessita de ajuda internacional (Estado de Calamidade Pública – ECP). |

Fonte: Kobiyama et al. (2006).

Mesmo as inundações e diversos outros problemas relacionados à água fazendo parte do cotidiano de diversas cidades, as consequências econômicas e, também, socioambientais desses eventos nem sempre são difundidas, fazendo com que a população passe a conviver com esses problemas sem compreender as consequências para a manutenção de sua qualidade de vida.

Brasil (2017) cita diversos efeitos socioambientais ocasionados por inundações, que podem ocorrer com maior frequência e intensidade quando medidas de controle ainda não foram instaladas ou são ineficientes:

- a) Danifica e interrompe os sistemas e/ou soluções alternativas de abastecimento de água, os serviços de drenagem, limpeza urbana e esgotamento sanitário;
- b) Aumenta os riscos de contaminação microbiológica de água para consumo humano e alimentos em razão de alagamentos de lixões, aterros sanitários, transbordamento de esgotos e fossas sépticas;
- c) Aumenta a ocorrência de doenças infecciosas (respiratórias e de transmissão hídrica e alimentar) e agrava as doenças crônicas e de transmissão por vetores, assim como o surgimento de doenças mentais, acidentes por animais peçonhentos e por outros animais, e doenças provocadas pela maior exposição às intempéries (frio, umidade, calor, tempestade etc.);

- d) Aumenta a ocorrência de doenças de pele, como fungos, foliculite, melasma, alergia e até mesmo câncer de pele;
- e) Provoca migração populacional (deslocamento) em busca de fontes alternativas de água, alimentos, moradia, emprego, entre outros fatores condicionantes.

De acordo com Brasil (2014), a ocorrência de inundações faz com que o setor de Saúde assuma responsabilidades para a promoção, a vigilância e a atenção à saúde, demandando a integração de diversos setores e de investimentos expressivos para a mitigação dos efeitos negativos desses eventos.

Nesses casos, o planejamento (gestão de risco) deve ser atuação da Secretaria de Vigilância em Saúde (SVS), na esfera federal do SUS. Portanto, cabendo ao SVS, o desenvolvimento do Plano de Contingência para Inundações, que norteará o manejo de emergência (alerta e resposta) e de recuperação (reabilitação e reconstrução) das áreas afetadas (Brasil, 2014). Além disso, para a adequada gestão de risco, medidas de prevenção também são de grande importância. No Esquema 1 é apresentado ações para amortizar os danos decorrentes de eventos inundações.

Esquema 1 – Medidas para mitigação de danos em eventos de inundações.



Fonte: Amaral e Ribeiro (2009).

Para Ferreira (2017), a primeira providência a ser tomada para evitar a ocorrência de inundação é o remanejamento de pessoas dos locais de risco de inundação. Contudo, o autor ressalta que essa ação é mais problemática após a consolidação da ocupação e o encerramento do processo de urbanização, tornando praticamente indispensável à utilização de medidas

estruturais, que, normalmente, são mais onerosas para a proteção da população e manutenção da saúde pública. Esse é o cenário em muitos centros urbanos brasileiros que já tiveram seus processos de urbanização finalizados, sendo necessário encontrar alternativas para combater os eventos de inundação em áreas densamente urbanizadas.

3.2 MEDIDAS DE CONTROLE DE INUNDAÇÃO

As medidas de controle são fundamentais para minimizar os danos das inundações nos centros urbanos. Para Barbosa (2006), não se pode considerar que as medidas de controle tenham a capacidade de conter totalmente os eventos de inundação e suas consequências, mas são essenciais para mitigar os efeitos e diminuir a ocorrência no meio urbano.

De acordo com Machado e Poleza (2017), as inundações são eventos que não podem ser evitados por medidas isoladas e que apresentam limites de contenção predefinidos, baseados em tempos recorrências. Nesse sentido, é possível entender que devem ser associadas diversas medidas para melhorar a proteção dos centros urbanos.

Segundo Cruz, Souza e Tucci (2007), as medidas de contenção de eventos de inundação são classificadas, de acordo com sua natureza, em medidas estruturais e não estruturais. As medidas estruturais são entendidas como obras físicas, que podem ser implantadas visando a correção e/ou prevenção dos problemas decorrentes de enchentes. Enquanto as medidas não estruturais são relacionadas com alternativas que buscam reduzir os danos ou as consequências das inundações, não por meio de obras, mas pela introdução de normas, regulamentos e programas.

Para Tucci (2005), medidas estruturais são aquelas que alteram o sistema fluvial, para evitar os danos ocasionados por inundações; enquanto medidas não estruturais são aquelas em que os prejuízos são mitigados pela melhor convivência da população com as enchentes.

3.2.1 Medidas Não Estruturais

As medidas não estruturais são definidas como ações de tomada de decisão que buscam reduzir os impactos das inundações por meio de normas e programas no planejamento urbano, isto é, sem obras físicas alterando o sistema de drenagem (SILVA et al., 2017a).

As medidas não estruturais para o controle de inundação são relacionadas ao aproveitamento de estruturas organizacionais existentes nas áreas delimitadas de bacias hidrográficas. Normalmente, as ações não estruturais atuam em longo prazo e trazem benefícios com dispêndios econômicos menores, se comparado às ações estruturais.

Melo (2007) afirma que as iniciativas envolvendo essas medidas podem ser empregadas por indivíduos, por associações e por entidades particulares, estimuladas pelos gestores municipais, sem a necessidade de grandes investimentos.

O mesmo autor ainda afirma que algumas medidas não estruturais requerem mais comprometimento dos setores governamentais, para viabilizar o início e, em alguns casos, seu desenvolvimento e aplicação dinâmica ao longo dos anos, mantendo os avanços obtidos e buscando melhorias para alcançar a sustentabilidade ambiental da bacia hidrográfica urbana.

Em geral, a utilização de medidas não estruturais tende a ter resultados mais eficientes no controle de inundações de áreas em processo de urbanização. Esse argumento foi confirmado por Decina e Brandão (2016), que relacionaram as medidas de controle não estruturais às condições de inundação e às etapas de urbanização da bacia do Córrego do Gregório/SP, verificando a baixa eficiência dessas medidas na proteção de eventos de inundação após a consolidação da malha urbana da bacia; e as boas condições de controle de inundação ao utilizar essas medidas juntamente com a formação do espaço urbano.

No Quadro 3 são apresentadas algumas medidas não estruturais que podem ser aplicadas para evitar problemas com inundações no espaço urbano.

Quadro 3 – Medidas não estruturais para controle de inundações. (continua)

| Medida | Características | Objetivos |
|------------------------------|--|---|
| Plano diretor | Planejamento das áreas a serem desenvolvidas e a densificação das áreas atualmente loteadas. | Evitar ocupação sem prevenção e previsão. |
| Zoneamento | Conjunto de regras para a ocupação das áreas de maior risco de inundação. | Visa à minimização futura de perdas materiais e humanas em face das grandes cheias. |
| Controle do desmatamento | Além do controle do desmatamento, o reflorestamento deve ser feito em todos locais possíveis. | Prevenir a erosão e o assoreamento. |
| Educação Ambiental | Para ser realizado junto à população. A conservação das margens dos arroios, sua vegetação típica e taludes são essenciais. | Conscientizar a população que sofre ou poderá sofrer com as inundações. |
| Medidas de apoio à população | Lugares seguros para preservar a pessoa, a família e trabalhos. Construção de abrigos temporários, meios de evacuação, patrulhas de segurança. | Inserir nos possíveis atingidos pelas inundações um senso de proteção. |

(conclusão)

| Medida | Características | Objetivos |
|---|--|---|
| Distribuição de informação sobre as enchentes | Programa de orientação da população sobre as previsões de enchentes para que ela aprenda a se prevenir contra as cheias. | Aprimorar a qualidade da assistência externa e a reduzir falhas como a falta de informações, a má avaliação das necessidades e formas inadequadas de ajuda. |
| Reassentamento | Reassentamento de residentes ilegais ocupantes das margens de rios, e de residentes legais nas áreas de enchente. | Retirar a população dos locais de risco. |
| Sistema de alerta | Sistema utilizado para prevenir a população com antecedência de curto prazo, em eventos mais raros. | Ajudar no controle das estruturas hidráulicas no sistema do rio, e evitar o pânico. |
| Construções a prova de enchentes | Pequenas adaptações nas construções. | Reduzir as perdas em construções localizadas nas várzeas de inundação |
| Seguro contra enchentes | Proteção econômica contra inundações. | Diminuir os prejuízos individuais causados pelas inundações. |
| Sistemas hidrológicos | Histórico hidrológico da bacia e modelos que mostram o comportamento hidráulico e hidrológico do sistema do rio. | Fornecer subsídios para os estudos de comportamento da bacia, assim como previsão de cenários futuros. |

Fonte: Enomoto (2004).

Canholi (2015) comenta que as medidas não estruturais buscam disciplinar a ocupação territorial e também criar mecanismos para atenuar os efeitos causados pelas inundações. As medidas não estruturais mais adotadas são ações envolvendo a regulação do uso e ocupação do solo, a educação ambiental, o “seguro-enchente” e os sistemas de alerta e previsão de inundações.

Dentre as medidas de controle não estruturais, a que merece grande destaque são as ações de regulamentação do uso e ocupação do solo que, associadas ao planejamento urbano, têm a finalidade de controlar as áreas que já foram loteadas e evitar a ocupação de áreas de risco. Essas medidas permitem que as cidades tenham espaço para enchentes de seus leitos maiores ao utilizar essas medidas utilizam o zoneamento do espaço urbano para prevenir o contato do homem com áreas suscetíveis às inundações.

Logo, o aproveitamento de áreas vulneráveis deve ser uma das medidas cabíveis ao poder público para a contenção de assentamento em áreas de risco, podendo ser exemplificado como a construção de praças, de parques ou de áreas de lazer (BARBOSA, 2006).

Righetto, Mendiondo e Righetto (2007) afirmam que os seguros contra enchentes urbanas (inundações) são interessantes para reduzir o impacto negativo ocasionado por esses eventos nas despesas públicas, entretanto, foi observado que a percepção de importância desse instrumento de gestão de risco para a sociedade acaba decaindo com o passar do tempo à ocorrência das inundações, ainda que a sua necessidade não diminua.

Os sistemas de monitoramento e de alerta são importantes na redução de riscos e danos das inundações, sendo que sua utilização deve integrar os diversos atores da sociedade, a comunidade técnica-científica e autoridades, a cerca do tema (REIS, 2014). Segundo Priest, Parker e Tapsell (2011), o uso de alertas de inundação acoplado a uma combinação de medidas estruturais e não estruturais para gestão de risco traz grandes benefícios econômicos. Os autores explicam que na Europa foi implantado o sistema de monitoramento Flood Warning Response and Benefits Pathways (FWRBP), com o intuito de registrar as vazões da rede hidrográfica e fazer previsão de inundações, garantindo a proteção dos indivíduos e reduzindo os danos às propriedades durante os eventos de inundação.

3.2.2 Medidas Estruturais

As medidas estruturais são entendidas como obras físicas implantadas nas áreas urbanas com a finalidade de escoamento de águas pluviais e, com isso, impedir a ocorrência de inundações. Entretanto, essas medidas não têm a capacidade dar proteção completa ao espaço urbano, uma vez que eventos de inundação podem apresentar magnitudes diferentes, o que exigiria adoção de estruturas contra a maior inundação possível, inviabilizando técnica e economicamente as medidas propostas (BARBOSA, 2006).

Apesar disso, as medidas estruturais são indispensáveis para a adequação do espaço urbano de bacias hidrográficas, já que a solução de remanejamento da população das áreas de risco muitas das vezes é, normalmente, mais onerosa e complexa para o poder público.

De acordo com Silva et al. (2017), as medidas estruturais, por terem maior destaque no controle de enchentes, podem criar a falsa sensação de segurança, impelindo a ocupação de áreas mais próximas aos cursos d'água. Essa situação ocasiona o assentamento de habitações em área de risco, fazendo com que a população passe a estar sujeita a inundações de intensidades não previstas, o que demonstra a necessidade de combinar ações estruturais e não estruturais para o melhor controle de eventos de inundação.

Segundo Tucci (2003), as medidas estruturais podem ser extensivas ou intensivas. As medidas extensivas são aquelas que atuam na bacia, buscando alterar as relações entre precipitação pluviométrica e vazão de canais ou de cursos d'água, como a alteração da cobertura vegetal do solo, que reduz e retarda os picos de enchente e controla a erosão. Por sua vez, as medidas intensivas são as mais utilizadas, realizando modificações no rio ou canal e podem ser de três tipos: a) aceleram o escoamento: redução da rugosidade, aumento da capacidade de descarga dos rios e corte de meandros; b) retardam o escoamento: reservatórios e as bacias de amortecimento; e c) desvio do escoamento: caminhos de cheia.

As medidas estruturais são interessantes quando não se tem espaço ou a urbanização já foi consolidada, inviabilizando a aplicação do ordenamento territorial adequado. Esse conceito foi aplicado no Japão para evitar inundações ribeirinhas de origem marítima. Nesse país foram empregadas estruturas que não ocupassem áreas superficiais, por isso foi construído enormes reservatórios subterrâneos (Projeto G-Cans) para comportar o volume de inundação de 350.000 m³, e implantaram estações elevatórias com capacidade de recalque de 200 m³/s (ZAHED FILHO et al., 2012).

No Quadro 4 são apresentadas algumas medidas estruturais extensivas e intensivas utilizadas na prevenção de inundações em bacias urbanas.

Quadro 4 – Medidas estruturais para controle de inundações.

| Medida | Vantagem | Desvantagem | Aplicação |
|--|--|--|-----------------------------------|
| Extensiva | | | |
| Cobertura Vegetal | Redução de picos de cheia | Impraticável em grandes áreas | Pequenas bacias |
| Controle de Perda | Reduz assoreamento | | |
| Intensiva | | | |
| Dique e Polders | Alto grau de proteção | Danos significativos em falhas de operação | Grandes rios |
| Redução da Rugosidade por desobstrução | Aumento da vazão com pouco investimento | Efeito localizado | Pequenos rios |
| Corte de Meandro | Amplia a área protegida e acelera o escoamento | Impacto negativos em rios de fundo aluvionar | Área de inundação estreita |
| Reservatórios (bacia de amortecimento) | Controle à jusante | Localização difícil | Bacias intermediárias |
| Reservatório com comporta | Mais eficiente com o mesmo volume | Vulnerável a erros humanos | Projeto de uso múltiplo |
| Reservatório de Cheia | Operação com mínimo de perdas | Custo não compartilhado | Restrito ao controle de enchentes |
| Caminho de Cheia | Amortecimento de volume | Depende da topografia | Grandes bacias |
| Desvios | Reduz a vazão do canal principal | | Bacias médias e grandes |

Fonte: Tucci (2003).

As medidas estruturais intensivas podem ser entendidas como obras hidráulicas, diretamente relacionadas à mitigação de eventos de inundação. Contudo, o correto manejo das águas pluviais que escoam pelo espaço urbano é mais complexo, utilizando de outras estruturas para o direcionamento do volume escoado superficialmente até os rios ou canais.

No que tange o escoamento de águas pluviais, é possível compreender a necessidade de utilização de medidas estruturais intensivas associadas a outras estruturas de manejo de águas pluviais para garantir a saúde, a segurança, o bem-estar da sociedade e do meio ambiente. No ramo da engenharia, o arranjo combinado dessas estruturas foi definido como sistema de drenagem urbana.

3.3 SISTEMA DE DRENAGEM URBANA

Os sistemas de drenagem urbana são de grande importância para o desenvolvimento adequado e a manutenção das condições socioambientais e econômicas dos centros urbanos. Ribeiro e Rooke (2010) citam que os serviços de drenagem urbana são categorizados como preventivos, por serem utilizados para evitar ocorrências de inundações, de alagamentos, de erosões e de assoreamentos.

De acordo com Filho, Széliga e Enomoto (2000), o melhor sistema de drenagem é aquele que tem capacidade para direcionar o escoamento superficial sem produzir impactos no local e à jusante. Segundo Azevedo Netto e Fernández (2015), na concepção dos sistemas de drenagem são considerados condicionantes técnicos e econômicos, mas também associados aspectos urbanísticos e sociopolíticos que, muitas vezes, se sobressaem na escolha da concepção a ser adotada.

Porto et al. (2009) comentam que a drenagem urbana é definida como o conjunto de medidas estruturais destinadas a recolher e transportar as águas precipitadas o mais rápido possível até o corpo receptor. Entretanto, nas últimas décadas, o conceito de rápido escoamento se tornou defasado, sendo agregadas à drenagem urbana as estruturas de infiltração e de armazenagem como formas de recuperação do comportamento natural de escoamento na bacia.

Tucci (2003) afirma que os serviços de drenagem urbana podem ser organizados em quatro categorias de acordo com a ação empregada no escoamento das águas pluviais:

a) Infiltração e percolação: as estruturas utilizadas criam espaço para que a água pluvial tenha maior área para infiltração e percolação no solo, utilizando o armazenamento e o fluxo

subterrâneo para retardar o escoamento superficial, podendo ser utilizado também à nível de loteamento;

b) Armazenamento: as estruturas são utilizadas para reter, temporariamente ou não, parte do volume escoado superficialmente, reduzindo o seu pico e distribuindo a vazão no tempo, podendo ser destinado até outras estruturas de drenagem. Esses reservatórios podem ser de tamanho adequado para uso residencial (1-3 m³) ou de grande porte, como bacias de retenção (alguns milhares de m³);

c) Aumento da eficiência do escoamento: essas estruturas aumentam a velocidade de escoamento com auxílio de condutos ou de canais, drenando áreas inundadas mais rapidamente. Esse tipo de solução tende a transferir enchentes de uma área para outra, mas pode ser benéfico quando utilizado em conjunto com reservatórios de detenção;

d) Transferência e/ou barramento do volume de cheia: essas estruturas de controle, como dique e bombeamento, são utilizadas para impedir enchentes localizadas em áreas urbanas, normalmente empregadas quando não há espaço para amortecimento de inundações.

Para Canholi (2015), as categorias de infiltração e de armazenamento são de grande importância para o escoamento de águas pluviais, utilizadas para compor o sistema de drenagem urbana sustentável. Essas unidades são distribuídas no espaço urbano de maneira a tornar as condições hidrológicas da bacia mais próximas possível de seu estado natural, diminuindo a necessidade de condutos pluviais e estruturas maiores e mais onerosas à jusante.

O sistema de drenagem pode ser composto por diversas estruturas, que devem ser adotadas de acordo com estudos de concepção, tendo como princípio melhorar o atendimento da população. Desse modo, para nortear os serviços de drenagem deve ser utilizado instrumentos de planejamento.

Para Souza et al. (2010), a drenagem urbana, juntamente com os serviços de abastecimento de água, esgotamento sanitário e manejo de resíduos sólidos, busca controlar os fatores que afetam o meio ambiente, a saúde, a produtividade dos indivíduos e as atividades econômicas, sendo essencial no planejamento e no desenvolvimento do país e de seus municípios.

Nesse contexto, no Brasil, foi promulgada a Lei 11.445/2007³, definindo esses quatro serviços (abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza e manejo de resíduos sólidos

³ Na Lei 11.445/2007 é apresentada a obrigação dos gestores municipais de elaborarem seus instrumentos de planejamento, a fim de alcançar a universalização do atendimento da população. No Plano Nacional de Saneamento Básico do Brasil (2013), o levantamento de informações relacionadas ao sistema de drenagem

e manejo e drenagem das águas pluviais) como os componentes do saneamento básico. No caso da drenagem urbana, na Lei foi apresentada a seguinte definição em seu Art. 3º:

[...] drenagem e manejo das águas pluviais, limpeza e fiscalização preventiva das respectivas redes urbanas: conjunto de atividades, infraestruturas e instalações operacionais de drenagem urbana de águas pluviais, de transporte, detenção ou retenção para o amortecimento de vazões de cheias, tratamento e disposição final das águas pluviais drenadas nas áreas urbanas.

Nessa Lei ainda é previsto que os sistemas de drenagem e manejo de águas pluviais devem ser desenvolvidos de maneira eficaz, mas também eficientes, para que se possa garantir a saúde pública e a segurança da vida e do patrimônio público e privado em áreas urbanas com as melhores técnicas e menores custos de implantação e operação.

3.3.1 Estruturas de Microdrenagem e de Macrodrenagem

No meio urbano, os sistemas de drenagem e manejo de águas pluviais são tradicionalmente divididos em dois subsistemas, de microdrenagem e de macrodrenagem. Segundo Miguez, Veról e Rezende (2015), para o bom funcionamento do sistema de drenagem urbana, todos os componentes desses subsistemas devem estar trabalhando de forma integrada, harmônica e com eficiência. Na ausência dessas condições, observa-se o acúmulo indevido de águas pluviais em diversos pontos do espaço urbano, principalmente em pontos mais baixos da bacia, que recebem mais contribuições devido à topografia natural do terreno.

Esses autores ainda afirmam que a microdrenagem pode ser entendida como conjunto de condutos em nível de loteamento ou de rede primária urbana projetada para comportar precipitações de baixo a médio tempo de recorrência. Essas estruturas são implantadas localmente para a captação distribuída dos escoamentos superficiais gerados por áreas urbanizadas, destinadas a receber e conduzir as águas pluviais, vinda de construções, lotes, ruas, praças etc. Em área urbana, o caminho da rede de microdrenagem é definido pelo traçado do sistema viário.

De acordo com Azevedo Netto e Fernández (2015), a microdrenagem é composta por diversas estruturas e dispositivos hidráulicos para captação e escoamento das águas pluviais:

urbana ainda é deficitária, tendo apenas os números de registros de inundação, diferente dos outros setores, que apresentaram o déficit por número de habitantes, permitindo maior detalhamento das metas propostas. A falta de indicadores para avaliação demonstra a grande carência de informações nesse setor do saneamento básico, refletindo negativamente nas condições de gestão das águas urbanas. A dificuldade de avaliação dos serviços de drenagem urbana impede de se conhecer a real situação do setor e de obtenção de justificativas para novos investimentos, dificultando a disponibilidade de recursos para o seu desenvolvimento.

- a) Sarjetas e sarjetões: são calhas destinadas a coletar e direcionar o escoamento superficial até os pontos de captação, atuando como canais de seção triangular. São construídas nas margens das vias, entre o meio-fio e a pista de rolamento (sarjetas); ou para o cruzamento transversal das ruas, conectando as sarjetas (sarjetões);
- b) Bocas de lobo: são dispositivos localizados junto às sarjetas, quando essas não apresentam capacidade hidráulica de comportar o volume precipitado sem extravasamento para a calha viária, em áreas acidentadas ou pontos mais baixos, que não podem escoar as águas pluviais pela topografia do terreno. Vale destacar que a capacidade de engolimento dessas estruturas funciona como vertedores de parede espessa;
- c) Tubos de ligação: são os condutos que ligam as bocas de lobo aos poços de visita ou caixas de ligação;
- d) Caixa de ligação: são estruturas destinadas a receber o volume de águas pluviais captado pelas bocas de lobo em pontos intermediários da rede ou para evitar o excesso de ligações nos poços de visita. As caixas de ligação não são visitáveis, estando fechadas por alvenaria e cobertas pela pavimentação.
- e) Poço de visita: são câmaras visitáveis que apresentam a mesma funcionalidade das caixas de ligação (receber o volume de precipitação das bocas de lobo). Essa característica é fundamental para a inspeção e limpeza de galerias;
- f) Galeria: são condutos que coletam as águas pluviais dos poços de visita e escoam o volume precipitado até o sistema de macrodrenagem (SILVA, 2017).

Na Figura 4 são apresentados os principais componentes de sistema de microdrenagem observado em centros urbanos.

Figura 4 – Estruturas de microdrenagem em áreas urbanas.



Fonte: Uberaba (2011).

Por sua vez, a macrodrenagem é a parte do sistema que recebe o volume precipitado que foi coletado pela rede de microdrenagem, tendendo a apresentar estruturas com dimensões maiores e, normalmente, situadas no fundo dos vales. Por estar localizada nos pontos mais baixos, a área total da bacia, a sua ocupação e o tempo de escoamento apresenta grande impacto no dimensionamento dessas estruturas (PONCIANO, 2016).

Para São Paulo (2012), a macrodrenagem é formada por estruturas que conduzem e/ou armazenam grandes volumes de água, sendo a sua manutenção de grande importância, pois a ausência de cuidados com essas estruturas pode levar a ocorrências de inundações localizadas no espaço urbano.

De acordo com a Fundação Nacional de Saúde (1999), a finalidade dos dispositivos de macrodrenagem é melhorar as condições de escoamento, atenuando os problemas de inundação, erosão e assoreamento ao longo dos talwegues (fundo de vale). Segundo São Paulo (2012), as principais estruturas da macrodrenagem são as galerias de grandes dimensões; os canais naturais ou artificiais, com retificação e/ou ampliação; reservatórios (retenção ou detenção); equipamentos hidromecânicos (comporta) e eletromecânico (estação de bombeamento).

Os canais são as estruturas de macrodrenagem mais empregadas no espaço urbano pela sua facilidade de implementação, podendo utilizar o espaço fluvial (canal natural) ou não (canal artificial). Essas estruturas apresentam, normalmente, seção retangular ou trapezoidal, podendo ser construídas de três: revestidos (concreto), não revestidos (gabião ou terra) e gramados (TOMAZ, 2013). As grandes galerias pluviais apresentam a mesma funcionalidade

dos canais e também operam como condutos livres, podendo utilizar PEAD corrugado e o concreto armado em suas estruturas. Mas, diferente dos canais, são estruturas fechadas e assentadas no subterrâneo.

As bacias de acumulação tem a função de armazenar as águas pluviais advindas de outras estruturas, com objetivo de reduzir o volume e a velocidade de escoamento, podendo possibilitar também a infiltração, alterando o tempo de concentração e o pico de vazão da bacia (MACIEL, 2010). Além de diminuir os riscos de inundação, essas estruturas acabam por reduzir as dimensões de estruturas à jusante, podendo tornar menos oneroso o sistema projetado.

Em locais com contornos topográficos desfavoráveis e quando o volume precipitado é maior que a capacidade de escoamento pluvial de estruturas de drenagem é necessário estações de bombeamento, a fim de retirar o volume excedente. Os sistemas elevatórios de água pluvial recalcam grandes volumes, podem ser superiores a 30 m³/s, e, geralmente, para pequenas alturas manométricas (MACINTYRE, 2016).

As comportas hidráulicas são equipamentos eletromecânicos utilizados para impedir ou regular o fluxo água, podendo ser empregadas na geração de energia, passagem de embarcações e regularizar níveis. De acordo com a NBR 7.259/2001, as comportas hidráulicas são dispositivos mecânicos usados para controlar a vazão em qualquer conduto livre ou forçado e de cuja estrutura do conduto é independente para a sua continuidade física e operacional.

Na Figura 5 são apresentadas algumas estruturas de macrodrenagem comumente empregadas.

Figura 5 – Estruturas de macrodrenagem.

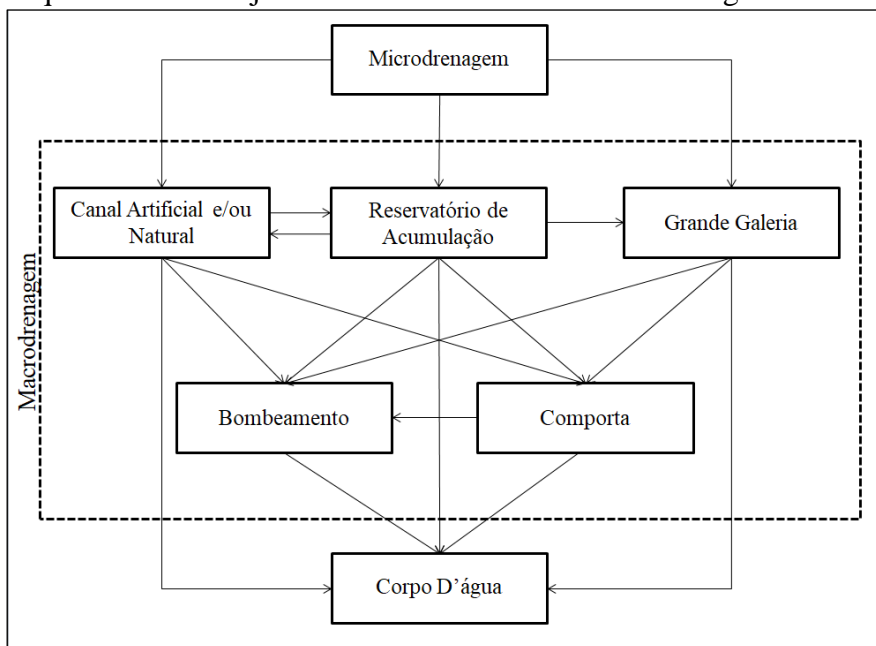


Fonte: REDE ... (2015); BARRA ... (2016); NEVES (2015); INFRAESTRUTURA ... (2016); CORSINI (2011); MAES (2015).

Como a macrodrenagem é responsável pelo escoamento final das águas pluviais no espaço urbano, suas estruturas são projetadas com maior segurança, comportando volume de precipitação pluviométrica de eventos com tempo de retorno de 25 a 100 anos (PARANÁ, 2002). Para Tucci (2012), os tempos de recorrência mais utilizados na avaliação de eventos de cheia são compreendidos entre 10 e 25 anos.

Diferente da microdrenagem, que necessita empregar diversos tipos de estruturas para compor seu subsistema até seu exutório, na macrodrenagem é utilizado número menor de unidades para chegar ao seu destino final (corpo d'água). No Esquema 2 são apresentados alguns dos arranjos de unidades de macrodrenagem mais frequentes em áreas urbanas.

Esquema 2 – Arranjos das unidades do sistema de drenagem urbana.



Para Miguez, Veról e Rezende (2015), o espaço urbano ainda pode sofrer com problemas de inundação mesmo com a implantação de sistemas de macrodrenagem isso pode ocorrer por falha na previsão do horizonte planejado, por falta de manutenção e/ou pela sobrecarga da infraestrutura, ocasionada pelo acréscimo de áreas impermeáveis que não foram consideradas no projeto.

Dessa forma, é preciso muito cuidado na estruturação de sistemas de drenagem eficiente, considerando aspectos pluviométricos, a ocupação e uso do solo e os dados fluviométricos, para garantir o controle das águas pluviais e fluviais no espaço urbano e impedir a ocorrência de inundações. Para isso, o inter-relacionamento de dados diversos é facilitado com a utilização de sistemas informatizados.

3.4 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS PARA AVALIAÇÃO DE INUNDAÇÕES EM SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA

A modelagem é importante quando o sistema real não possibilita obter as respostas dos problemas estudados de forma prática, podendo ser dividida em três elementos (entrada, processamento e saída). Para Krauskopf Neto (2005), os modelos buscam representar e avaliar problemas de:

a) identificação, quando se conhece o que ocasionou (entrada) e qual foi o resultado (saída), mas é desconhecido como o evento ocorreu (processamento);

b) previsão, quando é conhecido o que motivou determinado evento (entrada) e como ocorreu (processamento), mas não o seu resultado (saída); e

c) detecção, quando é conhecido o resultado (saída) e como ocorreu tal evento (processamento), mas não a sua origem (entrada).

Segundo Amaral (2014), a maioria dos softwares de modelagem é de base física, representada por equações diferenciais clássicas que não possuem soluções analíticas, incorporando rotinas computacionais para a solução das mesmas por métodos numéricos (diferenças finitas, elementos finitos ou elementos de contorno), acabando por incluir maior detalhamento da variabilidade espacial e temporal dos parâmetros, das variáveis de entrada/saída e de estado do modelo e, por consequência, possibilitando melhor caracterização dos problemas analisados.

Maksimovic (2001) afirma que no âmbito do saneamento, a modelagem pode auxiliar na investigação e avaliação das diversas condições de funcionamento do sistema de drenagem urbana, assim como analisar as respostas à nível de bacia, podendo fundamentar o planejamento e as medidas estratégicas, no controle da poluição e no gerenciamento operacional.

A utilização de sistemas computacionais permitiu o desenvolvimento de modelos matemáticos complexos para tratar com mais rigor os projetos de drenagem. Podendo ser largamente utilizada na avaliação de eventos de inundação, na qual a situação pode fugir das condições preestabelecidas em projeto, facilitando o mapeamento antecipado de seus efeitos negativos (MIGUEZ; VERÓL; REZENDE, 2015).

Decina e Brandão (2016) citam que a utilização de softwares para simulações possibilita criar cenários e utilizar eventos hidrológicos registrados para avaliar a eficácia de medidas de intervenção e ainda pode promover metodologias no sentido de auxiliar o poder público no processo de tomada de decisão.

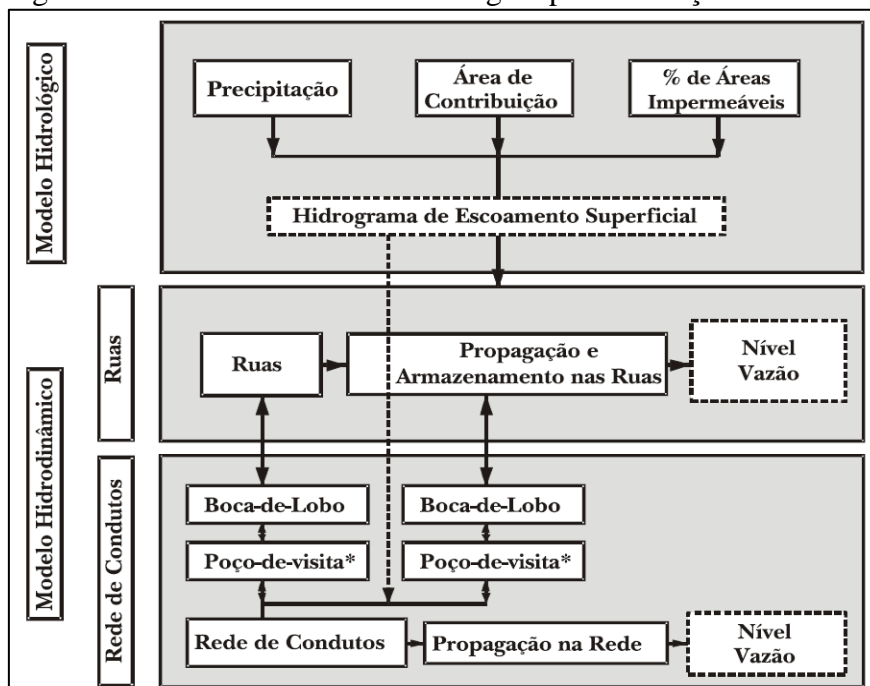
Para Cabral et al. (2009), os modelos computacionais permitem a avaliação da eficiência dos sistemas de drenagem, e podem ser empregados em três momentos: a) no planejamento, quando estão associadas à fase de concepção de projeto para estimar os custos e analisar a viabilidade técnica; b) no dimensionamento, quando são utilizadas para avaliar o porte das estruturas, como o diâmetro de galerias; e c) na operação, para fornecer análise detalhada e permitir a definição de regras de controle, como a abertura de comportas, acionamento de bombas e transporte de efluentes pluviais.

Segundo Costa (2013), as simulações computacionais podem ser utilizadas para melhorar a compreensão da interação entre as águas pluviais e o sistema de drenagem de bacias hidrográficas, utilizando de modelagem para explicitar os fenômenos existentes.

Correia, Ribeiro e Baptista (2015) observam que esses modelos são compostos por conjuntos de equações e mecanismos que representam o encaminhamento do escoamento superficial de precipitações pluviométricas até o seu exutório.

Meller e Paiva (2007) comentam que a modelagem dos sistemas de drenagem urbana inclui os dois componentes sequencialmente relacionados, os modelos hidrológico e hidráulico. Os modelos hidrológicos são utilizados para transformar precipitação pluviométrica em escoamento superficial (modelo chuva-vazão) com auxílio de algoritmos de perdas por armazenamento em depressões, por infiltração e interceptações. Enquanto os modelos hidráulicos são utilizados para representar a propagação do fluido, podendo verificar o escoamento de águas pluviais em redes de drenagem. Na Figura 6 é apresentado o modelo hidráulico-hidrológico empregado para estudos de sistemas de drenagem.

Figura 6 – Modelo hidráulico-hidrológico para avaliação da microdrenagem.



Fonte: Mark et al. (2001).

Existem diversos modelos computacionais desenvolvidos no Brasil e em outros países que utilizam equações e rotinas operacionais semelhantes para avaliação das condições de escoamento de bacias hidrográficas, e agregando dados da macrodrenagem, sendo a escolha

do modelo relacionada à disponibilidade de dados de entrada e à complexidade dos cenários avaliados.

Teméz (1978) cita como um dos primeiros modelos computacionais o CHM (Método do Hidrograma de Chicago), desenvolvido para estudar o escoamento de esgoto sanitário e pluvial, especificamente de Chicago, necessitando de grandes modificações para modelagem adequada de outras bacias. De acordo Collodel (2009), o ILLUDAS (Simulador de Drenagem de Illinois) é outro modelo antigo, produzido em 1962, com a capacidade de avaliação dos sistemas de drenagem, ao produzir hidrograma de galerias e de pontos de reunião desses condutos, possibilitando a verificação de sobrecargas na rede.

Segundo Possanti e Dornelles (2017), o modelo SWMM (*Storm Water Management Model*) foi desenvolvido em 1971 e é outra ferramenta computacional que traz grande auxílio ao planejamento e à gestão dos sistemas de drenagem, possibilitando simulações quantitativas e qualitativas do escoamento superficial de águas pluviais, principalmente em áreas urbanas. Zaffani (2012) também comenta a capacidade de modelagem desse software:

É um modelo amplamente aplicado em áreas urbanas, pois permite a simulação da micro e da macrodrenagem. Ao contrário dos outros modelos para área urbana que são concentrados, o SWMM usa abordagem distribuída para o cálculo detalhado das vazões em cada ponto da rede de drenagem, integrando a modelagem da micro e macrodrenagem.

O modelo STORM (*Storage, Treatment, Overflow Runoff Modelling*), desenvolvido em 1973, também pode ser aplicado no planejamento, por utilizar rotinas hidrológicas e de qualidade simplificadas para avaliação de medidas compensatórias e de tratamento de águas pluviais, podendo ser combinada à modelagem do escoamento de coletores de esgoto sanitário (ZAFFANI, 2012). Contudo, Malta (2009) destaca que esse modelo requer diversas informações para simular o escoamento superficial de maneira apropriada, podendo tornar inviável a sua aplicação em bacia de grande porte.

De acordo com Paz, Collischonn e Tucci (2006), o modelo nacional que merece destaque é o IPH⁴, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisa Hidráulicas em 1981, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, destinado à modelagem de bacias urbanas e rurais, realizando o balanço hídrico e propagação do escoamento com diferentes equações. Todavia, Neves, Villanueva e Tucci (2001) afirmam que esse modelo ainda apresenta

⁴ Segundo Lisboa et al. (2017), foi atualizado um dos modelos da série IPH, para simulações hidrológicas em grande escala, intitulado de MGB-IPH. A sua calibração foi realizada com dados de Itaipu, possibilitando modelagens satisfatórias de vazões em usinas hidrelétricas.

limitações, não representando de forma adequada a entrada do hidrograma nos condutos pluviais, gerando altos picos de vazão e instabilidade numérica decorrentes de condicionantes hidráulicas.

Segundo Park e Jang (2015), o modelo MOUSE (Modelling of Urban Sewer), elaborado pelo Instituto de Hidráulica da Dinamarca em 1985, permite verificar o escoamento em bacias, a variação da lâmina d'água e o carreamento de sedimentos e de poluentes em canais abertos e galerias, propiciando a verificação de deficiências nas estruturas de drenagem e de áreas acometidas por inundações, quando associada às ferramentas GIS.

Na Universidade de São Paulo foi desenvolvido o modelo ABC, também, em 1985, utilizado para simular as condições de escoamento entre reservatórios e bacias, com auxílio de apenas quatro componentes (nó, reservatório, paralelo e bacia). O número diminuto de elementos constituintes o torna prático para bacias com poucas informações, e, contudo, restringe a capacidade de simulação. Além disso, esse modelo apresenta outra limitação, quanto à obtenção dos produtos da simulação, visto que é recomendado que o intervalo de discretização dos cálculos fosse da ordem de 1/10 do tempo de concentração da bacia estudada para melhorar a representatividade dos resultados (LURDANI, 2013).

De acordo com USACE (2016), o modelo HEC-RAS programado pela *Army Corps of Engineers* dos Estados Unidos em 1995, permite simulações hidráulicas das condições de escoamento permanentes e não-permanentes, possibilitando a identificação de áreas de risco em eventos de cheia. Martins (2015) utilizou esse software para avaliar os casos de inundações no canal de macrodrenagem da bacia do Tucunduba, obtendo resultados satisfatórios para propor medidas de controle.

Na Universidade Federal do Rio de Janeiro foi criado o modelo denominado de MODCEL em 2001, utilizando do conceito de células de armazenamento, para simular a relação chuva-vazão em diferentes áreas e reservatórios de bacias hidrográficas, bem como em galerias e canais, possibilitando a avaliação do escoamento em enchentes urbanas (LOU, 2010).

Alguns desses softwares apresentaram atualizações no decorrer dos anos, viabilizando o desenvolvimento de simulações mais complexas e representativas da drenagem de águas pluviais. No Quadro 5 é apresentada a comparação de alguns modelos utilizados na avaliação dos sistemas drenagem urbana.

Quadro 5 – Característica de modelos computacionais utilizados na drenagem urbana.

| Capacidade de Simulação | Modelo | | | | |
|--|--------|---------|-------|-----|------|
| | CHM | ILLUDAS | STORM | IPH | SWMM |
| Múltiplas sub-bacias | SIM | SIM | - | SIM | SIM |
| Entrada de diversos hidrograma | SIM | - | - | SIM | SIM |
| Evaporação | SIM | - | SIM | - | SIM |
| Escoamento de base | SIM | SIM | - | SIM | SIM |
| Escoamento de superfície de áreas impermeáveis | SIM | SIM | SIM | SIM | SIM |
| Escoamento de superfície de áreas permeáveis | SIM | SIM | SIM | SIM | SIM |
| Áreas diretamente conectadas | - | SIM | - | - | SIM |
| Balanco hídrico entre eventos | SIM | - | SIM | SIM | SIM |
| Escoamento em sarjetas | SIM | SIM | SIM | - | SIM |
| Escoamento em galerias | SIM | SIM | SIM | SIM | SIM |
| Múltiplas seções transversais | - | - | - | - | SIM |
| Escoamento sob pressão | - | - | - | - | SIM |
| Derivação | - | SIM | SIM | SIM | SIM |
| Estação elevatória | - | SIM | - | - | SIM |
| Armazenamento | - | SIM | SIM | SIM | SIM |
| Cálculo de nível | - | SIM | - | SIM | SIM |
| Cálculo de velocidade | - | SIM | - | SIM | SIM |
| Simulação contínua | - | - | SIM | SIM | SIM |
| Escolha do passo de tempo | SIM | SIM | - | SIM | SIM |
| Cálculo de projetos | SIM | SIM | - | SIM | SIM |

Fonte: Collodel (2009). “-” – não permite simulação.

A partir do detalhamento das funcionalidades dos modelos, é possível identificar que o SWMM contém grande versatilidade, apresentando o maior número de características necessárias às simulações. Esse aspecto do software é muito relevante quando se estuda bacias urbanas, visto que possibilita a interação de fatores hidrometeorológicos, de superfícies de escoamento distintas e de medidas de controle na modelagem do espaço urbanizado.

3.4.1 Storm Water Management Model (SWMM) – Estado da Arte

O software SWMM foi desenvolvido pela *United States Environmental Protection Agency* (USEPA) no início da década de 70, para possibilitar a representação do processo dinâmico de chuva-vazão em bacias hidrográficas, considerando eventos chuvosos pontuais, intermitentes e contínuos (RONQUIM, 2014). Segundo Rossman (2015), esse software apresentou diversas atualizações no decorrer dos anos, melhorando a sua capacidade de simulação. Atualmente, encontra-se na versão 5.1.

Gomes (2014) comenta que esse modelo é caracterizado como software livre por disponibilizar seu código fonte aos usuários, possibilitando o seu acoplamento em outros

programas computacionais, como o SIG e o CAD, a criação de novos modelos e de ferramentas para melhorar a apresentação dos resultados. O SWMM é um dos softwares mais utilizados na representação de sistemas de drenagem e manejo de águas pluviais, por apresentar grande detalhamento e abrangência de modelagem dos deflúvios de áreas urbanas.

Existem vários programas comerciais associando SWMM ao SIG, como InfoSWMM, Mike Urban, SewerGEMS, XP-SWMM, SOBEK e PCSWMM. Esses softwares têm a capacidade de agregar o modelo digital do terreno no formato *shapefile* com os dados de saída de modelos hidrológicos, permitindo a delimitação de áreas de risco de inundação em bacias hidrográficas, podendo ser de grande relevância para o planejamento municipal (RIBEIRO; CARDOSO, 2015).

Castro, Barbosa e Bezerra (2017) observam que o software UFC8 utiliza o SWMM para o dimensionamento da rede de drenagem urbana em plataforma CAD. Além disso, o programa transmite o traçado e os dados da rede automaticamente ao SWMM para demonstrar a condições de funcionamento das estruturas hidráulicas propostas, evitando a necessidade de inserir os dados de entrada e facilitando a modelagem e o dimensionamento.

No SWMM ainda é permitido, de maneira prática, a calibração para buscar a diminuição de erros percentuais de vazão de pico ou de volume simulados, melhorando qualidade dos resultados obtidos (ROSA, 2017). Pela versatilidade de modelagem, esse modelo vem sendo utilizado em inúmeras pesquisas relacionadas ao dimensionamento do sistema de drenagem urbana para controle de inundações e alagamentos, avaliação de uso de sistemas de retenção de cheias, de proteção da qualidade das águas, mapeamento de áreas inundáveis e análise do efeito de medidas compensatórias (CABRAL et al., 2009).

Tsai et al. (2017) aplicaram o modelo SWMM na bacia rural Peishi (Taiwan), confirmando a confiabilidade do modelo para esse tipo de bacia. Entretanto, ressaltaram que o software pode subestimar o fluxo diário e a concentração de poluentes de eventos chuvosos com baixa intensidade em áreas de elevada permeabilidade.

Babaei, Ghazavi e Erfanian (2018) estudaram inundações em bacia hidrográfica urbana da cidade de Urmia (Irã), com o SWMM foi verificado que o sistema de drenagem não apresentava capacidade de escoamento mesmo para eventos de precipitação pluviométrica com pequeno tempo de retorno (2, 5 e 10 anos) e identificado quais as sub-bacias eram mais suscetíveis a ocorrência de inundação durante esses eventos.

Santos, Ruffino e Barros Filho (2017) simularam a bacia urbana do Riacho do Prado (Campina Grande/PB) no SWMM, para avaliar o impacto do aumento de áreas urbanizadas nas infraestruturas de drenagem, com o resultado da pesquisa foi constatado que houve crescimento no número de casos de alagamento em diversos pontos da bacia quando a impermeabilização do solo passou de 26,5% para 57%.

Silva et al. (2017b) utilizaram o SWMM para analisar inundações em canal de drenagem da bacia da Estrada Nova (Belém/PA), comparando a ocorrência desses eventos nas condições atuais e de projeto do canal e com bacia de acumulação. A partir das simulações foi verificado que o extravasamento do canal ocorre mesmo com o reservatório, demonstrando ser uma ferramenta importante no estudo de concepção dos sistemas de drenagem.

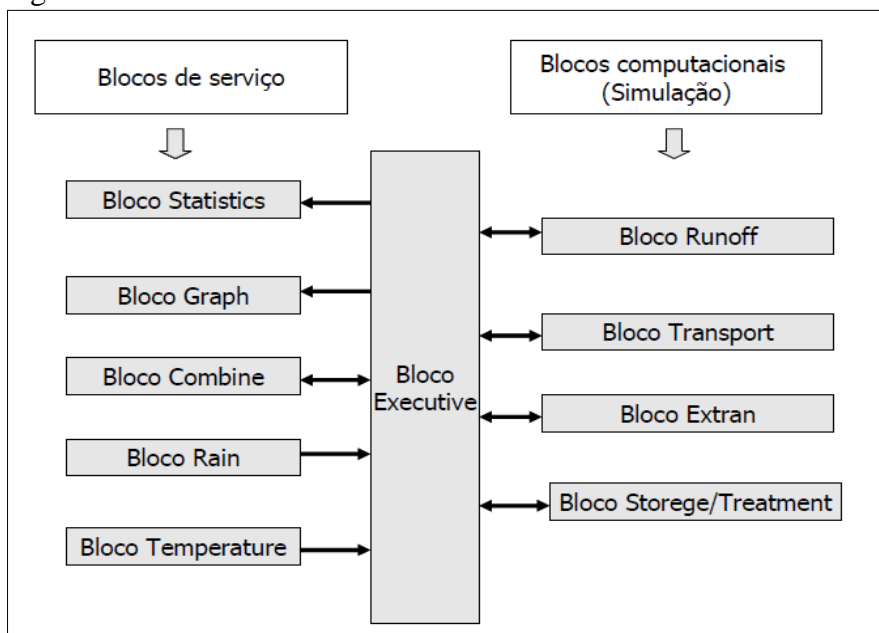
Enquanto, Vinagre et al. (2017) aplicou a modelagem do SWMM na bacia do Una (Belém/PA), para verificar o comportamento nível de água nos canais de drenagem durante eventos de precipitação de grande intensidade, que ao somarem com a elevação da maré, causam grandes problemas de inundação, tendo como principal dado de saída os trechos dos canais que sofrem com problemas de extravasamento.

3.4.2 Estrutura Computacional do SWMM

De acordo com Ferreira (2014), o SWMM foi elaborado com diversos módulos (blocos), permitindo simulações estáticas e dinâmicas de aspectos hidrológicos, como precipitação, degelo, escoamento de base e superficial; de estruturas hidráulicas, representando o escoamento em sarjetas, reservatórios, galerias e canais de diversas dimensões; e de parâmetros de qualidade da água.

Lima (2011) afirma que a estrutura do SWMM é composta por nove blocos, sendo cinco de serviço (*Statistics, Graph, Combine, Rain, Temperature*) e quatro computacionais (*Runoff, Transport, Extran e Storage/Treatment*), contando também com o módulo que relaciona todos os anteriores, definido como *Executive*, conforme pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 – Estrutura de módulos constituintes do SWMM



Fonte: Garcia (2005).

Para Silva (2016), os módulos de serviço são os responsáveis pela organização de todos os dados de entrada e saída do programa. O *combine* permite a interação de arquivos na interface do modelo; o *rain* e o *temperature* são utilizados para avaliar os dados de entrada de precipitação pluviométrica e temperatura, respectivamente, o *statistics* desenvolve análises estatísticas dos resultados obtidos; e o *graph* é destinado à plotagem e apresentação gráfica dos dados de saída.

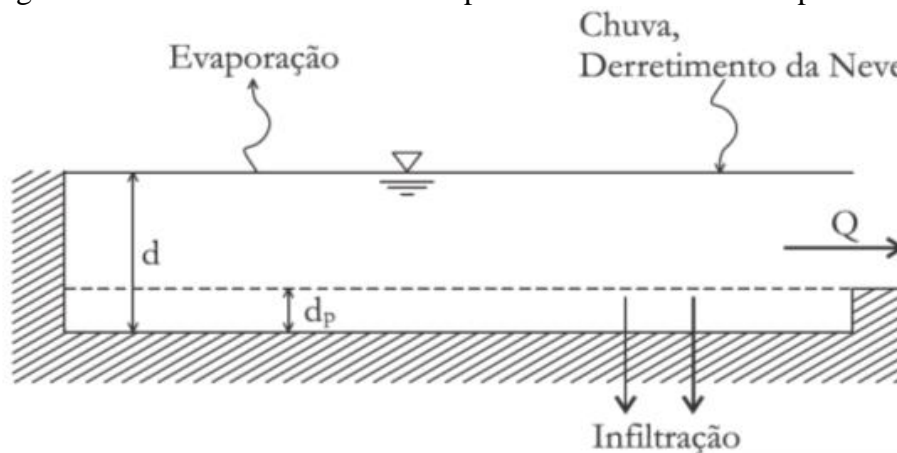
Os blocos computacionais, auxiliados pelos blocos de serviço, são encarregados dos principais cálculos realizados pelo SWMM. De acordo com Amaral (2014), o *Runoff* permite a transformação de chuva-vazão para modelagem do escoamento superficial e subterrâneo, com base em dados de precipitação; o *Transport* é responsável pela propagação do escoamento na rede de drenagem, utilizando a equação de onda cinemática; o *Extran* também é utilizado para simular o escoamento, entretanto, utilizando a equação hidrodinâmica completa, permitindo modelagens mais complexas; e o *Storage/Treatment* é responsável pelos efeitos de controle de fluxo por armazenamento e de tratamento relacionada à qualidade da água.

No SWMM, a associação desses blocos é utilizada na análise de diversos problemas relacionados às inundações e aos sistemas de drenagem urbana. Os processos simulados que merecem maior destaque são o escoamento superficial, a infiltração e a propagação do escoamento.

3.4.2.1 Escoamento Superficial

Segundo Silva (2016), as áreas de drenagem podem ser seccionadas em duas subáreas, permeáveis e impermeáveis. Para ocorrer a simulação escoamento superficial, essas subáreas são interpretadas como reservatórios não lineares, no qual a entrada da vazão é resultante dos dados hidrológicos e de áreas à montante. Nesses modelos, a saída pode ocorrer por infiltração, evaporação e escoamento superficial, este último acontece quando é superada a capacidade de armazenamento em depressões, conforme a Figura 8.

Figura 8 – Sistema de escoamento superficial em modelos computacionais.



Fonte: Gomes et al (2012).

Como caracteriza Sales (2011), o escoamento superficial pode ser entendido basicamente como a diferença entre a precipitação total e a precipitação efetiva de determinado evento chuvoso. Segundo Bastos (2007), no SWMM, o equacionamento do escoamento superficial é resolvido pelo processo iterativo de Newton-Raphson, utilizado para buscar a solução da expressão de Manning, combinada à equação da continuidade, conforme a Equação 8:

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i^* - \frac{W}{A \times n} (d - d_p)^{5/3} \times \sqrt{S} \quad (8)$$

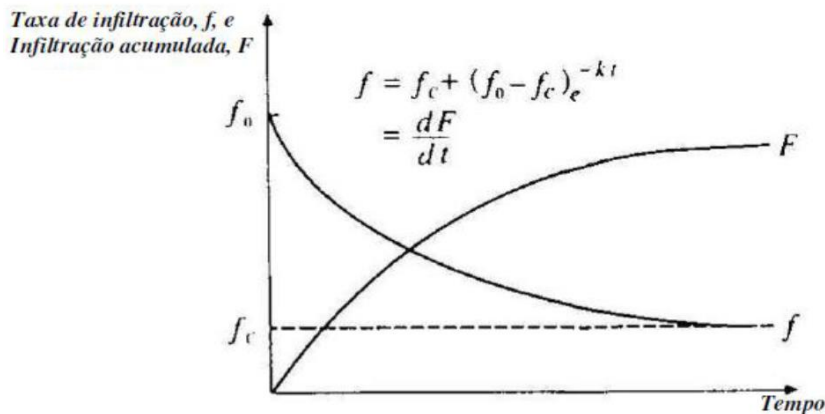
Onde “W” é a largura equivalente da bacia, “A” é a área da bacia, “n” é o coeficiente de rugosidade de Manning, “d” é a altura lâmina da água no reservatório, “d_p” é a altura da lâmina da água armazenada no reservatório, “S” é a declividade da bacia, “t” é o tempo e “i” é a precipitação efetiva.

3.4.2.2 Infiltração

O processo de infiltração está intrinsicamente relacionado ao escoamento superficial, visto que é uma das condições para que ocorra o deslocamento da massa líquida sobre os solos. Segundo Peixoto et al. (2017), a infiltração é entendida como a passagem de água sobre a superfície para o seu interior. No SWMM, para representar esse fenômeno, são apresentados três métodos de cálculo (Horton, Green-Ampt e Soil Conservation Service).

O Modelo de Horton consiste em retratar a taxa de infiltração de superfícies impermeáveis em eventos pluviométricos. De acordo com Lima (2011), a taxa de infiltração (f) tende a diminuir na ocorrência de eventos chuvosos, a partir de valor inicial máximo, até alcançar valor mínimo constante, caracterizando condições de equilíbrio (Figura 9).

Figura 9 – Taxa de infiltração de acordo com o Modelo de Horton.

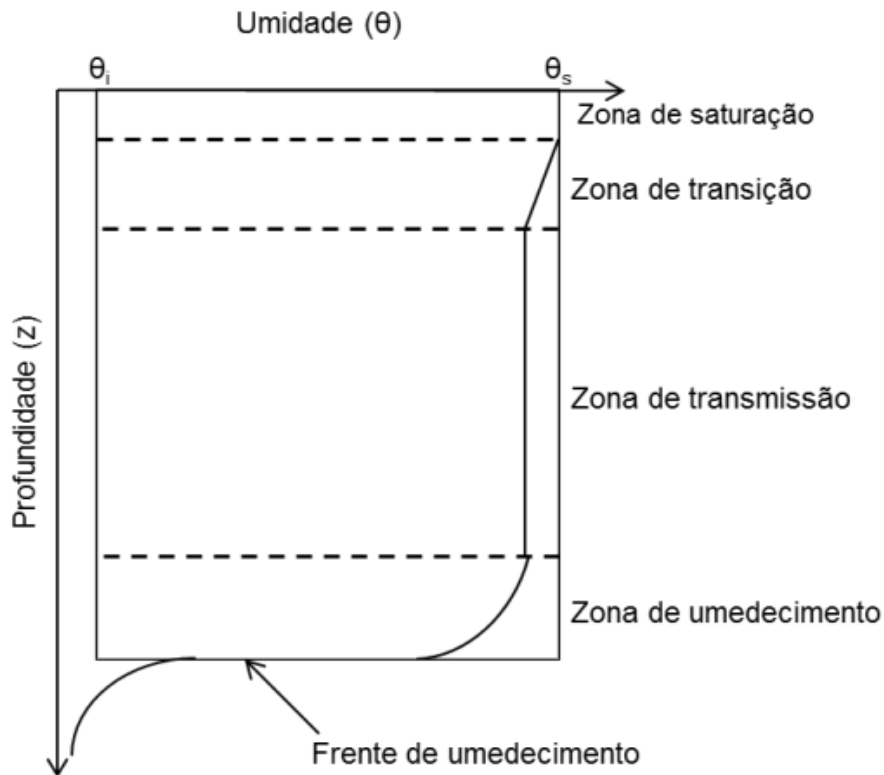


Fonte: Frazão (2011).

Frazão (2011) ressalta a importância de ensaios experimentais para a obtenção dos valores de f_0 e f_c , que são as taxas de infiltração inicial e no equilíbrio, e de k , que é a constante característica da superfície permeável, a fim de melhorar a acuracidade dos valores utilizados no cálculo do volume infiltrado.

O Método de Green-Ampt é baseado na teoria do escoamento em meios porosos saturados. Segundo Oliveira (2015), nesse método é representado o escoamento para o interior da camada superficial, pela formação de faixas uniformes completamente saturadas que aprofundam na camada permeável (modelo pistão), gerando fluxo contínuo até ocupar completamente os espaços vazios. Na Figura 10 são apresentadas as zonas formadas no solo pela infiltração, considerando o método de Green-Ampt.

Figura 10 – Perfil de Umedecimento do solo durante a infiltração (Green-Ampt).



Fonte: Oliveira (2015).

Para Zuquette e Palma (2006), as principais limitações desse método estão em considerar que a infiltração ocorre em superfícies homogêneas e o movimento da água em pistão, fazendo com que o valor da umidade mude drasticamente entre as zonas de umedecimento e de saturação. De acordo com Rossman (2015), no SWMM são necessárias três variáveis para a aplicação desse método de infiltração (déficit inicial de umidade, condutividade hidráulica do solo e sucção capilar).

O método de infiltração Soil Conservation Service (SCS) é largamente utilizado na determinação do volume infiltrado, para obter os valores da precipitação efetiva, por requerer a menor quantidade de dados de entrada, relacionando apenas o tipo, o uso do solo e o período de recuperação da umidade natural do solo (MAHMOUD, 2014). No Quadro 6 é apresentada a classificação dos solos no método SCS, vale comentar que a sua escolha altera os valores de permeabilidade para a mesma superfície.

Quadro 6 – Classe hidrológica dos solos.

| Grupo | Características | Condutividade hidráulica | Tipo de Solo |
|-------|--|--------------------------|--|
| - | - | pol/h | - |
| A | Escoamento superficial potencialmente baixo. Solos com taxa de infiltração alta, mesmo quando completamente saturados e principalmente profundos; areia drenada excessivamente ou cascalhos. | $\geq 0,45$ | Latossolo amarelo, latossolo vermelho amarelo, latossolo vermelho |
| B | Solo com taxa de infiltração moderada, quando completamente saturados e, principalmente, com profundidade moderada a profundo; solo moderadamente drenados a bem drenados; solos com textura moderadamente fina a moderadamente grosseira. | 0,30 – 0,15 | Latossolo amarelo e latossolo vermelho amarelo; latossolo bruno; nitosso vermelho; neossolo quartizarênico; argissolo vermelho ou vermelho amarelo. |
| C | Solos com taxa de infiltração lenta quando completamente saturados e consistindo, principalmente, de solos com camada que impede o movimento descendente de água ou solos com textura moderadamente fina a textura fina. | 0,15– 0,05 | Argissolo pouco profundo, argissolo vermelho, argissolo vermelho amarelo e argissolo amarelo; cambissolo de textura média e cambissolo húmico, espodossolo ferrocárbico; neossolo flúvico. |
| D | Potencial de escoamento superficial alto. Solo com taxa de infiltração muito lenta, quando completamente saturados e consistindo, principalmente, de solos argilosos com alto potencial de expansão; solo com lençol freático permanente alto; solo com camada de argila na, ou próxima à, superfície, e solos rasos sobre material quase impermeável. | 0,05 – 0,00 | Neossolo litólico; organossolo; gleissolo; chernossolo; planossolo; vertissolo; alissolo; luvisolo; plitossolo; solos de mangue; afloramento de rocha; cambissolos; argissolo vermelho amarelo e argissolo amarelo, ambos pouco profundos e associados à mudança textural abrupta. |

Fonte: Gomes et al. (2012); Sartori, Neto e Genovez. (2005).

Segundo Sales (2011), no método SCS, a capacidade de infiltração da superfície de escoamento é representada pela *Curve Number* (CN). Para Fernandes et al. (2017), o CN é entendido como parâmetro hidrológico que expressa numericamente as características de permeabilidade do solo ou da superfície de escoamento, variando de 1 até 100, quanto maior o valor do CN, menor a taxa de infiltração da superfície (camadas menos permeável). Na Tabela 1 são apresentados os valores de CN de acordo com o tipo solo e o seu uso e/ou ocupação para bacias urbanas.

Tabela 1 – Valores de CN para diferentes superfícies, por grupo hidrológico.

| Uso e/ou ocupação do solo | | Grupo | | | |
|---|---------------------|-------|----|----|----|
| | | A | B | C | D |
| Espaços Abertos, Relvados, Parques, Campos de Golf, Cemitérios, em boas condições | | | | | |
| Com Relva em mais de 75% da área | | 39 | 61 | 74 | 80 |
| Com Relva de 50 a 75% da área | | 49 | 69 | 79 | 84 |
| Zonas Comerciais e de Escritórios | | 89 | 92 | 94 | 95 |
| Zonas Industriais | | 81 | 88 | 91 | 93 |
| Zonas Residenciais | | | | | |
| Lotes (m ²) | % média impermeável | | | | |
| <500 | 65 | 77 | 85 | 90 | 92 |
| 1000 | 38 | 61 | 75 | 83 | 87 |
| 1300 | 30 | 57 | 72 | 81 | 86 |
| 2000 | 25 | 54 | 70 | 80 | 85 |
| 4000 | 20 | 51 | 68 | 79 | 84 |
| Estacionamentos, Telhados, Viadutos, etc. | | 98 | 98 | 98 | 98 |
| Arruamentos e Estradas | | | | | |
| Asfaltadas e com drenagem de águas pluviais | | 98 | 98 | 98 | 98 |
| Paralelepípedos | | 76 | 85 | 89 | 91 |
| Terra | | 72 | 82 | 87 | 89 |

Fonte: Tucci (2013).

Segundo Vendrame e Lopes (2005), as bacias de drenagem apresentam diversos tipos de solo e superfícies, nesses casos, o valor de CN deve ser calculado a partir da média ponderada de suas respectivas áreas. Araújo Júnior (2016) explica ainda que a falta de informações relacionada às características do solo podem levar a escolha de valores errôneos de CN. Desse modo, a divisão das bacias em subáreas e o levantamento de aspectos do solo devem ser realizados para melhorar a representatividade do volume infiltrado na bacia, calculado pelo método SCS.

3.4.2.3 Propagação do escoamento nas estruturas de drenagem urbana

A propagação do escoamento pode ser classificada em modelos de armazenamento, que considera apenas a acumulação de águas pluviais na atenuação e deslocamento de ondas de cheia, sem considerar a força de atrito levada em consideração pela equação do momento, e em modelo hidrodinâmico, podendo ser completas ou simplificadas, desenvolvida pela equação diferencial de Saint-Venant, apresentada na Equação 9 (SHINMA, 2011).

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

Onde “A” é a área molhada (m²), “t” é o tempo (s), “Q” é a vazão (m³/s), “x” é a distância no sentido longitudinal do rio ou canal (m) e “q” é a contribuição lateral. Na Equação 2 é apresentado a discretização de (10).

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gA(S_f - S_0) = 0 \quad (10)$$

| | | | |
|---------------------------------|--------------------------------------|---------------------|--|
| termo de aceleração local | termo de aceleração convectiva | termo de pressão | termo de força de atrito e gravitacional |
|---------------------------------|--------------------------------------|---------------------|--|

Onde “g” é a aceleração da gravidade (m²/s), “y” é a profundidade da água, “S_f” é a inclinação da linha de energia (m/m) e “S₀” é a inclinação longitudinal do fundo (m/m).

No SWMM é possível utilizar as três formas da equação de Saint-Venant (onda difusa, onda cinemática e onda dinâmica). Segundo Garcia (2005), os modelos que utilizam equações de Saint-Venant simplificadas são definidos como onda cinemática, quando desconsideram os termos de pressão e de inércia, e como onda difusa, quando apenas o termo de inércia é omitido da equação da conservação de massa (continuidade), normalmente utilizada em situações em que a velocidade de escoamento não possui grande variação. Contudo, essas condições impedem a modelagem de redes de condutos sob condições críticas, como inversão de fluxo, efeitos de jusante na mudança de regime e escoamento sob pressão.

De acordo com Negrão (2015), para responder mais adequadamente a esses fenômenos, é empregado a equação de Saint-Venant em sua forma completa nas simulações hidrodinâmicas, definido como modelo de onda dinâmica. Fonseca (2008) afirma que os modelos que utilizam a equação completa de Saint-Venant possibilitam a avaliação da passagem da onda de cheia, necessário quando o regime de escoamento é não permanente.

Segundo Akan (2006), esse comportamento é verificado em estruturas de macrodrenagem durante eventos chuvosos, que tem a vazão variando em função do tempo, alterando a propagação de águas pluviais significativamente e de forma acelerada. Segundo Vinagre et al. (2017), para tornar as simulações no SWMM mais representativas é interessante simular os efeitos pluviométricos em conjunto com as variações de maré do exutório.

Desse modo, é possível verificar que o SWMM apresenta boa capacidade de simulação para bacias urbanas com diversas características, contendo mecanismos diferentes para modelar o escoamento superficial, a infiltração e a propagação de onda. Demonstrando ser uma ferramenta computacional apropriada para o estudo de medidas de controle de inundação em bacias de drenagem, que sofre com influencia de maré.

4 METODOLOGIA

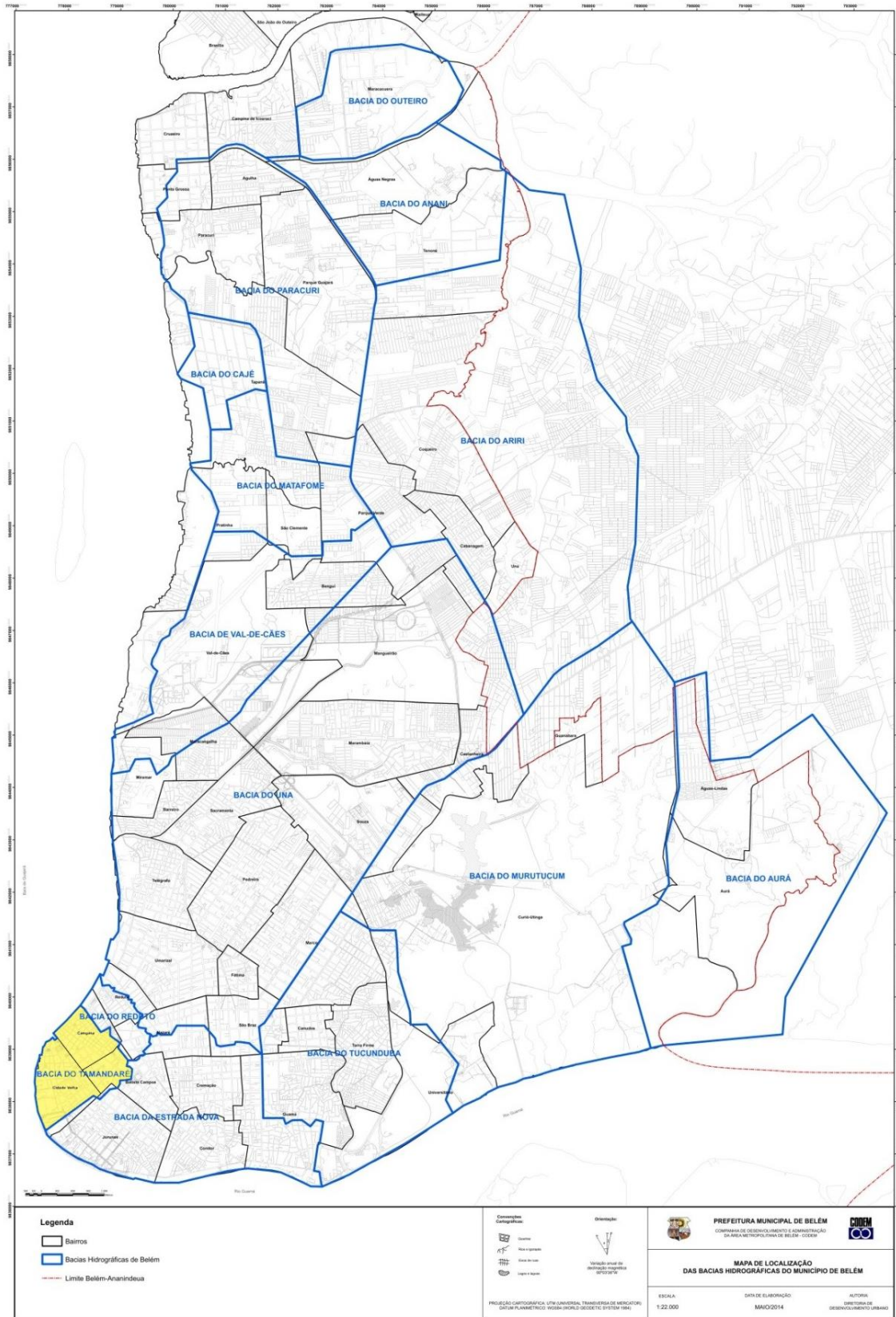
A base metodológica proposta é a de pesquisa bibliográfica e de levantamento de informações em campo, para a parametrização dos dados necessários à modelagem hidrodinâmica da massa líquida de água em escoamento no canal de drenagem da Bacia Hidrográfica da Tamandaré (Bacia da Tamandaré), avaliando a eficácia de medida estrutural no combate de inundações.

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A Bacia Hidrográfica da Tamandaré é uma das 14 bacias (Reduto, Una, Estrada Nova, Tucunduba, Aurá, Murutucum, Val-de-Cães, Matafome, Ariri, Cajé, Paracuri, Anani e Outeiro) que compõem a parte continental do município de Belém, conforme a divisão topográfica-administrativa definida pela CODEM (BELÉM, 2014).

Segundo a Secretaria de Saneamento de Saneamento (SESAN) de Belém (apud TAVARES, 2017), a partir dessa segmentação de bacias, a Tamandaré apresenta área de 2,31 km², sendo a terceira menor do município, alcançando seus limites na fronteira com as bacias do Reduto e da Estrada Nova. No Mapa 2 é apresentado limites das bacias hidrográficas de Belém.

Mapa 2 – Divisão das bacias hidrográficas do município de Belém.

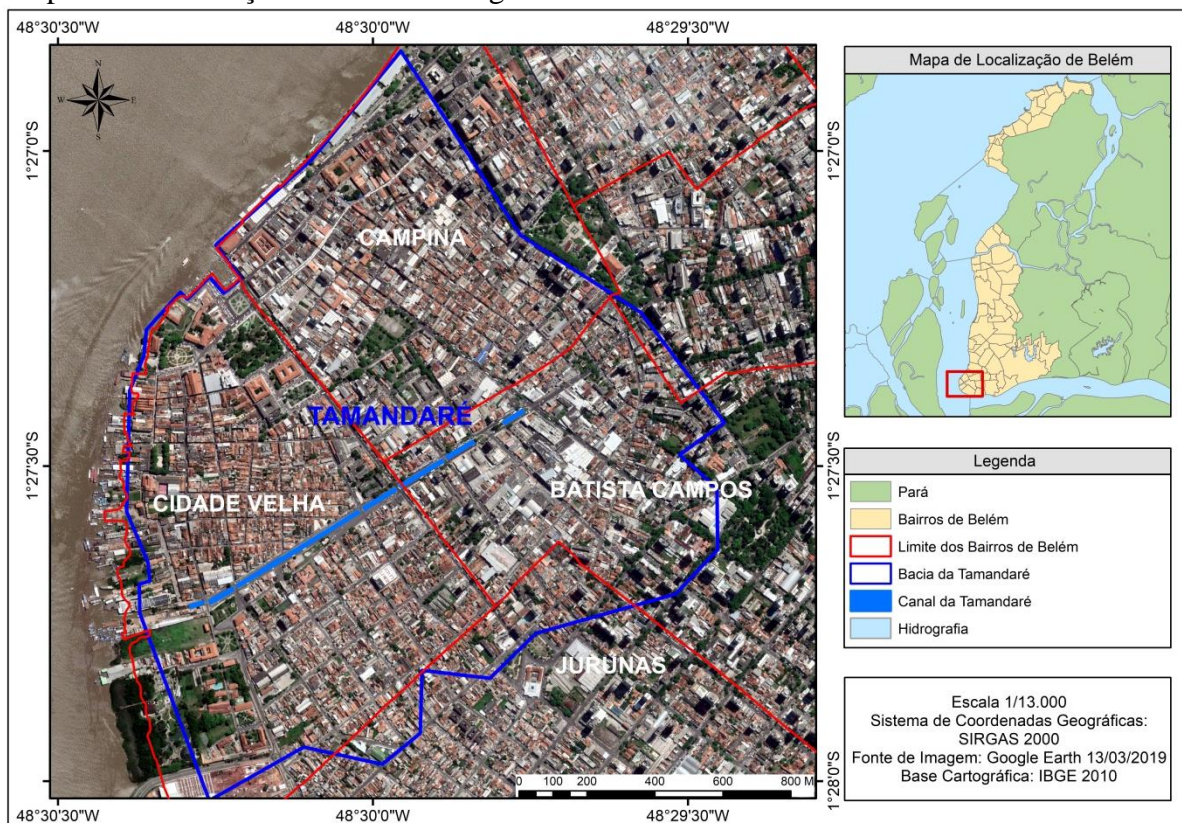


Fonte: Belém (2016).

No que tange o escoamento superficial em bacias, Garcia et al. (2015) comentam que a topografia define o encaminhamento e o volume de água precipitada até fundos de vale, estando intimamente relacionada à possibilidade de acúmulo indevido de águas pluviais em áreas urbanas. Por isso, a divisão de bacias hidrográficas da prefeitura de Belém não apresenta boas condições para o estudo do escoamento superficial de águas pluviais, visto que nessa delimitação foram incorporadas bacias menores em outras, a fim de facilitar o gerenciamento da drenagem urbana do município.

A bacia da Tamandaré é localizada na porção sudoeste do município de Belém/PA, formada por parte de quatro bairros da zona central (Batista Campos, Cidade Velha, Campina e Jurunas). Pantoja et al. (2014) afirmam que o seu processo de urbanização já foi consolidado na bacia estudada, apresentando ocupação de 94,57% de sua área, com predominância de área comercial e residencial. No Mapa 3 é apresentada a delimitação da Bacia da Tamandaré no município de Belém.

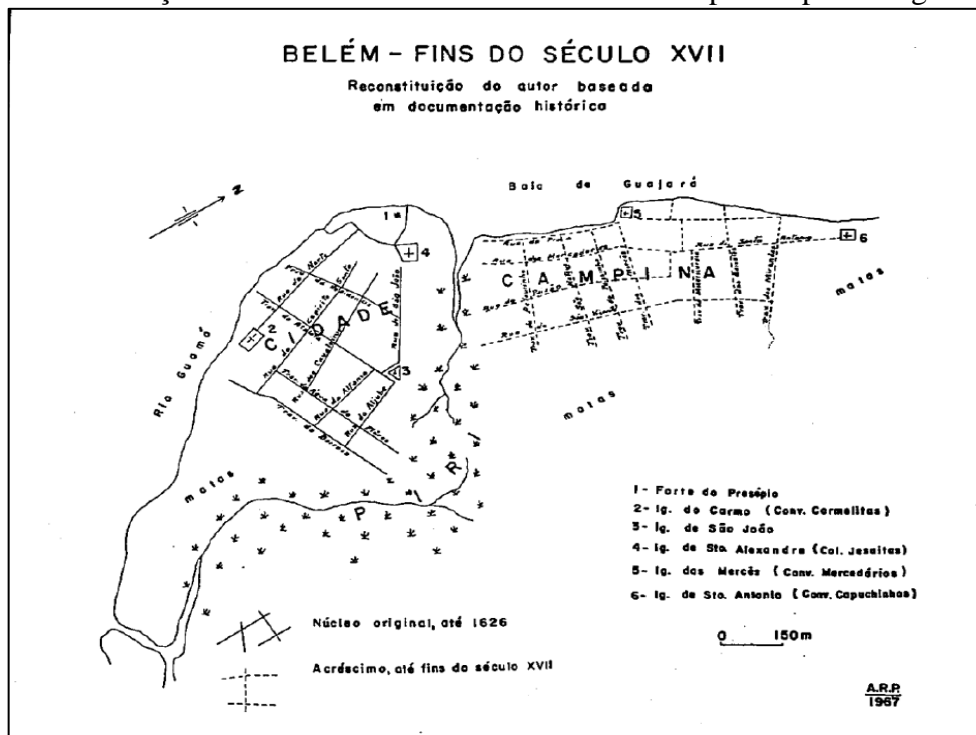
Mapa 3 – Localização da Bacia Hidrográfica da Tamandaré.



Vale comentar que a urbanização do município de Belém foi iniciada na bacia da Tamandaré, nas regiões com cotas altimétricas mais elevadas. A parcela mais baixa dessa bacia era formada área inundável, conhecida como Alagado do Piri (Figura 11), esse acidente

topográfico dividiu, inicialmente, a cidade em dois bairros, Cidade e Campina (BRITO, 2007).

Figura 11 – Formação histórica da malha urbana belenense separada pelo Alagado do Piri.



Fonte: Penteadó (1968).

Desde a fundação de Belém no século XVII, as áreas próximas de onde seria construído o canal da Tamandaré (Alagado do Piri) sofriam com grande influência da maré, o que limitou a expansão urbana. Essa realidade ribeirinha da área central da cidade de Belém começou a ser modificada apenas no século XIX, quando o governo municipal desenvolveu projetos de terraplanagem e de drenagem, aterrando áreas mais baixas e canalizando parte do curso d'água, o que propiciou a ampliação de áreas disponíveis para habitações na região central da cidade de Belém e próximas ao canal (ARAÚJO JÚNIOR, 2014).

Borges (2012) destaca que o processo de urbanização da bacia da Tamandaré foi intensificado ainda no século XIX com o aterramento de áreas ribeirinhas, principalmente, na parte dos bairros da Cidade Velha e da Campina. Esse processo de modificação da estrutura urbanística da bacia da Tamandaré fez com que áreas com cotas abaixo de 4 m fossem ocupadas, desconsiderando eventos de elevação de nível de maré menos recorrentes que acontecem periodicamente, as quais atingem o Ver-o-Peso e a Avenida Almirante Tamandaré (via trafegável que margeia o canal de drenagem).

Como a infraestrutura urbana da bacia da Tamandaré apresenta grande importância histórica para o município de Belém foi instituído a Lei municipal nº 7.709/94 (Lei do Patrimônio Histórico), com finalidade de promover a conservação, o tombamento de imóveis, entre outros aspectos.

O único canal de drenagem da bacia da Tamandaré tem forma retangular e comprimento de aproximadamente 1,15 km, com ponto de montante localizado nas coordenadas 1°27'24.55"S e 48°29'45.95"O e seu exutório na Baía do Guajará (NYLANDER, FERREIRA e PEREIRA, 2017).

A baía do Guajará é o corpo hídrico que recebe o escoamento pluvial do canal da Tamandaré, ocasionando impacto negativo à vazão dessa estrutura em momentos de maré alta. Com relação as precipitações pluviométricas, Ferreira (2008) comenta que essa região amazônica apresenta clima quente e úmido, baixos gradientes de temperatura, com ocorrência de nebulosidade e precipitação convectiva. Enquanto, Moraes et al. (2005) afirma que o índice pluviométrico de Belém pode ser caracterizado em dois períodos, chuvoso (Dezembro a Maio) e menos chuvoso (Junho a Novembro).

Anualmente, em momentos de cheia, as águas da baía do Guajará invadem o sistema de drenagem da Tamandaré, dificultando o escoamento no canal de drenagem e favorecendo a ocorrência de inundações e alagamentos, principalmente quando coincidem com precipitações pluviométricas intensas que ocorrem nos períodos mais chuvosos (LEÃO, 2017).

Nesse sentido, entende-se que é necessário o estudo de medidas estruturais para impedir a ocorrências de inundações e que modifiquem minimamente as condições urbanísticas da bacia.

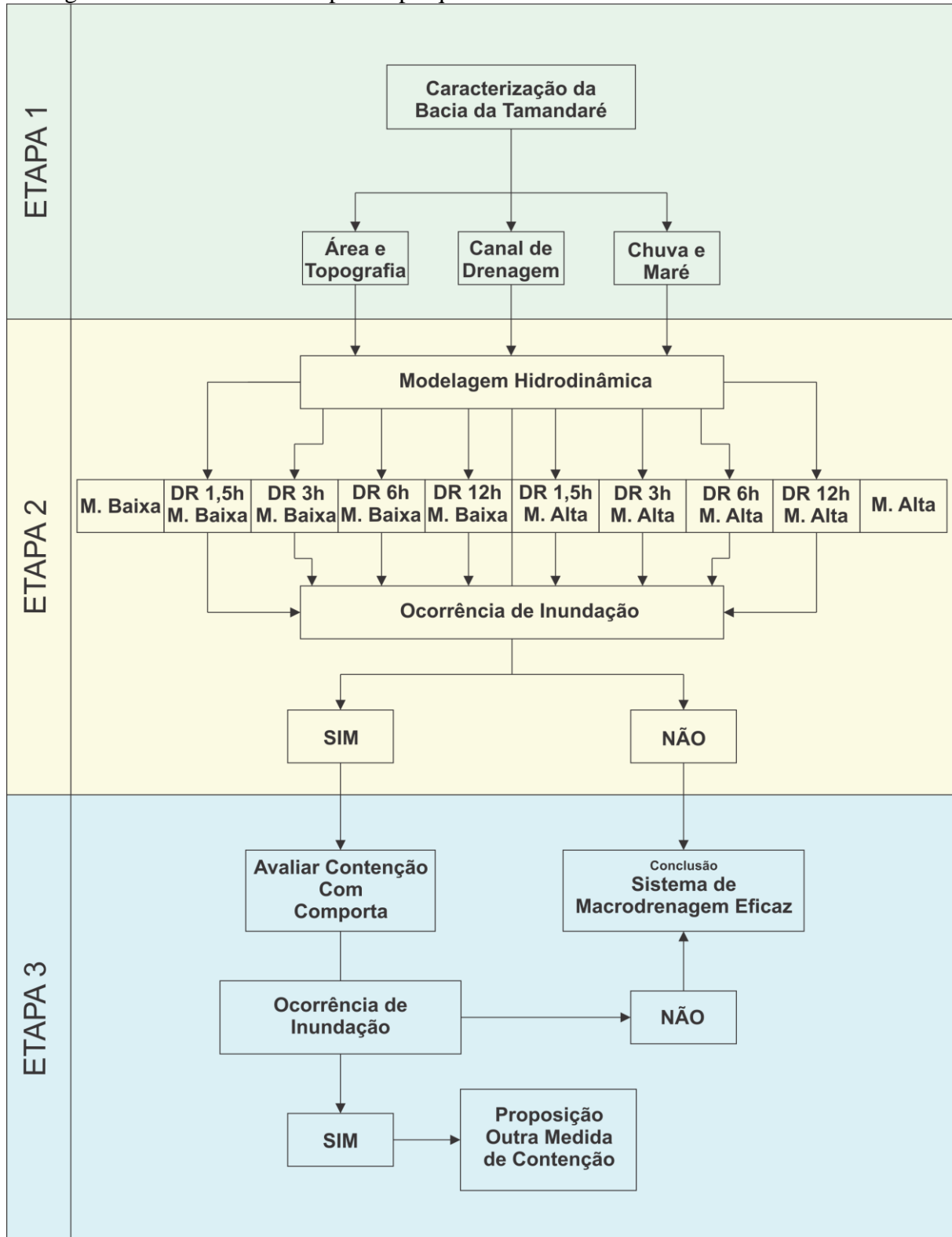
4.2 ETAPAS DA PESQUISA

O desenvolvimento do estudo proposto foi realizado em três etapas: a) estudo das condições relacionadas à drenagem urbana da bacia da Tamandaré; b) simulação hidrodinâmica das condições de escoamento do canal de drenagem da bacia da Tamandaré; e c) avaliação da utilização de comporta como medida estrutural de contenção de eventos de inundação em bacia de drenagem urbana.

A primeira etapa consistiu no levantamento bibliográfico e *in loco* de informações e dados da bacia hidrográfica estudada, possibilitando conhecer as peculiaridades da Bacia da Tamandaré. Na segunda etapa foram relacionados os fatores hidrometeorológicos (nível de

maré e precipitação pluviométrica) e do sistema de drenagem para verificar as condições de escoamento do canal e a ocorrência de inundações por simulação hidrodinâmica. Por fim, na última etapa foi avaliada a aplicabilidade de alternativas estruturais (sistema de comporta) no controle de enchentes do canal de drenagem, com auxílio de ferramentas computacionais, conforme o Fluxograma 1.

Fluxograma 1 – Resumo das etapas da pesquisa.



M. – Maré; DR – Duração de Chuva.

4.2.1 Etapa 1 – Estudo das Condições Relacionadas à Drenagem Urbana da Bacia da Tamandaré

Nessa etapa foi realizado o levantamento de informações para caracterizar a Bacia da Tamandaré, o que ocorreu em três fases. A primeira fase consistiu na busca de dados topográficos para definir a real área de contribuição da bacia da Tamandaré; na segunda fase foram estudados os fatores hidrometeorológicos que afetam a dinâmica das águas na bacia; e na terceira fase foram avaliadas as condições do sistema drenagem urbana da bacia.

4.2.1.1 Características Topográficas da Bacia da Tamandaré (Fase 1)

Inicialmente, foi pesquisada planialtimetria e a delimitação oficial da bacia da Tamandaré. Para isso foram consultados documentos de órgãos da Prefeitura de Belém, como a Secretaria de Saneamento (SESAN) e a Companhia de Desenvolvimento e Administração da Área Metropolitana de Belém (CODEM) e literaturas técnico-científicas, bem como os registros topográficos históricos da bacia, que marcam o início da formação urbana do município de Belém.

Em seguida, avaliado se os documentos oficiais apresentavam a real área de contribuição do escoamento de águas pluviais até o exutório, já que existe discordância de autores (TAVARES, 2017; PONTES et al., 2017, COSTA et al., 2015; PAIVA et al., 2012; SANTOS, 2012; e SILVA, 2003) sobre o valor de área da bacia. Para isso, a base planialtimétrica foi processada em sistema de informação geográfica, a partir do software ArcGis 10.3. Com os dados digitais de elevação, foi, então, elaborado o mapa hipsométrico e verificada a área da bacia e sua divisão em sub-bacias.

Por fim, para avaliação do escoamento da área estudada foram calculadas as variáveis morfométricas (geométrica, relevo e rede de drenagem) citadas por Teodoro et al. (2007) e Santos, Carvalho e Antoneli (2016), conforme o Quadro 7.

Quadro 7 – Variáveis morfométricas avaliadas na bacia da Tamandaré.

| Característica | Variável | Formulação |
|------------------|----------------------------------|---|
| Geométrica | Índice de circularidade (IC) | $IC = \frac{12,57 \times A}{P^2}$ |
| | Índice de compacidade (Kc) | $Kc = 0,28 \times \frac{P}{\sqrt{A}}$ |
| | Índice de Forma (F) | $F = \frac{A}{Lex^2}$ |
| Relevo | Altitude Máxima | Maior Cota |
| | Amplitude Altimétrica Máxima | Maior Cota – Menor Cota |
| | Declividade (I) | $I = \frac{Eq}{A} \times \left(\sum (\text{Curva de Nível}) \right)$ |
| Rede de Drenagem | Densidade de drenagem (Dd) | $Dd = \frac{Lt}{A}$ |
| | Índice de sinuosidade (Is) | $Is = \frac{L}{Dv}$ |
| | Índice de gradiente do canal (G) | $G = \frac{\Delta a}{Lc} \times 100$ |

A resposta das variáveis morfométricas, no caso, das Geométricas, foi para avaliar a suscetibilidade natural da bacia da Tamandaré à ocorrência de inundações, visto que Kc, F e IC não relacionam condições de urbanização ao indicador; enquanto, as de Relevo para avaliar o aumento ou retardo do tempo de concentração a partir da declividade; e as de Rede de drenagem para relacionar o escoamento do canal de drenagem.

4.2.1.2 Fatores Hidrológicos (Fase 2)

Nessa fase da pesquisa foram levantados os dados hidrológicos da bacia estudada, sendo divididos em dados de precipitação pluviométrica e dados maregráficos.

4.2.1.2.1 Dados de precipitação pluviométrica

Como a precipitação pluviométrica é o principal fator de entrada de água na bacia, no estudo desenvolvido foi realizado o levantamento bibliográfico e de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para a caracterização dos eventos chuvosos que afetam a bacia.

Além disso, para avaliar o volume precipitado em eventos chuvosos menos recorrentes foram consideradas séries sintéticas com grande tempo de retorno (TR), de 25 anos, que, normalmente, é o valor utilizado para o dimensionamento de estruturas de macrodrenagem.

No que tange a duração das precipitações pluviométricas no município de Belém, foram verificados grandes variações dos eventos pluviométricos em posto meteorológico da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária localizada na porção sudeste do município, podendo existir casos de 24h de duração (Bastos et al., 1998). Nesse sentido, foram estudados eventos de precipitação pluviométrica com diferentes durações, que possam ter maior influência de efeitos de maré, no caso, as durações de 1,5h, 3h, 6h e 12h.

Os 4 hietogramas relacionando TR e duração gerados foram fundamentados pelo estudo da relação Intensidade-Duração-Frequência (IDF) de Belém (Equação 11) proposto por Souza et al. (2012).

$$i = \frac{960,5846 \times T_r^{0,0954}}{(t + 9,7993)^{0,7245}} \quad (11)$$

Onde:

I: intensidade da precipitação em mm/h;

T: período de retorno em anos;

t: duração em minutos.

4.2.1.2.2 *Dados Maregráficos*

O outro principal fator de entrada de água na bacia da Tamandaré é a elevação de água da baía do Guajará. Nesse sentido, foram avaliadas as alturas máximas de maré, que interagem com o sistema de drenagem urbana da bacia Para isso, foram utilizados os dados de maré disponibilizados pela Marinha do Brasil. Esses registrados maregráficos foram monitorados no Porto de Belém, localizado a 2,7 km do exutório da bacia, sendo utilizados pela Marinha do Brasil como base para a definição das estimativas de alturas diárias de nível de maré no município de Belém.

É importante destacar que os registros maregráficos são fornecidos em função da Referência de Nível (RN) da Marinha do Brasil, portanto, para o estudo foi realizada a padronização da escala de maré para a RN da Companhia de Desenvolvimento e Administração da Área Metropolitana de Belém (CODEM). Para isso, foi pesquisado ponto conhecido nas duas RN's, possibilitando o relacionar dados topográficos do município e de maré.

Vale comentar que os valores utilizados como dados de contorno na modelagem hidrodinâmica são os maiores e dos menores valores dos níveis de maré, a fim de avaliar os efeitos extremos da maré no canal de drenagem.

4.2.1.3 Condições Estruturais do Sistema de Drenagem Urbana (Fase 3)

Na avaliação da infraestrutura do sistema de drenagem urbana da bacia estudada foram consultados documentos, projetos ou cadastro da rede microdrenagem e de macrodrenagem em órgãos da Prefeitura de Belém, como a Secretaria de Saneamento (SESAN) e a Companhia de Desenvolvimento e Administração da Área Metropolitana de Belém (CODEM) e literaturas técnico-científicas.

Também foram realizadas visitas de campo no canal de drenagem da Tamandaré, para levantar as medidas dos dados de geometria ao longo do canal, no caso, para coletar os valores de largura e profundidade por seção, utilizando trena de fibra de vidro; enquanto, os valores de extensão por seção foram obtidos pela ferramenta Google Earth. As visitas *in loco* ainda foram utilizadas para avaliar as condições atuais dos componentes de drenagem urbana da Tamandaré, identificando as principais deficiências dessas estruturas.

4.2.2 Etapa 2 – Simulação Hidrodinâmica das Condições de Escoamento do Canal de Drenagem da Bacia da Tamandaré

A modelagem hidrodinâmica foi realizada com auxílio do software SWMM 5.0, em razão da capacidade de simulação de diferentes características de bacias urbanas, como relacionado no Item 3.5.

Inicialmente, a área de contribuição da Tamandaré foi dividida em sub-bacias, conforme os dados topográficos e das estruturas de drenagem que chegam ao canal. Com a delimitação de cada sub-bacia, foram coletados os seguintes dados de entrada:

- a) Área (em ha), utilizando o software AutoCad para a delimitação das sub-bacias;
- b) Largura equivalente (m), maior encaminhamento (pior situação) da água pluvial até seu ponto de saída, canal de drenagem;
- c) Declividade média (em percentual), utilizando a metodologia de Mello e Silva (2013), Equação 12. Vale comentar que foi utilizado a extensão do software AutoCad, denominado de TOPOCAD-2000, para realização da triangulação de pontos cotados

na bacia, a fim de gerar as curvas de nível, sendo escolhido a equidistância mínima de 0,5 m.

$$I = \frac{Eq}{A} \times \left(\sum C \right) \times 100 \quad (12)$$

Onde:

I = Declividade (%);

Eq = Equidistância das curvas de nível (m);

A = Área da bacia considerada (m²);

C = Comprimento das curvas de nível da sub-bacia (m).

- d) Parcela impermeável (em percentual), a partir de imagens de satélite introduzidas no software AutoCad, foi delimitada a parcela permeável da área total da sub-bacia;
- e) Coeficiente de Rugosidade de Manning (n) impermeável, foi obtido pelo valor da média ponderada (Equação 13) “n” das principais superfícies impermeáveis que compõem a bacia (telhado, calçada e asfalto).

$$n_p = \frac{1}{A_t} \times \left(\sum n_x \times A_x \right) \quad (13)$$

Onde:

n_p = coeficiente de Manning ponderado;

A_t = área total da sub-bacia (m²);

n_x = valor do coeficiente de Manning da superfície correspondente;

A_x = área da superfície correspondente.

- f) Profundidade de armazenamento em depressões (em mm), foi utilizados os valores de referencia indicado no manual do EPA SWMM 5.0, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Valores de armazenamento em depressões.

| Tipo de Superfície | Valor de armazenamento (mm) |
|--------------------|-----------------------------|
| Impermeável | 1,27- 2,54 |
| Gramado | 2,54 – 5,08 |
| Pastagem | 5,08 |
| Serrapilheira | 7,62 |

Fonte: Gomes et al. (2012).

- g) Propagação do escoamento, foi utilizado a função Impervius, isto é, quando a propagação do escoamento da parcela permeável passa à impermeável para chegar ao exutório (canal de drenagem);

h) Método de infiltração, utilizado o modelo SCS, o valor de Curva Número⁵ (CN) adotado é calculado pelo CN médio ponderado (Equação 14) das áreas permeáveis e impermeáveis, sendo reduzidos 30%⁶.

$$CN_p = \frac{1}{A_t} \times \left(\sum CN_x \times A_x \right) \quad (14)$$

Onde:

CN_p = CN ponderado;

A_t = área total da sub-bacia (m²);

CN_x = valor do CN da superfície correspondente;

A_x = área da superfície correspondente.

Em seguida, foram definidas as dimensões (altura, largura e comprimento) em metros de cada seção da estrutura de macrodrenagem. Vale comentar que foi utilizado o tipo de forma “Irregular”, para integrar ao sistema as peculiaridades existentes em cada trecho do canal. Enquanto, nos trechos do canal sob as pontes foram utilizadas o tipo de forma “Custom”, para representar o canal em seção fechada. O valor de Manning do canal foi definido a partir das condições observadas *in loco*, considerando os valores do Quadro 8.

⁵ A classe hidrológica definida para a bacia da Tamandaré foi classe C, tomando como referência a mesma utilizada em bacias de fronteira, como é observado no Estudo de Impacto Ambiental da Estrada Nova (2007).

⁶ Segundo Martins (2015), os valores de CN encontrados superestimam a vazão escoada na bacia, sendo interessante a sua redução. Em estudo realizado pelo autor, na vazão da bacia do Tucunduba, o CN foi calibrado quando houve redução média de 30% de seu valor.

Quadro 8 – Valores de coeficiente de Manning para canais em diferentes condições de escoamento.

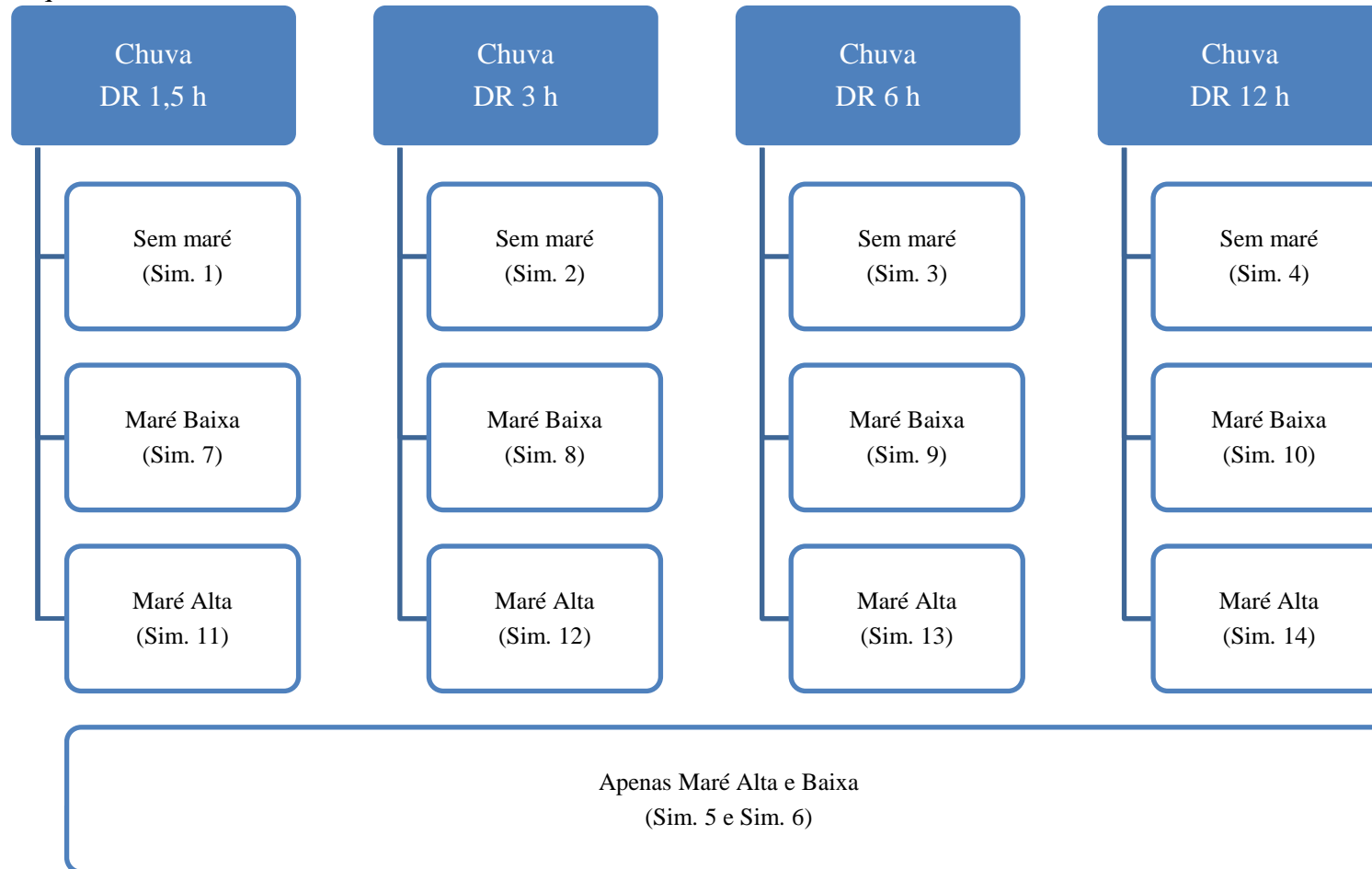
| Tipo | Natureza das paredes | <i>n</i> |
|------|--|----------|
| 1 | Superfícies excepcionalmente lisas, juntas perfeitas, acabamentos vitrificados. | 0,009 |
| 2 | Superfícies, juntas e vértices lisos e bem acabados, cimento muito liso tipo forma metálica. | 0,010 |
| 3 | Superfície lisa tipo reboco (2 areia e 1 cimento) desempenado no local por meios mecânicos. | 0,011 |
| 4 | Superfícies lisas mas com alguma aspereza, tipo emboço (3 areia e 1 cimento) e pequenas imperfeições no alinhamento e nas juntas, desempenado no local por meios mecânicos. | 0,012 |
| 5 | Superfícies de concreto e/ou argamassa, com pequenas imperfeições no acabamento e no alinhamento, desempenada por meios manuais com régua de madeira (*coletores de esgotos – valor usual). | 0,013 |
| 6 | Superfície cimentada (concreto) não muito alisado nem desempenado, pequeno crescimento de algas e depósitos no fundo. | 0,014 |
| 7 | Superfícies ásperas, alvenarias de tijolos ou paralelepípedos rejuntados, concreto ciclópico, reboco de argamassa com defeitos ou incompleto, juntas irregulares, cortes lisos a frio em rocha alinhamento tortuoso das superfícies (falta de desempenho). | 0,015 |
| 8 | Superfícies muito ásperas como concreto com a brita aparecendo saliente, superfícies cortadas em terreno tipo arenito, superfícies de alvenaria de tijolos ou pedras, não bem acabadas ou rejuntadas, rebocos ou acabamento mal feito ou em mau estado. Superfícies cortadas em rocha irregularmente. Canais com depósito no fundo, musgo nas paredes. | 0,017 |
| 9 | Superfícies cortadas em terra cobertas com argilo-cimento ou argilo-betume, ou canais de alvenaria ou concreto em más condições de manutenção e fundo com depósitos de pedregulhos; de terra, mas sem vegetação. | 0,018 |
| 10 | Superfícies em terreno compactado ou de gabiões, ou de concreto irregular ou arenito cortado manualmente e com alguma erosão e depósitos, além de um pouco de vegetação nas margens. | 0,020 |
| 11 | Canais de terra feitos pelo homem mantido em boas condições, com pouca vegetação, e canais naturais com as mesmas características (margens e fundo razoavelmente alinhados, sem grandes reentrâncias). | 0,025 |
| 12 | Canais de terra, com vegetação média, fundo com irregularidades por erosões; e assoreamentos, margens razoavelmente alinhadas. | 0,028 |
| 13 | Canais com fortes irregularidades no leito e nas margens não muito alinhadas e com vegetação normal. | 0,030 |
| 14 | Canais tipo rios permanentes em terreno aluvial, mas com bastante vegetação e variação da seção transversal, moderada. | 0,033 |
| 15 | Canais naturais tipo montanhoso, com vegetação, sedimentos (areia, cascalho e pedras grandes), corredeiras seguidas de lados seguido de corredeiras, com vegetação e variação transversal acentuada. | 0,035 |
| 16 | Idem Item 15, mas em condições mais severas. | 0,040 |
| 17 | Idem Item 15, em condições ainda mais severas. | 0,067 |
| 18 | Idem Item 15, em condições muito severas. | 0,080 |
| 19 | Canais naturais ou não com muita vegetação (árvores). | 0,100 |
| 20 | Condições muito severas de vegetação e irregularidades no leito do canal, como durante um transbordamento. | 0,220 |

Fonte: Azevedo Netto e Fernández (2015).

As ruas próximas ao canal da Tamandaré com cotas superiores a 4 metros foram representadas no modelo computacional, sendo empregado, também, o tipo de forma “Irregular”. As larguras e extensões dessas vias foram retiradas de imagem de satélite, enquanto, a profundidade adotada foi variada em função do nível do terreno no trecho representado.

Por fim, foram coincidos os picos do hidrograma das diferentes precipitações pluviométricas e das condições de maré, gerando mais oito simulações, demonstrando a interação hidrodinâmica dos dois fatores hidrológicos na estrutura de macrodrenagem da Tamandaré e seus efeitos no espaço urbano. Portanto, foi totalizado 14 simulações hidrodinâmicas diferentes para representar as condições de escoamento no Canal da Tamandaré (Esquema 3).

Esquema 3 – Cenários de escoamento no canal da Tamandaré.



DR. – Duração; Sim. - Simulação

4.2.3 Etapa 3 – Avaliação da Utilização de Comporta como Medida Estrutural de Contenção de Eventos de Inundação em Bacia de Drenagem Urbana

Na continuidade da pesquisa, com o conhecimento da ocorrência de eventos de inundação no canal da Tamandaré, foi verificada a capacidade de contenção desses eventos a partir de sistema de comporta.

Considerando os mesmos dados de entrada da etapa anterior, com interação das condições de regime de maré alta e baixa e de precipitação pluviométrica, considerando o TR de 25 anos e as quatro durações (1,5h, 3h, 6h e 12h), foi simulado o emprego de comporta nos diferentes cenários e avaliado a ocorrência de inundação na microbacia da Tamandaré.

Para isso, foram realizadas simulações do canal da Tamandaré com comporta fechada antes do nível de água do exutório atingir a cota de descarga do canal, sendo mantida essa condição durante todo o período de pico de maré ou quando o nível de água no canal atinge o ponto máximo, com abertura gradual, para impedir a entrada indevida de água da baía do Guajará no sistema de drenagem e

Nesse sentido, foi possível avaliar se o canal da Tamandaré tem capacidade de comportar o volume precipitado dos diferentes eventos pluviométricos, servindo como reservatório de detenção quando coincidem com momentos de cheia do corpo receptor. Finalmente, os resultados foram comparados com os dados obtidos na etapa anterior, para apresentar a redução do impacto das inundações com a utilização de comportas

5 RESULTADOS

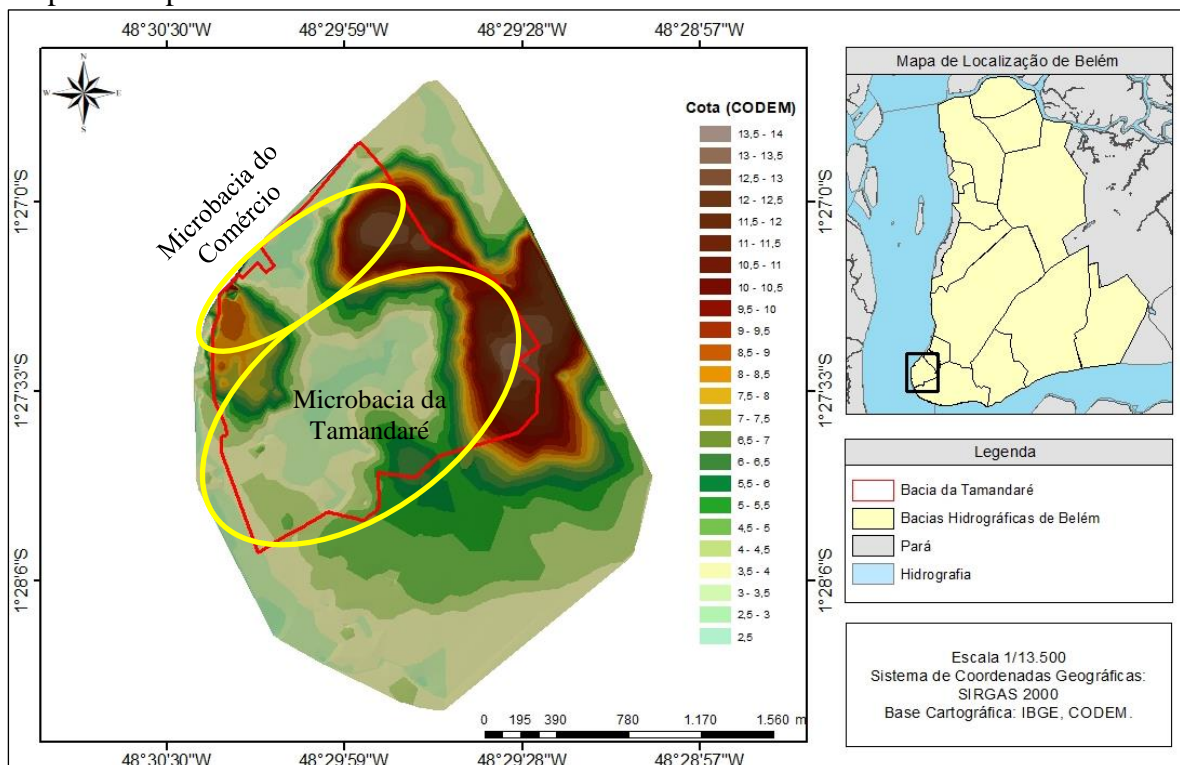
5.1 ESTUDO DAS CONDIÇÕES RELACIONADAS À DRENAGEM URBANA DA BACIA DA TAMANDARÉ

5.1.1 Topografia da bacia (Fase 1)

Na delimitação oficial das bacias hidrográficas do município de Belém foram consideradas a incorporação de bacias menores e a modificação das condições topográficas originais. Nesse sentido, foi realizado estudo planialtimétrico da bacia da Tamandaré para determinar a real área de contribuição para o escoamento de águas pluviais até o sistema de macrodrenagem da Tamandaré.

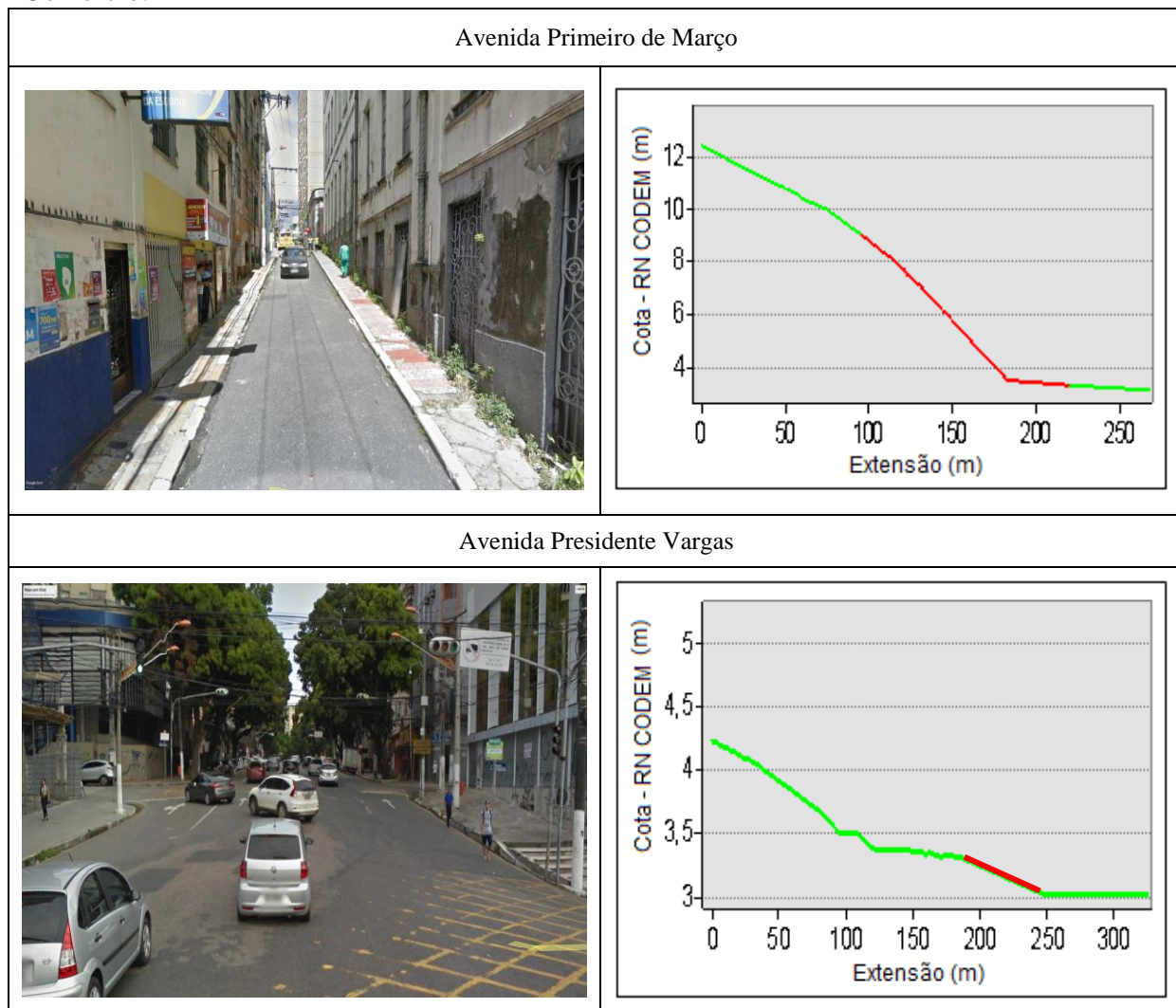
Na avaliação topográfica foi identificado que a Bacia da Tamandaré, na verdade, é formada por duas bacias, fazendo com que não haja interligação do escoamento entre certas áreas da região delimitada pela CODEM. No Mapa 4 é apresentado a hipsometria da bacia da Tamandaré e a região das microbacias que a compõem.

Mapa 4 – Hipsometria da Bacia da Tamandaré e de Áreas Próximas.



Essa divisão foi confirmada por Silva (2003), que denominou a área que não contribui para o canal de drenagem da Tamandaré como Bacia do Comércio⁷. Esta microbacia apresenta o escoamento das águas pluviais direcionado para o Ver-o-Peso, que sofre periodicamente com as elevações do nível da maré, e a Estação das Docas. Na Figura 12 são apresentadas vias da bacia do Comércio e seus perfis altimétricos.

Figura 12 – Ruas com chegada na Estação das Docas e seus perfis longitudinais da Bacia do Comércio.



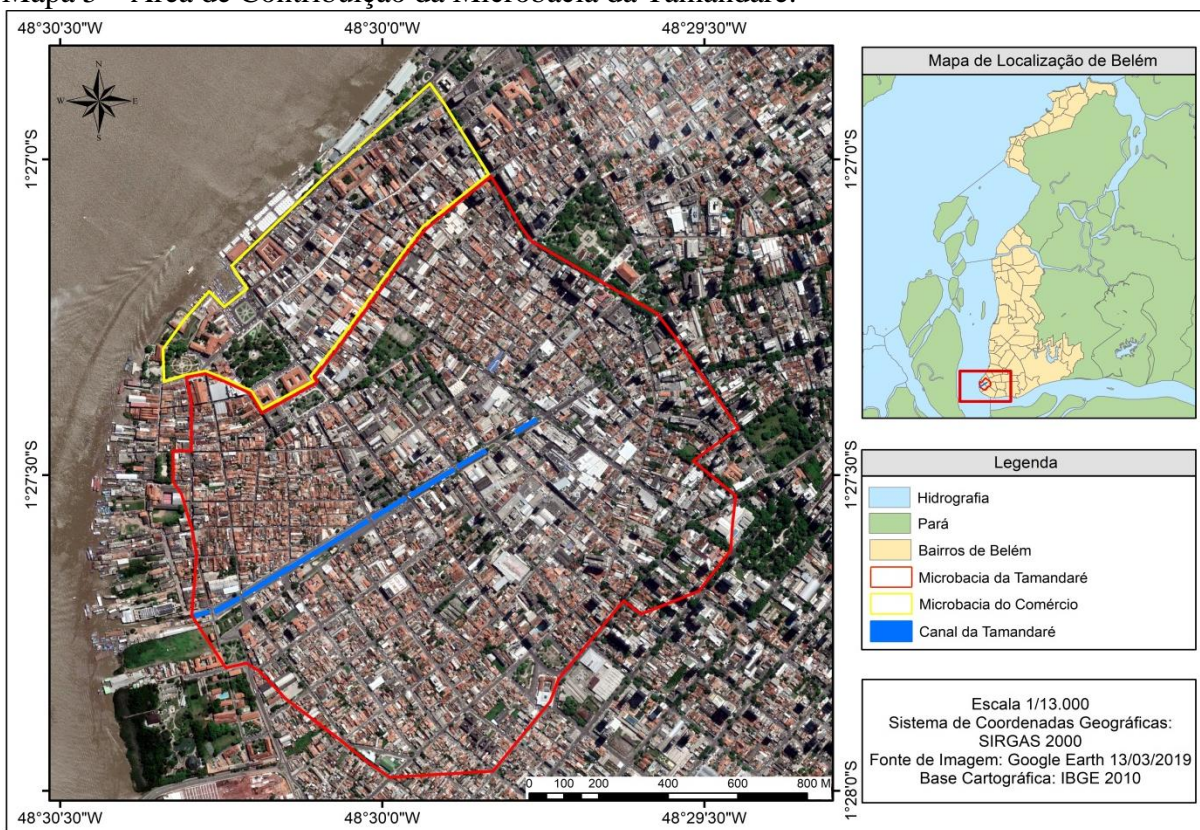
Essas avenidas demonstram que a diferença topográfica entre seus pontos de montante e jusante (Estação das Docas) direcionam o escoamento pluvial diretamente para a baía do

⁷ Para Silva (2003), a microbacia do Comércio tem área de 0,37 km², enquanto nesta pesquisa foi encontrado valor maior, de 0,43 km².

Guajará, reduzindo a área de contribuição do canal da Tamandaré e, por consequência, o volume estimado que deve ser transportado pelo canal até o corpo receptor.

A área da bacia da Tamandaré que direciona as águas pluviais até o canal de drenagem é denominado de microbacia da Tamandaré. Além disso, a real área de contribuição do canal da Tamandaré passa dos limites topográfico-administrativa da bacia, com variação altimétrica de 2,53 a 13,91 e área de 1,75 km² (perímetro da microbacia é 5,65 km), valor semelhante ao encontrado nas pesquisas de Costa et al. (2015), de Paiva et al. (2012), de Santos (2012) e de Silva (2003). Com isso, foram estabelecidos os limites da área de contribuição para o canal de macrodrenagem da Tamandaré, considerando os dados de altimetria, conforme o Mapa 5.

Mapa 5 – Área de Contribuição da Microbacia da Tamandaré.



Como a real área de contribuição para o escoamento pluvial até o canal da Tamandaré é diferente da divisão de bacias da CODEM, o levantamento de informações morfométricas baseados na delimitação oficial traria respostas errôneas para o sistema de macrodrenagem da bacia de estudo. Assim, na pesquisa foi desenvolvida a caracterização morfométrica, que é baseada na área do mapa de 1,75 km² (Microbacia da Tamandaré).

Com isso, foram determinadas as características morfométricas (geométrica, relevo e rede de drenagem) da real área de contribuição da Tamandaré, conforme relacionados na Tabela 3.

Tabela 3 – Caracterização Morfométrica da Microbacia da Tamandaré.

| Característica | Variável | Formulação | Valor da Microbacia Tamandaré |
|------------------|----------------------------------|---|-------------------------------|
| Geométrica | Índice de circularidade (IC) | $IC = \frac{12,57 \times A}{P^2}$ | 0,69 |
| | Índice de compacidade (Kc) | $Kc = 0,28 \times \frac{P}{\sqrt{A}}$ | 1,20 |
| | Índice de Forma (F) | $F = \frac{A}{Lex^2}$ | 0,71 |
| Relevo | Altitude Máxima | Maior Cota | 13,91 m |
| | Amplitude Altimétrica Máxima | Maior Cota – Menor Cota | 11,38 m |
| | Declividade Média (I) | $I = \frac{Eq}{A} \times \left(\sum \text{(Curva de Nível)} \right)$ | 0,0137 m/m |
| Rede de Drenagem | Densidade de drenagem (Dd) | $Dd = \frac{Lt}{A}$ | 0,65 km/km ² |
| | Índice de sinuosidade (Is) | $Is = \frac{L}{Dv}$ | 1,006 |
| | Índice de gradiente do canal (G) | $G = \frac{\Delta a}{Lc} \times 100$ | 0,0483% |

Referente às características geométricas, a microbacia da Tamandaré apresentou IC de 0,69, que configura forma da bacia mais circular. Segundo Alves e Castro (2003), bacias hidrográficas com valores de índice de circularidade (IC) acima de 0,51 demonstram forma menos alongada. Esse valor demonstra impacto negativo para o tempo de concentração no escoamento da bacia, visto que o volume escoado acaba chegando ao exutório no mesmo período de tempo, o que aumenta a probabilidade de cheias. A mesma conclusão pode ser encontrada ao analisar os coeficientes de forma e de compacidade, que resultaram nos valores de 0,71 e de 1,20, respectivamente, demonstrando que a microbacia da Tamandaré tem forma pouco irregular, o que gera deflúvios de diversos pontos da bacia chegando simultaneamente ou em intervalos de tempo próximos nos pontos mais baixos, confirmando a tendência à ocorrência de inundações relacionadas aos eventos intensos de precipitação pluviométrica.

Com relação às características de relevo, o maior valor de cota altimétrica da microbacia foi de 13,91 m, com amplitude altimétrica de 11,38 m. Castro e Lopes (2001)

comentam que a altimetria afeta a radiação emitida à bacia, alterando a precipitação pluviométrica, evapotranspiração e temperatura. Vale destacar que quanto menor a altitude, maior a intensidade solar que a bacia recebe.

As condições de baixa declividade são características da topografia do município de Belém, sendo verificada também nessa área de contribuição, com valor médio de 1,37%. Considerando a classificação de Santos et al. (2018), os relevos de bacias que apresentam variação de declividade entre 0 a 3% são consideradas planas, apresentando diferença de cotas muito pequenas. A consequência desse relevo de bacia é a ocorrência de inundações graduais, caso ocorram, visto que esse valor de declividade impacta a velocidade de escoamento de águas pluviais até os pontos mais baixos da bacia, gerando deflúvios com pequena energia potencial.

No caso da rede de drenagem, a bacia da Tamandaré apresentou densidade de drenagem de 0,65 km/km². Esse valor está dentro do intervalo de 0,5 a 3,5 km/km² citado por Villela e Mattos (1975) como referência de bacias com condições ruins de drenagem. Esse indicador demonstra pequena extensão de canal para comportar volume escoado por unidade de área, favorecendo o aumento do nível de água no canal.

O índice de sinuosidade da microbacia foi de 1,006. Villela e Mattos (1975) ainda comentam que o índice de sinuosidade próximo a 1 representa forma retilínea da rede de drenagem da Tamandaré, o que diminui a tendência de acúmulos de sedimentos no canal, em comparação à canais que apresentam mudanças de sentido. Entretanto, o índice de gradiente do canal de 0,0483%, demonstra a pequena declividade do canal da Tamandaré, o que reduz a velocidade de escoamento e pequena força de arraste, acabando por gerar ambiente propício para o grande acúmulo de sedimentos ao longo do canal.

A síntese das variáveis morfométricas obtidas na pesquisa demonstra que a) a área que contribui para o canal da Tamandaré tem forma mais arredondada, fazendo com os escoamentos a partir de pontos mais distantes do exutório cheguem em intervalos de tempo semelhantes, podendo apresentar tendência para ocorrência de inundações; b) a pequena diferença altimétrica e a baixa declividade (bacia plana) geram escoamento com maior tempo de concentração, favorecendo a drenagem da área ao reduzir o pico de vazão; e c) a área de contribuição apresenta condições ruins de drenagem, apresentando apenas um canal de forma

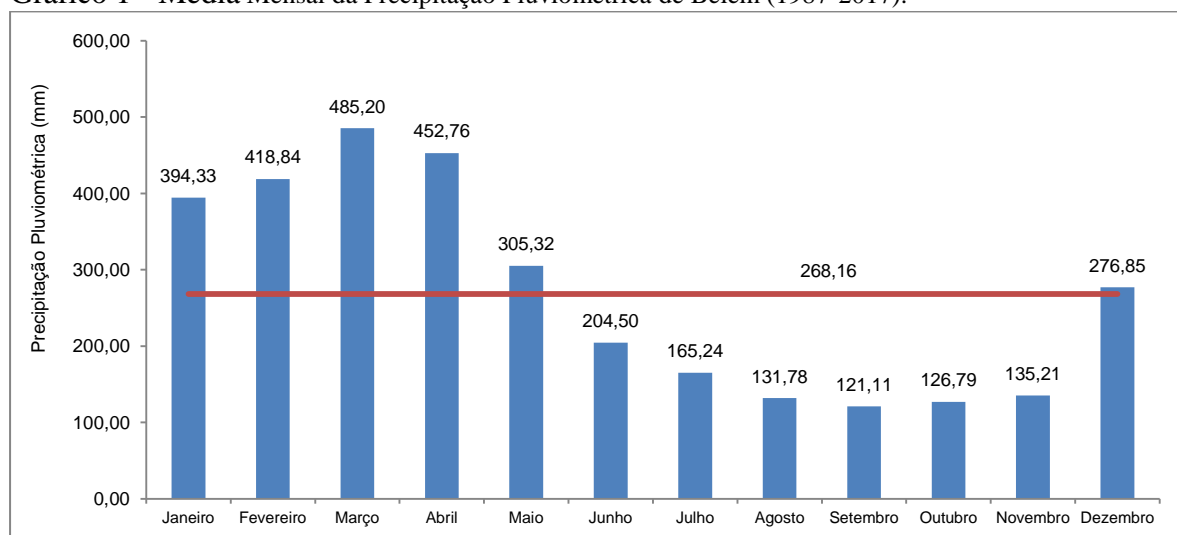
retilínea, com pequena amplitude topográfica entre pontos de montante e de jusante, o que facilita a sedimentação de partículas suspensas e demanda serviços periódicos de dragagem.

5.1.2 Fatores hidrológicos (Fase 2)

5.1.2.1 Precipitação Pluviométrica

Os eventos pluviométricos da microbacia da Tamandaré são moldados por fenômenos da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), dos Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN), das Linhas de Instabilidade (LI) e dos Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM), fatores que relacionados geram precipitações mesmo em período menos chuvoso (PONTES, 2017). No Gráfico 1 é apresentado o perfil da precipitação mensal do município de Belém.

Gráfico 1 - Média Mensal da Precipitação Pluviométrica de Belém (1987-2017).



Fonte: INMET.

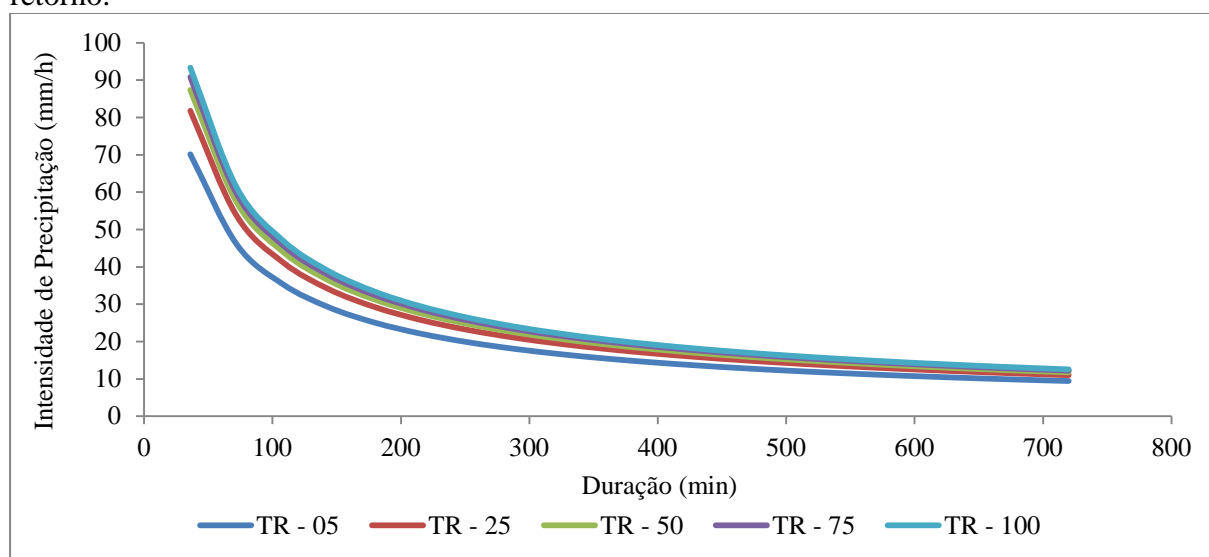
No período de maior intensidade pluviométrica são observados valores mensais acima de 300 mm, valor superior a média (268,16 mm/mês), enquanto no período menos chuvoso é verificado que o volume precipitado fica, abaixo de 200 mm/mês, com exceção de Junho. Vale comentar que o acúmulo indevido de águas pluviais (alagamento) em Belém acaba ocorrendo em todos os meses do ano, enquanto problemas de inundação são verificados no período chuvoso.

Além disso, as precipitações pluviométricas do município de Belém apresentaram incremento de volume ao longo dos anos quando avaliado o período de 1969 a 2009 (SANTIAGO et al., 2011). Essa afirmativa demonstra que o sistema de drenagem da

Tamandaré pode ter sobrecarga, facilitando o acúmulo indevido de água pluvial em logradouros da área urbana.

Na pesquisa, foi utilizada a equação IDF de Belém, proposta por Souza et al. (2012), para verificar a intensidade precipitada em eventos com diferentes tempos de recorrência (Gráfico 2).

Gráfico 2 – Intensidade de precipitação pluviométrica de Belém para diferentes tempos de retorno.



As características de precipitações pluviométricas convectivas verificadas nas curvas IDF geradas, indicam grande intensidade em precipitações pluviométricas de curta duração, decaindo ao longo do tempo. Observa-se que, quanto maior o tempo de retorno, menor a variação entre os volumes precipitados. Portanto, foi tomado como referencia o TR-25, comumente adotado para desenvolver projetos de macrodrenagem e medidas de contenção. Na Tabela 4 são relacionados os valores totais calculados pela IDF de Belém.

Tabela 4 – Volume precipitado em precipitações pluviométricas de TR de 25 anos no município de Belém.

| Precipitação Pluviométrica | Duração da precipitação pluviométrica (h) | | | |
|----------------------------|---|-------|--------|--------|
| | 1,5 | 3 | 6 | 12 |
| Intensidade (mm/h) | 45,51 | 29,19 | 18,01 | 11,00 |
| Total Precipitado (mm) | 69,76 | 87,58 | 108,03 | 132,04 |
| Acréscimo (%) | - | 25,54 | 23,36 | 22,22 |

Como o Instituto Nacional de Meteorologia não possui pluviógrafos em Belém, o registro do volume precipitado não é dado pela função horária, não sendo possível verificar o comportamento dos eventos chuvosos durante a sua ocorrência, apenas o total diário.

Contudo, na pesquisa realizada por Leme Engenharia (2011) foram identificados os volumes precipitados em eventos de diferentes durações em Belém, sendo na Tabela 5 apresentados os valores monitorados e comparados aos calculados para precipitação pluviométrica de TR de 25 anos

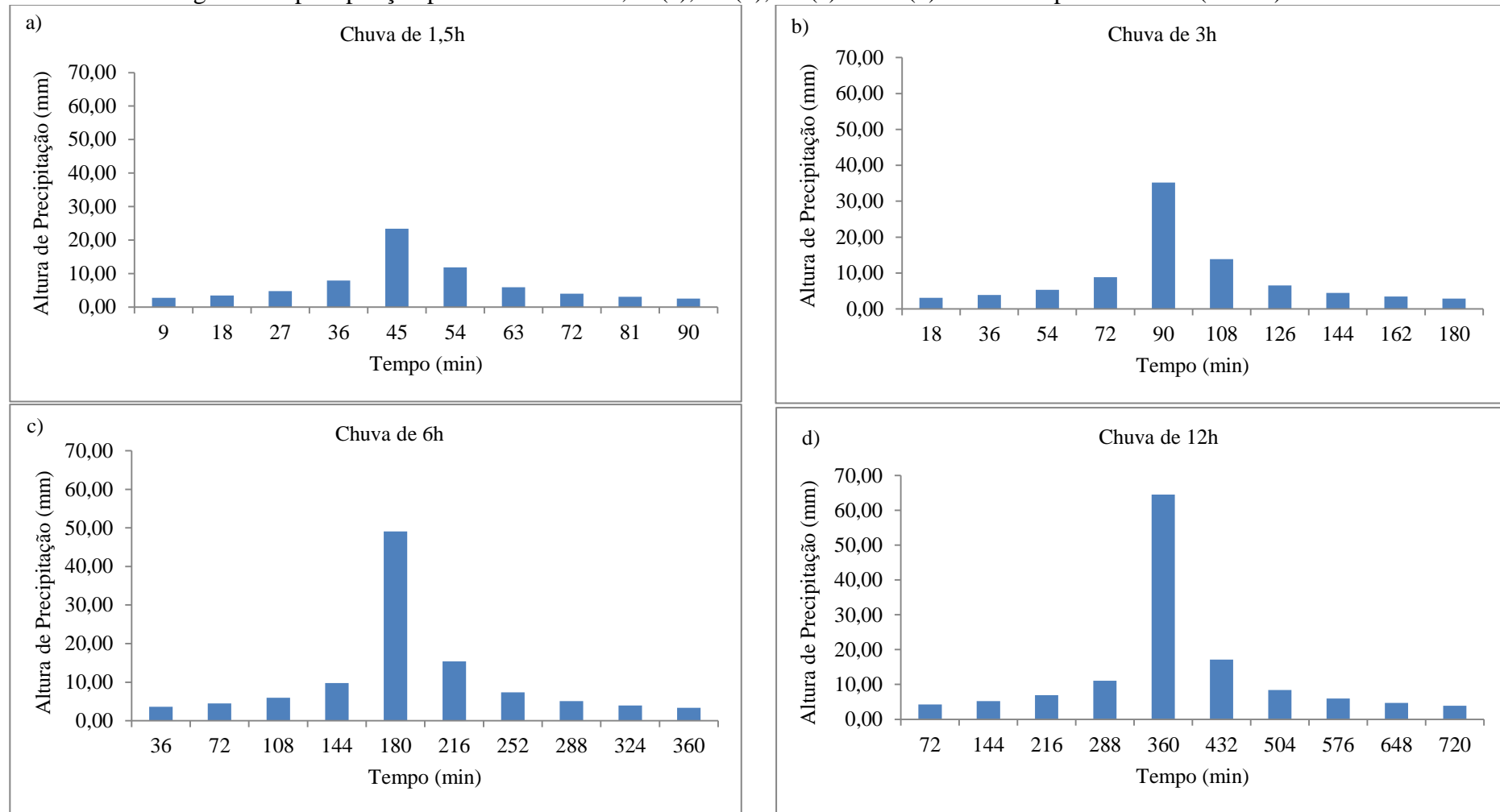
Tabela 5 – Comparação do volume precipitado no município de Belém (monitorado e calculado).

| Duração (h) | Precipitação Acumulada (mm) | |
|-------------|------------------------------|-----------------|
| | Monitorada (Leme Engenharia) | Calculada (IDF) |
| 1 | 62,00 | 60,26 |
| 2 | 72,00 | 76,89 |
| 3 | 77,00 | 87,58 |
| 6 | 98,60 | 108,03 |
| 12 | 123,20 | 132,04 |

Fonte: Leme Engenharia (apud MARTINS, 2015).

Os valores observados e calculados apresentaram boa correlação (0,99), justificando a utilização dos valores calculados como referência por representarem eventos ainda mais severos. Para retratar o comportamento dos eventos chuvosos no município, foi empregado o método de blocos alternados, gerando os hietogramas das precipitações pluviométricas de projeto de Belém, mostrado no Gráfico 3.

Gráfico 3 – Hietograma de precipitação pluviométrica de 1,5h (a), 3h (b), 6h (c) e 12h (d) no município de Belém (TR-25).

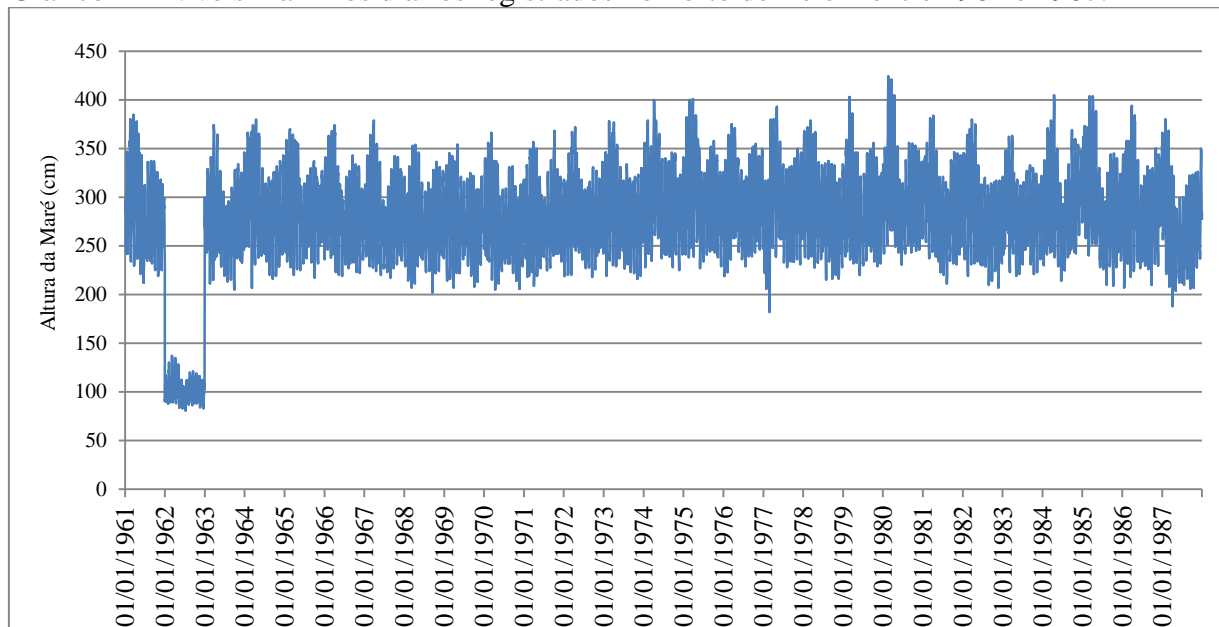


5.1.2.2 Maré

No Porto de Belém foi estabelecida a referência de nível (RN) da Marinha do Brasil no município, utilizada como orientação para diversos monitoramentos de níveis de maré da baía do Guajará, tendo quatro momentos registrados oficialmente, entre 1955 e 1987, posteriormente ao ano de 1987 não houve mais registros de maré. O mais antigo monitoramento foi de 1948 a 1950; o segundo ocorreu entre os anos 1955 e 1956, sendo utilizado até os dias atuais para o desenvolvimento da Tábua de Maré, pelo método harmônico, apresentada anualmente pela Marinha do Brasil; posteriormente, houve o terceiro registro entre 1961 e 1962; por fim, o maior período registrado sequencialmente ocorreu de 1963 a 1987, intervalo onde foram encontradas as maiores alturas de maré. Ressalta-se que após 1987 não foi mais realizado registros de nível de maré, ficando restrita a utilização dos dados supracitados.

Como os dois últimos registros foram consecutivos, na pesquisa foram agrupados os valores no Gráfico 4, representando a sequência de alturas máximas diárias da maré da baía do Guajará.

Gráfico 4 – Níveis máximos diários registrados no Porto de Belém entre 1961 e 1987.

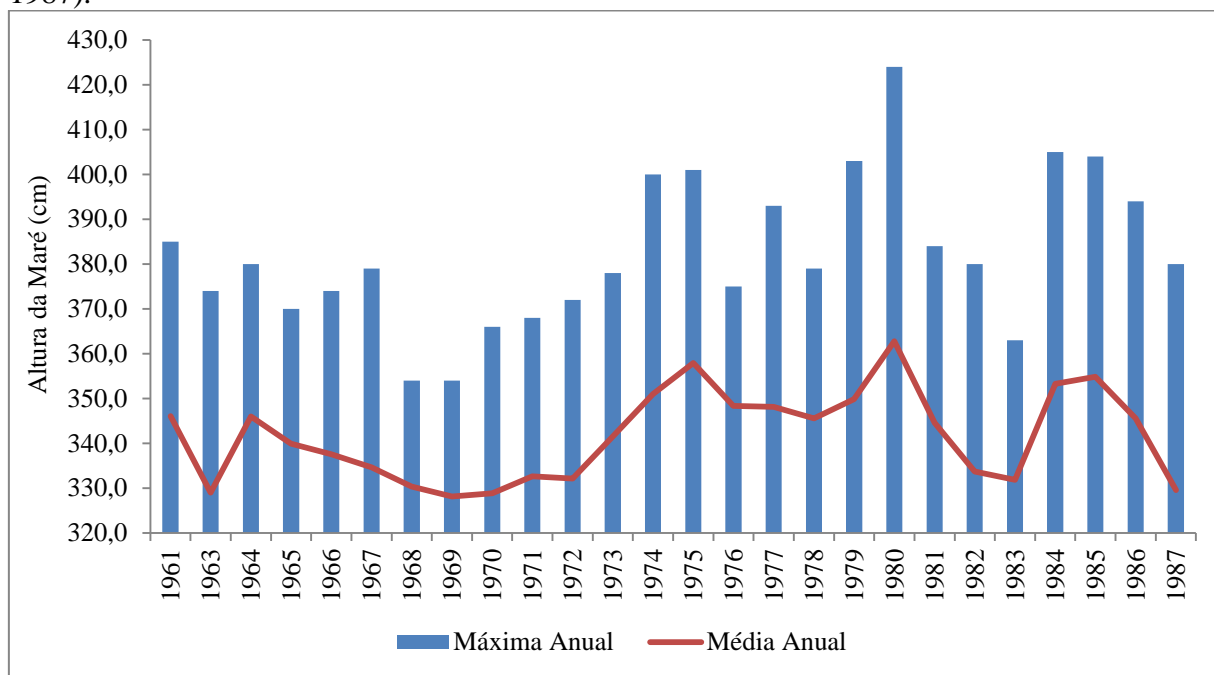


Fonte: Marinha do Brasil.

O período de 1962 a 1963 apresentou valores destoantes de toda a série histórica de maré, com altura máxima chegando a 1,37 m. Esse valor foi muito baixo em comparação aos demais anos.

Considerando os outros dados, o comportamento da maré máxima da baía do Guajará não apresentou grande variação (0,70 m) ao longo dos 26 anos monitorados, passando de 3,54 m (1968 e 1969) até 4,24 m (1980), conforme pode ser observado no Gráfico 5.

Gráfico 5 – Alturas máximas e médias anuais das marés registradas no Porto de Belém (1961-1987).

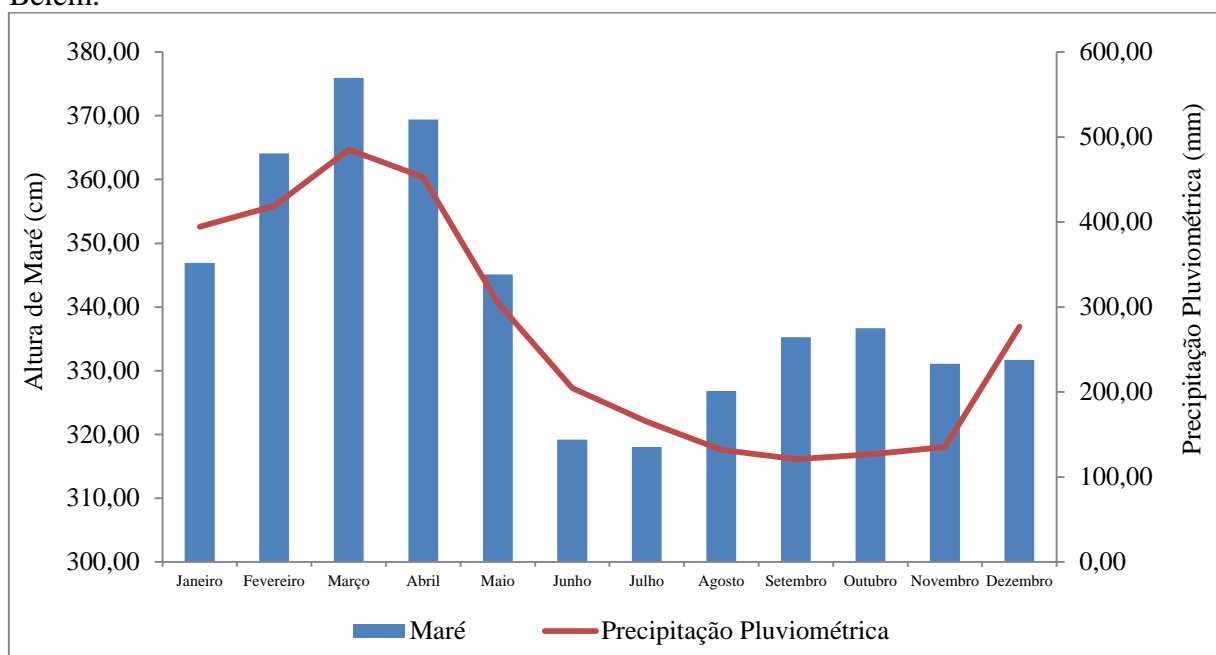


Fonte: Marinha do Brasil (2018).

A relação entre os valores anuais médio e máximo teve comportamento semelhante, sendo a maré máxima superior a média de 1,07 a 1,17 vezes. A amplitude entre os valores máximos de maré foi de 0,70 m, tendo sido registrado o menor valor (3,54 m) em 1968 e o maior valor (4,24 m) em 1980. Mesmo não apresentando grande amplitude, é possível identificar que as alturas máximas de maré não apresentam tendência uniforme para a sua ocorrência, o que dificulta as previsões anuais de altura máxima e a determinação do tempo de recorrência.

Enquanto, a avaliação anual não proporciona bons parâmetros para prever alturas máximas de maré, a sazonalidade mensal, apresentando grande relação com fatores pluviométricos, permite melhor indicação do período em que ocorrem as maiores elevações de maré, conforme pode ser observado no Gráfico 6.

Gráfico 6 – Média Máxima Mensal de Maré e de Precipitação Pluviométrica do município de Belém.



Fonte: Marinha do Brasil e INMET.

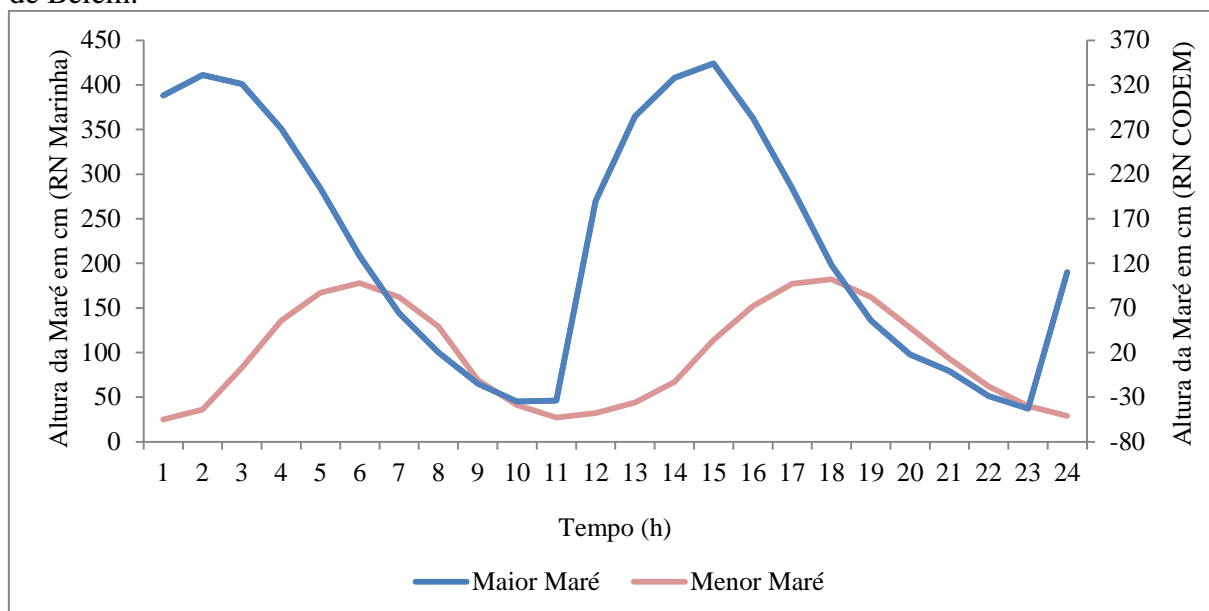
Nos meses em que ocorre o maior volume de precipitação pluviométrica (Janeiro, Fevereiro, Março e Abril) também são observados as maiores alturas de maré. Segundo Pegado et al. (2014), principalmente no mês de março, a combinação desses fatores favorece a ocorrência de inundações, e Tavares (2008) ainda complementa ao afirmar que em Belém as oscilações máximas de maré (maré de sizígia) desse período são intensificadas por efeitos astronômicos (lua nova e lua cheia).

O comportamento hidrodinâmico diário das águas da baía do Guajará é influenciado por dois fatores, os ambientes fluviais ao sul (contribuições do rio Guamá e rio Acará) e as marés oceânicas ao norte, tornando as águas mais salobras em períodos de baixa intensidade pluviométrica. Na baía do Guajará, a influência oceânica gera comportamento de maré semi-diurna, formando duas preamar e baixa-mar diariamente, contudo, é maior a dominância fluvial, fazendo com que haja aumento da duração do período de vazante em relação à enchente (GREGÓRIO; MENDES, 2009).

Normalmente, as marés de sizígia da baía do Guajará alcançam níveis de 3,6 m, (SANTOS et al., 2014), entretanto, a maior altura de maré registrada nesse corpo hídrico já

atingiu o valor de 4,24 m⁸ no dia 19 de Fevereiro de 1980. Enquanto, foi registrado o valor da menor altura de pico de maré (0,98 m) em 26 de Fevereiro de 1977. No Gráfico 7 é apresentado o comportamento oscilatório das alturas de maré monitorada na baía do Guajará.

Gráfico 7 – Comportamento horário do maior e do menor nível de maré registrado no Porto de Belém.



Fonte: Marinha do Brasil (2018).

O comportamento da maré alta demonstrou que a enchente da baía do Guajará ocorreu aproximadamente em cinco horas (das 9h às 14h), enquanto, a vazante durou cerca de oito horas. Com relação ao movimento oscilatório da menor maré, a duração de vazante e enchente foi inversa, no caso, a vazante transcorreu em cinco horas (das 5h às 10h) e a enchente durou 7h. Vale comentar que esses casos extremos de maré podem ser considerados eventos com grande tempo de recorrência, podendo a cidade de Belém sofrer periodicamente.

Com isso, na pesquisa foram utilizados esses valores máximos e mínimos de maré como referência para modelagem do comportamento hidrodinâmico do canal de drenagem da Tamandaré.

5.1.3 Condições Estruturais do Sistema de Drenagem Urbana (Fase 3)

A falta de informações de projetos e cadastros das estruturas de drenagem da área que contribui para o escoamento até o canal da Tamandaré em órgão oficial não apresentou

⁸ As alturas de maré utilizam referência de nível (RN) da Marinha do Brasil, para avaliar seus efeitos no espaço urbano foi realizado o ajuste dos valores de cota baseada na RN apresentada pela CODEM. Nesse caso, é possível identificar que a maior maré registra afetou as cotas altimétricas de 3,44 m.

grande valia por apresentar dispositivos implantados ainda no século XIX, tendo diversos cadastros e projetos perdidos ao longo dos anos.

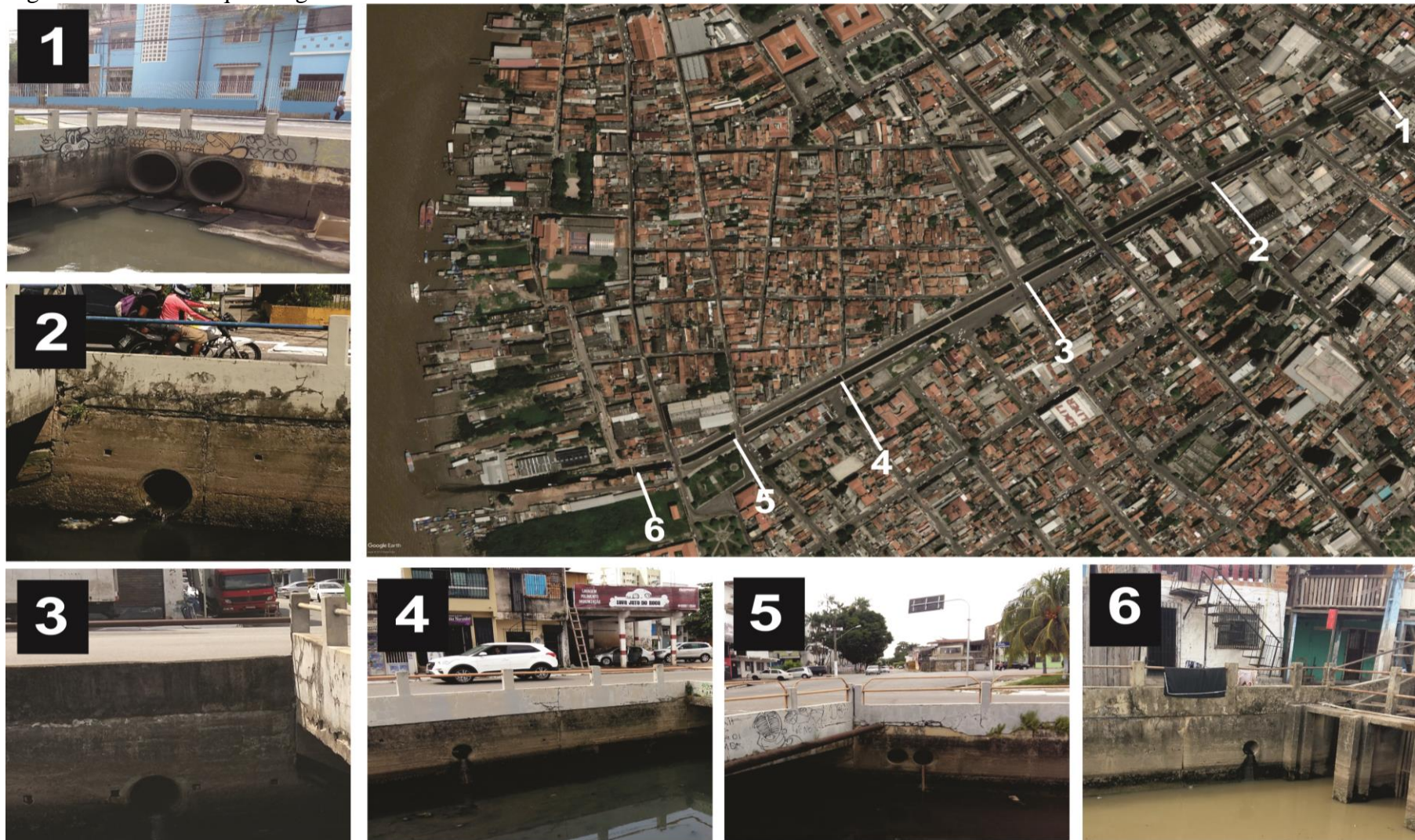
Nas visitas *in loco*, foram verificadas falhas nas estruturas de captação de águas pluviais da microdrenagem, o que ocorre por problemas de manutenção e limpeza, resultando em tampas deterioradas e acúmulo de resíduos em grelhas das bocas-de-lobo, além de receber contribuição de esgoto sanitário, conforme as fotografias abaixo.

Fotografia 1 – Estruturas de microdrenagem de áreas próximas ao canal da Tamandaré.



Também não foram obtidas informações das galerias de drenagem, dificultando o estabelecimento do encaminhamento desses condutos. Desse modo, na visita foram contabilizadas galerias com trecho final no canal, totalizando 71 galerias, com diâmetros variando de 300 mm a 1200 mm. As principais galerias da área de contribuição da Tamandaré seguem o encaminhamento do sistema viário, recebendo contribuições de pontos à montante. Na Figura 13 são apresentadas 6 das 71 galerias que chegam ao canal de macrodrenagem.

Figura 13 – Galerias que chegam ao canal da Tamandaré.



As estruturas de microdrenagem dessa área direcionam as águas pluviais coletadas ao canal da Tamandaré, que, juntamente, com as comportas na jusante, compõem as estruturas de macrodrenagem dessa área central do município de Belém, conforme pode ser observado na Fotografia 2.

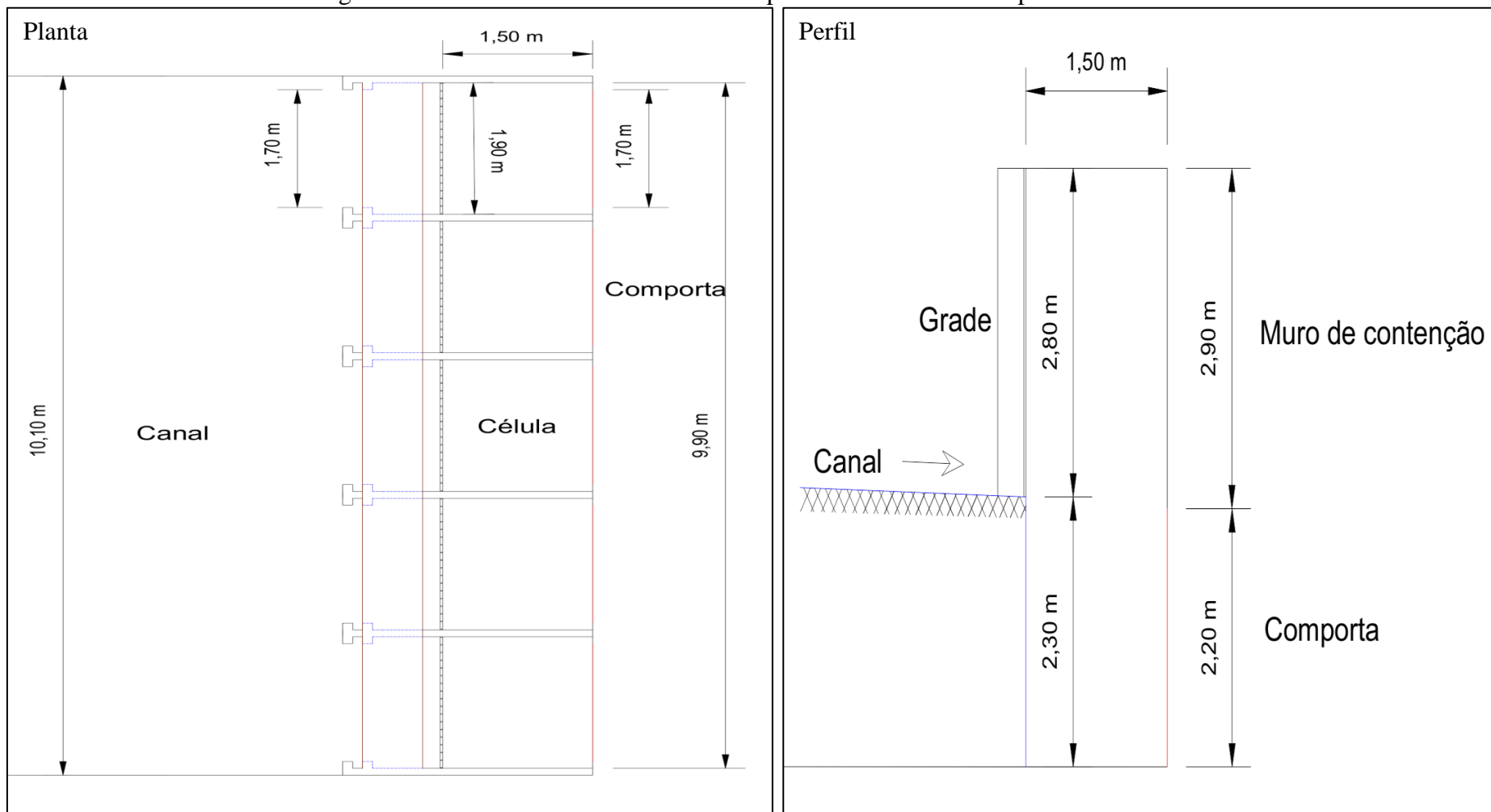
Fotografia 2 – Estruturas de macrodrenagem da microbacia da Tamandaré.



O sistema de comportas na jusante do canal da Tamandaré é formado por cinco células de mesmas dimensões compostas por gradeamento e comporta. As estruturas de gradeamento em aço com angulação de 90° são posicionadas antes das comportas para impedir que resíduos grosseiros sejam carregados até essas estruturas, com limpeza manual ocorrendo diariamente. A área do gradeamento apresentou largura de 1,90 m e altura de 2,8 m, com 18 barras (espessura 11 mm) espaçadas a cada 10 cm.

As comportas da Tamandaré apresentam mecanismo de acionamento automático, esses dispositivos utilizam a pressão hidrostática gerada na elevação da maré para definir o fechamento das comportas, isto é, quando a pressão exercida pela maré excede a pressão interna do canal (LIMA, 2017). Todavia, anualmente, a operação dessas comportas apresenta falha no acionamento, permitindo a entrada da maré e, por consequência, a ocorrência de inundações de vias próximas ao canal. Na Figura 14 é apresentado as dimensões levantadas *in loco* do sistema de comporta utilizada na jusante do canal da Tamandaré.

Figura 14 – Dimensões do Sistema de Comporta da Tamandaré em planta e em corte.

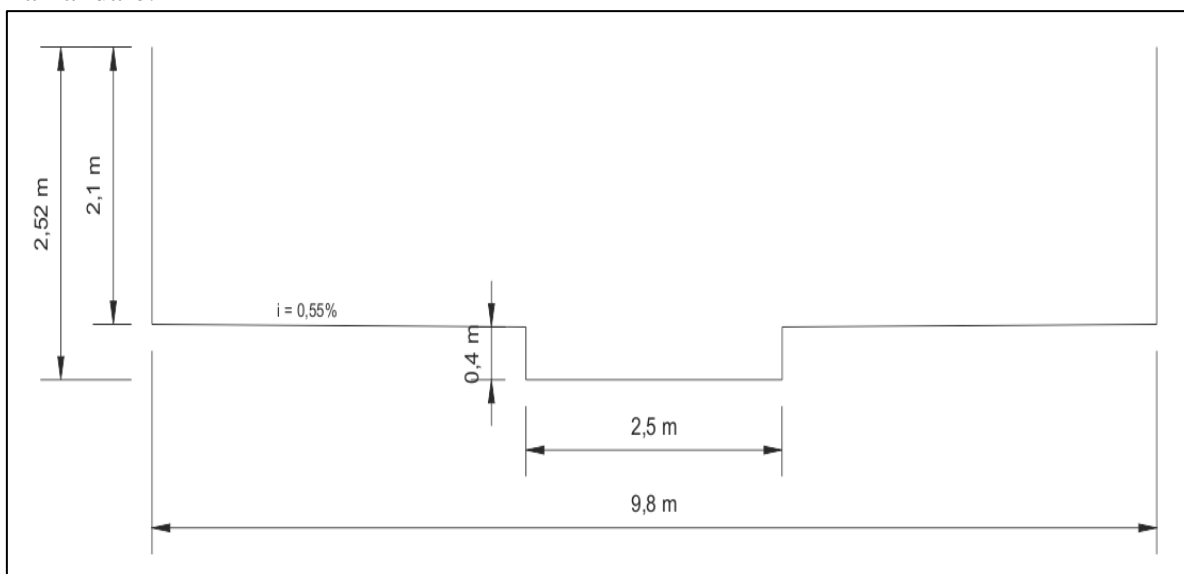


As comportas são posicionadas abaixo da soleira do canal, na cota -1,656, apresentando altura de 2,20 m, alcançando a cota 0,544. Esse valor está abaixo da cota de chegada do canal, apresentando desnível de 10 cm. Acima da comporta foi construído muro de contenção em alvenaria, gerando perda de carga entre o nível da maré na baía do Guajará e no canal.

O canal da Tamandaré possui extensão de 1,15 km, sendo margeada pela via de mesmo nome, Avenida Almirante Tamandaré. O traçado da malha urbana dessa área faz com 12 vias de acesso chegando ao canal. Desse total, 7 vias (Travessa Padre Eutíquio, Travessa São Francisco, Avenida Dezesesseis de Novembro, Rua Ângelo Custódio, Travessa de Breves, Rua Doutor Assis e Travessa São Pedro) cruzam essa estrutura de drenagem e 5 vias (Rua Doutor Rodrigues Santos, Travessa Monte Alegre, Travessa Carlos Carvalho, Travessa Gurupá e Rua São Boa Ventura) finalizam seu trecho ao chegar no canal.

A intervenção pública mais significativa no canal da Tamandaré ocorreu em 1964, finalizando suas obras após 4 anos. Nesse período, essa estrutura recebeu revestimento em concreto, nas laterais e no fundo, e guarda-corpo misto em alvenaria e tubo metálico (BASSALO, 2004). Contudo, é importante ressaltar que o fundo do canal é irregular, por apresenta desnível para garantir o escoamento de afluentes da montante, sem diminuir a área molhada da seção projetada para o escoamento de água pluvial, conforme a Figura 15.

Figura 15 – Dimensões da seção transversal do trecho de montante (Seção 1) do canal da Tamandaré.



O canal da Tamandaré apresenta largura média de 10 m e profundidade variada ao longo de seu comprimento, devido à variação dos valores de cota do terreno. Para o melhor detalhamento das dimensões do canal da Tamandaré, essa estrutura de macrodrenagem foi dividida em 10 seções, conforme apresentado na Figura 16.

Figura 16 – Seccionamento dos trechos do canal da Tamandaré.



É importante comentar que as pontes diminuem a altura útil do canal, podendo causar efeitos de remanso. Entretanto, é a transição da Seção 1 para a Seção 2 do canal que apresenta a redução mais significativa da sua seção transversal. É possível inferir que essa seção não foi bem projetada, pois gera grandes impactos negativos ao escoamento da montante.

A declividade do fundo do canal da Tamandaré não é acentuada, apresentando pequeno desnível de montante para jusante, correspondendo à diferença de 56 cm entre a cabeceira até o exutório do canal. Isso gera escoamento em baixas velocidades e que favorece a elevação da lâmina líquida e a sedimentação de partículas sólidas. Na Tabela 6 são apresentados os valores de cota e de dimensões por seção do canal levantadas *in loco*.

Tabela 6 – Dimensões do canal da Tamandaré.⁹

| Seção | Ponto | Cota ¹ | Profundidade (m) | Largura (m) | Comprimento (m) |
|---------|----------|-------------------|------------------|-------------|-----------------|
| S1 | Montante | 1,30 | 2,10 | 9,80 | 55,40 |
| | Jusante | 1,28 | 2,05 | 9,80 | |
| S2 | Montante | 1,28 | 0,60 | 4,80 | 111,53 |
| | Jusante | 1,20 | 0,70 | 4,85 | |
| S3 | Montante | 1,20 | 2,20 | 9,80 | 91,10 |
| | Jusante | 1,13 | 2,25 | 9,85 | |
| Ponte 1 | Montante | 1,13 | 1,70 | 9,85 | 14,03 |
| | Jusante | 1,13 | 1,70 | 10,00 | |
| S4 | Montante | 1,13 | 2,25 | 10,00 | 148,52 |
| | Jusante | 1,08 | 2,30 | 10,00 | |
| Ponte 2 | Montante | 1,08 | 1,75 | 10,00 | 16,61 |
| | Jusante | 1,08 | 1,75 | 10,00 | |
| S5 | Montante | 1,08 | 2,30 | 10,00 | 10,93 |
| | Jusante | 1,03 | 2,30 | 10,00 | |
| Ponte 3 | Montante | 1,03 | 1,85 | 10,00 | 15,96 |
| | Jusante | 1,03 | 1,85 | 10,00 | |
| S6 | Montante | 1,03 | 2,30 | 10,00 | 95,11 |
| | Jusante | 0,95 | 2,35 | 10,00 | |
| Ponte 4 | Montante | 0,95 | 1,95 | 10,00 | 1,50 |
| | Jusante | 0,95 | 1,98 | 10,00 | |
| S7 | Montante | 0,95 | 2,35 | 10,00 | 167,86 |
| | Jusante | 0,92 | 2,40 | 10,50 | |
| Ponte 5 | Montante | 0,92 | 2,10 | 10,50 | 1,50 |
| | Jusante | 0,92 | 2,10 | 10,50 | |
| S8 | Montante | 0,92 | 2,40 | 10,50 | 153,01 |
| | Jusante | 0,91 | 2,30 | 10,70 | |
| Ponte 6 | Montante | 0,91 | 1,90 | 10,70 | 14,82 |
| | Jusante | 0,91 | 1,95 | 10,70 | |
| S9 | Montante | 0,91 | 2,30 | 10,70 | 82,02 |
| | Jusante | 0,86 | 2,67 | 10,00 | |
| Ponte 7 | Montante | 0,86 | 2,30 | 10,00 | 15,33 |
| | Jusante | 0,86 | 2,30 | 10,10 | |
| S10 | Montante | 0,78 | 2,75 | 10,10 | 50,92 |
| | Jusante | 0,64 | 2,80 | 9,90 | |
| Total | | | | | 1150,05 |

¹ Esse valor de cota não considerou a profundidade da valeta central.

O levantamento dos valores de cota do canal foi baseado na RN da CODEM, demonstrando que essa estrutura de drenagem está sujeita à ser afetada pelo nível de água do corpo receptor, havendo entrada de maré mesmo na situação de menor pico registrado (0,98 m).

A grande variação de valores de profundidade (0,6 m até 2,80 m) é explicada pelas diferentes seções que compõem o canal, foi observada a drástica redução na Seção 2 (estrangulamento), intervalo no qual o canal passa a ser conduto fechado, reduzindo a altura máxima da estrutura de 2,05 m para 0,6 m. Além disso, as pontes também reduzem a

⁹ Os valores levantados *in loco* foram utilizados na modelagem, sendo considerado as diferentes seções do canal e as pontes (reduzindo a altura máxima).

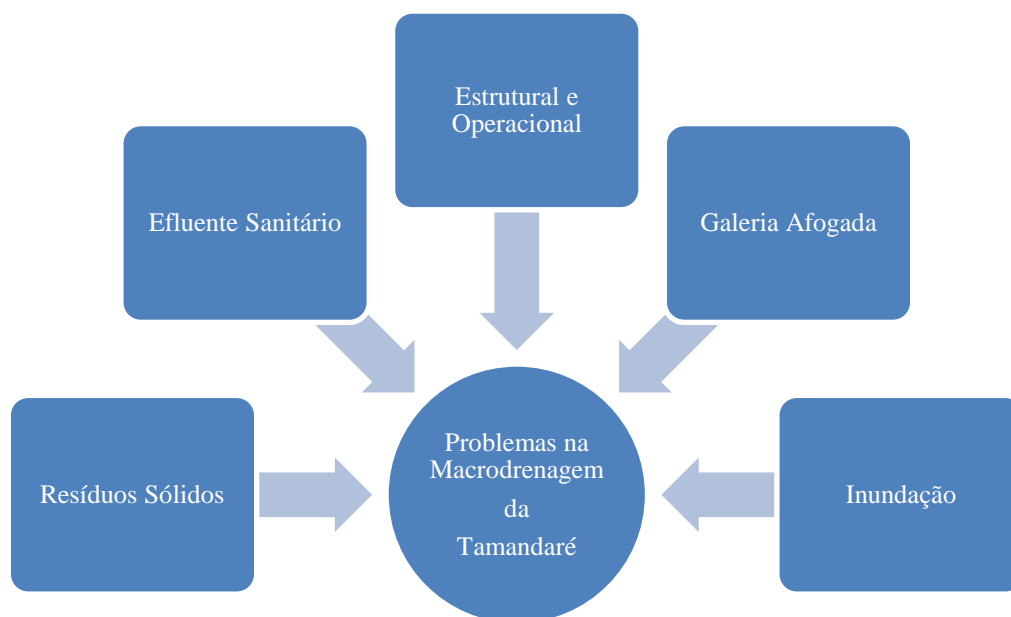
profundidade, diminuindo a área transversal de escoamento do canal. Essas situações impactam na capacidade hidráulica do canal, podendo favorecer a ocorrência de inundações em situações de alta intensidade pluviométrica.

Com relação à largura do canal, foi observada pequena variação, indo de 9,75 m a 10,70 m (intervalo de 0,95 m), quando excetuada a Seção 2. Esta seção também apresenta redução na dimensão de largura, passando de 9,75 m, da seção anterior, para 4,80 m, confirmando que diversos problemas de elevação do nível de água à montante da Seção 2 podem ocorrer.

5.1.3.1 As Fragilidades da Principal Estrutura de Macrodrenagem da Tamandaré

Mesmo estando explícita a relevância do canal da Tamandaré para o desenvolvimento do espaço urbano, diversos problemas foram verificados nessa estrutura de drenagem urbana: resíduos sólidos, afluente sanitário, deficiências estruturais, galerias afogadas e ocorrência de inundações, conforme a Figura 17.

Figura 17 – Problemas identificados no canal de drenagem da Tamandaré.



A disposição de resíduos sólidos em áreas próximas ao canal da Tamandaré (Figura 18-a) geram grandes prejuízos ao sistema de drenagem, favorecendo a obstrução de bocas-de-lobo e a ocorrência de alagamentos. Os resíduos sólidos também acabam depositados no

fundo do canal ou impedindo o acionamento das comportas. Em entrevista *in loco*, realizado com funcionário da equipe de limpeza do canal, foi afirmado que, diariamente em caminhão basculante são realizadas duas coletas (período diurno e noturno) de resíduos no ponto de jusante do canal. Segundo Costa et al. (2016), entre 2010 e 2013, em média 14,70% dos resíduos sólidos gerados no bairro da Cidade Velha chegaram ao canal de macrodrenagem, com o valor total aumentando cerca de 2% ao ano no período avaliado.

Além disso, há chegada de grande volume de efluente no canal de drenagem, mesmo em momentos de ausência de precipitação pluviométrica (Figura 18-b), indicando a existência de inúmeras ligações de esgoto sanitário conectadas nas galerias de microdrenagem, que acabam afetando negativamente a qualidade da água pluvial efluente encaminhada para a baía do Guajará.

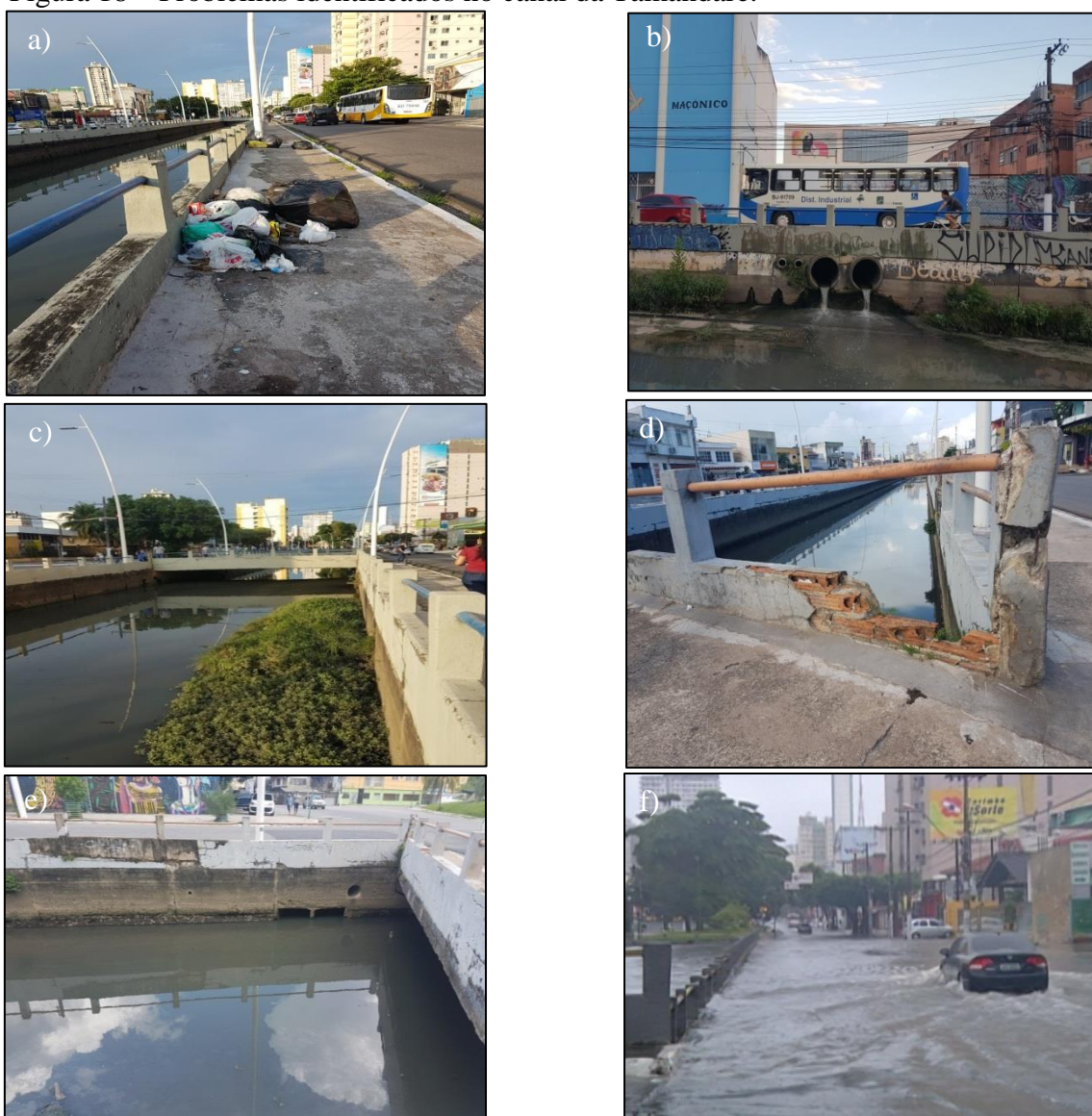
Semelhante ao verificado na microdrenagem, o sistema de macrodrenagem (canal da Tamandaré e comporta) não apresenta boas condições operacionais, contendo inúmeras seções com disposição de sedimentos e crescimento de vegetação (Figura 18-c), e estruturais, como avarias no guarda-corpo e rachaduras ao longo do canal (Figura 18-d). A sedimentação de partículas suspensas nos efluentes é um dos principais problemas do canal da Tamandaré, pois a pequena declividade do canal aumenta essa ocorrência, gerando a necessidade de dragagem periódica¹⁰. Vale comentar que o acúmulo indevido de resíduos no canal aumenta a rugosidade do fundo e diminui a altura útil, reduzindo o desempenho hidráulico nessa estrutura de macrodrenagem.

O canal da Tamandaré ainda sofre com influência da maré, que provoca afogamento de algumas galerias em períodos de cheia (Figura 18-e). Como consequência, tem-se o alagamento em pontos a montante na rede de microdrenagem, já que esses condutos apresentam baixa capacidade de escoamento.

As consequências mais prejudiciais da influência da maré no canal de drenagem da Tamandaré, juntamente com os outros fatores que dificultam o escoamento de águas pluviais no canal, são os casos de inundação (Figura 18-f), que ocorrem mais frequentemente nos meses de maior intensidade pluviométrica, e quando há coincidência das precipitações pluviométricas de longa duração com elevação do nível de maré.

¹⁰ Costa et al. (2016) comentam que o volume médio anual de sedimento dragados do canal da Tamandaré foi de 2.900 m³, nos anos de 2010 a 2013.

Figura 18 – Problemas identificados no canal da Tamandaré.



Fonte: Autor e Diário Online (2013).

Vale observar que o canal de drenagem da Tamandaré deveria representar uma importante estrutura para o saneamento de bairros de Belém (Batista Campos, Campina e Cidade Velha), com a finalidade de afastar as águas pluviais até a baía do Guajará. Entretanto, a falta de iniciativas dos gestores municipais para garantir o atendimento das demandas públicas de drenagem urbana acaba por desenvolver estruturas com deficiências, que causam diversos transtornos à população residente e que transita nas proximidades da área estudada, principalmente, na ocorrência de eventos de inundação, que prejudicam a mobilidade urbana e facilitam a transmissão de doenças de veiculação hídrica.

Para Soares e Carvalho (2018), a intervenção e o interesse público são necessários para a mudança de realidade do espaço urbano, melhorando a dinâmica socioambiental de

parte da cidade com cotas mais baixas. Nesse cenário, mecanismos para avaliar a magnitude das inundações e estudar medidas de intervenção que modifiquem a realidade atual do sistema de macrodrenagem da Tamandaré são de grande valia, sendo interessante o emprego de instrumentos computacionais que representem o escoamento e confirmem a eficácia das medidas de intervenção.

5.2 SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA DAS CONDIÇÕES DE ESCOAMENTO DO CANAL DE DRENAGEM DA MICROBACIA DA TAMANDARÉ

5.2.1 Divisão de Sub-bacias e Dados de Entrada

A microbacia da Tamandaré foi representada no software SWMM. Para isso, a área de contribuição do canal de macrodrenagem de 1,75 km² foi dividida em 27 sub-bacias, estabelecidas de acordo com as características topográficas e as ruas principais com galerias chegando ao canal. Na Figura 19 é apresentada a divisão das 27 sub-bacias de drenagem da microbacia da Tamandaré.

Figura 19 – Identificação das sub-bacias da microbacia da Tamandaré.



Essas sub-bacias apresentam algumas características em comum, no caso, o valor do coeficiente de Manning da área permeável, de 0,15 (superfície gramada), e os valores de armazenamento em depressões permeáveis e impermeáveis, de 2,54 mm e 5,08 mm, respectivamente. As outras variáveis de área, de largura equivalente, de declividade, de parcela impermeável, de coeficiente de Manning ($n_{\text{Ponderado}}$) da área impermeável e de CN apresentaram valores distintos para cada sub-bacia, conforme pode ser observado na Tabela 7.

Tabela 7 – Características das sub-bacias que contribuem para o escoamento no canal da Tamandaré.

| Sub-Bacia | Área (ha) | Largura equivalente (m) | I_{eq} (%) | Parcela Impermeável (%) | $n_{\text{Ponderado}}$ | CN_{EQ}^* |
|-----------|-----------|-------------------------|---------------------|-------------------------|------------------------|--------------------|
| | | | | | Impermeável | |
| 1 | 16,87 | 205,36 | 2,03 | 89,05 | 0,0121 | 67,60 |
| 2 | 16,66 | 175,31 | 1,80 | 93,92 | 0,0121 | 68,08 |
| 3 | 8,47 | 100,09 | 1,02 | 95,79 | 0,0120 | 68,40 |
| 4 | 5,13 | 70,43 | 0,97 | 92,83 | 0,0121 | 67,56 |
| 5 | 5,66 | 77,73 | 1,03 | 90,46 | 0,0121 | 67,00 |
| 6 | 5,09 | 67,32 | 0,88 | 94,98 | 0,0121 | 68,09 |
| 7 | 3,54 | 67,40 | 1,55 | 94,73 | 0,0121 | 67,88 |
| 8 | 2,84 | 49,40 | 1,02 | 94,73 | 0,0121 | 68,05 |
| 9 | 10,18 | 112,74 | 0,63 | 92,32 | 0,0121 | 67,81 |
| 10 | 8,27 | 94,69 | 0,56 | 92,73 | 0,0121 | 68,05 |
| 11 | 3,86 | 47,28 | 0,55 | 94,82 | 0,0121 | 67,90 |
| 12 | 9,53 | 108,07 | 0,73 | 93,32 | 0,0121 | 67,98 |
| 13 | 3,42 | 64,94 | 0,96 | 92,93 | 0,0121 | 67,41 |
| 14 | 1,04 | 46,86 | 1,19 | 63,26 | 0,0124 | 62,43 |
| 15 | 0,48 | 30,94 | 0,45 | 63,82 | 0,0122 | 62,52 |
| 16 | 28,89 | 372,32 | 2,03 | 92,84 | 0,0121 | 68,15 |
| 17 | 4,42 | 111,60 | 1,35 | 94,93 | 0,0120 | 68,42 |
| 18 | 5,71 | 84,23 | 1,77 | 87,53 | 0,0121 | 66,50 |
| 19 | 3,08 | 74,35 | 0,71 | 94,66 | 0,0121 | 68,12 |
| 20 | 3,84 | 67,05 | 0,72 | 95,86 | 0,0121 | 68,24 |
| 21 | 1,99 | 44,87 | 0,57 | 94,34 | 0,0122 | 67,82 |
| 22 | 2,12 | 41,53 | 0,68 | 93,26 | 0,0121 | 67,64 |
| 23 | 5,63 | 104,98 | 1,51 | 95,62 | 0,0121 | 68,20 |
| 24 | 6,71 | 126,32 | 1,89 | 94,90 | 0,0121 | 68,08 |
| 25 | 3,68 | 56,30 | 1,31 | 96,28 | 0,0121 | 67,98 |
| 26 | 7,05 | 96,75 | 1,37 | 96,04 | 0,0121 | 68,10 |
| 27 | 0,49 | 31,84 | 1,03 | 94,75 | 0,0121 | 67,72 |

CN_{EQ}^* - Os valores apresentados tiveram redução de 30% do valor encontrando.

As sub-bacias apresentaram grande variação de área de 0,48 ha até 28,89 ha. É importante destacar que a soma (45,76 ha) das duas áreas localizadas a montante do canal (sub-bacias 1 e 16) representa 26,20% da área da bacia, concentrando grande parcela do volume escoado desde a cabeceira da estrutura de macrodrenagem.

As larguras equivalentes identificadas também apresentaram variação, indo de 372,32 m a 30,94 m. Esses valores apresentam forte correlação, de 0,97, com a área das respectivas sub-

bacias, visto que maior área acaba gerando encaminhamentos mais tortuosos (largura equivalente) até exutório.

A declividade das sub-bacias não apresentou muita variação, o menor foi de 0,45%, e o maior valor foi de 2,03%, confirmando a característica de bacia plana em todas as sub-áreas, favorecendo a redução de picos de escoamento.

No levantamento das superfícies impermeáveis sobrepostas na microbacia da Tamandaré, foi identificado que grande parte da bacia já apresenta terreno impermeável, com valor médio de 93,06%. O impacto é identificado no grande volume escoado superficialmente até o canal de macrodrenagem, favorecendo a ocorrência de inundações e alagamentos em pontos mais baixos da microbacia.

Como a área de contribuição da Tamandaré contém parcela significativa de área impermeável, os valores do coeficiente de Manning e de CN foram elevados e apresentaram pequena variação, no caso, de n foi de 0,0124 a 0,0120; e de CN foi de 68,42 a 62,43, valores com redução de 30%, conforme as recomendações de Martins (2015).

Essas características das sub-bacias foram utilizadas para a determinação do volume encaminhado ao canal de macrodrenagem pelas diferentes áreas.

5.2.2 Hidrogramas das sub-bacias da Tamandaré

Os dados das sub-bacias permitiram avaliar o volume escoado superficialmente na área de contribuição da Tamandaré em diferentes eventos de precipitação pluviométrica. Para isso, foi utilizado o software SWMM 5.0, sendo gerados hidrogramas para as precipitações pluviométricas de TR 25 anos das sub-bacias apresentados nos Gráfico 8, Gráfico 9, Gráfico 10 e Gráfico 11.

Gráfico 8 – Hidrogramas das sub-bacias gerados pela precipitação pluviométrica de 1,5h de duração.

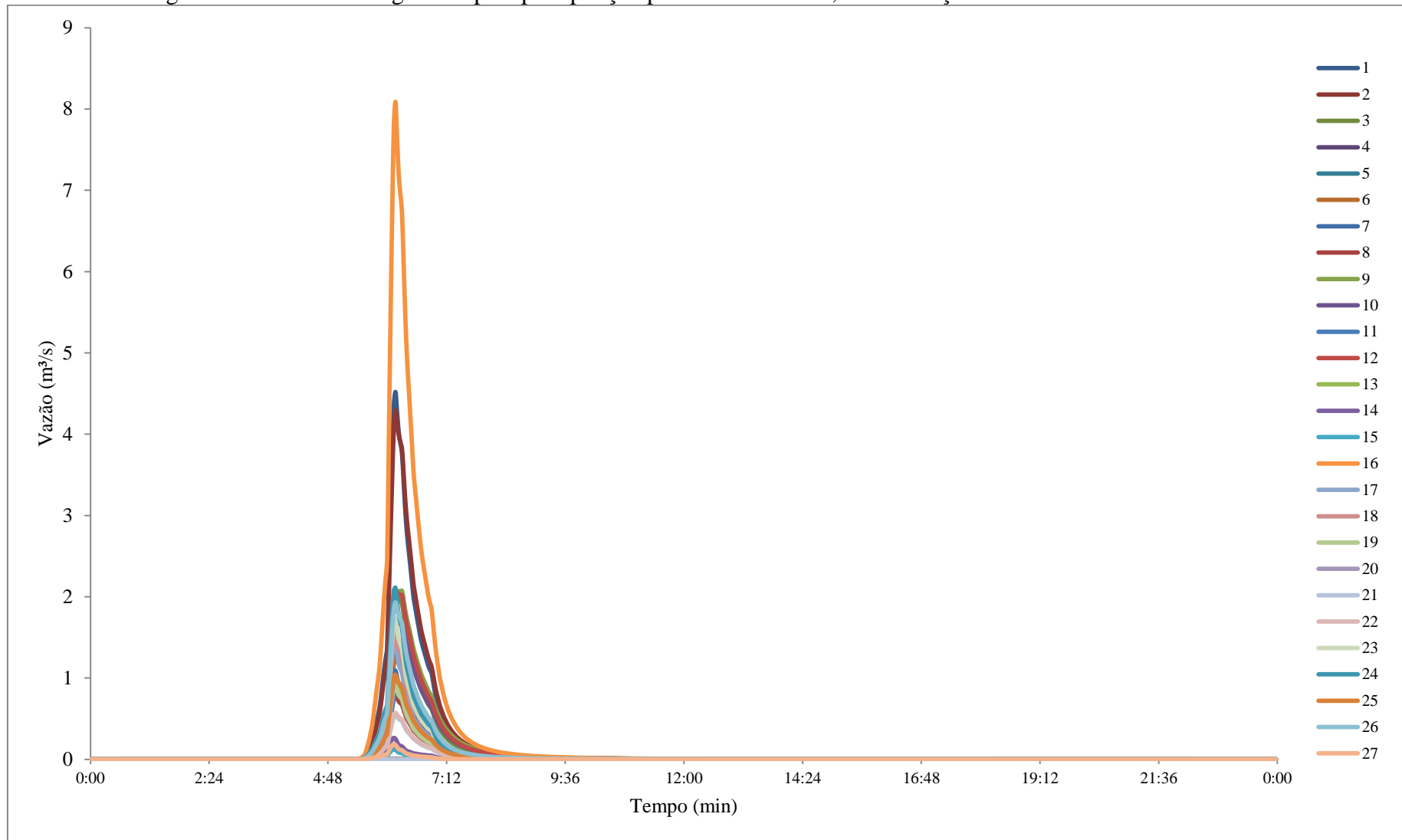


Gráfico 9 – Hidrogramas das sub-bacias gerados pela precipitação pluviométrica de 3h de duração.

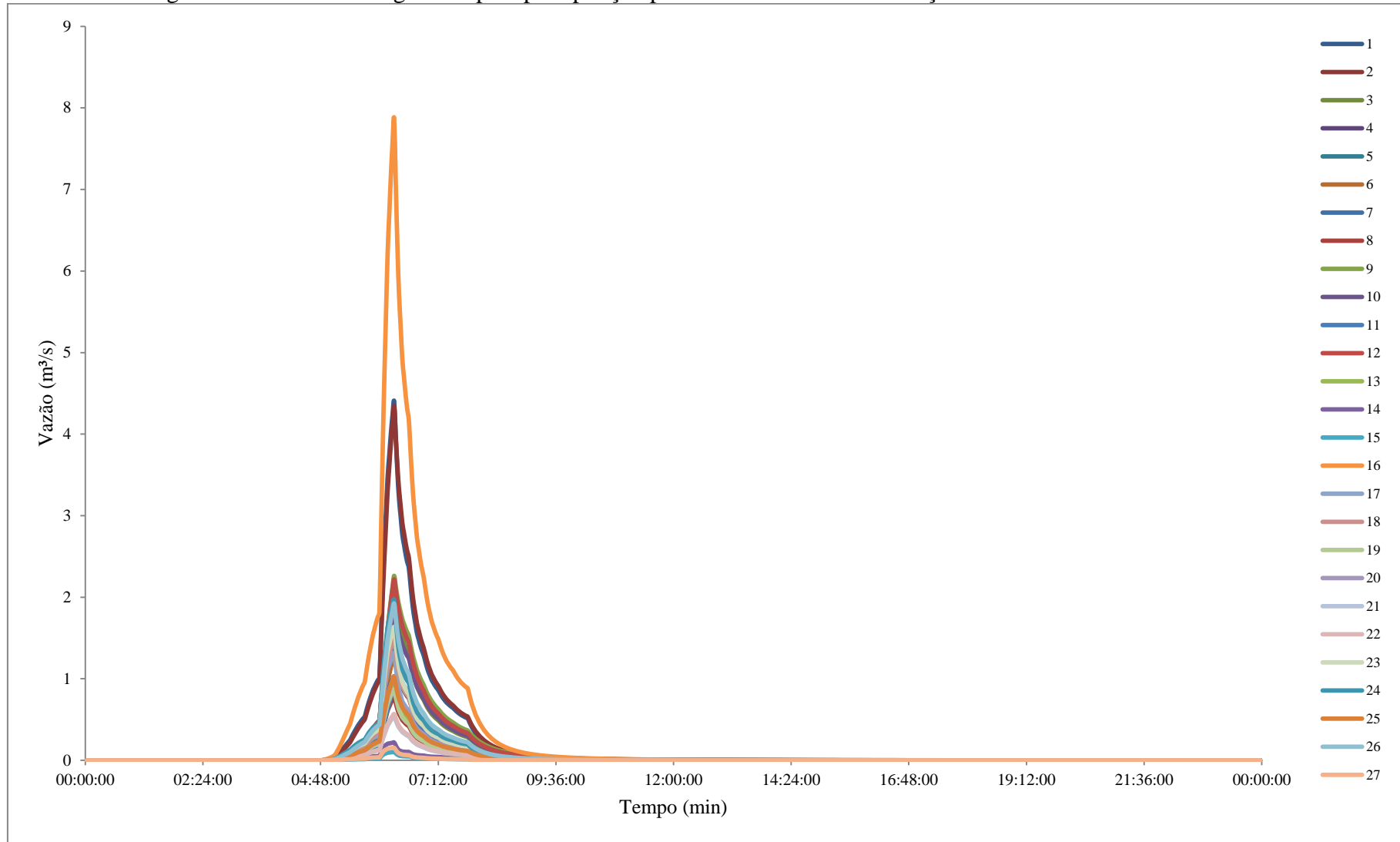


Gráfico 10 – Hidrogramas das sub-bacias gerados pela precipitação pluviométrica de 6h de duração.

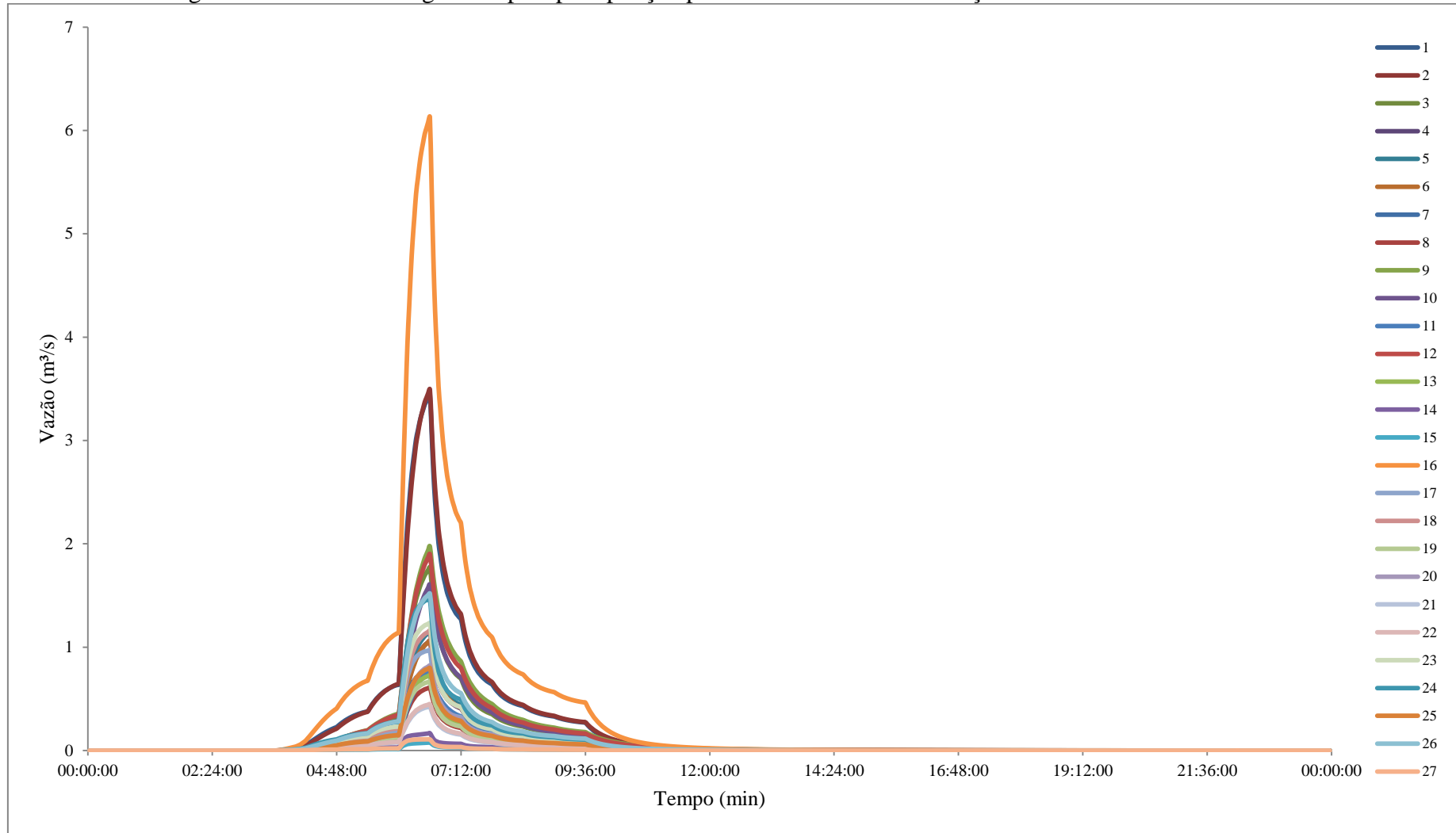
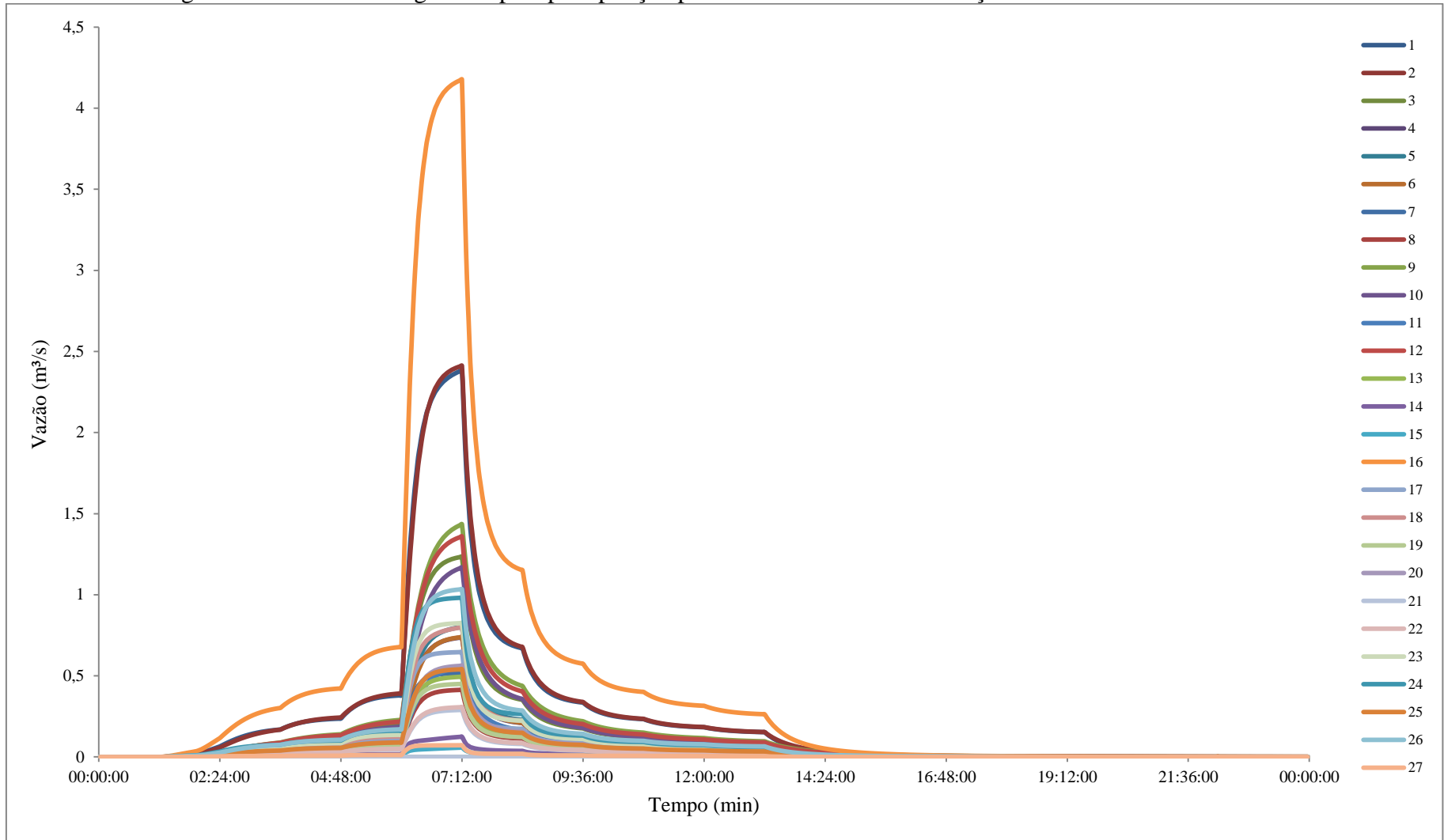


Gráfico 11 – Hidrogramas das sub-bacias gerados pela precipitação pluviométrica de 12h de duração.



A análise dos Gráfico 8, Gráfico 9, Gráfico 10 e Gráfico 11 demonstra que pico de vazão mais acentuada no escoamento superficial gerado nas precipitações pluviométricas de 1,5h, 3h e 6h. Por sua vez, o volume precipitado em precipitações pluviométricas de longa duração é mais distribuído, reduzindo o valor de pico do hidrograma, o que é explicado pela alta intensidade das precipitações pluviométricas, característica das precipitações pluviométricas de Belém. Essas tormentas demonstram que o sistema de drenagem do município precisa estar preparado para comportar grande volume pluvial provocado por precipitações pluviométricas de curta e média duração. Na Tabela 8 são apresentados os valores de pico dos hidrogramas dos diferentes eventos de precipitação pluviométricas.

Tabela 8 – Vazões de pico das sub-bacias da Tamandaré, em m³/s.

| Sub-bacia | Duração (h) | | | |
|-----------|-------------|------|------|------|
| | 1,5 | 3,0 | 6,0 | 12,0 |
| 1 | 4,64 | 4,40 | 3,45 | 2,38 |
| 2 | 4,37 | 4,34 | 3,49 | 2,41 |
| 3 | 2,08 | 2,14 | 1,77 | 1,23 |
| 4 | 1,31 | 1,31 | 1,06 | 0,74 |
| 5 | 1,44 | 1,43 | 1,15 | 0,80 |
| 6 | 1,26 | 1,29 | 1,06 | 0,74 |
| 7 | 1,13 | 1,03 | 0,77 | 0,52 |
| 8 | 0,81 | 0,78 | 0,61 | 0,41 |
| 9 | 2,07 | 2,26 | 1,97 | 1,43 |
| 10 | 1,68 | 1,83 | 1,61 | 1,17 |
| 11 | 0,82 | 0,89 | 0,77 | 0,55 |
| 12 | 2,07 | 2,22 | 1,90 | 1,36 |
| 13 | 0,99 | 0,94 | 0,73 | 0,49 |
| 14 | 0,27 | 0,22 | 0,17 | 0,12 |
| 15 | 0,13 | 0,10 | 0,08 | 0,06 |
| 16 | 8,31 | 7,87 | 6,13 | 4,18 |
| 17 | 1,50 | 1,31 | 0,97 | 0,65 |
| 18 | 1,62 | 1,50 | 1,16 | 0,80 |
| 19 | 0,93 | 0,87 | 0,67 | 0,45 |
| 20 | 1,03 | 1,02 | 0,82 | 0,56 |
| 21 | 0,56 | 0,54 | 0,43 | 0,29 |
| 22 | 0,59 | 0,57 | 0,45 | 0,31 |
| 23 | 1,79 | 1,63 | 1,23 | 0,83 |
| 24 | 2,20 | 1,97 | 1,47 | 0,98 |
| 25 | 1,07 | 1,02 | 0,80 | 0,54 |
| 26 | 1,97 | 1,92 | 1,52 | 1,03 |
| 27 | 0,19 | 0,15 | 0,11 | 0,07 |

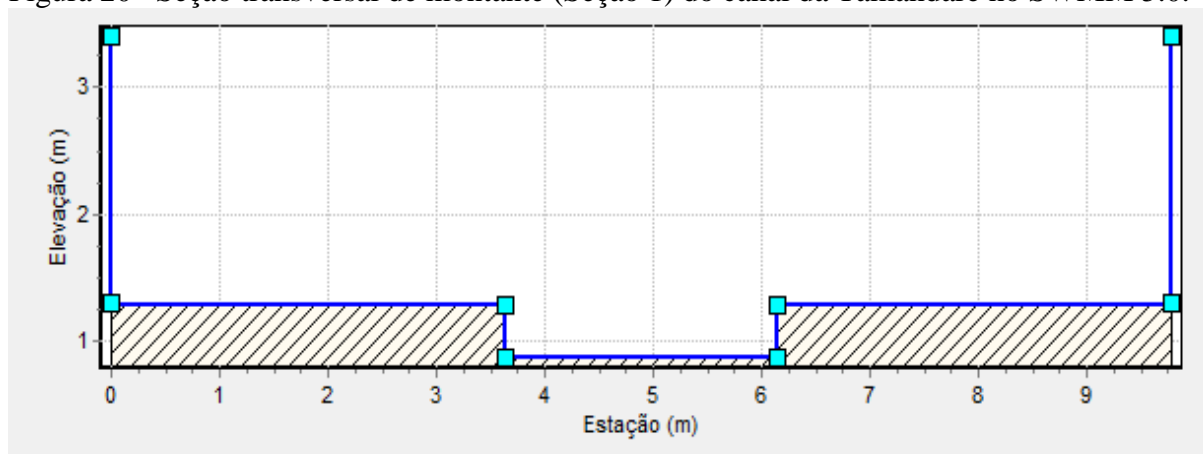
Os valores de pico das sub-bacias da Tamandaré apresentaram grande variação, devido às características específicas de cada área. Contudo, é importante destacar que os dois maiores valores de vazão das sub-bacias 1 e 16, que apresenta maior área de captação e declividade mais acentuada, com seus exutórios na montante do canal, antes da redução de seção (Seção 2). Esses hidrogramas de vazão das sub-bacias foram fundamentais para o conhecimento dos volumes pluviais que chegam até o canal, sendo a base para a modelagem hidrodinâmica do sistema de macrodrenagem do presente estudo.

5.2.3 Simulações Hidrodinâmicas das Condições de Escoamento do Sistema de Macrodrenagem da Tamandaré

O levantamento dos aspectos das sub-bacias, juntamente, com os dados do canal de drenagem e dos fatores hidrológicos (precipitação pluviométrica e maré) permitiu a modelagem hidrodinâmica do sistema de macrodrenagem da bacia da Tamandaré.

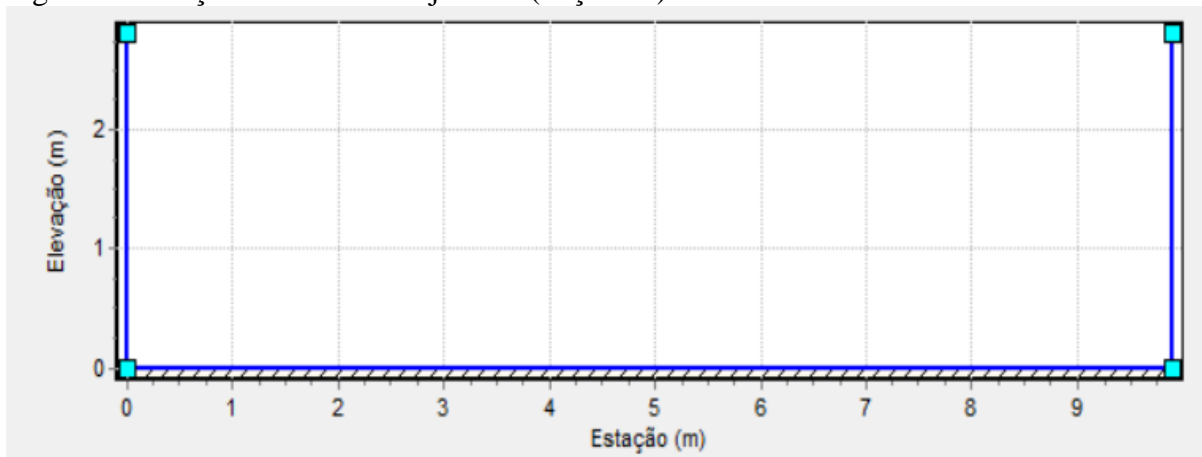
Nessa modelagem foram identificados os níveis de água no canal e em vias próximas que recebem a parcela de inundação. Na Figura 20 é apresentada a seção transversal do canal na montante.

Figura 20 – Seção transversal de montante (Seção 1) do canal da Tamandaré no SWMM 5.0.



É importante destacar que a altura da valeta central é de 0,40 m (Seção 1), sendo reduzida ao longo da extensão canal até alcançar o mesmo nível das bordas, que ocorre na última seção (Seção 10). Essa peculiaridade do canal foi acrescentada ao modelo para o desenvolvimento das simulações hidrodinâmicas. Na Figura 21 é apresentado as dimensões da seção de jusante do canal da Tamandaré.

Figura 21 – Seção transversal de jusante (Seção 10) do canal no SWMM 5.0.



Os valores incorporados no SWMM permitiram avaliar o comportamento hidrodinâmica no canal de drenagem na Tamandaré e o impacto de inundação na área urbana, sendo considerado, inicialmente, três cenários distintos, no caso, apenas precipitação pluviométrica, apenas maré e combinação da precipitação pluviométrica com maré, considerando a coincidência dos picos de vazão desses dois eventos.

5.2.3.1 Simulações do Escoamento das Precipitações Pluviométricas sem Efeitos de Maré no Canal de Drenagem

As primeiras simulações realizadas consistiram em avaliar a capacidade de escoar os diferentes eventos chuvosos do canal da Tamandaré, sem fatores externos (maré).

As Simulações 1 (Precipitação Pluviométrica de 1,5 h), 2 (Precipitação Pluviométrica de 3 h), 3 (Precipitação Pluviométrica de 6 h) e 4 (Precipitação Pluviométrica de 12 h), demonstram que o canal da Tamandaré tem a capacidade de escoar eventos de precipitação pluviométrica de diferentes durações, sem riscos de inundação. Entretanto, foi verificada elevação significativa no trecho à montante do canal pela brusca redução de seção entre os trechos 1 e 2, durante eventos de maior intensidade.

Nas Figura 22, Figura 23, Figura 24 e Figura 25 é possível identificar o nível de água (NA) do canal no instante que atinge a maior cota.

Figura 22 – Nível de água máximo alcançado no canal da Tamandaré durante precipitação pluviométrica com duração de 1,5 h (Simulação 1).

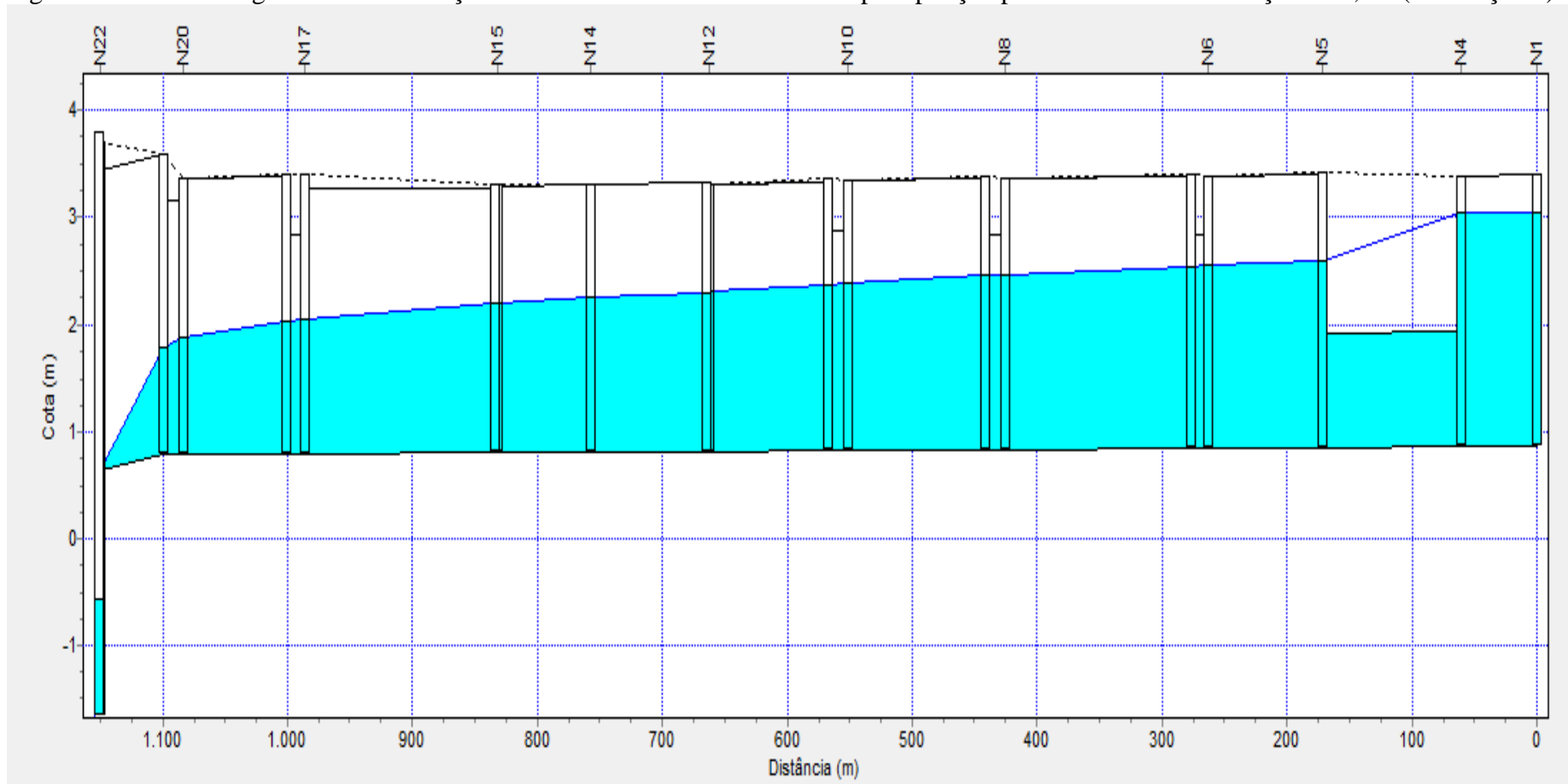


Figura 23 – Nível de água máximo alcançado no canal da Tamandaré durante precipitação pluviométrica com duração de 3 h (Simulação 2).

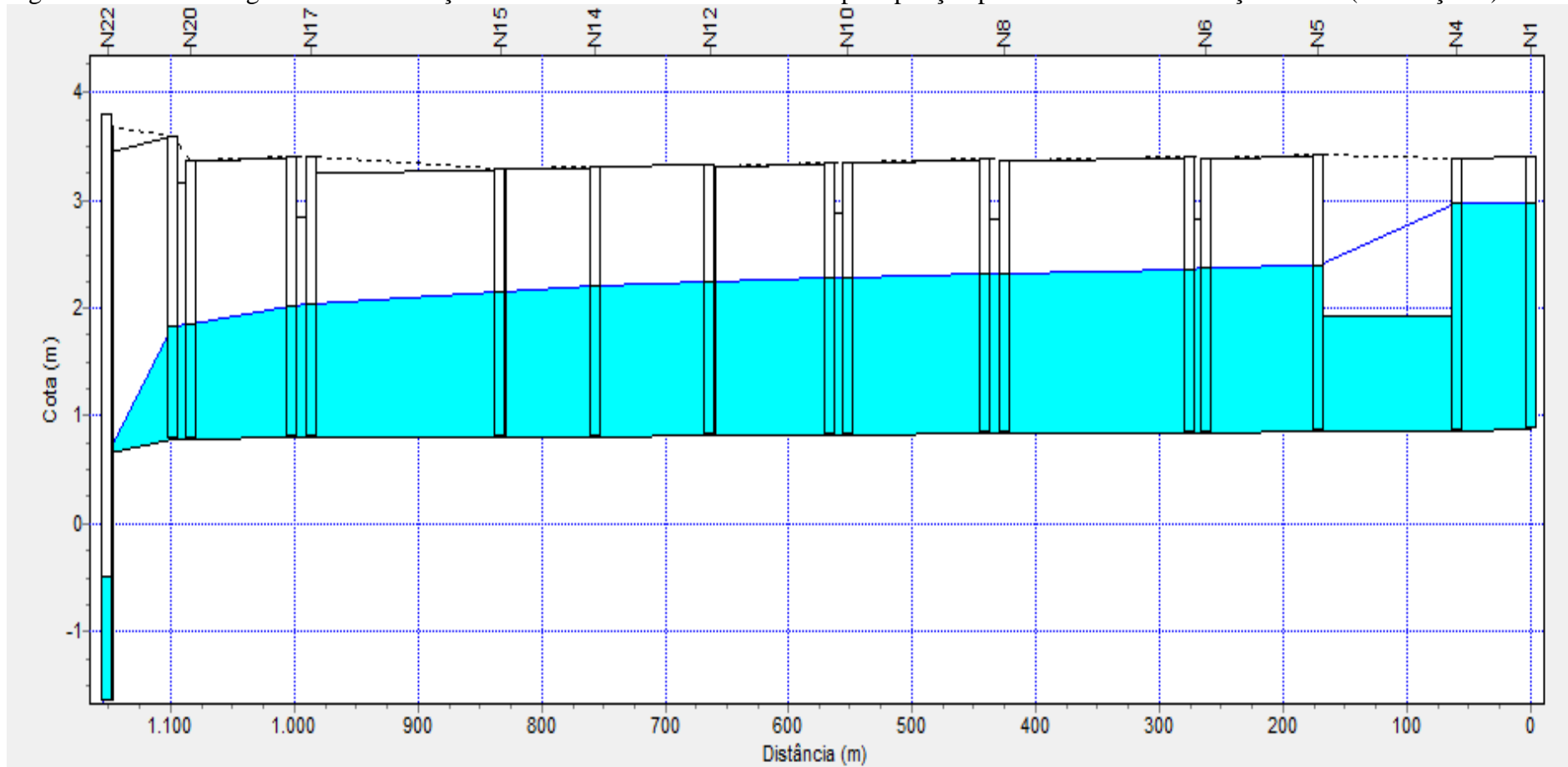


Figura 24 – Nível de água máximo alcançado no canal da Tamandaré durante precipitação pluviométrica com duração de 6 h (Simulação 3).

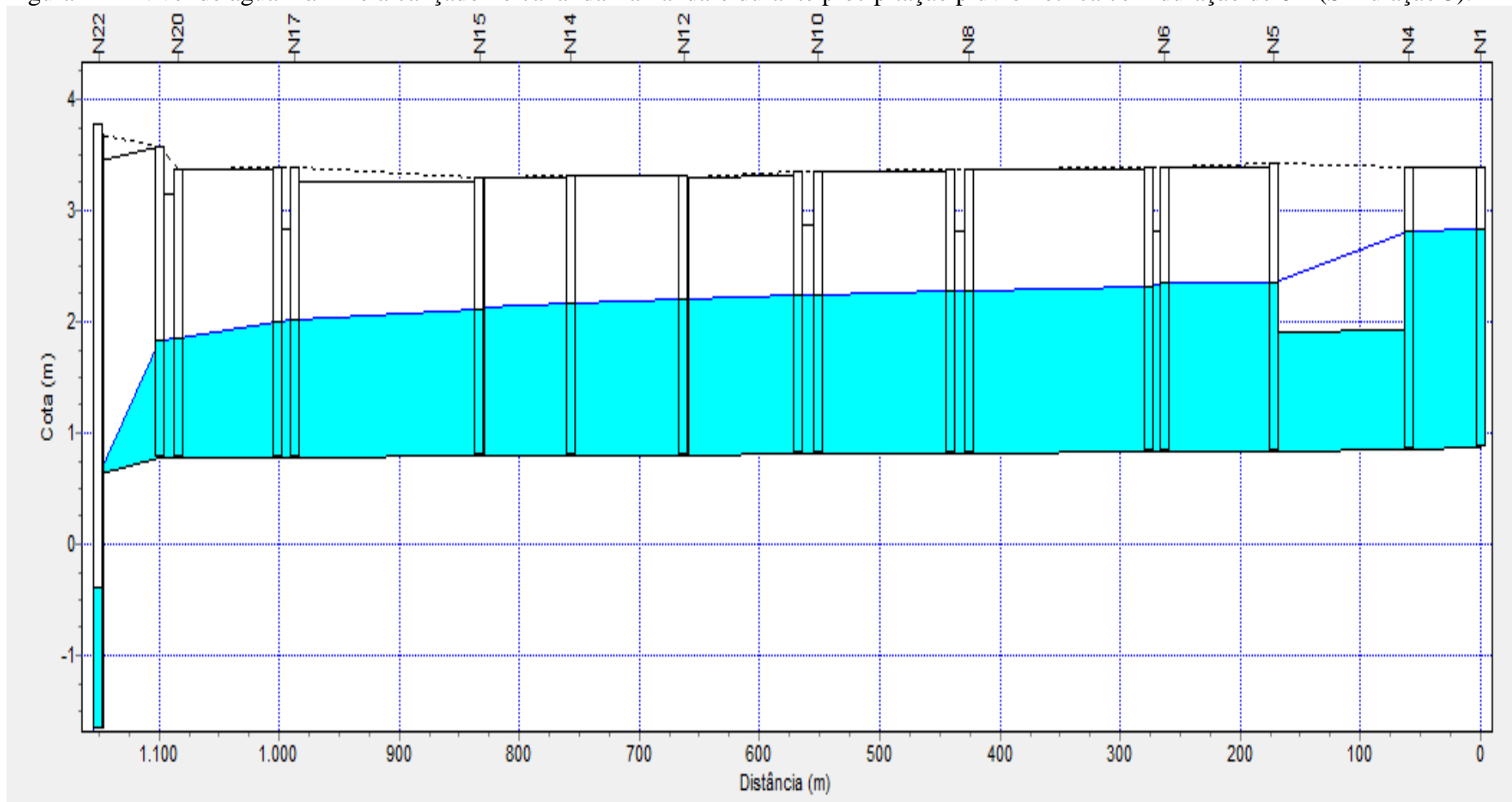
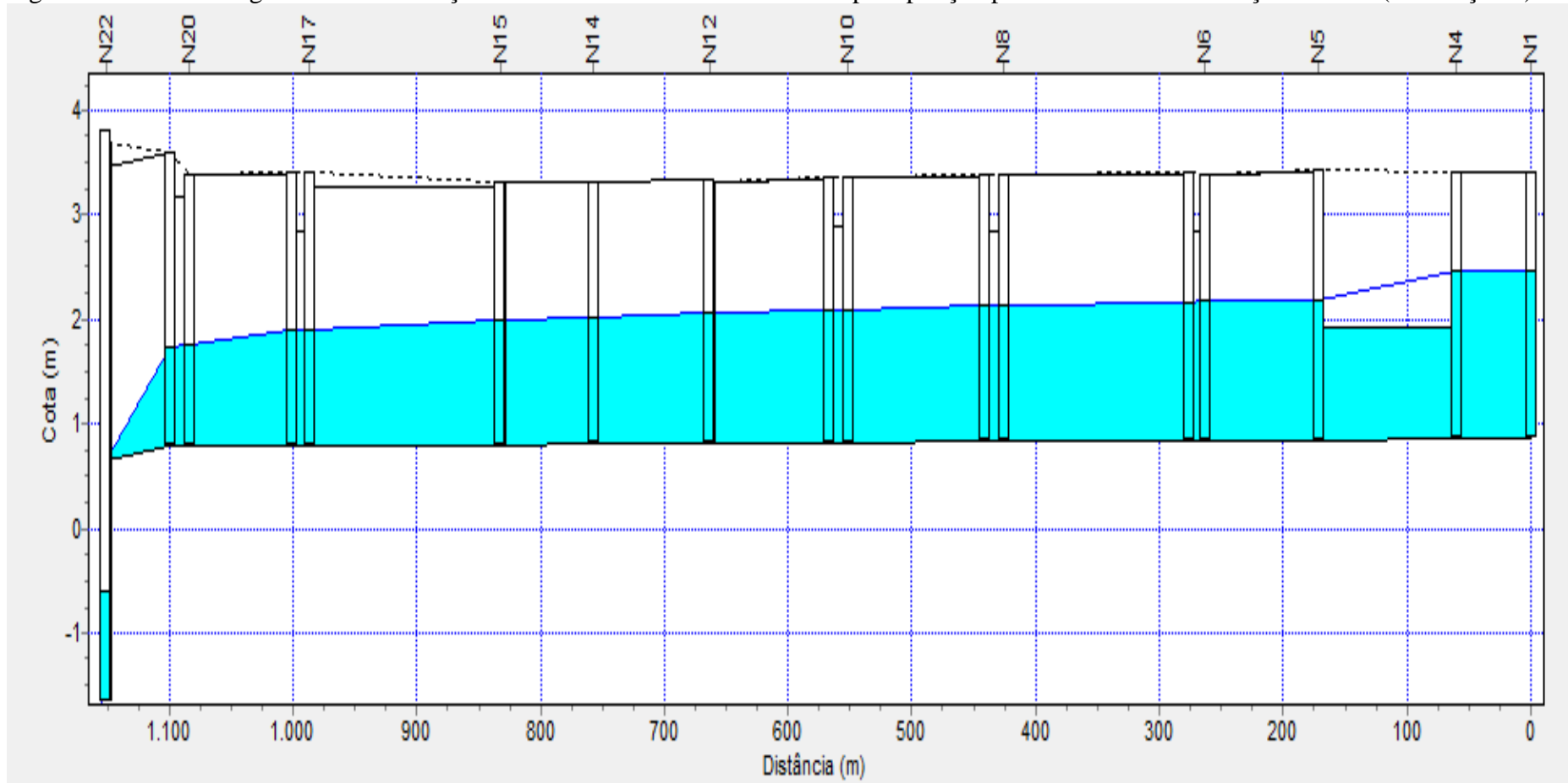


Figura 25 – Nível de água máximo alcançado no canal da Tamandaré durante precipitação pluviométrica com duração de 12 h (Simulação 4).



De modo geral, as simulações apresentaram respostas gerais semelhantes. Nas simulações foi verificado que a redução da área transversal (Seção 2) no trecho de montante causa grande impacto negativo para as condições hidráulicas de escoamento, sendo agravada com o aumento da intensidade da chuva. Ao longo do canal, foi observado que nível de água não ultrapassa a altura útil disponível da estrutura de drenagem, isto é, o nível de água (NA) está abaixo de 0,30 m da altura máxima, gerando escoamento do volume pluvial sem sobrecargas. Da mesma forma, a jusante do canal apresentou boas condições de escoamento, sem apresentar elevação de água na ausência de maré.

Na Simulação 1 foi verificado que o canal da Tamandaré tem capacidade para escoar o volume precipitado pelo evento de 1,5 h, sem que ocorra inundação. O nível máximo de água no canal alcançou a cota de 3,03 m, após 1,05 h de precipitação pluviométrica, período em que já foi precipitado 60,12 mm. A elevação de água nessa situação não atingiu o nível máximo da altura útil do canal na Seção 1, deixando borda livre de 0,36 m.

Na Simulação 2 foi verificado que o canal da Tamandaré tem capacidade para escoar o volume precipitado pelo evento de 3 h, sem que ocorra inundação. O nível máximo de água no canal alcançou a cota de 2,97 m, após 1,12 horas de precipitação pluviométrica, período em que já foi precipitado 70,21 mm. A elevação de água nessa situação não atingiu o nível máximo da altura útil do canal na Seção 1, deixando a borda livre de 0,42 m.

Na Simulação 3 foi verificado que o canal da Tamandaré tem capacidade para escoar o volume precipitado pelo evento de 6 h, sem que ocorra inundação. O nível máximo de água no canal alcançou a cota de 2,85 m, após 3,60 h de precipitação pluviométrica, período em que já foi precipitado 88,29 mm. A precipitação pluviométrica com duração de 6 h, mesmo escoando maior volume pluvial até o canal, alcançou menor altura do nível d'água, se comparado às simulações 1 e 2, isso ocorre pela menor intensidade da chuva, atenuando o pico de vazão da montante. A elevação de água nessa situação não alcançou o nível máximo da altura útil do canal na Seção 1, deixando a borda livre de 0,55 m.

Na Simulação 4 foi verificado que o canal da Tamandaré tem capacidade para escoar o volume precipitado pelo evento de 12 h, sem que ocorra inundação. O nível máximo de água no canal alcançou a cota de 2,45 m, após 7,20 h de precipitação pluviométrica, período em que já foi precipitado 109,07 mm. A precipitação pluviométrica com duração de 12 h apresentou comportamento semelhante ao observado na precipitação pluviométrica de 6 h,

atingindo a menor altura de lâmina d'água. A elevação de água nessa situação não alcançou o nível máximo da altura útil do canal na Seção 1, deixando a borda livre de 0,95 m.

5.2.3.2 Simulação do Escoamento das Marés Baixa e Alta sem Eventos de Precipitações Pluviométricas no Canal de Drenagem

As simulações envolvendo apenas os eventos extremos de maré, a menor e a maior altura de maré registrada no porto de Belém, foram realizadas para identificar o nível de água que atinge as áreas próximas do canal sem eventos de precipitação pluviométrica.

Na Simulação 5 (Maré baixa) foi verificado que o canal da Tamandaré tem a capacidade para comportar o volume fluvial que entra na estrutura, ficando comportado apenas na calha central, enquanto na Simulação 6 (Maré alta) foi confirmado que apenas a maré alta tem capacidade para gerar eventos de inundação na microbacia da Tamandaré, sem extravasamento do canal.

No caso da microbacia da Tamandaré, as inundações podem ocorrer devido à cota da rua e das estruturas de microdrenagem estarem abaixo do NA no canal, fazendo com que ocorra afloramento das águas do canal pelo sistema de microdrenagem, isto é, extravasando pelas boca-de-lobo nas vias próximas ao canal com cotas baixas.

Nas Figura 26 e Figura 27 é possível identificar o nível de água (NA) do canal no instante em que atinge a maior cota pelos efeitos de maré.

Figura 26 – Nível máximo de água gerado por efeitos de maré baixa no canal da Tamandaré (Simulação 5).

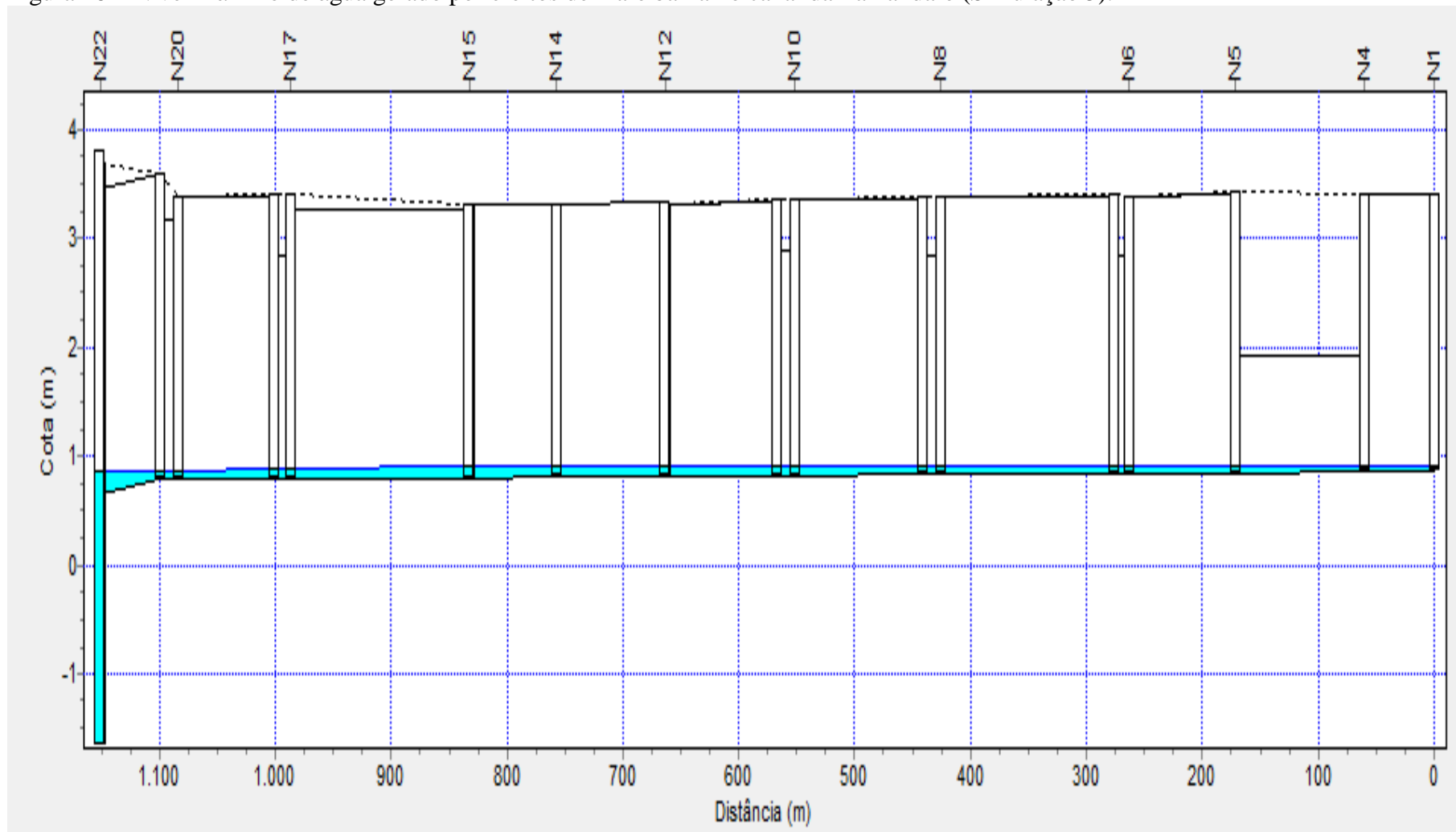
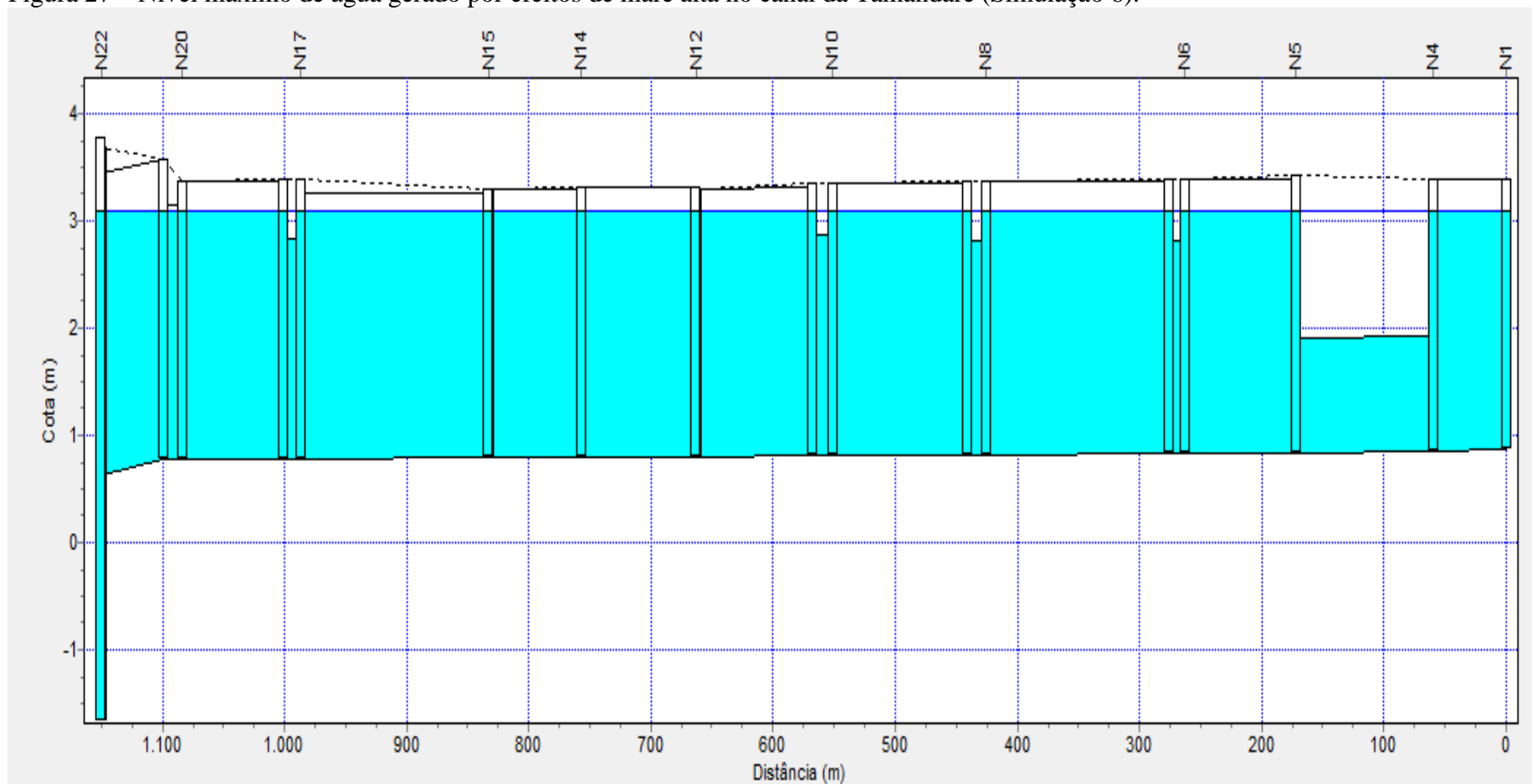


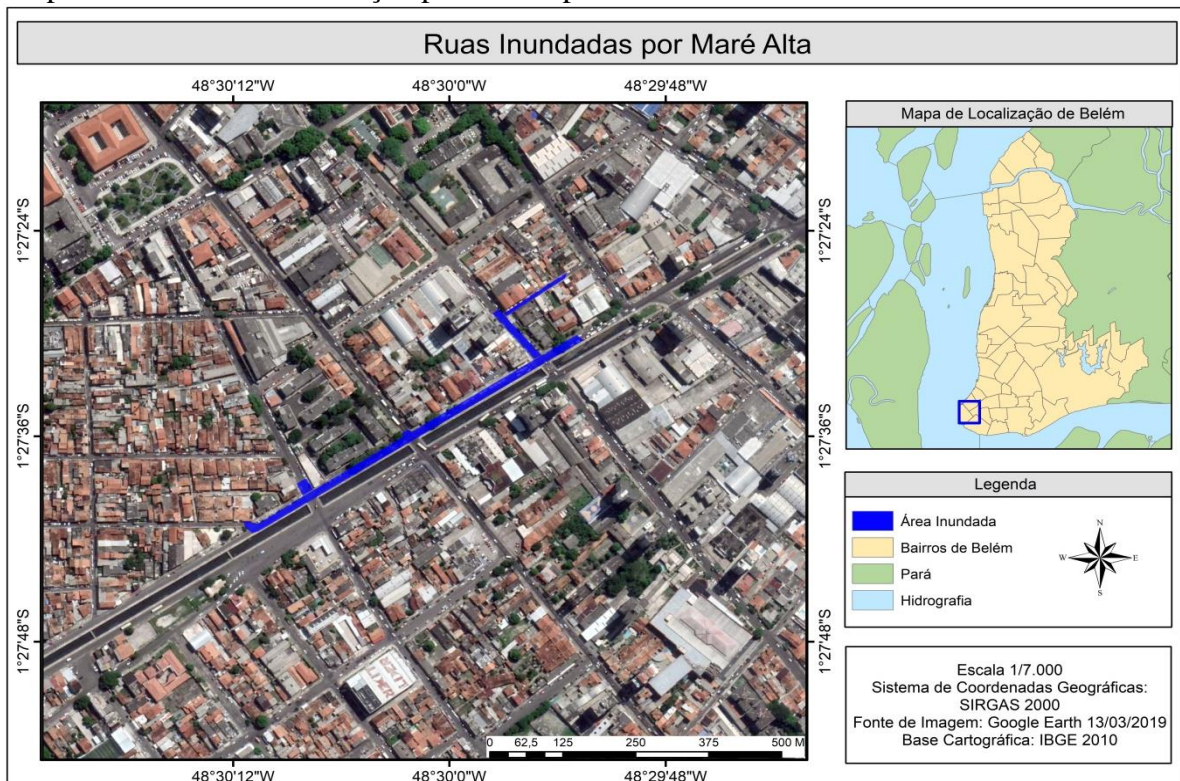
Figura 27 – Nível máximo de água gerado por efeitos de maré alta no canal da Tamandaré (Simulação 6).



Na Simulação 5 foi verificado que a menor altura de maré registrada atinge a soleira do canal da Tamandaré (cota 0,64 m) após 4,56 h do seu ponto de vale (nível máximo de vazante). A altura de água da maré atinge seu valor máximo 2,07 h depois de alcançar a soleira do canal, alcançando a cota 0,96 m. No ponto de pico de enchente, a maré não consegue atingir toda a extensão do canal de drenagem, entretanto, após o ponto de inflexão, para a vazante, a maré passa a escoar até atingir a montante do canal após 1,13 h do seu pico de enchente.

Na Simulação 6 foi verificado que a maior altura de maré registrada atinge a soleira (cota 0,64 m) do canal da Tamandaré após 1,17 h do seu ponto de vale (nível máximo de vazante), demonstrando que, em caso de maré alta, o nível de água sobe rapidamente. Após alcançar a soleira do canal, a maré atinge a montante dessa estrutura em 0,92 h, com profundidade de 0,97 m na jusante. O nível da maré continuou subindo após atingir a montante, chegando ao nível do solo (cota 2,98 m) 2,22 h depois de ter alcançado a cabeceira do canal, momento em que o nível de água na baía do Guajará atingia a cota 3,39 m. A partir desse valor de cota, ocorreu inundação, com afloramento da maré pelas estruturas de microdrenagem, sem extravasamento do canal. No Mapa 6 é apresentado as vias afetadas por efeitos de maré alta.

Mapa 6 – Mancha de inundação provocada pela maré alta.



O evento de inundação gerado pela maré durou 1,73 h, período em que alcançou a cota de 3,11 m, formando lâmina líquida sobre as vias com altura máxima de 0,13 m. O volume de inundação ocasionada pela maré alta foi de 354 m³, distribuída na mancha de inundação formada em áreas próximas ao canal.

A partir da simulação de maré alta foi possível identificar que o muro de contenção existente no final do canal da Tamandaré gera 15 cm de perda de carga entre o nível da maré na baía do Guajará e no interior do canal no momento de pico de inundação, reduzindo o nível máximo alcançado pela maré no sistema de drenagem. Além disso, foi confirmado que apenas a maré alta causa inundações no espaço urbano da microbacia da Tamandaré. Isso confirma que em cidades com cotas altimétricas baixas, deve ser empregado técnicas para barrar a entrada de maré em conjunto com as estruturas tradicionais (galerias e canais) de drenagem de águas pluviais.

A simulação de maré baixa demonstra que o nível de água no interior do canal não é significativo durante a sua ocorrência, sendo comportado na calha central. Em contrapartida, a simulação da maré alta confirma os casos de inundação, estes que podem ser agravados na coincidência com eventos de precipitação pluviométrica. Para essa avaliação, nesta pesquisa foram relacionados os picos de maré e de escoamento durante eventos de precipitação pluviométrica, sendo posicionados para que ocorressem no mesmo instante, gerando a pior situação de escoamento do sistema de macrodrenagem.

5.2.3.3 Simulação do Escoamento de Precipitações Pluviométricas com Efeitos de Maré Baixa no Canal de Drenagem

As simulações envolvendo os eventos extremos de menor altura de maré registrada no porto de Belém, juntamente com eventos de precipitação pluviométricas foram realizadas para identificar o nível de água que atinge as áreas próximas do canal na coincidência desses eventos.

As Simulações 7 (Precipitação pluviométrica 1,5 h + MB), 8 (Precipitação pluviométrica 3 h + MB), 9 (Precipitação pluviométrica 6 h + MB) e 10 (Precipitação pluviométrica 12 h + MB), demonstram que o canal da Tamandaré tem a capacidade de escoar eventos de precipitação pluviométrica de diferentes durações, sem riscos de inundação, durante oscilações de maré baixa. Entretanto, foi verificada elevação significativa no trecho à montante do canal pela brusca redução de seção entre os trechos 1 e 2, durante eventos de maior intensidade.

Nas Figura 28, Figura 29, Figura 30 e Figura 31 é possível identificar os níveis de água (NA) do canal no instante em que atinge a maior cota durante eventos de precipitação pluviométrica e maré baixa.

Figura 28 - Nível de água máximo alcançado no canal da Tamandaré durante precipitação pluviométrica com duração de 1,5h e maré baixa (Simulação 7).

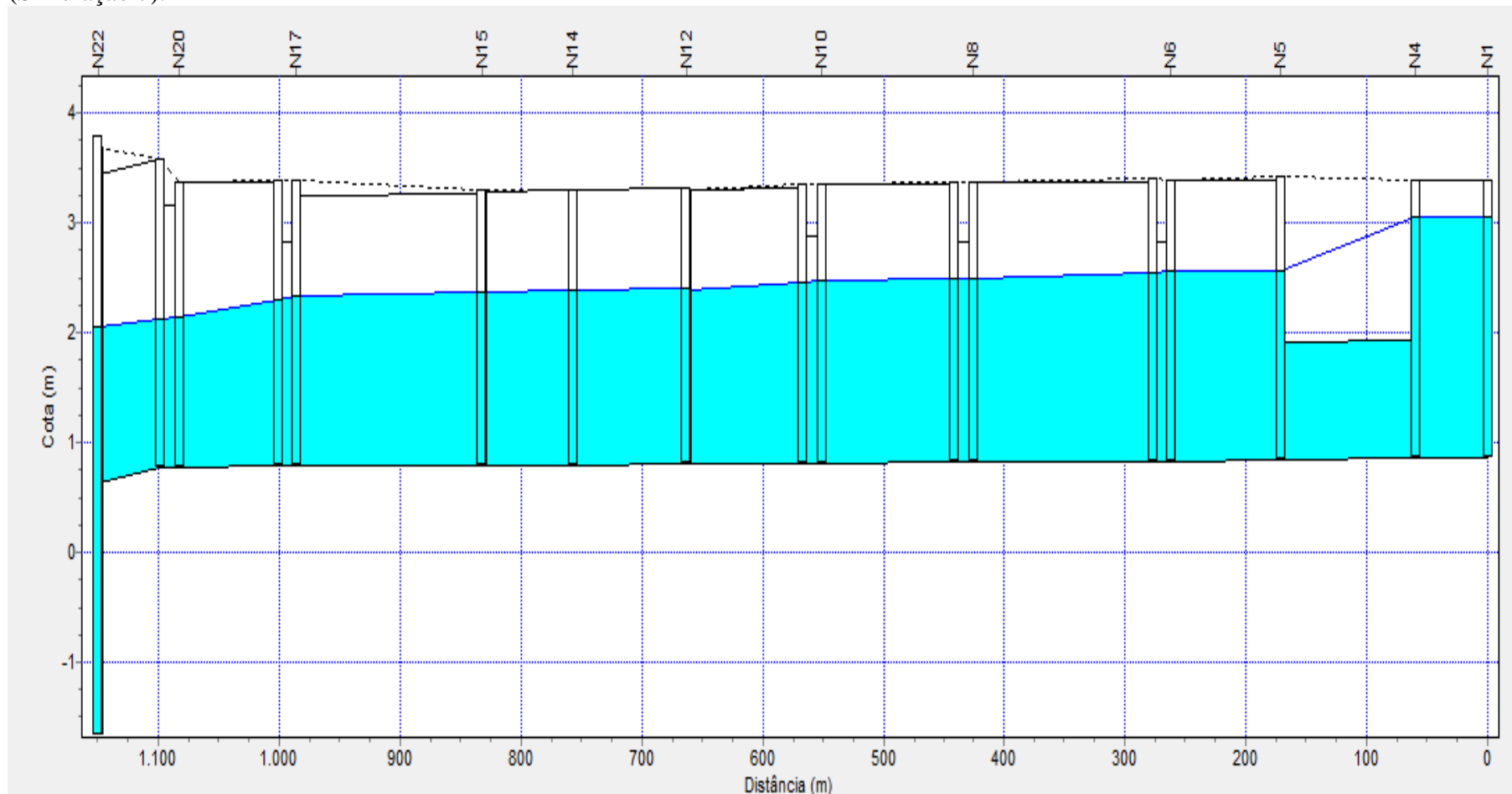


Figura 29 - Nível de água máximo alcançado no canal da Tamandaré durante precipitação pluviométrica com duração de 3h e maré baixa (Simulação 8).

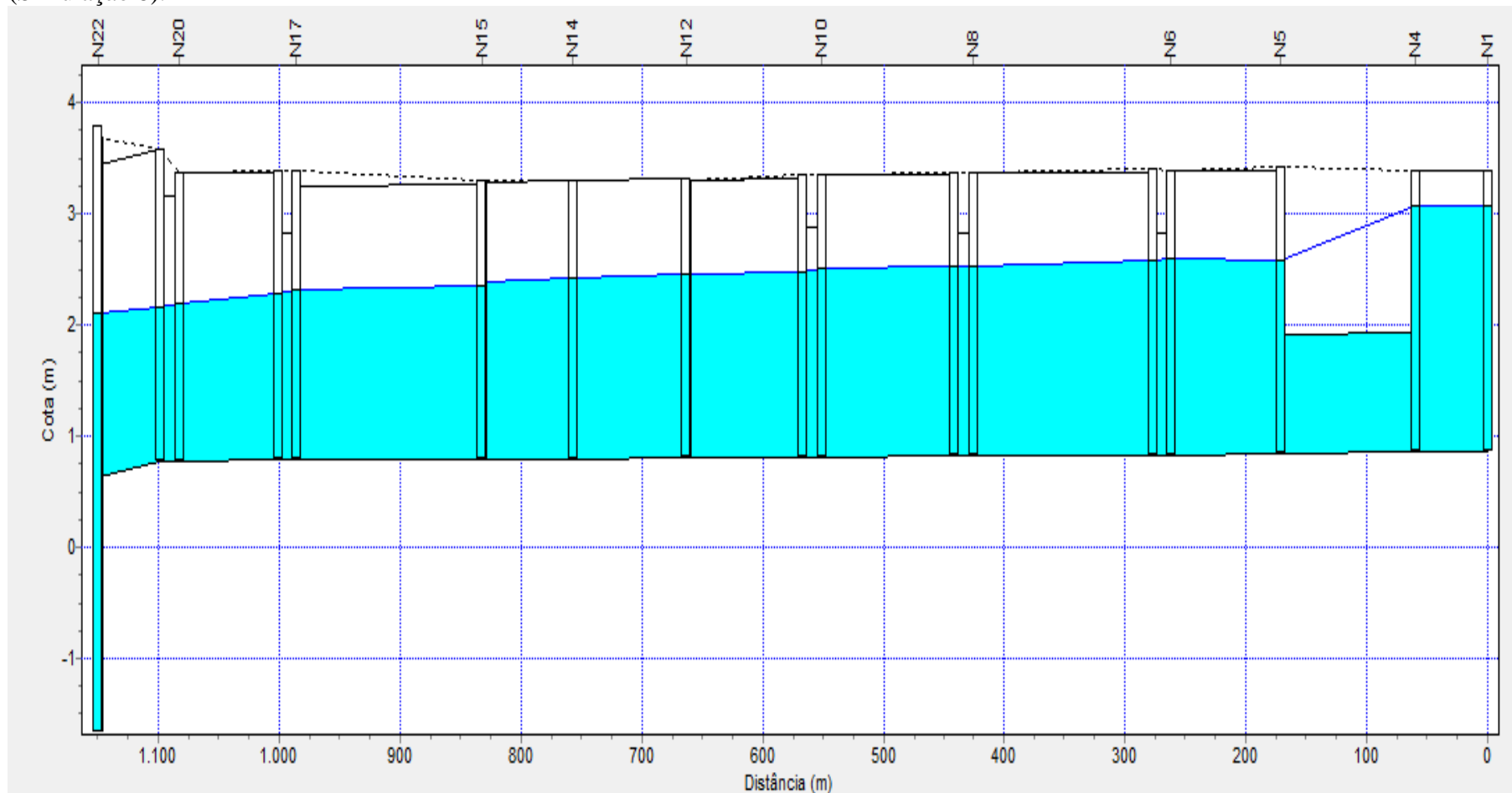


Figura 30 - Nível de água máximo alcançado no canal da Tamandaré durante precipitação pluviométrica com duração de 6h e maré baixa (Simulação 9).

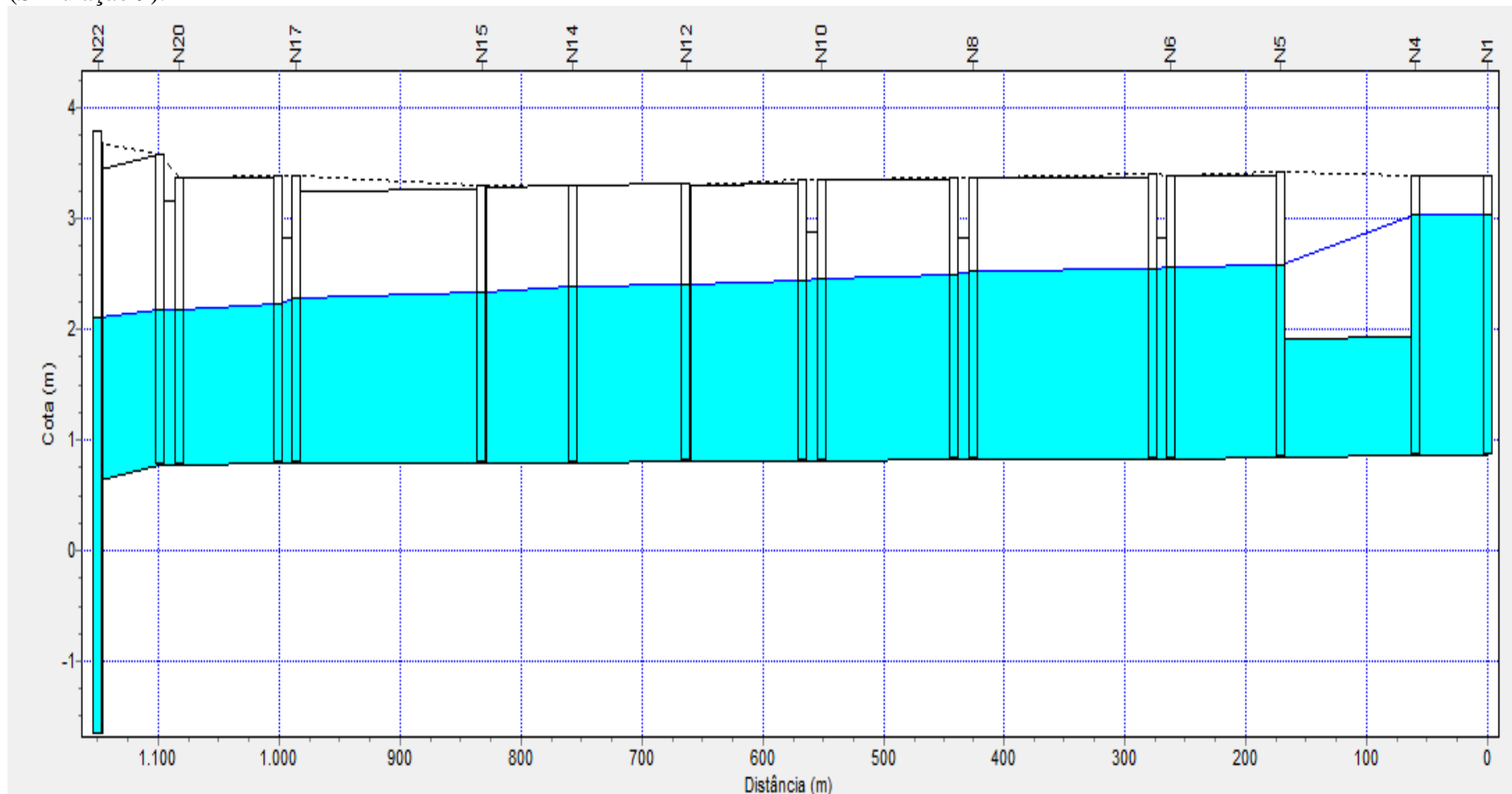
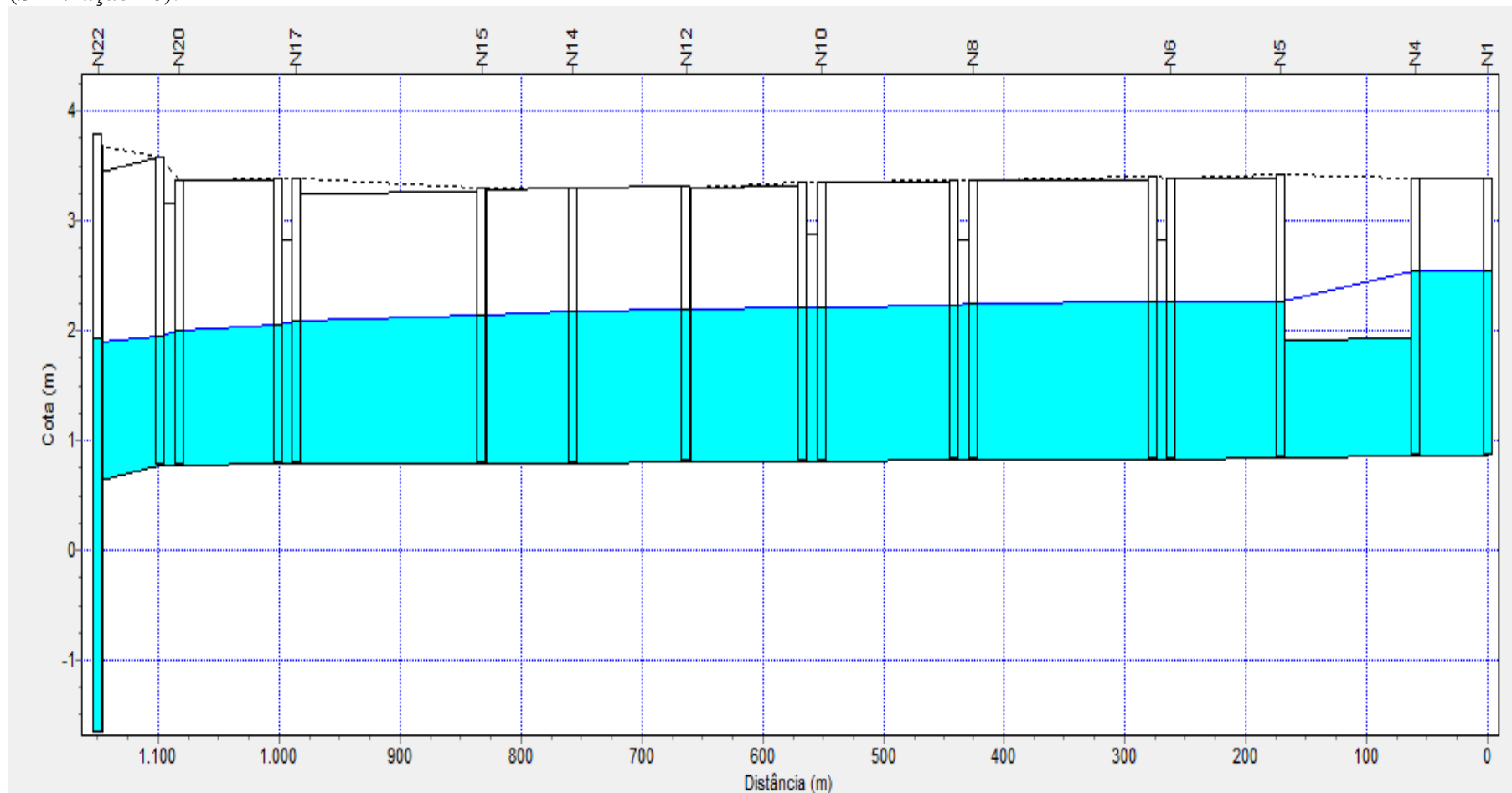


Figura 31 - Nível de água máximo alcançado no canal da Tamandaré durante precipitação pluviométrica com duração de 12h e maré baixa (Simulação 10).



A partir da simulação dos eventos de precipitação pluviométrica em conjunto com a maré baixa foi identificado que o nível de água na jusante do canal acaba sendo elevado durante os eventos chuvosos, demonstrando o impacto causado pelo nível de água no exutório. Além disso, foi confirmado que a dinâmica do escoamento é modificada pela presença de maré no canal, foi observado que o maior nível de água acumulado na montante acontece durante a precipitação pluviométrica de 3 h. Enquanto, nas simulações sem efeitos de maré, o nível máximo acontece durante a precipitação pluviométrica de 1,5 h.

Na Simulação 7 foi verificado que o canal da Tamandaré tem capacidade de escoar o volume precipitado pelo evento de 1,5 h quando coincide com o pico da menor altura de maré. Entretanto, foi observado grande elevação do nível de água na primeira seção.

Em conjunto com a alta intensidade pluviométrica e a brusca redução de seção, foi gerada rápida elevação do nível de água na montante do canal, passando da cota 0,97 m para 3,06 m (aumento de 2,07 m) em 0,77 h. O nível máximo de água no canal alcançou a cota de 3,06 m na seção de montante depois de 1,12 h de precipitação pluviométrica. A elevação de água nessa situação quase atingiu o nível de altura útil do canal na Seção 1, deixando borda livre de 0,32 m. A consequência dessa diminuição de capacidade do canal fez com que o nível de água atingisse a cota de 3,06 m na montante, enquanto, no exutório do canal, a lâmina d'água chegou apenas à cota 2,20 m, diferença de 0,86 m da seção à montante.

Na Simulação 8 foi verificado que o canal da Tamandaré tem capacidade de escoar o volume precipitado pelo evento de 3 h quando coincide com o pico da menor altura de maré. Além disso, foi observado grande elevação do nível de água na primeira seção, chegando próximo ao extravasamento pela microdrenagem.

Nessa simulação, semelhante à anterior, a alta intensidade pluviométrica e a brusca redução de seção geraram rápida elevação do nível de água na montante do canal, passando da cota 0,97 m para 3,08 m (aumento de 2,11 m) em 1,15 h. O nível máximo de água no canal alcançou a cota de 3,08 m na seção de montante depois de 1,90 h de precipitação pluviométrica. A elevação de água nessa situação atingiu o nível de altura útil (1,75 m) do canal na Seção 1, deixando borda livre de 0,30 m. A consequência dessa diminuição de capacidade do canal gerada pela maré fez com que o nível de água atingisse a cota de 3,08 m na montante, enquanto, no exutório do canal, a lâmina d'água chegou apenas à cota 2,27 m, diferença de 0,81 m da seção à montante.

Na Simulação 9 foi verificado que o canal da Tamandaré tem capacidade de escoar o volume precipitado pelo evento de 6 h em situações de maré baixa. Comparado às situações encontradas nas Simulações 7 e 8, foi observado que precipitações pluviométricas com maior duração distribuem o volume precipitado favorecendo o escoamento.

Em conjunto do volume precipitado e a brusca redução de seção, foi gerada elevação do nível de água na montante do canal, passando da cota 0,97 m para 3,05 m (aumento de 2,08 m) em 2,38 h. O nível máximo de água no canal alcançou a cota de 3,05 m na seção de montante depois de 3,62 h de precipitação pluviométrica. A elevação de água nessa situação atingiu o nível de altura útil do canal na Seção 1, deixando borda livre de 0,33 m. A consequência dessa diminuição de capacidade do canal fez com que o nível de água atingisse a cota de 3,05 m na montante, enquanto, no exutório do canal, a lâmina d'água chegou apenas à cota 2,25 m, diferença de 0,80 m da seção à montante.

Na Simulação 10 foi verificado que o canal da Tamandaré tem capacidade de escoar o volume precipitado pelo evento de 12 h em situações de maré baixa. Nessa simulação foi verificada a melhor situação de escoamento mesmo contendo o maior volume de precipitação pluviométrica.

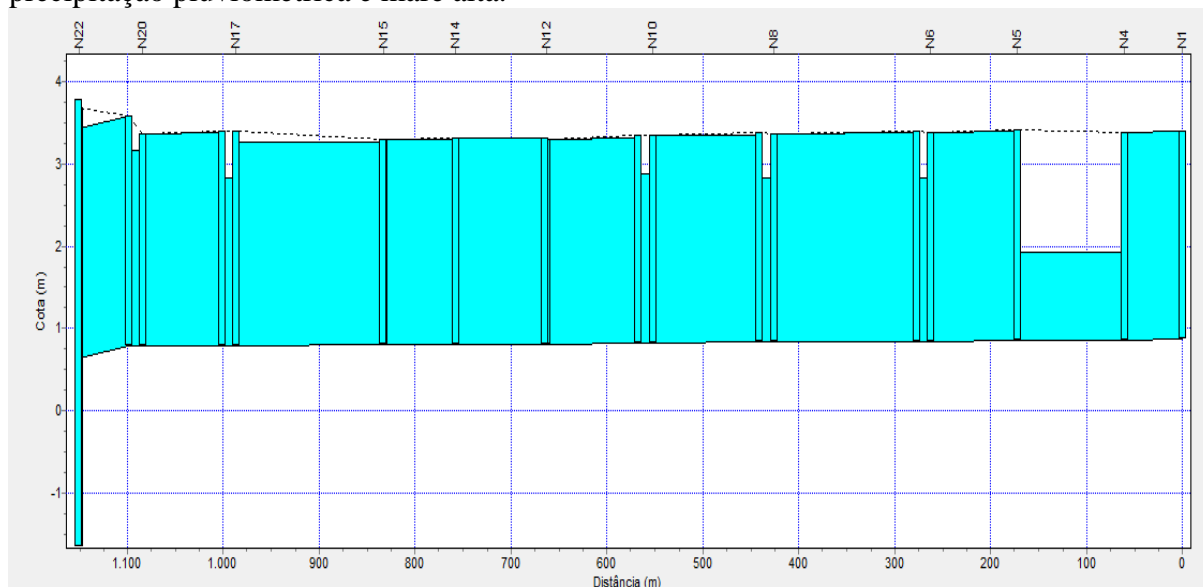
Mesmo com a brusca redução de seção, foi gerada pequena elevação do nível de água na montante do canal, passando da cota 0,97 m para 2,55 m (aumento de 1,58 m) durante 4,88 h. O nível máximo de água no canal alcançou a cota de 2,55 m na seção de montante depois de 7,08 h de precipitação pluviométrica. A elevação de água nessa situação atingiu o nível de altura útil do canal na Seção 1, deixando borda livre de 0,83 m. A consequência dessa diminuição de capacidade do canal fez com que o nível de água atingisse a cota de 2,55 m na montante, enquanto, no exutório do canal, a lâmina d'água chegou apenas à cota 1,99 m, diferença de 0,56 m da seção à montante.

5.2.3.4 Simulação do Escoamento das Precipitações Pluviométricas com Efeitos de Maré Alta no Canal de Drenagem

As simulações envolvendo os eventos extremos de maior altura de maré registrada no porto de Belém, juntamente com eventos de precipitação pluviométricas foram realizadas para identificar o nível de água que atinge as áreas próximas do canal na coincidência desses eventos.

Nas Simulações 11 (Precipitação pluviométrica 1,5 h + MA), 12 (Precipitação pluviométrica 3 h + MA), 13 (Precipitação pluviométrica 6 h + MA) e 14 (Precipitação pluviométrica 12 h + MA) foi verificado que o canal da Tamandaré não tem a capacidade de escoar eventos de precipitação pluviométrica de diferentes durações em momentos de maré alta. Diferente das simulações anteriores, o perfil de água do canal nessas simulações apresentou o mesmo comportamento, ultrapassando a altura do canal e causando grandes inundações. Na Figura 32 é possível identificar o nível de água (NA) do canal no instante em que atinge a maior cota.

Figura 32 – Nível de água máximo alcançado no canal da Tamandaré durante eventos de precipitação pluviométrica e maré alta.



O NA máximo alcançado no canal drenagem foi o mesmo para as simulações 11 a 14, isto é, o canal não suportou o volume pluvial, extravasando pelas bordas do canal para todos os eventos simulados de precipitação pluviométrica e maré alta. Entretanto, é importante comentar que os fatores envolvendo os eventos de inundação gerados foram distintos, apresentando suas próprias particularidades e impactos no meio urbano da bacia.

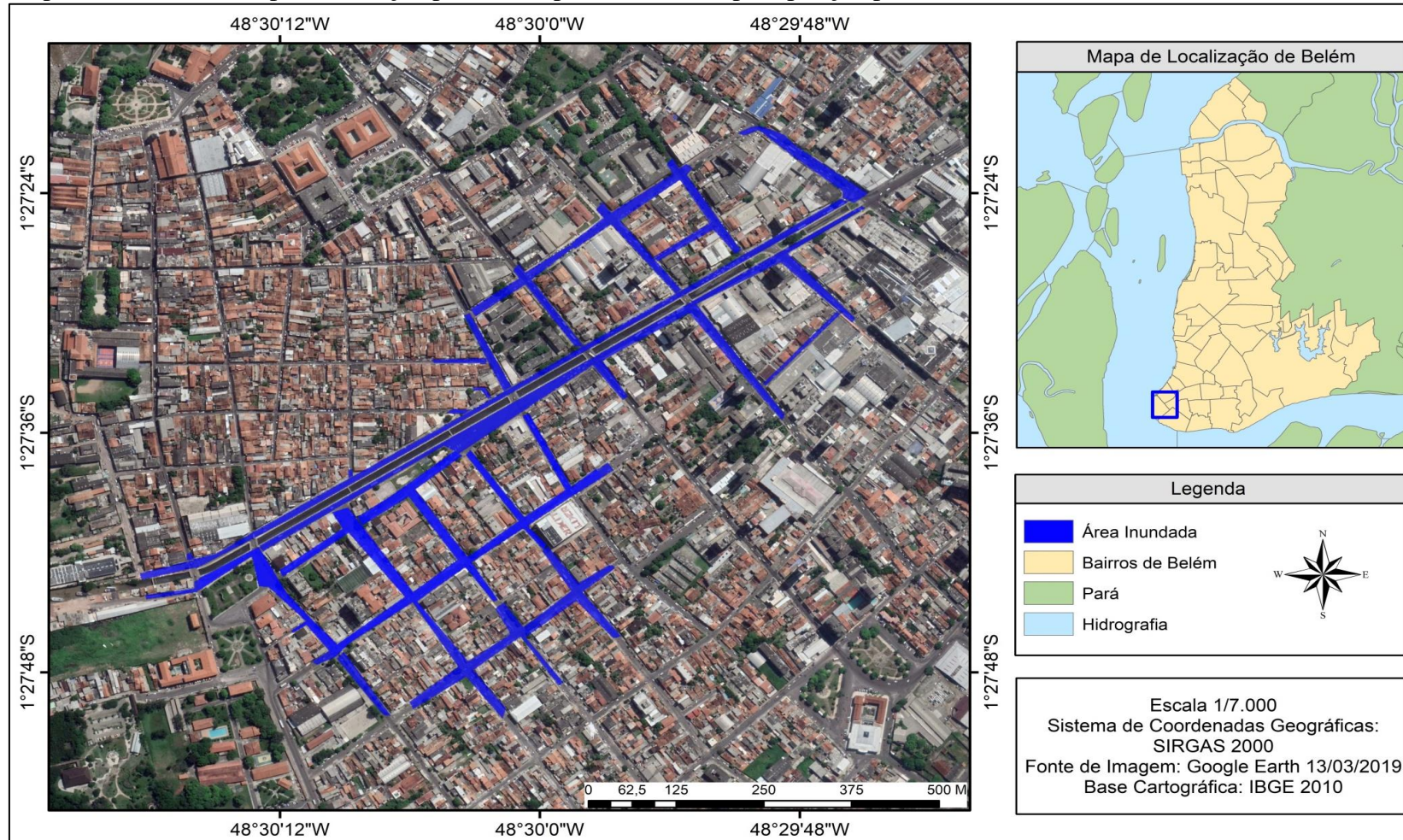
❖ Ocorrência de Inundação em Situação de Precipitação Pluviométrica de 1,5 h e Maré Alta (Simulação 11).

Na Simulação 11 foi verificado que o canal de drenagem da Tamandaré não tem capacidade de escoar o volume precipitado por precipitação pluviométrica de 1,5 h em conjunto com a maré alta. O nível de água alcançou o terreno 2,22 h após a maré invadir o canal. Vale comentar que inundação começa 3 minutos antes do início da chuva, isso por que a maré alta já começa a extravasar pela microdrenagem antes do seu ponto de pico, que coincide com o pico do hidrograma. Nessa situação, o nível de água do canal apresenta uniformidade, visto que a maré apresenta domínio no escoamento do canal, gerando fluxo de jusante para montante.

Com o início da precipitação pluviométrica de 1,5 h, evento pluviométrico de alta intensidade, somado ao contínuo aumento da maré, reduzindo escoamento e ocasionando efeito de remanso na montante, fez com que o volume excedente vertesse pelas bordas do canal e extravasasse pela microdrenagem, gerando inundação com profundidade máxima de 0,98 m, atingindo a cota de 3,96 m.

A inundação ocasionada por maré alta e precipitação pluviométrica de 1,5 h apresentou grande magnitude e sua ocorrência durou 2,70 h, demonstrando que a maré prejudica drasticamente o sistema de macrodrenagem. Nessa situação, o volume inundável foi de 121.123 m³, gerando grande mancha de inundação na bacia, conforme o Mapa 7.

Mapa 7 – Vias afetadas por inundação provocada pela maré alta e precipitação pluviométrica de 1,5 h.



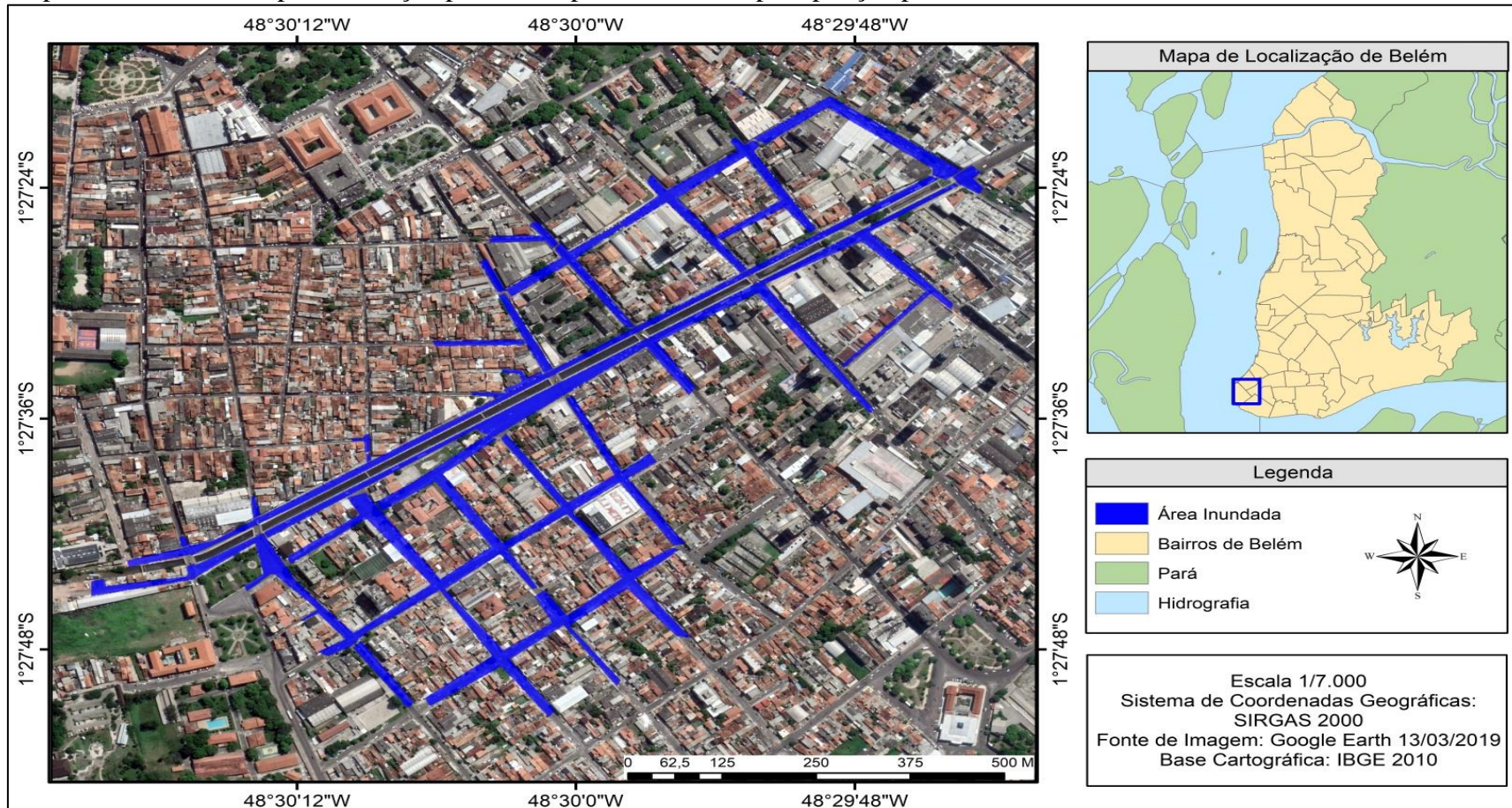
❖ Ocorrência de Inundação em Situação de Precipitação Pluviométrica de 3 h e Maré Alta (Simulação 12).

Na Simulação 12 foi verificado que o canal de drenagem da Tamandaré não tem capacidade de escoar o volume precipitado por precipitação pluviométrica 3 h em conjunto com a maré alta. O nível de água alcançou o terreno em 1,97 h após a maré invadir o canal. Vale comentar que inundação começa 42 min depois do início da chuva, período em que a vazão escoada pelas sub-bacias ainda não é significativa, gerando situação semelhante ao observado na Simulação 11. Nessa situação, o nível de água do canal apresenta uniformidade, visto que a maré apresenta domínio no escoamento do canal, gerando fluxo de jusante para montante.

Com o início da precipitação pluviométrica de 3 h, evento pluviométrico de alta intensidade, somado ao contínuo aumento da maré, reduzindo escoamento e ocasionando efeito de remanso na montante, fez com que o volume excedente vertesse pelas bordas do canal e extravasasse pela microdrenagem, gerando inundação com profundidade máxima de 1,05 m, atingindo a cota de 4,03 m.

A inundação ocasionada por maré alta e precipitação pluviométrica de 3 h apresentou grande magnitude e sua ocorrência durou 2,88h. Entretanto, é importante comentar que após o término da inundação, uma parcela do seu volume ainda continua escoando sobre as ruas durante 3,46 h até voltar ao sistema de drenagem ou acumular em trechos com pequena declividade. O volume desse evento de inundação foi de 125.913 m³, gerando grande mancha de inundação na bacia, conforme o Mapa 8.

Mapa 8 – Vias afetadas por inundação provocada pela maré alta e precipitação pluviométrica de 3 h.



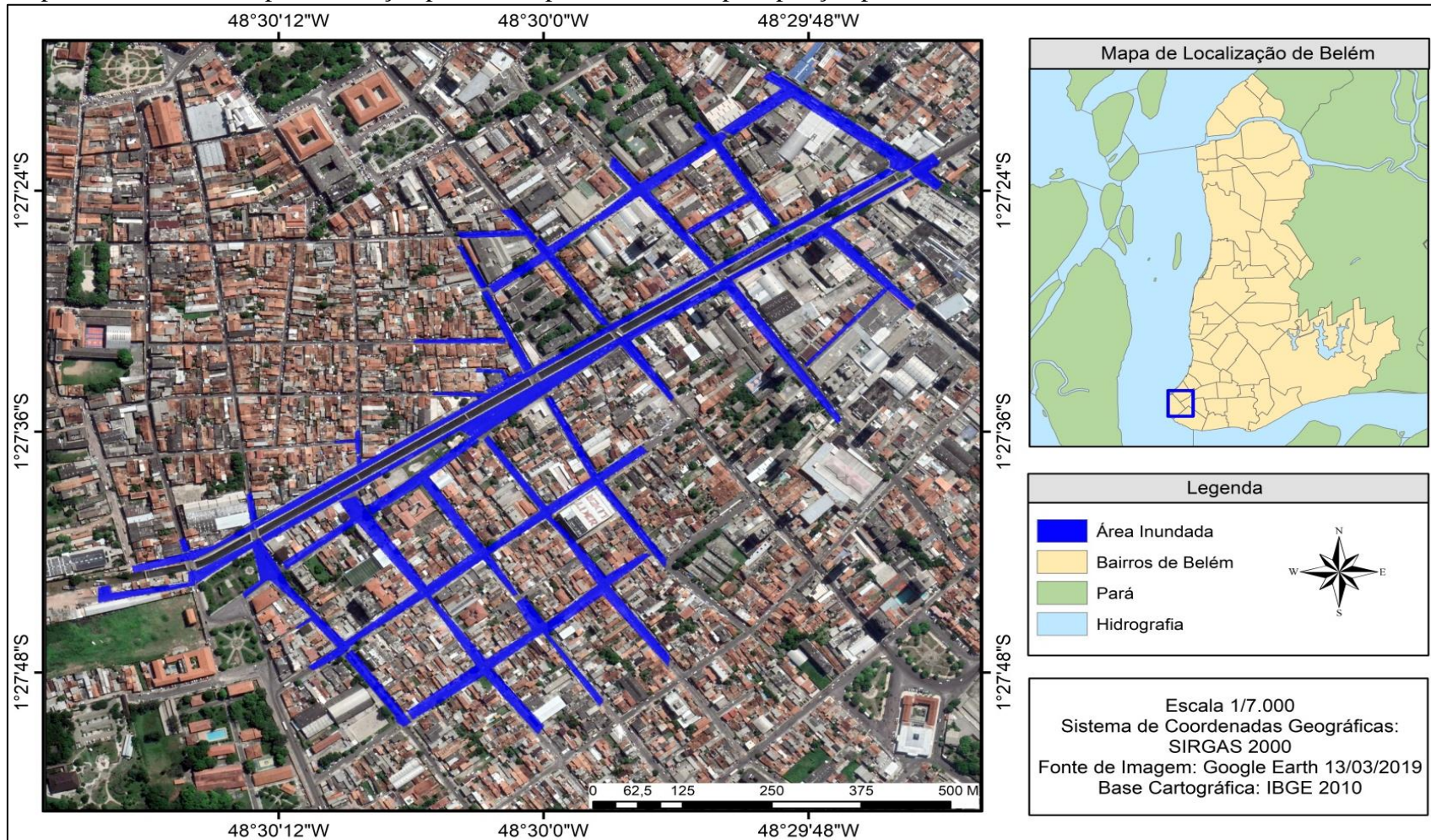
❖ Ocorrência de Inundação em Situação de Precipitação Pluviométrica de 6 h e Maré Alta (Simulação 13).

Na Simulação 13 foi verificado que o canal de drenagem da Tamandaré não tem capacidade de escoar o volume precipitado por precipitação pluviométrica de 6 h em conjunto com a maré alta. O nível de água alcançou o terreno em 1,67 h após a maré invadir o canal. Vale comentar que inundação começa 1,93h depois do início da chuva, período em que a vazão escoada pelas sub-bacias ainda não é significativa, gerando situação semelhante ao observado na Simulação 11 e 12. Nessa situação, o nível de água do canal apresenta uniformidade, visto que a maré apresenta domínio no escoamento do canal, gerando fluxo de jusante para montante.

Com o início da precipitação pluviométrica de 6 h, evento pluviométrico de moderada intensidade, somado ao contínuo aumento da maré, reduzindo escoamento e ocasionando efeito de remanso, fez com que o volume excedente vertesse pelas bordas do canal e extravasasse pela microdrenagem, gerando inundação com profundidade máxima de 1,07 m, atingindo a cota de 4,05 m.

A inundação ocasionada por maré alta e precipitação pluviométrica de 6 h apresentou grande magnitude e sua ocorrência durou 3,13 h, demonstrando que a maré prejudica drasticamente o sistema de macrodrenagem. Entretanto, é importante comentar que após o término da inundação, uma parcela do seu volume ainda continua escoando sobre as ruas durante 3,40 h até voltar ao sistema de drenagem ou acumular em trechos com pequena declividade. O volume desse evento de inundação foi de 130.149 m³, gerando grande mancha de inundação na bacia, conforme o Mapa 9.

Mapa 9 – Vias afetadas por inundação provocada pela maré alta e precipitação pluviométrica de 6 h.



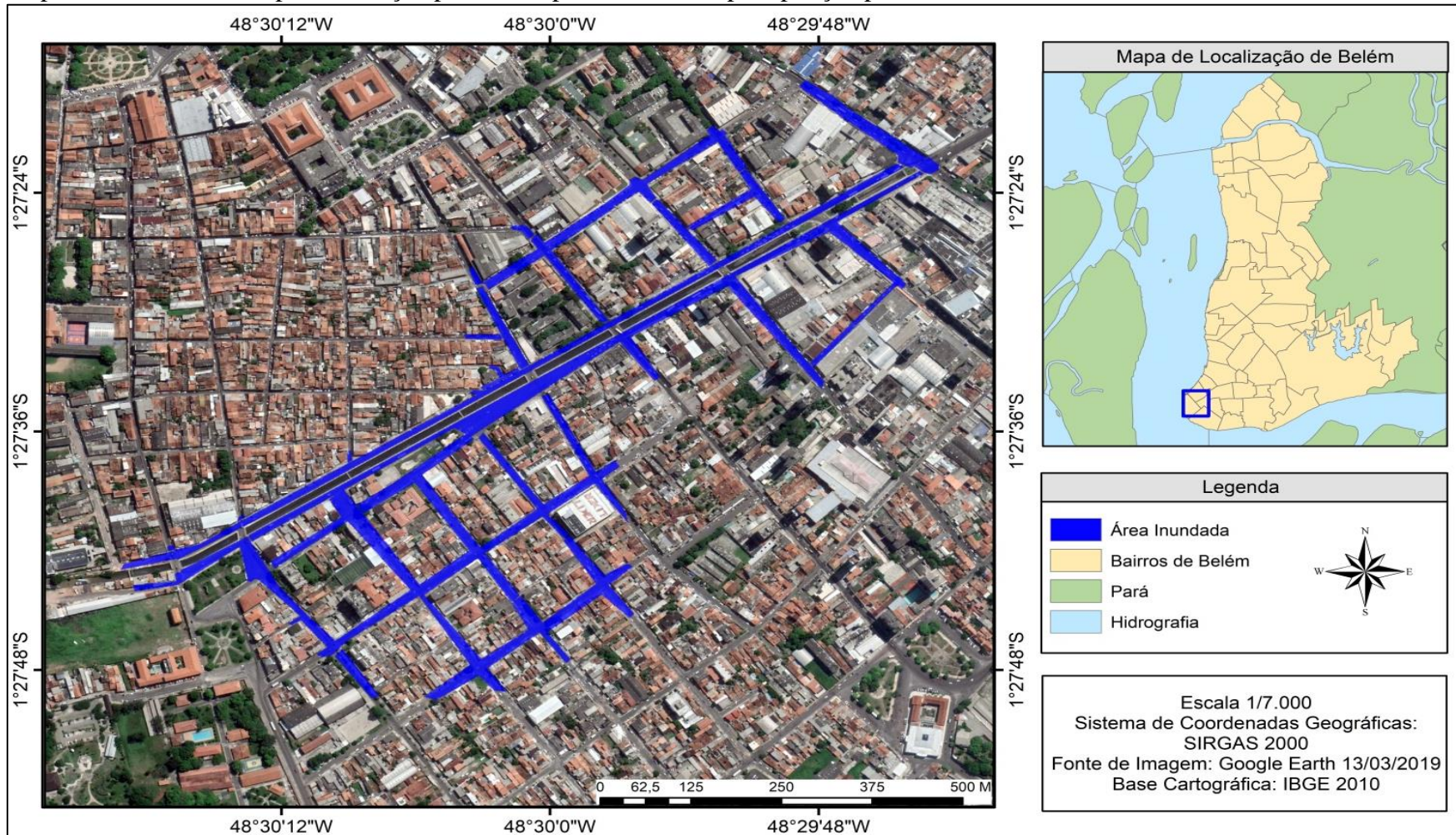
❖ Ocorrência de Inundação em Situação de Precipitação Pluviométrica de 12 h e Maré Alta (Simulação 14).

A Simulação 14 demonstrou que o canal de drenagem da Tamandaré não tem capacidade de escoar o volume precipitado por precipitação pluviométrica de 12 h em conjunto com a maré alta. O nível de água alcançou o terreno em 1,63 h após a maré invadir o canal. Vale comentar que inundação começa 5,13 h depois do início da chuva, período em que a vazão escoada pelas sub-bacias e, principalmente, pela maré eleva o nível de água no canal. Nessa situação, a lâmina líquida do canal apresenta uniformidade, entretanto, é observado que a maré apresenta domínio no escoamento do canal apenas até 475 m do exutório.

Com o início da precipitação pluviométrica de 12 h, evento pluviométrico de baixa intensidade, somado ao contínuo aumento da maré, reduzindo o escoamento e gerando inundação com profundidade máxima de 0,95 m, atingindo a cota de 3,93 m.

A inundação ocasionada por maré alta e precipitação pluviométrica de 12 h apresentou menor magnitude, se comparado aos outros eventos de precipitação pluviométrica e maré alta, contudo, essa inundação apresentou a maior duração, de 3,33 h. Além disso, é importante comentar que após o término da inundação, uma parcela do seu volume ainda continua escoando sobre as ruas durante 2,23 h até voltar ao sistema de drenagem ou acumular em trechos com pequena declividade. O volume desse evento de inundação foi de 117.668 m³, gerando grande mancha de inundação na bacia, conforme o Mapa 10.

Mapa 10 – Vias afetadas por inundação provocada pela maré alta e precipitação pluviométrica de 12 h.



As simulações permitem caracterizar os eventos de inundação que ocorrem na microbacia da Tamandaré. Com relação origem desses eventos, foi possível identificar que as elevações do nível de água do canal que afetam a área urbana ocorrem naturalmente, sem a presença de precipitação pluviométrica, sendo agravada na coincidência desses eventos, portanto, é definida como inundação de origem ribeirinha. No que tange a velocidade de ocorrência, os extravasamentos pela microdrenagem e pelo canal ocorre lentamente, afetando a malha urbana por poucas horas até a oscilação da maré permitir o escoamento para o sistema de drenagem. O impacto ocasionado à área urbana da bacia é definido com tangível de baixa intensidade, impactando os domicílios, os comércios e a infraestrutura local, gerando principalmente, problemas de mobilidade na área estudada.

É importante destacar que os resultados das simulações confirmam que a maré é um fator determinante para a ocorrência de inundações na microbacia da Tamandaré, visto que não há ocorrência de extravasamento de água do canal ou pela microdrenagem nos cenários simulados quando não ocorre interação com a maré alta. Na Tabela 9 é apresentado o resumo das simulações desenvolvidas para comparação entre os diferentes cenários de escoamento no canal de drenagem.

Tabela 9 – Resumo das simulações de escoamento da microbacia da Tamandaré.

| Simulação | Situação | Intensidade Pluviométrica (mm/h) | Cota máxima alcançada pelo nível da água | Evento de Inundação | Tempo para atingir a cota do terreno (h) | Período inundado (h) | Volume de inundação (m³) | NA _{máx} acima do terreno (m) |
|-----------|-----------|----------------------------------|--|---------------------|--|----------------------|--------------------------|--|
| 1 | C-1,5h | 45,51 | 3,03* | Não | - | - | - | - |
| 2 | C-3h | 29,19 | 2,97 | Não | - | - | - | - |
| 3 | C-6h | 18,01 | 2,85 | Não | - | - | - | - |
| 4 | C-12h | 11,00 | 2,45 | Não | - | - | - | - |
| 5 | MB | - | 0,96 | Não | - | - | - | - |
| 6 | MA | - | 3,11 | Sim | 2,22 | 1,73 | 354 | 0,13 |
| 7 | C-1,5h+MB | 45,51 | 3,06* | Não | - | - | - | - |
| 8 | C-3h+MB | 29,19 | 3,08* | Não | - | - | - | - |
| 9 | C-6h+MB | 18,01 | 3,05* | Não | - | - | - | - |
| 10 | C-12h+MB | 11,00 | 2,55 | Não | - | - | - | - |
| 11 | C-1,5h+MA | 45,51 | 3,96 | Sim | 2,22 | 2,70 | 121.123 | 0,98 |
| 12 | C-3h+MA | 29,19 | 4,03 | Sim | 1,97 | 2,88 | 125.913 | 1,05 |
| 13 | C-6h+MA | 18,01 | 4,05 | Sim | 1,67 | 3,13 | 130.149 | 1,07 |
| 14 | C-12h+MA | 11,00 | 3,93 | Sim | 1,63 | 3,33 | 117.668 | 0,95 |

C – Chuva; MA – Maré alta; MB – Maré baixa.

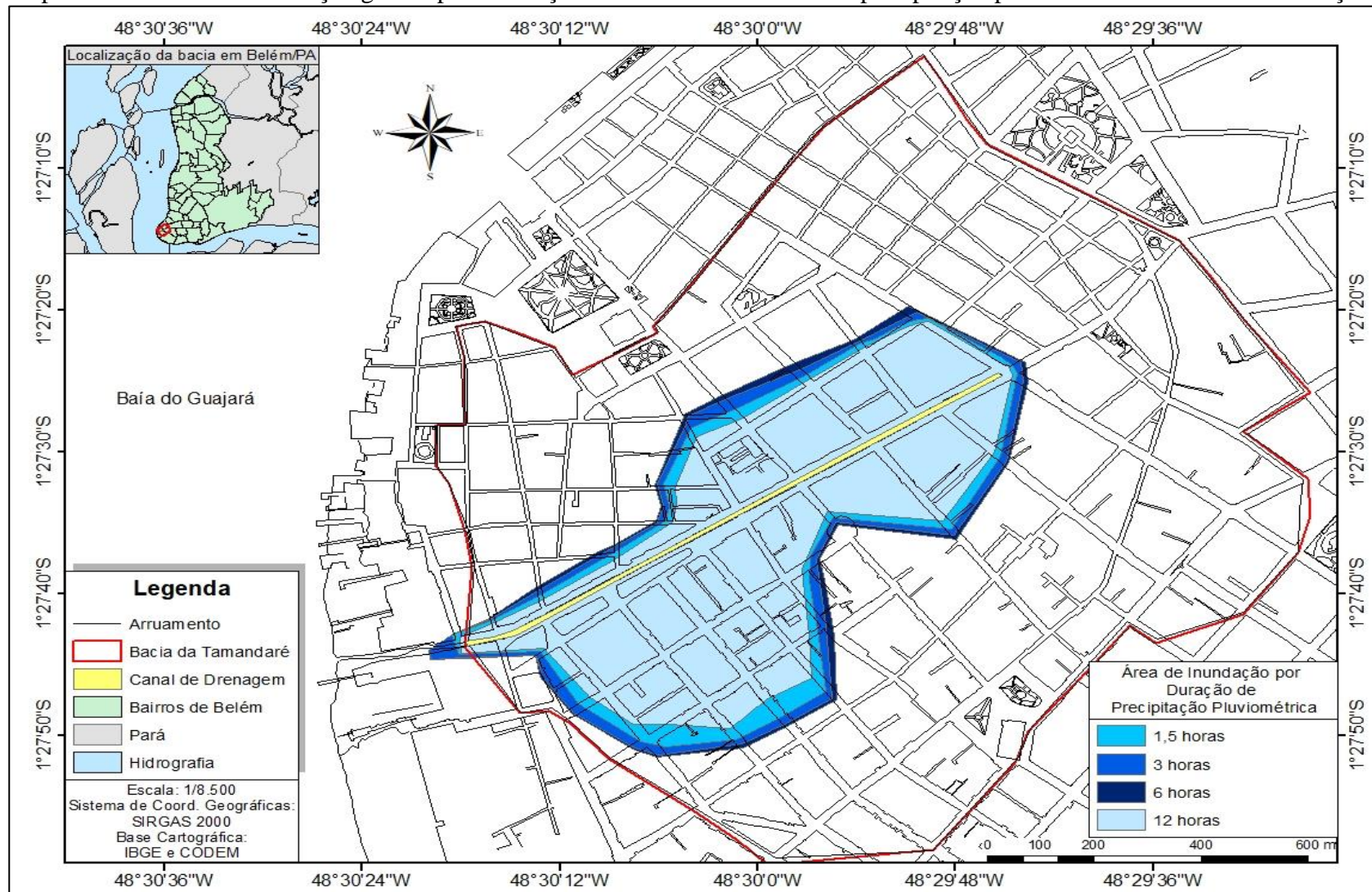
*Essa cota foi alcançada na Seção 1 (montante), parte do canal em que a cota do terreno é mais elevada (3,25).

Vale destacar que foi identificado grande efeito de remanso em todas as simulações, gerado pela diminuição da área transversal na Seção 2. Nesse trecho do canal passa uma importante via (Travessa São Pedro) sobre o canal, que auxilia na mobilidade urbana nessa área de Belém. Entretanto, do ponto de vista das condições de drenagem urbana, foi identificado que essa via causa grande impacto negativo para o sistema de escoamento de águas pluviais, reduzindo momentaneamente a capacidade hidráulica do canal e aumentando o nível de água à montante.

A pior situação de inundação ocorreu durante a precipitação pluviométrica de 6 h, quando o NA alcança a cota 1,07 m, atingindo maior extensão de vias. Essa situação ocorre devido ao volume precipitado atingir todo o período de elevação e descida da maré, o que impede o volume pluvial de escoar no canal, ficando concentrado em área próxima. Esse cenário também é verificado durante as precipitações pluviométricas de 1,5 h e 3 h, fazendo a cota de inundação atingir níveis mais elevados. O volume pluvial mais distribuído ocorreu durante a precipitação pluviométrica de 12 h, o que permite escoar a precipitação pluviométrica de maneira gradativa, gerando o menor impacto de inundação dos eventos de inundação com maré alta, conforme pode ser observado no Mapa 11.

Ainda que as precipitações pluviométricas de diferentes durações modifiquem o impacto das inundações geradas, em conjunto com a maré alta, foi observado pequena variação de NA máximo entre os eventos simulados. Isso demonstra que os efeitos de maré prevalecem sobre o escoamento do canal e necessitam ser impedidos para a adequada condução das águas pluviais na microbacia da Tamandaré. Nesse sentido, foi estudada a utilização de comportas para impedir as oscilações de nível da maré no canal de drenagem durante eventos de precipitação pluviométrica.

Mapa 11 – Mancha de inundação gerada pela interação de maré alta e eventos de precipitação pluviométrica de diferentes durações.



5.3 AVALIAÇÃO DE COMPORTA NA CONTENÇÃO DE EVENTOS DE INUNDAÇÃO EM BACIA DE DRENAGEM URBANA

As simulações desenvolvidas confirmaram que a entrada de maré no canal de drenagem é um fator determinante para a ocorrência de inundações. É importante ressaltar que o canal da Tamandaré já apresenta sistema de comporta instalada no ponto de jusante do canal. Contudo, a falta de controle operacional e de manutenção torna, muitas vezes, esse dispositivo inoperante. Assim, foi avaliado se a utilização da comporta instalada é suficiente para a contenção dos eventos de inundação simulados na etapa anterior.

O intuito da proposta é reduzir o impacto de novas instalações no espaço urbano da área de estudo. Além de avaliar se efeitos de inundação podem ser impedidos pelo sistema existente. Portanto, na pesquisa foi considerado o mesmo sistema de comporta implantado no canal, utilizando controladores de nível de água da maré e do canal para determinar o acionamento desse dispositivo de controle hidráulico.

Em momento de enchente, a comporta deve ser fechar quando o nível da maré atingir a cota de 0,13 n, o que resulta em diferença de 0,51 m até a soleira do canal (cota 0,64 m). Outro fator considerado no controle operacional foi o nível máximo para abertura, no caso, sendo estabelecido que a comporta deve permitir passagem quando a lâmina de água na jusante do canal atingir a cota 2,94 m¹¹, valor 4 cm abaixo da menor cota de via próxima ao canal.

Além disso, sem a ocorrência de evento chuvoso, fica estabelecido que deve ser realizado manobra de abertura da comporta quando a maré, em período de vazante, estiver abaixo da cota 1,80 m e o nível de água no canal estiver acima da cota 0,80 m, permitindo o balanço das massa líquidas pluvial e fluvial sem a ocorrência de inundações e reduzindo o tempo de detenção no canal. No Quadro 9 são apresentadas as regras básicas de controle.

Quadro 9 – Regras de controle de comporta para o canal da Tamandaré.

| Regra | Cota (m) | | Situação da Maré | Condição da comporta |
|-------|----------|--------|------------------|----------------------|
| | Maré | Canal | | |
| 1 | > 0,13 | - | Enchente | Fechada |
| 2 | - | > 2,94 | Enchente/Vazante | Aberta |
| 3 | < 1,80 | > 0,80 | Vazante | Aberta |

¹¹ Esse valor foi definido por apresentar capacidade de gerar pressão hidrodinâmica suficiente para permitir a descarga de escoamento no exutório do canal com a maré na cota 3,19 m.

Seguindo a rotina operacional estabelecida para a comporta e utilizando as mesmas condições de contorno da modelagem hidrodinâmica das simulações 11 (P-1,5 h + MA), 12 (P-3 h + MA), 13 (P-6 h + MA) e 14 (P-12 h + MA), as quais apresentaram problemas de inundações, foi avaliada a utilização de comporta na contenção de evento de inundação. É importante comentar que não foi verificada a inundação ocorrida na Simulação 6 (MA), visto que na ausência de evento chuvoso, a entrada de maré é impedida pela comporta fechada.

5.3.1 Acionamento de Comporta em Situação de Precipitação Pluviométrica e Maré Alta

Nas simulações do canal da Tamandaré com manobra de comporta na jusante foi verificado a ocorrência de inundações em todas as situações. Nesses casos, a mancha de inundação gerada apresentou menor magnitude. Em situações com comporta, as precipitações pluviométricas com maior volume de precipitação pluviométrica representam maior preocupação para o espaço urbano.

A Simulação 15 demonstrou que o canal de drenagem da Tamandaré não tem capacidade de comportar o volume precipitado em coincidência com a maré alta. Nessa simulação, a comporta foi fechada 2,97h antes do início da chuva, devido à rápida elevação do nível de água no corpo receptor, atingindo a cota referência estabelecida na Regra 1. O acionamento da comporta ainda permitiu a entrada de água, que atingiu a soleira do canal.

Com o início da precipitação pluviométrica de 1,5h, o nível de água do canal foi elevando até atingir a cota de referência da Regra 2, gerando situação para manobra de abertura 1,17h depois do início da chuva, permitindo a volta do escoamento no canal. No Gráfico 12 pode ser observado o hidrograma de vazão da comporta.

A manobra de abertura do canal ainda possibilitou a entrada de pequena vazão do corpo receptor e iniciou a descarga do canal, o nível da maré nesse momento atingia a cota 3,19 (superior ao nível no canal).

A Simulação 16 demonstrou que o canal de drenagem da Tamandaré não tem capacidade de comportar o volume precipitado em coincidência com a maré alta. Nessa simulação, a comporta foi fechada 2,20h antes do início da chuva, devido à rápida elevação

do nível de água no corpo receptor, atingindo a cota referência estabelecida na Regra 1. O acionamento da comporta ainda permitiu a entrada de água, que atingiu a soleira do canal.

Com o início da precipitação pluviométrica de 3h, o nível de água do canal foi elevando até atingir a cota de referência da Regra 2, gerando situação para manobra de abertura 1,9h depois do início da chuva, permitindo a volta do escoamento no canal. No Gráfico 13 pode ser observado o hidrograma de vazão da comporta.

A manobra de abertura do canal ainda possibilitou a entrada de pequena vazão do corpo receptor e iniciou a descarga do canal, o nível da maré nesse momento atingia a cota 3,18 (superior ao nível no canal).

A Simulação 17 demonstrou que o canal de drenagem da Tamandaré não tem capacidade de comportar o volume precipitado em coincidência com a maré alta. Nessa simulação, a comporta foi fechada 0,7 h antes do início da chuva, devido à rápida elevação do nível de água no corpo receptor, atingindo a cota referência estabelecida na Regra 1. O acionamento da comporta ainda permitiu a entrada de água, que atingiu a soleira do canal.

Com o início da precipitação pluviométrica de 6 h, o nível de água do canal foi elevando até atingir a cota de referência da Regra 2, gerando situação para manobra de abertura 3,47 h depois do início da chuva, permitindo a volta do escoamento no canal. No Gráfico 14 pode ser observado o hidrograma de vazão da comporta.

A manobra de abertura do canal ainda possibilitou a entrada de pequena vazão do corpo receptor e iniciou a descarga do canal, o nível da maré nesse momento atingia a cota 3,16 m (superior ao nível de água no canal).

A Simulação 18 demonstrou que o canal de drenagem da Tamandaré não tem capacidade de comportar o volume precipitado em coincidência com a maré alta. Nessa simulação, a comporta foi fechada 2,30 h após o início da chuva, devido à rápida elevação do nível de água no corpo receptor, atingindo a cota referência estabelecida na Regra 1. O acionamento da comporta ainda permitiu a entrada de água, que atingiu a soleira do canal.

Com o início da precipitação pluviométrica de 12 h, o nível de água do canal foi elevando até atingir a cota de referência da Regra 2, gerando situação para manobra de abertura 6,57 h depois do início da chuva, permitindo a volta do escoamento no canal. No Gráfico 15 pode ser observado o hidrograma de vazão da comporta.

A manobra de abertura do canal ainda possibilitou a entrada de pequena vazão do corpo receptor e iniciou a descarga do canal, o nível da maré nesse momento atingia a cota 3,10 m (superior ao nível de água no canal).

Gráfico 12 – Hidrograma de vazão da comporta do canal da Tamandaré durante precipitação pluviométrica de 1,5 h e maré alta.

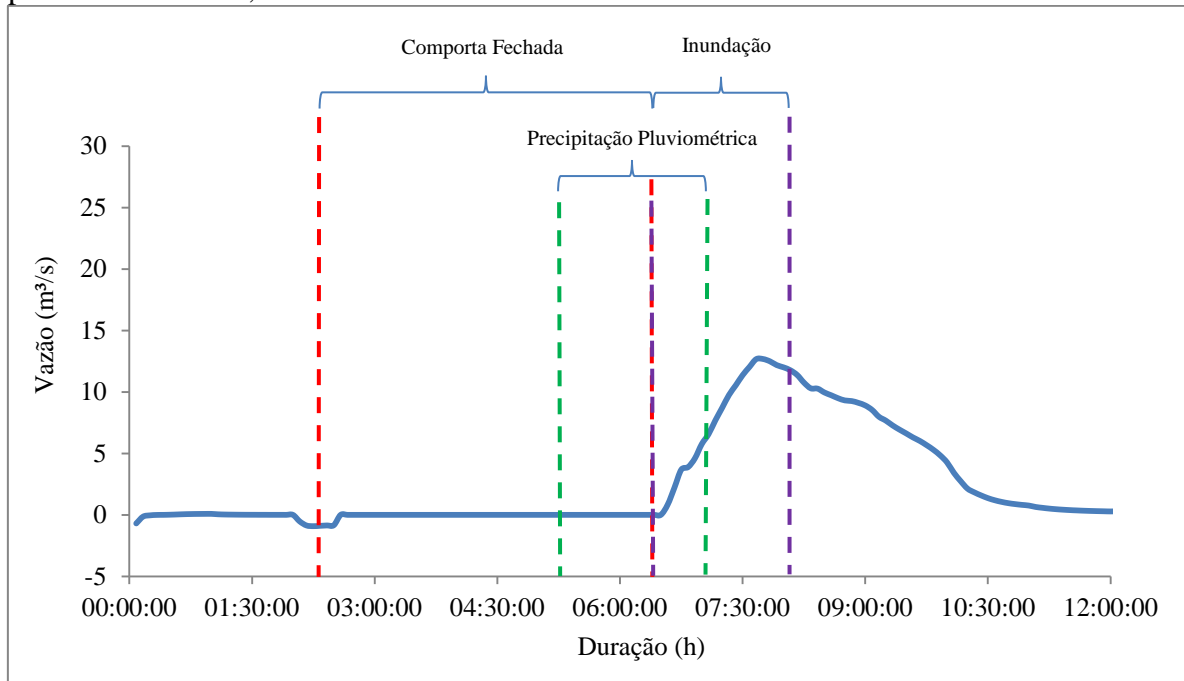


Gráfico 13 – Hidrograma de vazão da comporta do canal da Tamandaré durante precipitação pluviométrica de 3 h e maré alta.

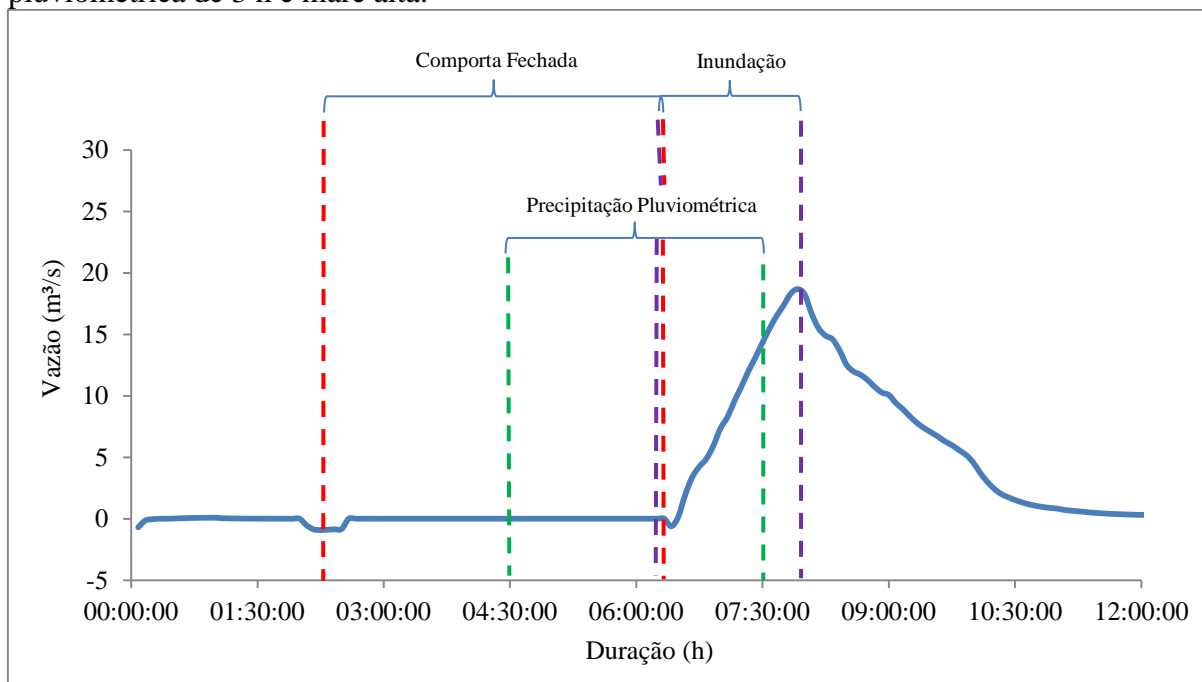


Gráfico 14 – Hidrograma de vazão da comporta do canal da Tamandaré durante precipitação pluviométrica de 6 h e maré alta.

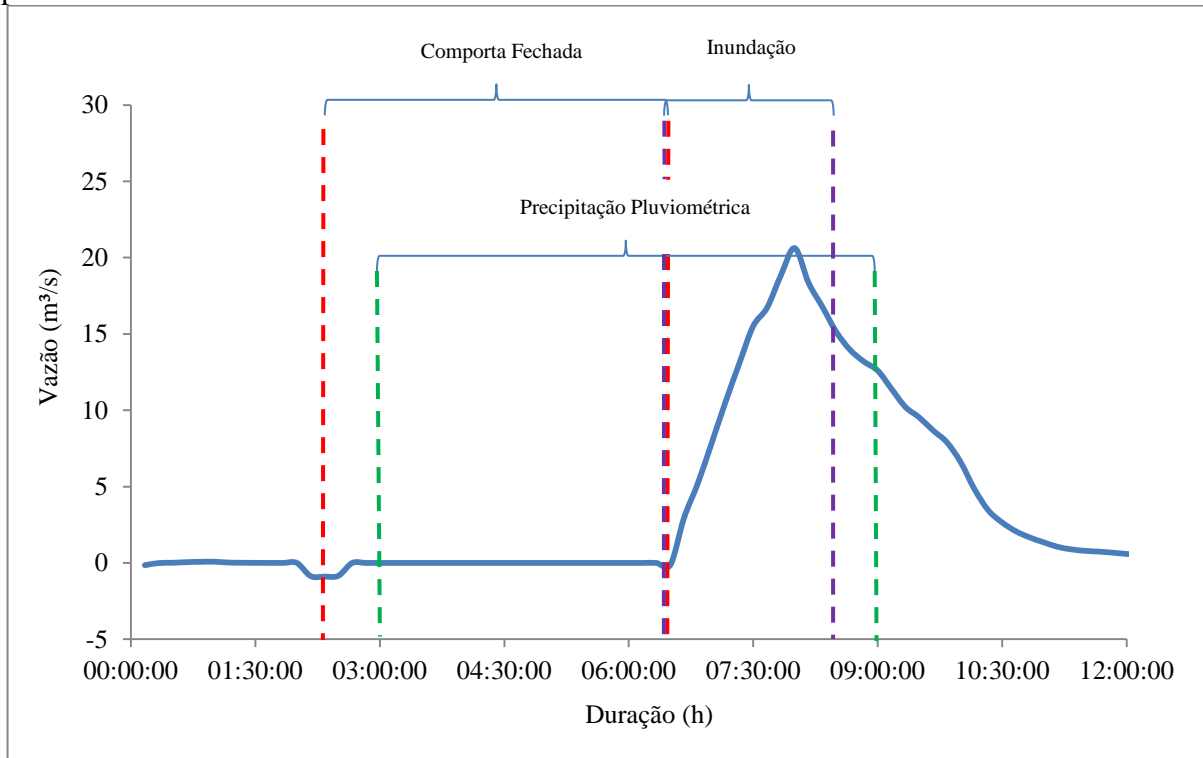
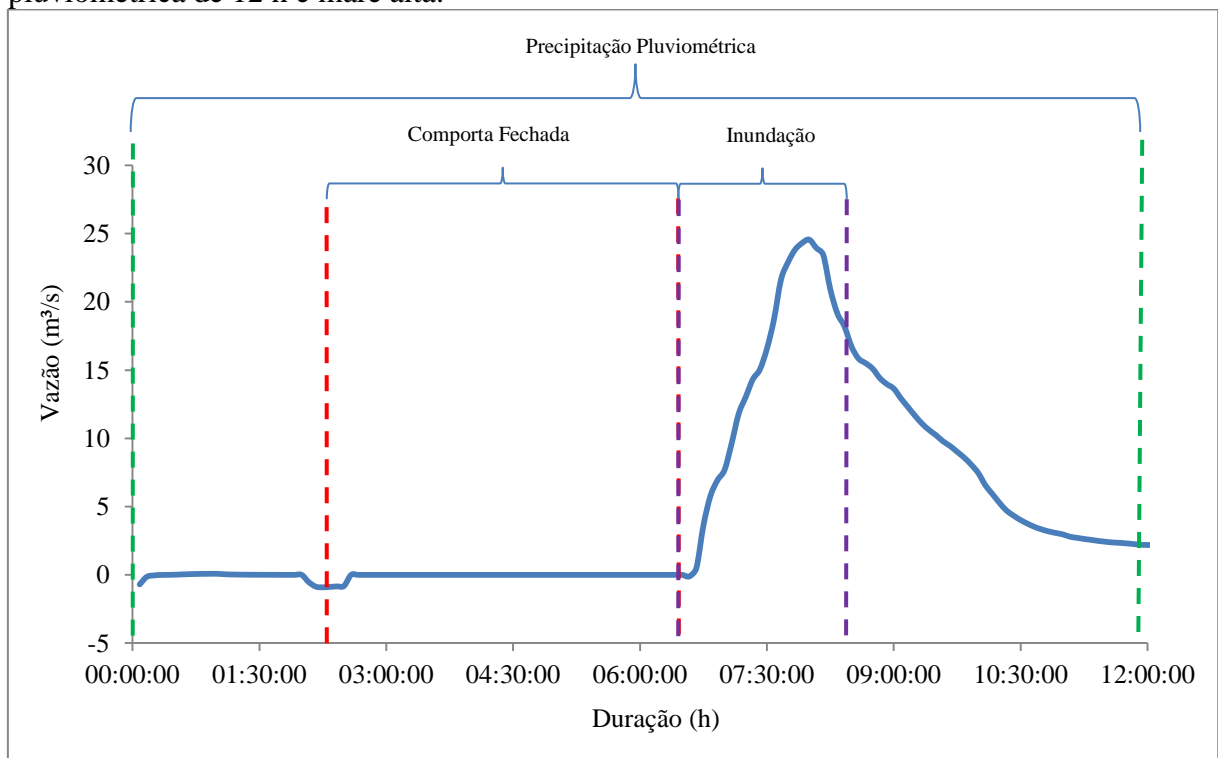


Gráfico 15 – Hidrograma de vazão da comporta do canal da Tamandaré durante precipitação pluviométrica de 12 h e maré alta.

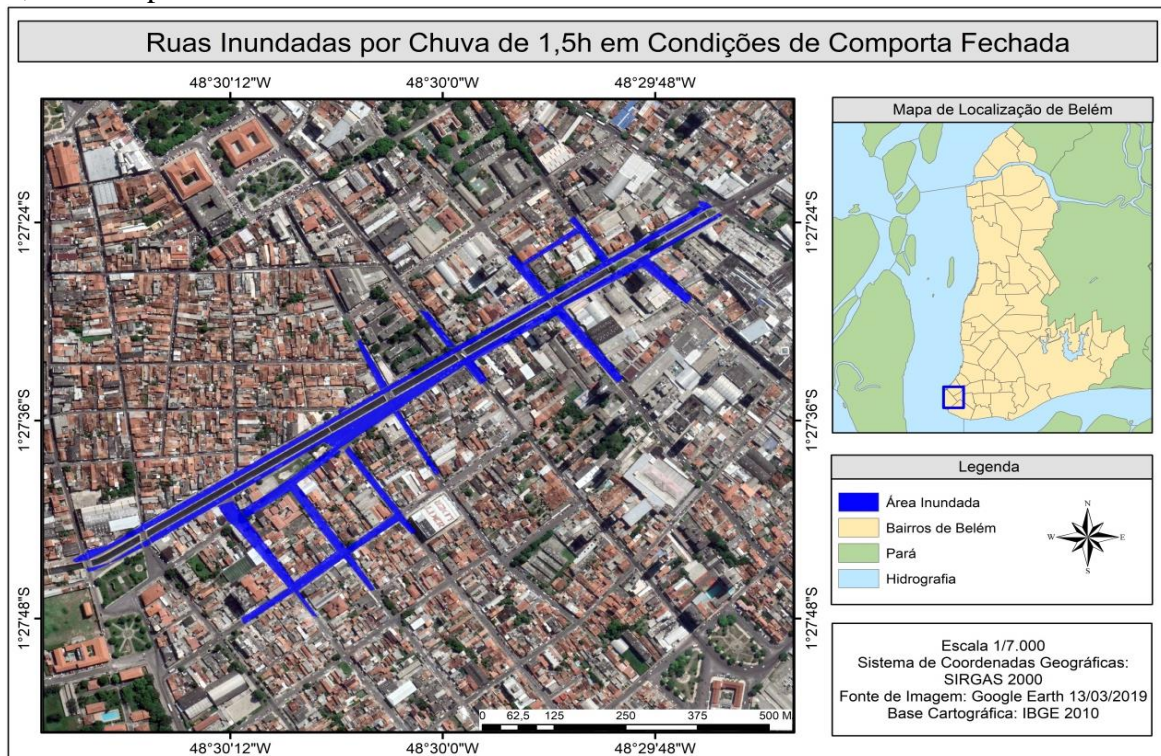


- ❖ Ocorrência de inundação em situação de precipitação pluviométrica de 1,5 h e maré alta com acionamento de comporta.

Após atingir a cota para abertura da comporta, o nível de água no canal continuou a subir apenas pelo volume precipitado que chega ao canal, o que gerou evento de inundação, em 1,22 h depois do início da chuva, atingindo altura máxima sobre o terreno de 0,51 m (sem a otimização de abertura da comporta, o nível máximo alcançado pela inundação seria de 0,64 m).

O tempo necessário para começar a inundação foi 1,20 h após o início da chuva. Esse evento de inundação durou 1,63 h, enquanto, o volume gerado foi de 87.906 m³, reduzindo 71,80% do volume originado pela inundação sem comporta. No Mapa 12 é apresentada a mancha de inundação formada por esse evento.

Mapa 12 – Mancha de inundação provocada pela maré alta, precipitação pluviométrica de 1,5h e comporta.

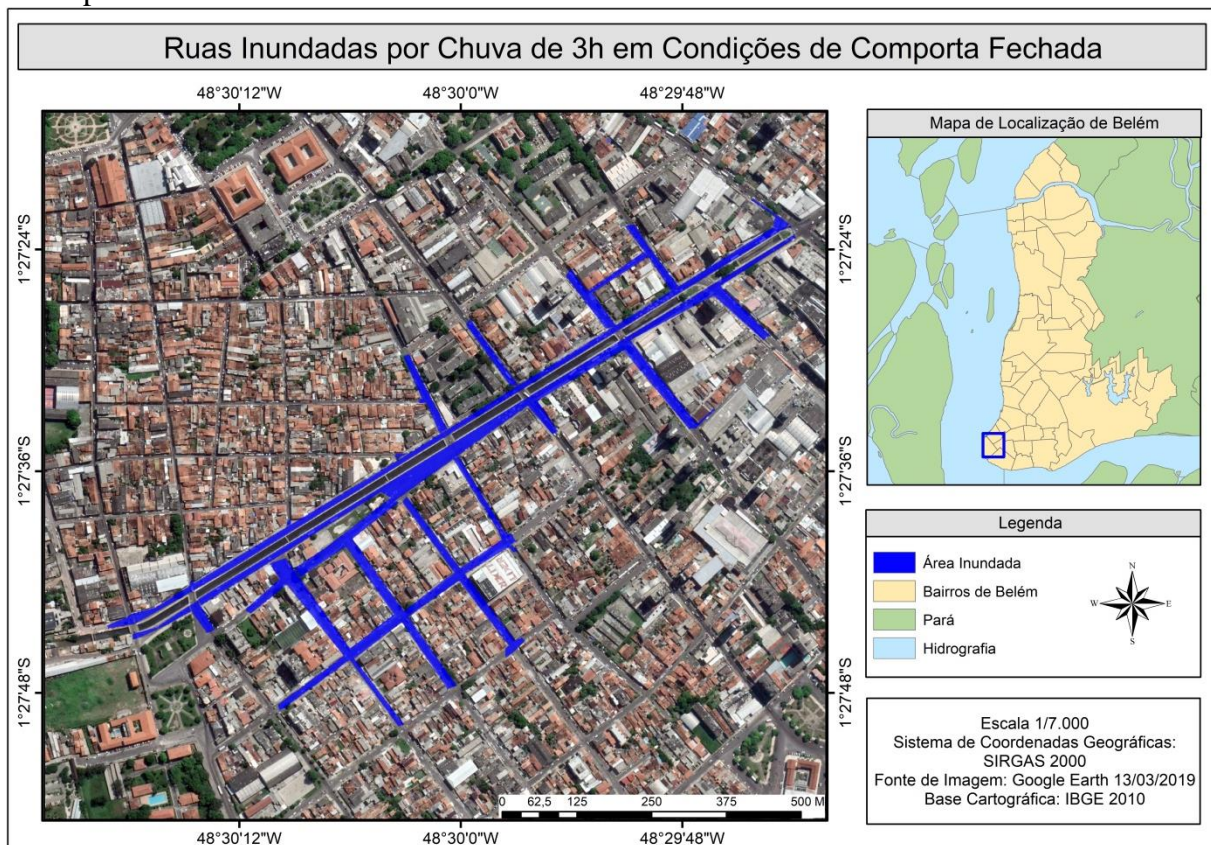


- ❖ Ocorrência de inundação em situação de precipitação pluviométrica de 3 h e maré alta com acionamento de comporta.

Após atingir a cota para abertura da comporta, o nível de água no canal continuou a subir apenas pelo volume precipitado que chega ao canal, o que gerou evento de inundação, em 1,85 h depois do início da chuva, atingindo altura máxima sobre o terreno de 0,61 m (sem a otimização de abertura da comporta, o nível máximo alcançado pela inundação seria de 0,85 m).

Esse evento de inundação durou 1,95 h, enquanto, o volume de inundação gerado por esse evento foi de 60.837 m³, reduzindo 48,32% do volume originado pela inundação sem comporta. No Mapa 13 é apresentada a mancha de inundação formada por esse evento.

Mapa 13 – Mancha de inundação provocada pela maré alta, precipitação pluviométrica de 3h e comporta.

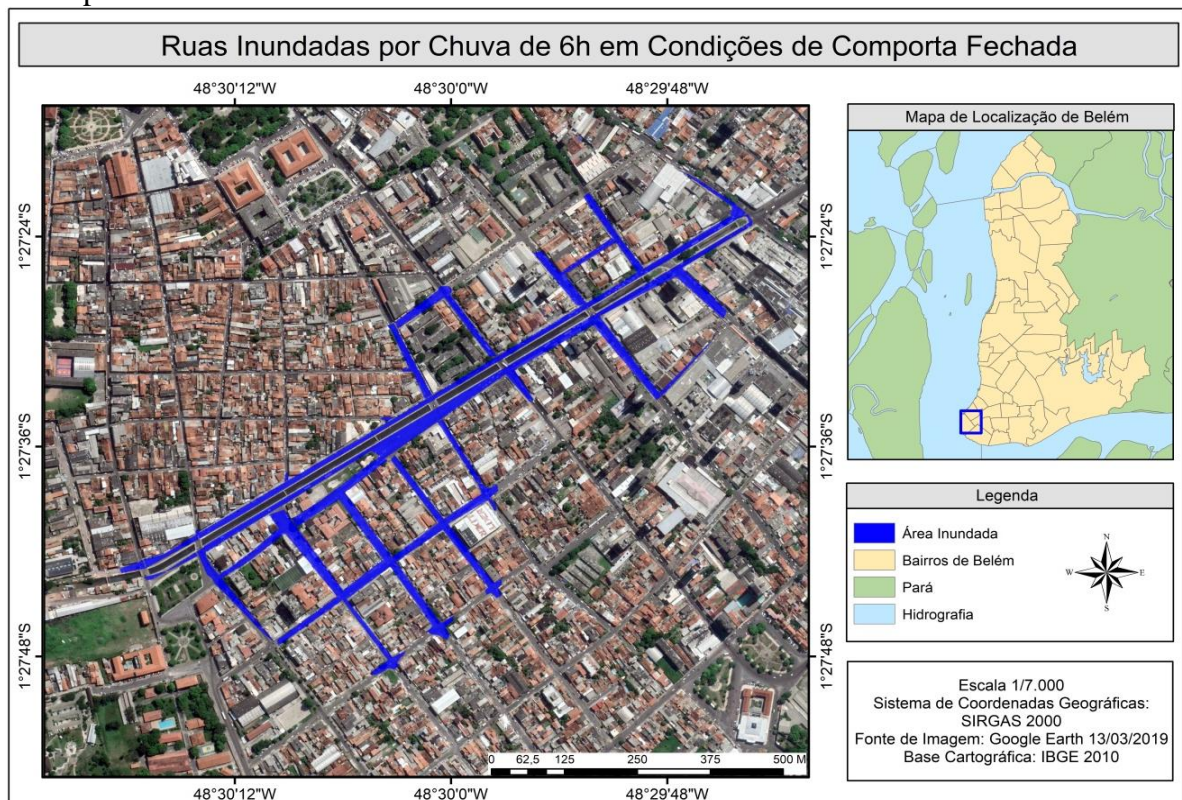


- ❖ Ocorrência de inundação em situação de precipitação pluviométrica de 6 h e maré alta com acionamento de comporta.

Após atingir a cota para abertura da comporta, o nível de água no canal continuou a subir apenas pelo volume precipitado que chega ao canal, o que gerou evento de inundação, em 3,45 h depois do início da chuva, atingindo altura máxima sobre o terreno de 0,66 m (sem a otimização de abertura da comporta, o nível máximo alcançado pela inundação seria de 0,97 m).

Esse evento de inundação durou 2,02 h, enquanto, o volume gerado foi de 46.345 m³, reduzindo 35,61% do volume originado pela inundação sem comporta. No Mapa 14 é apresentada a mancha de inundação formada por esse evento.

Mapa 14 – Mancha de inundação provocada pela maré alta, precipitação pluviométrica de 6h e comporta.

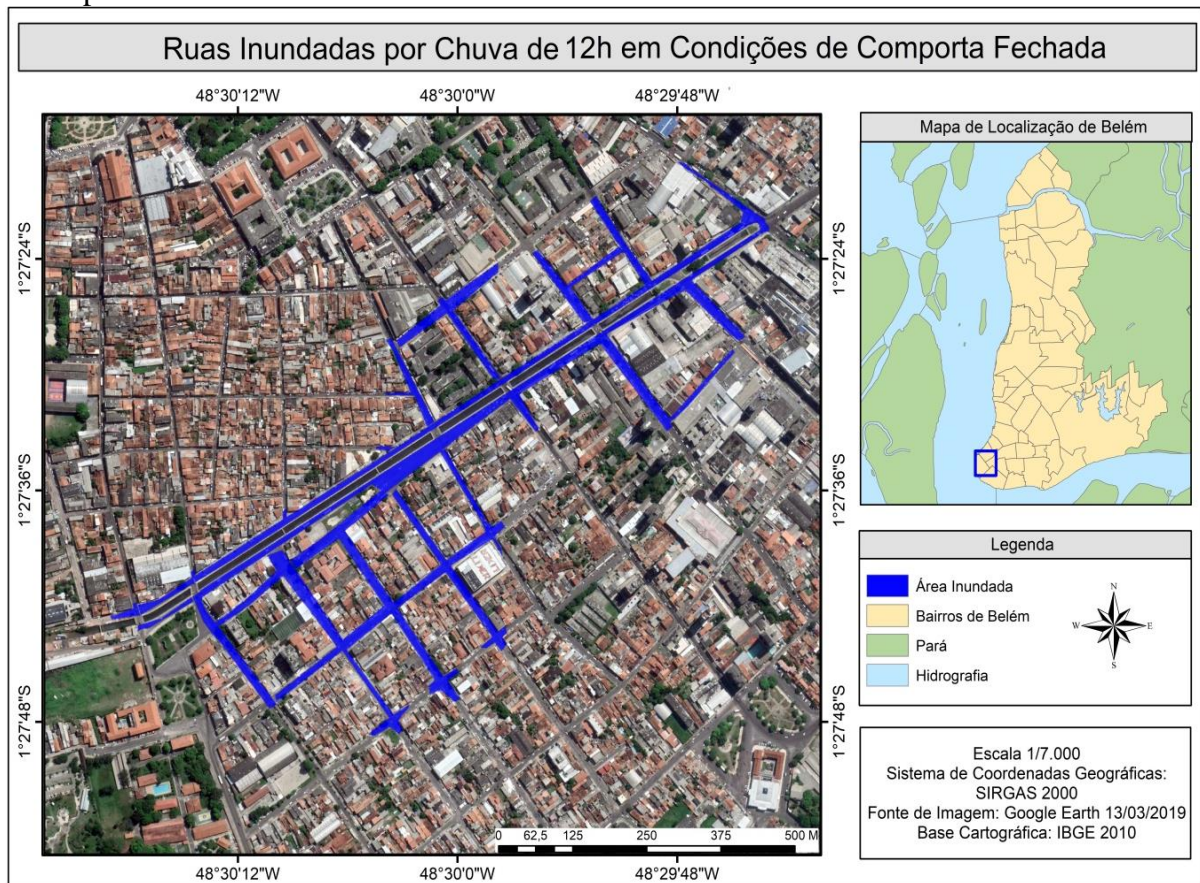


- ❖ Ocorrência de inundação em situação de precipitação pluviométrica de 12 h e maré alta com acionamento de comporta.

Após atingir a cota para abertura da comporta, o nível de água no canal continuou a subir apenas pelo volume precipitado que chega ao canal, o que gerou evento de inundação, em 6,57 h depois do início da chuva, atingindo altura máxima sobre o terreno de 0,69 m (sem a otimização de abertura da comporta, o nível máximo alcançado pela inundação seria de 1,08 m).

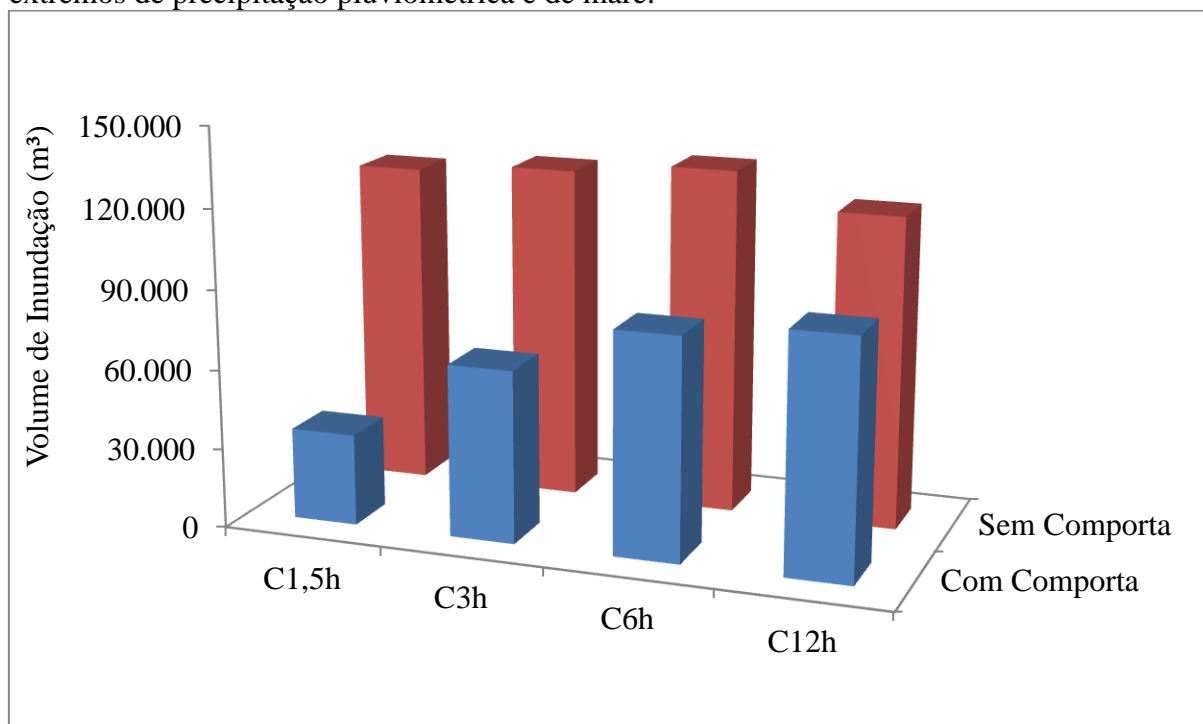
Esse evento de inundação durou 1,95 h, enquanto, o volume gerado foi de 28.143 m³, reduzindo 23,92% do volume originado pela inundação sem comporta. No Mapa 15 é apresentada a mancha de inundação formada por esse evento.

Mapa 15 – Mancha de inundação provocada pela maré alta, precipitação pluviométrica de 12h e comporta.



As simulações da coincidência dos picos de escoamento de precipitação pluviométrica e de maré com acionamento de comporta confirmam que o canal da Tamandaré não tem capacidade para suportar a parcela do volume dos eventos das precipitações pluviométricas analisadas com comporta fechada durante o pico de maré alta (Mapa 16). No Gráfico 16 é apresentada a comparação das inundações na microbacia da Tamandaré com entrada de maré e com a utilização de comporta.

Gráfico 16 – Volume de Inundação na microbacia da Tamandaré na coincidência de eventos extremos de precipitação pluviométrica e de maré.



Quando utilizado apenas comporta em canal de drenagem, a eficiência dessa estrutura é reduzida com o aumento da duração da precipitação pluviométrica, devido ao maior volume que acaba sendo concentrado no canal sem capacidade de escoamento em momentos de cheias. Contudo, foi observada a importância dessa estrutura para impedir a entrada de maré ao gerar redução da magnitude dos eventos de inundação, o sistema de comportas na jusante do canal também acaba diminuindo o período inundado e NA máximo sobre as vias. Na Tabela 10 são relacionados às características das inundações com canal de drenagem livre e com comporta.

Mapa 16 – Mancha de inundação gerada pelo fechamento de comporta durante precipitações pluviométricas em momento de maré alta.

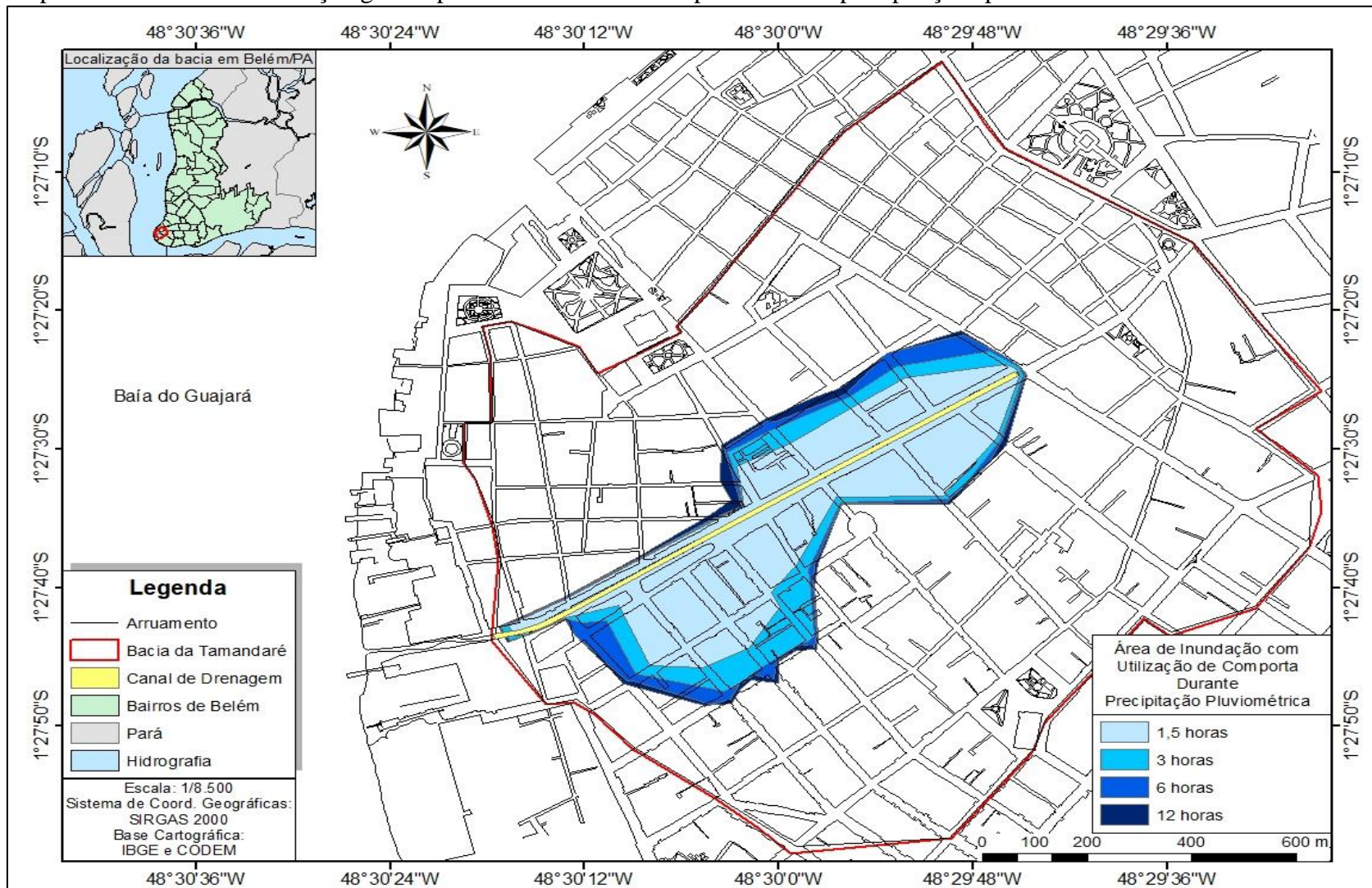


Tabela 10 – Avaliação do sistema de comporta na redução de efeitos de inundação durante eventos de precipitação e maré alta.

| Situação | Inundação na microbacia da Tamandaré | | | | | | | | |
|-----------|--------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| | Sem Comporta | | | Com Comporta | | | Redução de Inundação | | |
| | Período inundado (h) | Volume de inundação (m³) | Altura NA máx. acima do terreno (m) | Período inundado (h) | Volume de inundação (m³) | Altura máx. acima do terreno (m) | Período inundado (h) | Volume de inundação (m³) | Altura NA máx. acima do terreno (m) |
| C-1,5h+MA | 2,93 | 122.426 | 0,98 | 1,63 | 34.520 | 0,51 | 1,30 (44,37%) | 87.906 (71,80%) | 0,47 (47,96%) |
| C-3h+MA | 3,03 | 125.913 | 1,05 | 1,95 | 65.076 | 0,61 | 1,08 (35,64%) | 60.837 (48,32%) | 0,44 (41,90%) |
| C-6h+MA | 3,13 | 130.149 | 1,07 | 1,90 | 83.803 | 0,66 | 1,23 (39,30%) | 46.345 (35,61%) | 0,41 (38,32%) |
| C-12h+MA | 3,36 | 117.668 | 0,95 | 1,83 | 89.525 | 0,69 | 1,53 (45,54%) | 28.143 (23,92%) | 0,26 (27,37%) |

C – Chuva; MA – Maré alta; NA – nível da água.

5.3.2 Proposição de equações de tendência para avaliação dos riscos de inundação da Microbacia da Tamandaré

Os dados encontrados pelas simulações permitiram desenvolver algumas equações de tendência, utilizados para estimativas relacionadas às inundações com o intuito de facilitar a gestão de risco na bacia da Tamandaré. Vale comentar que, apesar de poucos dados para o desenvolvimento das curvas de tendência, foram encontradas boas correlações, conforme pode ser observado no Quadro 10.

Quadro 10 – Correlação dos dados extraídos das simulações.

| Varável | | Situação da Comporta | Nº de dados | Coeficiente de Correlação |
|--------------------------------------|-------------------------|----------------------|-------------|---------------------------|
| 1 | 2 | | | |
| Volume de Inundação | Altura da Lâmina d'água | Aberta | 9 | 0,98 |
| Altura da Chuva | Volume de Inundação | Fechada | 4 | 0,94 |
| Tempo para atingir a cota do terreno | Intensidade da Chuva | Fechada | 4 | -0,89 |

Os efeitos gerados pelas inundações na bacia da Tamandaré apresentam boa correlação devido às características morfométricas da bacia. Essa especificidade da área de captação de águas pluviais da Tamandaré apresenta forma arredondada e pequena declividade, além de não apresentar desníveis nas vias; com o favorecimento da topografia da bacia as inundações acabam ocorrendo de maneira progressiva, o que facilita a correlação dos efeitos hidrológicos. Nos Gráfico 17 e Gráfico 18 são apresentadas as equações de tendência relacionando a precipitação pluviométrica e os efeitos de inundação.

Gráfico 17 – Capacidade de contenção do canal

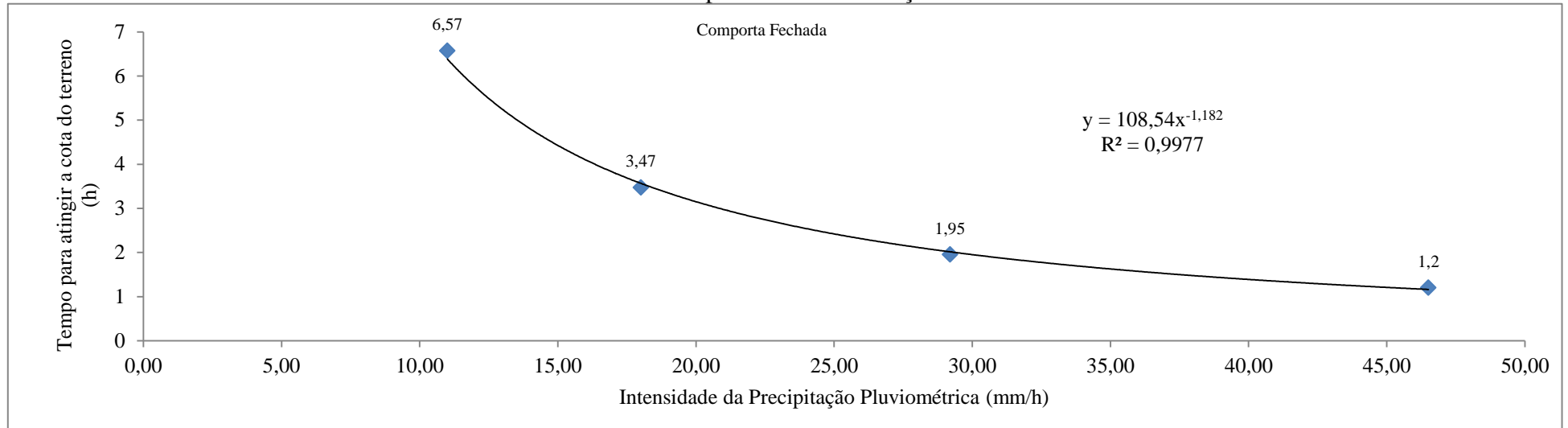
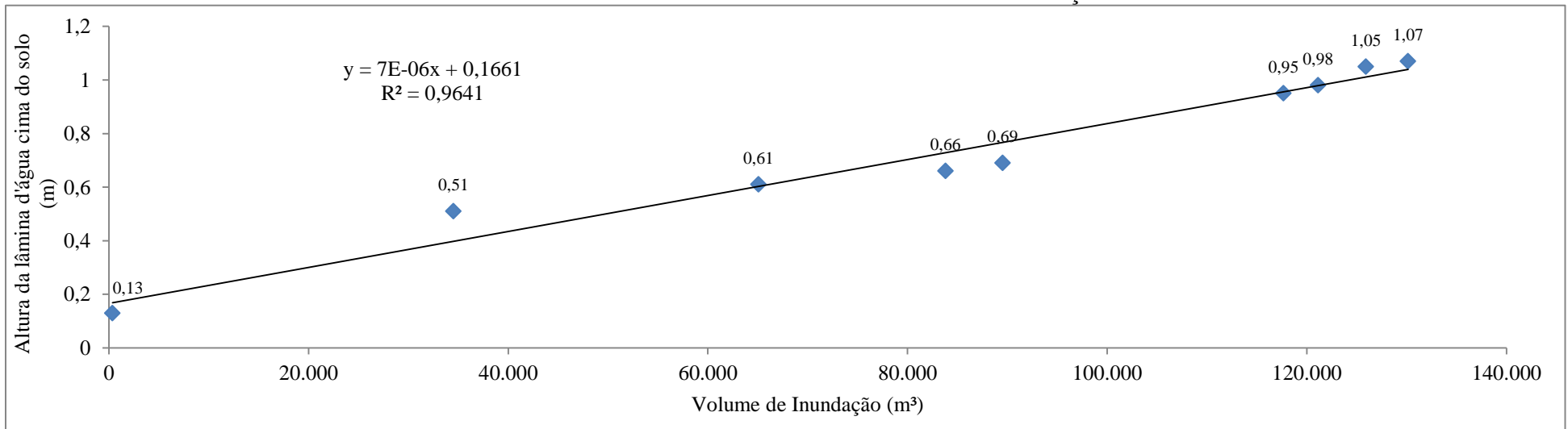


Gráfico 18 – Altura máxima do NA em evento de inundação



A equação do Gráfico 17 permite identificar o tempo que determinado evento chuvoso leva para utilizar todo o volume útil do canal, sendo de interesse ao relacionar outras medidas de retenção. Vale comentar que esse tempo para atingir o solo (início da inundação) é dado em condição de canal com comporta fechada, quando atua como reservatório de detenção em momentos de maré alta.

Por fim, a partir da equação do Gráfico 18 é possível definir a cota máxima que determinado volume de inundação alcança acima do solo. Nesse caso, é tomada como referência a menor cota, localizada próxima ao canal da Tamandaré. Além disso, é importante destacar que foram utilizadas todas as respostas de inundações encontradas nas simulações, isto é, o volume de inundação pode ser relacionado aos efeitos de maré (comporta aberta)

As equações desenvolvidas são propostas para auxiliar a gestão de riscos relacionados às águas pluviais e facilitar o planejamento da bacia de drenagem da área central do município de Belém que sofre frequentemente com problemas de inundação.

5.3.3 Proposição de Alternativas para Impedir a Ocorrência de Inundações na Microbacia da Tamandaré

Como observado nas simulações, os efeitos de maré são determinantes para a ocorrência e aumento da magnitude das inundações. Por isso, a medida inicial para a mudança de realidade e melhora das condições de drenagem urbana na bacia estudada é a utilização de estruturas que interrompam a entrada das águas de cheia nas estruturas de escoamento de pluvial, ou seja, a utilização de comportas na jusante do canal se torna indispensável para o sistema de drenagem da microbacia da Tamandaré.

Essa medida de contenção de maré já está implantada na área de estudo, contudo, foi confirmado pela simulação hidrodinâmica que mesmo com controle operacional de abertura ótima, a sua eficácia na prevenção de eventos de inundação não é suficiente para impedir o extravasamento do canal de drenagem. Portanto, a utilização de comporta, solução adotada em diversas bacias de drenagem no município de Belém, no caso do canal da Tamandaré não resolve o problema de inundações mesmo sem a presença das águas de cheia.

Nesse sentido, é fundamental o emprego de outras soluções estruturais em conjunto com sistema de comportas, esses para retenção, como bacias de acumulação e reservatório

enterrado, e/ou para condução, como bombeamento, do volume excedente que chega ao canal pelas precipitações pluviométricas.

No caso específico da microbacia da Tamandaré, a falta de espaço físico e as dificuldades para modificações urbanísticas dificultam a utilização de estruturas de grande porte como soluções viáveis, como bacia de acumulação, visto que essas estruturas necessitam de grandes áreas para comportar o volume de inundação prevista na pior situação dos eventos simulados com comporta (precipitação pluviométrica de 12 h, gerando volume de inundação de 89.525 m³). Além disso, a área de estudo apresenta nível freático elevado por estar próximo à baía do Guajará, com grande parte de sua área com pequena elevação altimétricas, dificultando também a aplicação de reservatórios enterrados.

Assim, é importante destacar que apenas a utilização de técnicas de retenção na microbacia da Tamandaré não demonstra ser alternativa viável sem a grande oneração dessas estruturas devido às peculiaridades locais, sendo interessante o emprego de alternativas para o contínuo escoamento das águas pluviais durante eventos de precipitação pluviométrica.

Com o nível de água do corpo receptor elevado, as estruturas de bombeamento se tornam alternativas técnicas interessantes para a retirada do volume pluvial, ainda que apresentem maior custo operacional. Esses sistemas requerem menos espaços disponíveis em comparação às alternativas de retenção e têm a capacidade de recalque ajustável, principalmente, com o número de bombas em operação, permitindo melhor controle operacional da vazão de bombeamento em função do nível de água nas estruturas de drenagem.

Desse modo, a utilização de comporta para impedir a entrada de maré em conjunto com alternativas, como bacias de acumulação e, principalmente, sistemas de bombeamento de águas pluviais, se torna de grande importância para o controle de eventos extremos de inundação e melhora das condições de drenagem urbana da microbacia da Tamandaré, garantindo o bem-estar da população que utiliza essa parte da área central do município de Belém.

6 CONCLUSÃO

O estudo desenvolvido possibilitou avaliar que as estruturas de macrodrenagem não são suficientes para evitar inundações de vias próximas ao canal da Bacia da Tamandaré, quando coincidem eventos extremos de maré e de precipitação pluviométrica, situação que pode ser amenizada, porém não solucionada, com a utilização de comportas para o controle e contenção da entrada das águas da baía do Guajará.

Na avaliação topográfica da bacia da Tamandaré foi identificado que a área estudada, na verdade, é composta por duas bacias, microbacia do Comércio e da Tamandaré. Portanto, a área de contribuição para o escoamento das águas pluviais é menor do que a delimitada por fontes oficiais (CODEM).

A microbacia da Tamandaré tem área de 1,75 km² (valor correspondente à 75,76% do total da bacia da Tamandaré) e perímetro de 5,65 km. No que tange as variáveis morfométricas, foi observado que a bacia apresenta tendências natural a ocorrência de cheias e má condição de drenagem, com , devido às características do canal.

As condições das estruturas de drenagem urbana levantadas *in loco* demonstram falta manutenção nas parcelas de microdrenagem e da macrodrenagem. No estudo da macrodrenagem, que é composta por canal com extensão de 1,15 km, largura média de 10 m, profundidade variada, de 1,70 a 2,80 m (excetuando as dimensões da Seção 2), e por cinco comportas à jusante que, muitas das vezes, ficam inoperantes e permitem a entrada das águas da baía do Guajará.

Além disso, diversos problemas foram identificados no canal da Tamandaré, como o acúmulo de resíduos sólidos, despejo de efluente sanitário, falta de manutenção, galerias afogadas e inundações.

Esse último problema foi avaliado a partir de simulações realizadas no software SWMM 5.0, que demonstrou ser eficiente para modelar as condições de escoamento em bacia de drenagem urbanizada. Para a modelagem hidrodinâmica, a microbacia da Tamandaré foi seccionada em 27 sub-bacias, com áreas variando de 0,48 há a 28,89 ha, com duas sub-bacias correspondendo a 26,20% do total, localizada à montante do canal. A declividade das sub-bacias apresentou menor variação, indo de 0,45% a 2,03%. Enquanto a área impermeável variou de 63,26% a 96,04%. A partir dos dados de entrada das sub-bacias, foi avaliado as

vazões geradas, estas apresentaram grande pico de escoamento devido à grande parcela impermeável.

Os cenários simulados (1, 2, 3 e 4) demonstraram que o canal da Tamandaré tem capacidade de escoar os volumes precipitados sem a ocorrência de inundações, quando não há interação com maré, entretanto, é importante ressaltar que eventos de maior intensidade pluviométrica acabam gerando efeitos de remanso na montante do canal, haja vista que essa estrutura de drenagem apresenta seção estrangulada no início de sua extensão. As cotas alcançadas pela lâmina líquida na montante do canal foram de 3,03 m (Simulação 1), 2,97 m (Simulação 2), 2,85 m (Simulação 3), e 2,45 m (Simulação 4), correspondendo às durações de precipitação pluviométrica de 1,5 h, 3 h, 6 h e 12 h, respectivamente, enquanto, na jusante não houve elevação.

Na Simulação 5, condição de maré baixa, foi verificado que o nível de água no canal consegue atingir a montante, mas não apresenta volume significativo, estando comportado na calha central. Entretanto, na modelagem da maré alta (Simulação 6), foi verificado que há inundação na bacia, a partir da cota de maré de 3,39 m. A inundação ocasionada apenas pela maré durou 2,23 h, invadindo as ruas por aflorar pelo sistema de microdrenagem ligado ao canal.

Nos casos de maré baixa com precipitação pluviométrica (Simulação 7, 8, 9 e 10), foi verificado que o canal tem capacidade de transportar o volume pluvial até o exutório sem a ocorrência de inundações, contudo, diferente a situação sem maré, a lâmina líquida no exutório foi elevada, até a cota 2,45 m.

Com relação às interações dos eventos chuvosos com maré alta, foi verificado casos de inundação em todos os cenários simulados (Simulação 11, 12, 13 e 14), com duração desses eventos variando de 2,70 h a 3,33 h. Vale comentar que é o evento de 6 h que gera o maior caso de inundação, alcançando a cota de 4,05 m, visto que grande parte do volume precipitado atinge o canal em momento de maré alta, sendo impedido de chegar ao exutório.

No estudo de contenção desses eventos com comporta, o sistema existente não se mostrou efetivo na contenção de inundação mesmo com controle de nível¹², não conseguindo

¹² Para o controle de nível é requerido a utilização de instrumentação, no caso foram implantados sensores para registrar o NA na baía do Guajará e no canal de drenagem, a inter-relação desses das permite abertura da comporta quando o nível do canal está elevado e maré está em vazante.

impedir a sua ocorrência mesmo durante a precipitação pluviométrica de menor duração avaliada, demonstrando que o canal da Tamandaré não tem capacidade de comportar volumes precipitados acima de 69,76 mm, para duração de 1,5 h. Entretanto, ressalta-se que canais de drenagem não são projetados para essa finalidade, sendo utilizado como estrutura de detenção de forma alternativa.

Além disso, é interessante destacar que comportas com acionamento por pressão hidrostática, sem sensores de nível, não são eficientes para essa bacia, visto que as pressões geradas pela maré e pela contenção pluvial podem gerar abertura da comporta em momento errôneo, permitindo a interação desses dois fatores e acabando por aumentar a magnitude da inundação.

Ainda que a utilização de comporta não tenha sido suficiente para impedir a ocorrência de inundação durante eventos chuvosos, quando ocorrem simultaneamente com picos de maré alta, ficou claro a sua importância na redução dos efeitos gerados pelas águas fluviais em área urbana e na diminuição da eficácia das comportas com o aumento da duração da precipitação pluviométrica. Nas simulações desenvolvidas com comporta, os volumes de inundação reduziram de 87.906 m³ a 28.143 m³ (71,80% a 23,92%) e alturas máximas alcançadas por esses eventos diminuíram de 0,47 m a 0,26 m (47,96% a 27,37%). Logo, as simulações confirmam que as comportas conseguem reduzir a magnitude das inundações, contudo, são estruturas que necessitam ser complementadas com outras alternativas para o manejo das águas pluviais ou unidades do sistema de macrodrenagem.

No caso da área estudada, o aumento da capacidade do canal não é uma alternativa viável, visto que é margeado por avenida de grande porte (Av. Almirante Tamandaré). Enquanto, as grandes bacias de acumulação também não podem ser facilmente empregadas, devido à densidade de ocupação da bacia, o que poderia gerar grandes custos com desapropriação.

Vale destacar que as estruturas de recalque gerem maiores custos operacionais, contudo, necessitam de menor espaço disponível, o que reduz os impactos urbanísticos na implantação dessa estrutura, e assegura que não haja acúmulo indevido de água pluvial, sendo interessante em futuros estudos a avaliação da eficácia desses dispositivos na contenção de eventos de inundação, a fim de melhorar a salubridade ambiental e acabar por gerar benefícios à população da bacia da Tamandaré.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Hidrologia Básica**. [S. l.: s. n]. 2012. Disponível em: <http://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/66/2/Unidade_1.pdf>. Acesso em: 10 out. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2018: Informe Anual**. Brasília: ANA, 2018. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/portal/publicacao/Conjuntura2018.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2018.

AKAN, A. O. **Open Channel Hydraulics**. Elsevier. 2006. Disponível em: <<https://www.elsevier.com/books/open-channel-hydraulics/akan/978-0-7506-6857-6>>. Acesso em: 10 fev. 2018.

ALFIERI, L; THIELEN, J. A European precipitation index for extreme rain-storm and flash flood early warning. **Meteorological Applications**. n. 22. p. 3-13, 2015. Disponível em: <<https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/met.1328>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

ALVES. J. M. P.; CASTRO. P. T. A. Influência de feições geológicas na morfologia da bacia do rio Tanque (MG) baseada no estudo de parâmetros morfométricos e análise de padrões de lineamentos. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 33, n. 2, p. 117-127, 2003. Disponível em: <<http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/9821/9781>>. Acesso em: 10 out. 2018.

AMARAL, Daniele Pereira Batista. **Aplicação do Modelo Hidrológico SWMM na Gestão de Águas Pluviais Urbanas: Estudo de Caso da Bacia Hidrográfica do Rio Morto**. Rio de Janeiro. 2014. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Centro de Tecnologia e Ciências, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

AMARAL. R.; GUTJAHR. M. R. **Desastres Naturais**. São Paulo: IG/SMA. 2011. Disponível em: <<http://arquivos.ambiente.sp.gov.br/publicacoes/2016/12/8-DesastresNaturais.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2018.

AMARAL. R.; RIBEIRO. R. R. Inundação e Enchentes. In: TOMINAGA. L. K.; SANTORO. J.; AMARAL. R. (Org.). **Desastres naturais: Conhecer para Prevenir**. 1. ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. Disponível em: <<http://www.igeologico.sp.gov.br/downloads/livros/DesastresNaturais.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2018.

AMORIM, Raul Reis; Reis. Claudio Henrique; FERREIRA. Carmen. Mapeamento dos Geossistemas e dos Sistemas Antrópicos como Subsídio ao Estudo de Áreas com Riscos a Inundações no Baixo Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Muriaé (Rio de Janeiro – Brasil). **Territorium**, n. 24, p. 89-114. 2017. Disponível em: <http://www.uc.pt/fluc/nicif/riscos/Territorium/numeros_publicados>. Acesso em: 10 mar. 2018.

AMORIN, José Carlos Cesar. **Segurança em Barragens: Aspectos Hidromecânicos**. 2016. Disponível em: <https://capacitacao.ead.unesp.br/dspace/bitstream/ana/110/16/Unidade_7-modulo1.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2018.

ANTONELI, V.; THOMAZ, E. L. Caracterização do meio físico da bacia do Arroio Boa Vista. Guamiranga-PR. **Revista Caminhos da Geografia**, Uberlândia, v. 8, n. 21, jun. p. 46-58, 2007.

ARAÚJO JÚNIOR, Antônio Carlos Ribeiro. Natureza da Modificação e Modificação da Natureza: antropogênese da bacia hidrográfica da Estrada Nova. Belém (PA). **Geo UERJ**. Rio de Janeiro, ano 16, v. 1, n. 25, p. 39-61, 2014. Disponível em: <<http://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/geouerj/article/view/5234/9933>>. Acesso em: 10 fev. 2018.

ARAÚJO JÚNIOR, Ésio Wilson Levino de. **Avaliação da Influência do Uso e Cobertura do Solo em Parâmetros Quantitativos e de Qualidade da Água na Sub-bacia Tamanduá (DF)**. 2016. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7.259 – Comportas Hidráulicas – Terminologia**. Rio de Janeiro, 2001.

AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNANDEZ, M. F. **Manual de Hidráulica**. ed. 9, São Paulo: Edgard Blücher, 2015.

BABAEI, Sahar; GHAZAVI, Reza; ERFANIAN, Mahdi. Urban Flood Simulation and Prioritization of critical urban sub-catchments using SWMM model and PROMETHEE II approach. **Physics and Chemistry of the Earth. Parts A/B/C**, v. 103, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474706517301584>>. Acesso em: 10 fev. 2018.

BARBAT, B.; CARREÑO, T. **Análisis de riesgo urbano utilizando indicadores: aplicación demostrativa para la ciudad de Bogotá. Colombia**. Manizales: Instituto de Estudios Ambientales – IDEA de la Universidad Nacional de Colômbia, Banco Interamericano de Desenvolvimento – BID, 2004.

BARBOSA, Francisco de Assis dos Reis. **Medidas de proteção e controle de inundações urbanas na bacia do rio Mamanguape/PB**. 2006. 115 f. Dissertação (Mestrado em Urbanismo) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2006.

BASSALO, José Maria Coelho. **Avaliação de Sistemas de Prevenção e Contenção de Inundações em Bacias de Drenagem Urbana**. 2004. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará, Belém, 2003.

BASTOS, Gustavo Antonio Pereira. **Análise dos Parâmetros do Modelo SWMM para Avaliação do Escoamento em Duas Bacias Periurbanas em Santa Maria-RS**. 2007. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

BASTOS, T. X. *et al.* Precipitações pluviométricas máximas de 24 horas em Belém. probabilidade de ocorrência e tempo de retorno. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA. 10., 1998, Brasília, **Anais...** Brasília: [s.n.] 1998. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/986631/precipitações-pluviométricas-maximas-de-24-horas-em-belem-probabilidade-de-ocorrencia-e-tempo-de-retorno>>. Acesso em: 10 out. 2018.

BELÉM. **Bacias Hidrográficas**. 2014. Disponível em: <<http://www.belem.pa.gov.br/app/c2ms/v/?id=18&conteudo=4756>>. Acesso em: 11 de Setembro de 2018.

BELÉM. Lei nº 7.709, de 18 de maio de 1994. Disponível em: <<https://cm-belem.jusbrasil.com.br/legislacao/583044/lei-7709-94>>. Acesso em: 10 fev. 2018.

BELÉM. **Programa de Recuperação Urbano-ambiental da Bacia Hidrográfica da Estrada Nova**. Engesolo Engenharia LTDA, 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0044-59672005000200010>. Acesso em: 10 out. 2018.

BERZ, G. Flood Disasters: Lessons from the Past - Worries for the Future. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water and Maritime Engineering**, v. 142, n. 1, 2000. p. 3-8. Disponível em: <<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Ac429db35-c548-4d44-a8b0-3d24146c3815?collection=research>>. Acesso em: 10 fev. 2018.

BORGES, Denilce Rabelo. **As Institucionalidades na Gestão do Território: Os Limites das Dominalidades Territoriais sobre os Terrenos da Marinha em Belém – PA**. 2012. 156 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.

BRASIL. Banco de dados e registros de desastres: sistema integrado de informações sobre desastres - S2ID. 2013. Disponível em: <<http://s2id.integracao.gov.br/>>. Acesso em: 10 mar. 2013.

BRASIL. **Guia de preparação e resposta à emergência em saúde pública por inundação**. 1. ed. Brasília: Ministério da Saúde. 2017. Disponível em: <http://www.conasems.org.br/wp-content/uploads/2018/01/guia_preparacao_respostas_emergencia_saude_publica_inundacao.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2018.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 05 de janeiro de 2007. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/111445.htm>. Acesso em: 06 fev. 2018.

BRASIL. Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112608.htm>. Acesso em: 23 fev. 2018.

BRASIL. **Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios**. Brasília: Ministério das Cidades, Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 2007, p. 176. Disponível em: <https://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNPU/Biblioteca/PrevencaoErradicacao/Livro_Mapeamento_Enconstas_Margens.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2018.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Plano Nacional de Saneamento Básico**. Brasília, 2013. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/AECBF8E2/Plansab_Versao_Conselhos_Nacionais_020520131.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2017.

BRASIL. **Plano de Contingência para Emergência em Saúde Pública por Inundação**. 1. ed. Brasília: Ministério da Saúde, 2014. Disponível em: <<http://www.conasems.org.br/wp->

content/uploads/2018/01/guia_preparacao_respostas_emergencia_saude_publica_inundacao.pdf >. Acesso em: 10 mar. 2018.

BRASIL. **Plano Nacional de Saneamento Básico**. Brasília: Ministério das Cidades, 2013. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/AECBF8E2/Plansab_Versao_Conselhos_Nacionais_020520131.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2018.

BRITO, Fausto. Transição Demográfica e desigualdades sociais no Brasil. **Revista Brasileira de Estudos de População**, São Paulo, v. 25, n. 1, p. 5-26, jan./jun. 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbepop/v25n1/v25n1a02.pdf>>. Acesso em 10 fev. 2018.

BRITO, Lilian Simone Amorim. **Intervenção no Centro Histórico e a Reorganização Sócio-espacial do Bairro da Cidade Velha – Belém/PA**. 2007. 158 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

CABRAL, J. J. S. P. *et al.* Modelos Computacionais para Drenagem Urbana. In: RIGHETTO, Antônio Marozzi (Org.). **Manejo de Águas Pluviais Urbanas**. Rio de Janeiro: ABES, 2009.

CANÇADO, Vanessa Lucena. **Consequências Econômicas das Inundações E Vulnerabilidade: Desenvolvimento de Metodologia para Avaliação do Impacto nos Domicílios e na Cidade**. 2009. 417 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

CANHOLI, Aluísio Pardo. **Drenagem Urbana e Controle de Enchentes**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

CASTRO, M. A. H. de; BARBOSA, J. M. C.; BEZERRA, A. de A. Uma Interface Gráfica entre o AutoCAD e o SWMM para Projetos de Redes de Drenagem Urbana. In: SEMINARIO IBEROAMERICANO DE REDES DE AGUA Y DRENAJE. 15., 2017, Bogotá, **Anais...** Bogotá, Universidade Los Andes, 2017.

CASTRO, P.; LOPES, J. D. S. **Recuperação e conservação de nascentes**. Viçosa, Minas Gerais: CPT, 2001, 84p.

COLLODEL, Milena Gardai. **Aplicação do Modelo Hidrológico SWMM na Avaliação de Diferentes Níveis de Detalhamento da Bacia Hidrográfica Submetida ao Processo de Transformação Chuva-vazão**. 2009. 225 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de São Paulo, São Carlos, 2009.

CORREIA, Evaldo Flávio Gomes; RIBEIRO, Gilberto Pessanha; BAPTISTA, Alessandra Carreiro. Modelagem Hidrológica da Bacia Hidrográfica do Rio Bengalas. Nova Friburgo. RJ. Utilizando o Potencial de Geotecnologias na Definição de Áreas de Risco à Inundação. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, n. 67, p. 1183-1202, nov./dez. 2015. Disponível em: <<http://lsie.unb.br/rbc/index.php/rbc/article/view/955/863>>. Acesso em: 10 fev. 2018.

COSTA, Carlos Eduardo Aguiar de Souza *et al.* Problemática Dos Resíduos Sólidos No Sistema De Drenagem Urbana De Belém/Pa. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis, v. 4, n. 2, p. 329-344, out./mar. 2016. Disponível em:

<http://www.portaldeperiodicos.unisul.br/index.php/gestao_ambiental/article/view/2413/2268>. Acesso em: 10 out. 2018.

COSTA, Maria Elisa Leite. **Monitoramento e Modelagem de Águas de Drenagem Urbana na Bacia do Lago Paranoá**. 2013. 203 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

CRED/UNISDR (Centre for Research on the Epidemiology of Disaster/United Nations Office for Disaster Risk Reduction). **The Human Costs of Weather Related Disasters 1995–2015**. Brussels: Geneva, 2015. Disponível em: <www.unisdr.org/we/inform/publications/46796>. Acesso em: 23 fev. 2018.

CRUZ, M. A. S.; SOUZA, C. F.; TUCCI, C. E. M. Controle da drenagem urbana no Brasil: Avanço e mecanismos para sua sustentabilidade. In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17., 2007, São Paulo, **Anais...** São Paulo, 2007.

DECINA, Thiago Galvão Tiradentes; BRANDÃO, João Luiz Boccia. Análise de desempenho de medidas estruturais e não estruturais de controle de inundações em uma bacia urbana. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 1, p. 207-217, jan./mar. 2016. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v21n1/1413-4152-esa-21-01-00207.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2018.

DEPARIS, Simone. **Implicações no meio ambiente decorrentes da ocupação desordenada na área urbana do município de Concórdia/SC**. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Gestão Ambiental em Municípios) – Polo UAB do Município de Concórdia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Concórdia, 2014.

ENOMOTO, C. F. **Método para elaboração de mapas de inundação: estudo de caso na bacia do Rio Palmital**. Paraná. 2004. 135 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2004.

FERNANDES, R. de O.; COSTA, C. T. F.; STUDART, T. M. C. Análise de sensibilidade em hidrogramas de cheias máximas obtidos pelo método do SCS em uma bacia urbana. **Águas Subterrâneas**, v. 31, p. 243-254, 2017. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28812>>. Acesso em: 10 fev. 2018.

FERREIRA, Douglas Batista da Silva. **Eventos extremos da zona de convergência intertropical sobre o Atlântico durante o período chuvoso da Amazônia Oriental**. 2008. 158 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.

FERREIRA, Paulo César Morgado. **Modelação Dinâmica de Sistemas de Drenagem Urbana: Aplicação a um caso de estudo**. 2014. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2014.

FERREIRA, Ximena Cardozo. **Inundações Urbanas: Propostas Para uma Gestão do Risco com Foco na Prevenção de Danos**. 2017. 121 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Jurídica), Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí, 2017.

FILHO, A. G. de A.; SZÉLIGA, M. R.; ENOMOTO, C. F. Estudo de Medidas Não-Estruturais para Controle de Inundações Urbanas. **Ciências Exatas e da Terra. Ciências Agrárias e Engenharias**, v. 6, p. 69-90, 2000. Disponível em: <<http://www.revistas2.uepg.br/index.php/exatas/article/view/747>>. Acesso em: 10 fev. 2018.

FONSECA, Paulo Luiz da. **Integração entre Modelos de Simulação Hidrodinâmica e Sistemas de Informação Geográfica: Bacias de Detenção no Controle de Cheias Urbanas**. 2008. (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2008.

FONTE Hídrica. 2011. Disponível em: <<http://fontehidrica.blogspot.com.br/2011/11/impactos-da-urbanizacao-em-bacias.html>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

FRAZÃO, Manuel Francisco Reis e Almeida. **Calibração e Validação de um Modelo Matemático Aplicado ao Caneiro de Alcântara**. 2011. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.

FREITAS, Carlos Machado de *et al.* Desastres naturais e saúde: uma análise da situação do Brasil. **Ciência e Saúde Coletiva**, v. 19, p. 3645-3656, 2014.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE. **Manual de saneamento**. 3. ed. Brasília: FUNASA, 1999.

G1. **Em Marabá, prefeitura decreta situação de emergência com cheia de rios**. Jornal Nacional. 2018a. Disponível em: <<https://g1.globo.com/pa/para/noticia/em-maraba-prefeitura-decreta-situacao-de-emergencia-com-cheia-de-rios.ghtml>>. Acesso em: 10 jun. 2018.

G1. **Em Paragominas (PA) enxurrada mata duas crianças e deixa desabrigados**. Jornal Nacional. 2018b. Disponível em: <<http://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2018/04/em-paragominas-pa-enxurrada-mata-duas-criancas-e-deixa-desabrigados.html>>. Acesso em: 08 jun. 2018.

G1. **Nível do rio Tocantins aumenta, mas autoridades descartam enchentes em Marabá**. Jornal Nacional. 2018c. Disponível em: <<https://g1.globo.com/pa/para/noticia/nivel-do-rio-tocantins-aumenta-mas-autoridades-descartam-enchentes-em-maraba.ghtml>>. Acesso em: 10 jun. 2018.

GALVÃO, Diogo Cavalcanti. A estrutura da urbe: uma relação sistêmica. **Humanae**, v. 8, n. 2, 2014. Disponível em: <<http://humanae.esuda.com.br/index.php/humanae/article/view/124/76>>. Acesso em: 10 jan.2018.

GARCIA, Caroline *et al.* Influência da configuração topográfica na ocorrência de alagamentos no município de Maringá, Paraná. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental: Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria**, v. 19, p. 10-18, 2015. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/reget/article/view/20553/pdf>>. Acesso em: 10 jan.2018.

GARCIA, Joaquin Ignacio Bonnacarrère. **Monitoramento Hidrológico e Modelagem da Drenagem Urbana da Bacia Hidrográfica do Arroio Cancela**. 2005. 169 f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

GOERL, R. F.; KOBIYAMA, M. Considerações sobre as Inundações no Brasil. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 16., 2005, João Pessoa, **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2005.

GOMES, Heber Pimentel *et al.* **SWMM 5.0: Manual do Usuário**. João Pessoa: FeA, 2012. Disponível em: <http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/swmm/SWMM_2012.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2018.

GOMES, Kaline Muriel de Figueiredo. **Modelagem da Poluição Difusa em uma Bacia de Drenagem Urbana**. 2014. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

GREGÓRIO, Aderson Manoel da Silva; MENDES, Amilcar Carvalho. Batimetria e sedimentologia da baía do Guajará, Belém, estado do Pará, Brasil. **Amazônia: Científica & Desenvolvimento**, Belém, v. 5, n. 9, jul./dez. 2009. Disponível em: <[http://repositorio.museu-goeldi.br/bitstream/mgoeldi/369/1/Amaz%C3%B4nia%20Ci%C3%A2ncia%20e%20Desenvolvimento%205\(9\)%202009%20GREGORIO.pdf](http://repositorio.museu-goeldi.br/bitstream/mgoeldi/369/1/Amaz%C3%B4nia%20Ci%C3%A2ncia%20e%20Desenvolvimento%205(9)%202009%20GREGORIO.pdf)>. Acesso em: 10 out. 2018.

GUHA-SAPIR, Debarati *et al.* **Annual Disaster Statistical Review 2016: The Numbers and Trends**. Brussels: CRED, 2016. Disponível em: <https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/adsr_2016.pdf>. Acesso em: 23 fev. 2018.

GUIRANO, A. C.; CISOTTO, M. F. ; BARBOSA, R. V. Vulnerabilidade por inundação na área de várzea do rio Atibaia no município de Campinas-SP. **Revista Geonorte**, v. 3, n. 4, p. 1380-1390, 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Atlas Nacional do Brasil Milton Santos**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv37312.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2018.

KOBIYAMA, M. *et al.* **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos**. Curitiba: Organic Trading, 2006.

KRAUSKOPF NETO, Ricardo. **Atualização de Modelos Chuva-vazão-propagação com Estimadores de Estado**. 2005. 286 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

LEÃO, M. B. M. S. Paisagem ribeirinha nas baixadas de Belém/PA: usos e apropriações na bacia da Estrada Nova. In: XVII ENCONTRO NACIONAL DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM PLANEJAMENTO URBANO E REGIONAL. 17., 2017, São Paulo, **Anais...** . São Paulo: XVII ENANPUR, 2017.

LECHIU, B. C. G.; OLIVEIRA FILHO, P. C.; SOUSA, J. B. de. Utilização de imagens orbitais de alta resolução em superfícies com níveis distintos de impermeabilização do solo urbano: caso Irati-PR. In: SEMINÁRIO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS, Londrina, v. 33, n. 2, jul./dez. 2012, p. 127-140.

LICCO, E. A.; DOWELL, S. F. M. Alagamentos. Enchentes Enxurradas e Inundações: Digressões sobre seus impactos socioeconômicos e governança. **Iniciação**, v. 5, p. 159-174, 2015.

LIMA, Isabel Pires. **Inundações Urbanas: Desafios ao Ordenamento do Território. O Caso da Cidade da Praia (Cabo Verde)**. 2012. 139 f. Dissertação (Mestrado em Geografia Física e Ordenamento do Território) – Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa, 2012.

LIMA, Lauro. Prevenção: Manutenção de comportas minimiza alagamentos em Belém. **Agência Belém**, Belém, 2017. Disponível em: <<http://agenciabelem.com.br/Noticia/143152>>. Acesso em: 10 out. 2018.

LIMA, Raniere Rodrigues Melo de. **Estudo de Manejo de Águas Pluviais Urbanas na Cidade Natal - Rio Grande do Norte**. 2011. 192 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

LIRA, Penélope Aryadne Antony. **O princípio da cidade sustentável na urbanização brasileira: estudo de caso de Manaus**. Dissertação (Mestrado em Direito Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Direito Ambiental, Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2012.

LISBOA, Auder M. Vieira *et al.* Sistema de Previsão de Vazão por Conjunto da Usina de Itaipu: Desenvolvimento e Primeiras Análises. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2017, Florianópolis, **Anais...** Florianópolis: ABRH, 2017.

LOU, Rodrigo Furtado. **Modelagem Hidrológica Chuva-vazão e Hidrodinâmica Aplicada na Bacia Experimental do Rio Piabanha/RJ**. 2010. 190 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

LURDANI, Marina. **Uso do Modelo de Simulação ‘ABC 6’ Aplicado a Dutovias para Avaliação de Áreas Sujeitas à Ocorrência de Ondas de Cheia e Corridas de Massa/Detritos: Estudo de Caso na Bacia do Ribeirão da Prata (SP)**. 2013. 79 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2013.

MACHADO, M. L. **Curvas de Inundação versus Profundidade de Submersão: Desenvolvimento de Metodologia – Estudo de Caso da Bacia do Rio Sapucaí. Itajubá – MG**. 2005. Tese. (Doutorado em Saneamento. Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

MACHADO, Orli José; POLEZA, Maristela Macedo. **Medidas Estruturais e Não Estruturais Implementadas para Minimizar Impactos com as Inundações no Município de Taió**. 2017. Disponível em: <<http://www.uniedu.sed.sc.gov.br/wp-content/uploads/2017/09/Orli-Jos%C3%A9-Machado.pdf>>. Acesso em: 08 Mar. 2018.

MACIEL, C. B. **Análises geotécnicas e hidrossedimentológicas de estradas não pavimentadas: estudo de caso da Fazenda Cerro Azul – Planalto norte catarinense**. 2010. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

MACINTYRE, Archibald Joseph. **Bombas e instalações de bombeamento**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

MAGNAGO, Rachel Faverzani. Incidência de Desastres Naturais em Santa Catarina de 2011 a 2013. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis, v. 4, n. 1, p. 156-175, abr./set. 2015. Disponível em: <http://www.portaldeperiodicos.unisul.br/index.php/gestao_ambiental/article/view/2281>. Acesso em: 10 mar. 2018.

MAHMOUD, S. Investigation of rainfall–runoff modeling for Egypt by using remote sensing and GIS integration. **Catena**, v. 120, p. 111-121, 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S034181621400109X>>. Acesso em: 08 mar. 2018.

MAIA, D.C. Caracterização das enchentes na área urbana de Ribeirão Preto (SP): um enfoque através de notícias de jornal. **Geografia**, Rio Claro, v.34, n.2, p. 307-327, 2009.

MAKSIMOVIC, Cedo. **Urban Drainage in Specific Climates**. v. 1, n. 40, Paris: UNESCO, 2001. Disponível em: <<http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001228/122848eo.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2018.

MALTA, Luiz Ricardo dos Santos. **Simulação do Balanço e Transporte de Nitrogênio e Fósforo Provenientes de Dejetos Animais Aplicados em Áreas Agrícolas – Estudo de Caso: Bacia do Rio Toledo – Paraná – Brasil**. 2009. 189 f. Tese (Doutorando em Engenharia Civil), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

MARCELINO, Emerson Vieira. **Desastres Naturais e Geotecnologias: Conceitos Básicos**. São José dos Campos: INPE, 2008. Disponível em: <<http://mtc-m16c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/07.02.16.22/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 10 jan.2018.

MARK, Ole *et al.* Modelling of Urban Flooding in Dhaka City. **ASCE**, Orlando, 2001. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/40583%28275%2932>>. Acesso em: 08 Mar. 2018.

MARQUES, Ellen Thuany dos Santos; SILVA, Mariela Sousa Gomes; ACÁCIO, Sidney César. **Gestão de Drenagem Urbana no Controle de Enchentes: Captação, Reservação e Armazenamento de Águas Pluviais**. 2015. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Centro Universitário Newton Paiva, Belo Horizonte, 2015.

MARTINS, Karla Gonçalves. **Expansão Urbana Desordenada e Aumento Dos Riscos Ambientais à Saúde Humana: O Caso Brasileiro**. 2012. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Gestão Ambiental) – Faculdade UnB Planatina, Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2012.

MARTINS, V. C. D. **Avaliação de Sistemas de Prevenção e Contenção de Inundações em Bacias de Drenagem Urbana**. 2015. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

MASOUD, M. H. Rainfall-runoff modeling of ungauged Wadis in arid environments (case study WadiRabigh - Saudi Arabia). **Arabian Journal of Geosciences**, v. 8, n. 5, p. 2587–2606, 2015.

MELLER, A; PAIVA. E. M. C. D. Simulação hidrodinâmica 1D de inundações em sistema de drenagem urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 12, n. 2, p.81-92, abr./jun. 2007.

MELLO, Carlos Rogério de; SILVA. Antonio Marciano da. **Hidrologia: Princípios e Aplicações em sistemas agrícolas**. 1 ed. UFLA, 2013.

MELO, Luiz Martins de. A infraestrutura de serviços públicos e o território urbano. In: LEAL, Claudio Figueiredo Coelho *et al.* (Org.). **Um olhar territorial para o desenvolvimento: Sudeste**. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2015, p. 410-434.

MELO, Marcos José Vieira de. **Medidas Estruturais e Não-Estruturais de Controle de Escoamento Superficial Aplicáveis na Bacia do Rio Fragoso na Cidade de Olinda**. 2007. 126 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

MENDONÇA, Renato Ribeiro; SILVA. José Antonio da. **Ação emergencial para reconhecimento de áreas de alto e muito alto risco a movimentos de massa, enchente e inundação**: São Francisco do Guaporé, RO. São Francisco do Guaporé: CPRM, 2017. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/18387>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

MIGUEZ, Marcelo Gomes; VERÓL, Aline Pires; REZENDE, Osvaldo Moura. **Drenagem Urbana: do Projeto Tradicional à Sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

MINERVINO, Aline Costa; DUARTE, Elisabeth Carmen. Danos materiais causados à Saúde Pública e à sociedade decorrentes de inundações e enxurradas no Brasil. 2010-2014: dados originados dos sistemas de informação global e nacional. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 21, p. 685-694, 2016.

MORAES, B. C.; COSTA, J. M. N.; COSTA, A. C. L.; COSTA, M. A. Variação espacial e temporal da precipitação no estado do Pará. **Acta Amazônica**, v. 35, n. 2, p. 207-214, abr./jun. 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0044-59672005000200010>. Acesso em: 10 out. 2018.

NEGRÃO, Anne Caroline. **Modelagem Hidrodinâmica Unidimensional da Passagem de Onda de Cheia em um Córrego Urbano Considerando Escoamento Transcrítico**. 2015. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

NEVES, M. G. F. P. das; VILLANUEVA, A. O. N.; TUCCI, C. E. M. Simulação Hidrodinâmica Integrada do Escoamento em Redes de Drenagem Urbana e nas Ruas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 3, p. 111-139, jul./set. 2001. Disponível em: <<http://rhama.com.br/blog/wp-content/uploads/2017/01/simulacao-hidrodinamica-integrada-do-escoamento-em-redes-de-drenagem-urbana-e-nas-ruas-1.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2018.

NYLANDER, J. D. A.; FERREIRA, J. F. H.; PEREIRA, J. A. R. Avaliação de alternativa para amortização de eventos de inundação em bacia de drenagem urbana. In: SEMINARIO IBEROAMERICANO DE REDES DE AGUA Y DRENAJE. 7., 2017, Bogotá, **Anais...** Bogotá - Colômbia: Universidad de Los Andes, 2017, p. 90-98.

OLIVEIRA, Alan Ébano de. **Modelagem de Infiltração de Água no Solo com o Modelo Green-AMPT**. 2015. 122 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

OSTROWSKY, Maria de Sampaio Bonafé; ZMITROWICZ, Witold. **Urbanização e Controle de Enchente: o caso de São Paulo: seus conflitos e inter-relações**. In: Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia da Construção Civil, São Paulo: 1991. Disponível em: <http://www.pcc.usp.br/files/text/publications/BT_00050.pdf>. Acesso em: 30 de mai. 2013.

PAIVA, A. R. M. *et al.* A Bacia da Tamandaré e o Simbolismo Entre o Rio-Homem-Cidade. In: ENCONTRO NACIONAL DA ANPPAS, 6., 2012, Belém, **Resumo...** Belém, 2012. Disponível em: <<http://www.anppas.org.br/encontro6/anais/ARQUIVOS/GT9-814-524.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2018.

PANTOJA, M. A. L. *et al.* Detecção de Canais e Rios Impactados pelo Despejo Irregular de Efluentes na Cidade de Belém. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA E V CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOPROCESSAMENTO. 26., 2014, Gramad, 2014. Disponível em: <<http://ptdocz.com/doc/419437/detec%C3%A7%C3%A3o-de-canais-e-rios-impactados-pelo-despejo-irregul...>>. Acesso em: 10 fev. 2018.

PARANÁ. **Manual de Drenagem Urbana: Região Metropolitana de Curitiba-PR**. CH2MHILL, 2002. Disponível em: <http://www.aguasparana.pr.gov.br/arquivos/File/pddrenagem/volume6/mdu_versao01.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2018.

PARK, Hyoseon; JANG, Dongwoo. Analysis of Storm Sewer Discharge Capacity of Urban Water using MOUSE. **Advanced Science and Technology Letters**, v. 99, p. 194-197, 2015. Disponível em: <http://onlinepresent.org/proceedings/vol99_2015/47.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2018.

PAZ, Adriano Rolim da; COLLISCHONN, Walter; TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Simulação Hidrodinâmica Integrada Rio-Planície em Ambientel SIG: Aplicações ao Rio Aquidauana. In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL. 1., 2006, Campo Grande, **Anais...** Campo Grande, 2006. Disponível em: <http://www.ct.ufpb.br/~adrianorpaz/artigos/Paz_et_al_Geopantanal_2006.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2018.

PEGADO, Rosielle Souza *et al.* Risco de cheia e vulnerabilidade: uma abordagem às inundações urbanas de Belém/Pará no Brasil. **Territorium: Revista da Associação Portuguesa de Riscos, Coimbra**, n. 21, p. 71-76, 2014. Disponível em: <https://www.uc.pt/fluc/nicif/riscos/Documentacao/Territorium/T21_artg/T21_artg06.pdf>. Acesso em: 10 out. 2018.

PEIXOTO, Filipe da Silva *et al.* Estimativa de Recargas Hídricas Subterrâneas Potenciais Voluntárias e Involuntárias em Áreas Urbanas. **Águas Subterrâneas**, v. 31, p. 104-116, 2017. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28621/18691>>. Acesso em: 10 fev. 2018.

PENTEADO, Antônio Rocha. Belém do Pará. das origens aos fins do século XVIII. **Revista do Instituto de Estudos Brasileiros**, n. 3, 1968. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/rieb/article/view/45666/49263>>. Acesso em: 10 fev. 2018.

PONCIANO, João Lucas do Carmo. **Águas Pluviais: Análise de Problemas de Novos Loteamentos. Estudo de Caso do Setor Habitacional Arniqueira– DF.** 2016. 90 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade de Brasília, Brasília, 2016

PONTES, M. L. C. *et al.* Dinâmica das áreas de várzea do município de Belém/PA e a influência da precipitação pluviométrica na formação de pontos de alagamentos. **Caderno de Geografia**, v. 27, n. 49, p. 285-303, 2017. Disponível em: <<http://periodicos.pucminas.br/index.php/geografia/article/view/p.2318-2962.2017v27n49p285>>. Acesso em: 10 fev. 2018.

PORTO, R. *et al.* Drenagem urbana. In: TUCCI, C. E. M. (Org.) **Hidrologia: ciência e aplicação.** 4 ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2009.

POSSANTTI, Iporã Brito; DORNELLES, Fernando. Prognóstico por Modelagem da Eficácia de Banhado de Precipitação pluviométrica no Atendimento do Enquadramento de Um Rio Urbano. **Revista Caminhos da Geografia**, Uberlândia, v. 18, n. 64, dez. 2017. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/40920>>. Acesso em: 10 fev. 2018.

PRIEST, S. J.; PARKER, D. J.; TAPSELL, S. M. Modelling the potential damage-reducing benefits of flood warnings using European Cases. **Environmental Hazards: Human and Policy Dimensions**, London, v. 10, p. 101-120, 2011.

RAMOS, Liane Silva. **O efeito da implantação de infra-estrutura para o aumento do valor do solo urbano em diferentes realidades: estudo de caso na cidade de Belém-PA.** 1999. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

REIS, João Bosco Coura dos. **Monitoramento e alerta de inundação no município de Itajubá (MG) através de modelos matemáticos.** 2014. 95 f. Dissertação (Mestre em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Itajubá, 2014.

RIBEIRO, Alexandra; CARDOSO, Alberto. Integração de Modelos de Simulação em SIG: Aplicação ao Caso da Drenagem de Águas Pluviais Urbanas. In: SANTOS, José Gomes dos *et al.* **Atas das I Jornadas Lusófonas de Ciências e Tecnologias de Informação Geográficas**, Coimbra: Universidade de Coimbra, 2015, p. 699-720.

RIBEIRO, Júlia Werneck; ROOKE, Juliana Maria Scoralick. **Saneamento Básico e sua Relação com o Meio Ambiente e a Saúde Pública.** 2010. 36 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Análise Ambiental), Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2010.

RIGHETTO, Antoni Marozzi; MENDIONDO, Eduardo Mário; RIGHETTO, Julian Margarido. Modelo de Seguro para Riscos Hidrológicos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 2, abr./jun. 2007. Disponível em: <<https://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=20&SUMARIO=282>>. Acesso em: 10 fev. 2018.

RIGHI, Eléia. **Metodologia para Zoneamento de Risco a Inundações graduais**. 2016. 196 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ROCHA, Nayda. **Planejamento Urbano da Bacia do Córrego Samambaia (Goiânia – GO) Utilizando o SWMM – Storm Water Management Model**. 2013. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

RONQUIM, Joyce. **Gestão de Drenagem Urbana em Palmas-PR: Conflitos e Alternativas**. 2014. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2014.

ROSA, Deyvid Wave Barreto. **Resposta Hidrológica de Uma Bacia Hidrográfica Urbana à Implantação de Técnicas Compensatórias de Drenagem Urbana – Bacia do Córrego do Leitão**. Belo Horizonte. Minas Gerais. 2017. 220 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

ROSSMAN, L. A. **Storm Water Management Model: User's Manual Version 5.1**. Cincinnati: United States Environmental Protection Agency. 2015. Disponível em: <<https://www.innovyze.com/products/swmm/download/ZyPDF.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2018.

SALES, Raquel Jucá de Moraes. **Estudos Hidráulicos e Hidrológicos de Amortecimento de Cheias do Riacho Alagadiço. Fortaleza. CE**. 2011. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Ceará, Fortaleza, 2011.

SANTIAGO, Alailson V. *et al.* **Variabilidade e Intensidade das Chuvas em Belém-PA**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA. 17., 2011 – Guarapari: SESC Centro de Turismo de Guarapari, 2011. Disponível em: <http://www.sbagro.org.br/anais_congresso_2011/cba2011/trabalhos/08/cba08_387_869.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2018.

SANTOS, Humberto Gonçalves *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 ed. Brasília: Embrapa, 2018. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1094003/sistema-brasileiro-de-classificacao-de-solos>>. Acesso em: 10 out. 2018.

SANTOS, K. A. S.; RUFFINO, I. A. A.; BARROS FILHO, M. N. M. Impactos da ocupação urbana na permeabilidade do solo: o caso de uma área de urbanização consolidada em Campina Grande – PB. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 5, p. 943-952, set./out. 2017. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v22n5/1809-4457-esa-s1413-41522016146661.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2018.

SANTOS, Maria de Lourdes Souza *et al.* Influência das Condições da Maré na Qualidade de Água do Rio Guamá e Baía do Guajará. **Boletim Técnico Científico do CEPNOR**, v. 14, n. 1, p. 17-25, 2014. Disponível em: <<https://cepnor.ufra.edu.br/index.php?journal=tjfas&page=article&op=view&path%5B%5D=1757>>. Acesso em: 10 out. 2018.

SANTOS, Marilaine Alves; CARVALHO, Silvia Méri; ANTONELI, Valdemir. Suscetibilidade a Enchentes a partir da Análise de Variáveis Morfométricas. na Bacia

Hidrográfica Rio Bonito em Irati-PR-Brasil. **Equador**, Piauí, v. 5, n. 5, p.151-167, 2016. Disponível em: <www.ojs.ufpi.br/index.php/equador/article/download/4855/3224>. Acesso em: 10 fev. 2018.

SANTOS, Odete Cardoso de Oliveira. As Chuvas, Alagamentos e Enchentes. no Período Chuvoso em Belém. Estado do Pará. **Revista Geonorte**, v. 2, n. 5, p. 173-183, 2012. Disponível em: <<http://www.periodicos.ufam.edu.br/revista-geonorte/article/view/2488>>. Acesso em: 10 fev. 2018.

SÃO PAULO. Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano. **Manual de drenagem e manejo de águas pluviais**: gerenciamento do sistema de drenagem urbana. São Paulo: SMDU, 2012. Disponível em: <http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/desenvolvimento_urbano/arquivos/manual-drenagem_v1.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2018.

SARTORI, A.; NETO, F. L.; GENOVEZ, A. M. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Precipitação pluviométrica Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 05-18, out./dez. 2005. Disponível em: <<http://132.248.9.34/hevila/Revistabrasileiraderecursosohidricos/2005/vol10/no4/1.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2018.

SHINMA, Taís Arriero. **Calibração Multiobjetivo do SWMM Aplicada à Transformação Chuva-Vazão**. 2011. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

SILVA, Andressa Macêdo e. **Gestão de conflitos pelo uso da água em bacias hidrográficas urbanas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade do Estado do Pará. Belém, 2003.

SILVA, Daniele Feitoza. **Análise da Influência de Microrreservatórios em um Loteamento e seus Efeitos em Escala de Bacia**. 2016. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

SILVA, Izabela Cristiane de Lima. **Proposta Metodológica para Avaliação da Qualidade de Planos Municipais de Saneamento Básico**. 2017. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

SILVA, M. N. de A.; COPQUE, A. C. da S. M.; GIUDICE, D. S. **Consequências das transformações ambientais no processo de expansão das cidades – O exemplo de Salvador/Bahia**. 2009. Disponível em: <<http://observatoriogeograficoamericalatina.org.mx/egal12/Geografiasocioeconomica/Geografiaurbana/107.pdf>>. Acesso em 10 fev. 2018.

SILVA, Narjara Rúbia Lima da *et al.* Aplicação do Modelo de Gestão de Drenagem Urbana (SWMM) na Sub-Bacia 2 da Estrada Nova em Belém do Pará. **Sustentare**, Três Corações, v. 1, n. 1, p. 01-17, ago./dez. 2017b.

SILVA, Ofélia de Lira Carneiro. Avaliação de impactos causados pelas enchentes em regiões ribeirinhas na cidade de Boa Vista/RR. **Revista de Ciência e Tecnologia**, v. 3, n. 4, 2017a. Disponível em: <<https://revista.ufrb.br/rct/article/view/2537>>. Acesso em: 10 fev. 2018.

SILVA, Thiago Henrique Almeida. **Concepção e Dimensionamento de Sistema de Drenagem Urbana em Zona Comercial do Município de Lagoa da Prata – MG**. 2017. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Centro Universitário de Formiga, Formiga, 2017c.

SOARES, André Araújo Sombra; CARVALHO, André Cutrim. Desafios da Governança do Espaço Urbano na Era do Antropoceno e o Caso das Inundações e Alagamentos Em Belém-Pa. **Revista GeoAmazônia**, Belém, v. 6, n. 11, p. 105-142, 2018. Disponível em: <<http://www.geoamazonia.net/index.php/revista/article/view/163/128>>. Acesso em: 10 out. 2018.

SOUZA, Rodrigo O. R. de M. *et al.* Equações de Chuvas Intensas para o Estado do Pará. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 16, n. 9, p. 999-1005, 2012. Disponível em: <<http://www.agriambi.com.br/revista/v16n09/v16n09a11.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2018.

SOUZA, Rosângela Silva de *et al.* Saneamento Básico no Estado de Roraima: Situação Atual e Perspectivas. **Análise**, Porto Alegre, n. 2, p. 151-161, jul/dez. 2010. Disponível em: <<http://revistaseletronicas.pucrs.br/ojs/index.php/face/article/viewFile/7430/6605>>. Acesso em: 23 fev. 2018.

TACHINI, Mario. **Avaliação de danos associados às inundações no município de Blumenau**. 2010. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

TAVARES, João Paulo Nardin. Enchentes Repentinhas na Cidade de Belém-PA: Condições Climáticas Associadas e Impactos Sociais no Ano de 1987. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 9, n. 18, p. 01-06, 2008. Disponível em: <www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/download/15746/8911>. Acesso em: 10 out. 2018.

TAVARES, Lígia Conceição. **Análise do Sistema de Macrodrenagem da Bacia Hidrográfica da Tamandaré em Belém-PA**. 2017. 17 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2017.

TEMÉZ, J. **Cálculo Hidrometeorológico de Caudales Máximos em pequenas cuencas naturales**. Madrid: Dirección de Carreteras, 1978.

TEODORO, V. L. I. *et al.* O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. **Revista Uniara**, n. 20, p. 137-156, 2007. Disponível em: <<http://www.revistarebram.com/index.php/revistauniara/article/view/236/191>>. Acesso em: 10 fev. 2018.

TOMAZ, Plínio. **Bombeamento de águas pluviais**. 2010. Disponível em: <http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/capitulo_11_bombeamento_aguas_pluviais.pdf>. Acesso em: 08 jun. 2018.

TOMAZ, Plínio. **Fórmulas de Manning e canais**. 2013. Disponível em: <http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/Novos_livros/livro_canais/capitulo50.pdf>. Acesso em: 08 jun. 2018.

TSAI, Lin-Yi *et al.* Using the HSPF and SWMM Models in a High Pervious Watershed and Estimating Their Parameter Sensitivity. **Water**, v. 9, n. 10, p. 1-16, 2017. Disponível em: <www.mdpi.com/2073-4441/9/10/780>. Acesso em: 10 fev. 2018.

TUCCI, C. E. M. Águas urbanas. **Estudos Avançados**, v.22, n.63, p. 01-16, 2008.

TUCCI, C. E. M. **Gestão da drenagem urbana**. Brasília: CEPAL/IPEA, 2012. Disponível em: <<http://200.9.3.98/handle/11362/38004>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia Ciência e Aplicação**. 4 ed. Porto Alegre: UFRGS, 2013.

TUCCI, C. E. M. **Gestão das inundações urbanas**. Brasília, 2005.

TUCCI, E. M; BERTONI, J. C. (Org.) **Inundações Urbanas na América do Sul**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos: Porto Alegre, 2003.

UBERABA. **Galeria de Imagens**. 2011. Disponível em: <<http://www.uberaba.mg.gov.br/portal/galeriaimagens.noticias.2011.02%20-%20Fevereiro.11.02.2011>>. Acesso em: 08 Mar. 2018.

UNIÃO EUROPEIA. Diretiva n° 2007/60/CE, de 23 de outubro de 2007. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=celex%3A32007L0060>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME. **The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-Based Solutions for Water**. Paris: UNESCO, 2018. Disponível em: <<http://unesdoc.unesco.org/images/0026/002614/261424e.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

UNITED NATIONS. **Disaster Risk Reduction: Global Review 2007**. Geneva, 2007. Disponível em: <https://www.unisdr.org/files/1130_GlobalReview2007.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2018.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. **Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2012: Volume Brasil**. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres, Florianópolis: CEPED UFSC, 2013.

USACE. HEC-RAS (River Analysis System): User's Manual. New York: Hydrologic Engineering Center, 2016. Disponível em: <<http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Users%20Manual.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

VAN DER VEEN, A. *et al.* Structural economic effects of large scale inundation: a simulation of the Krimpen dike breakage. In: VAN DER VEEN, A.; ARELLANO, A.; NORDVIK, J. (Org.). **In search off a common metthodollogy on damage estimation**. European Communities: Institute for the Protection and Security of the Citizen (IPSC); EC Directorate General Joint Research Centre (JRC), 2003, p. 53-78. Disponível em: <<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Ac429db35-c548-4d44-a8b0-3d24146c3815?collection=research>>. Acesso em: 10 fev. 2018.

VENDRAME, I. F.; LOPES, W. A. B. Análise do crescimento urbano e seus efeitos na mudança da dinâmica de escoamento superficial da bacia Pararangaba. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. 12., 2005, Goiânia, **Anais...** Goiânia: INPE, 2005, p. 2555-2562.

VERONELLI, J. C.; TESTA, A. **La OPS en Argentina**: crônica de una relación centenaria. Buenos Aires: Opas, 2002.

VINAGRE, Marco Valério de Albuquerque *et al.* Modelo de Gestão de Drenagem Urbana Aplicada à Bacia do Una e. Belém-PA. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, Três Corações, v. 15, n. 1, p. 253-267, jan./jul. 2017. Disponível em: <<http://periodicos.unincor.br/index.php/revistaunincor/article/view/3708>>. Acesso em: 10 fev. 2018.

ZAFFANI, Aline Gomes. **Poluição Difusa da Drenagem Urbana com Base Ecohidrológica**: Diagnóstico Atual e Cenários de Longo Prazo em Bacias Urbanas de São Carlos - São Paulo. 2012. 174 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

ZAHED FILHO, Kamel *et al.* **Coleção Águas Urbanas**: Medidas de Armazenamento Artificial e Facilitadores de Infiltração para Controle de Inundações Urbanas. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica, 2012. Disponível em: <www.pha.poli.usp.br/LeArq.aspx?id_arq=6482>. Acesso em: 10 fev. 2018.

ZUQUETTE, Lázaro Valentin; PALMA, Janaina Barrios. Avaliação da Taxa de Infiltração e Escoamento Superficial Frente a Diferentes Cenários de Chuvas em Área de Ocorrência dos Arenitos da Formação Botucatu. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 36, n. 1, p. 49-60, 2006. Disponível em: <<http://ppegio.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/9352>>. Acesso em: 10 fev. 2018.