



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Dayana Martins Nunes

**Gestão das Águas Pluviais Urbanas e Elementos da Infraestrutura Verde:  
Estudo de Caso da Bacia Hidrográfica do Rio Morto, Rio de Janeiro**

Rio de Janeiro

2017

Dayana Martins Nunes

**Gestão das Águas Pluviais Urbanas e Elementos da Infraestrutura Verde: Estudo de  
Caso da Bacia Hidrográfica do Rio Morto, Rio de Janeiro**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Saneamento Ambiental - Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup> Luciene Pimentel da Silva

Coorientador: Prof<sup>º</sup> Paulo Luiz da Fonseca

Rio de Janeiro

2017

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

N972 Nunes, Dayana Martins.  
Gestão das águas pluviais urbanas e elementos da infraestrutura verde: estudo de caso da Bacia Hidrográfica do Rio Morto, Rio de Janeiro / Dayana Martins Nunes – 2017.  
166f.

Orientador: Luciene Pimentel da Silva.  
Coorientador: Paulo Luiz da Fonseca.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Ambiental. 2. Gestão de águas pluviais no meio urbano - Dissertações. 3. Bacias hidrográficas - Dissertações. 4. Modelagem hidrológica - Dissertações. I. Silva, Luciene Pimentel da. II. Fonseca, Paulo Luiz da. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. IV. Título.

CDU 556.18

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Dayana Martins Nunes

**Gestão das Águas Pluviais Urbanas e Elementos da Infraestrutura Verde: Estudo de  
Caso da Bacia Hidrográfica do Rio Morto, Rio de Janeiro.**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Saneamento Ambiental - Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Aprovada em 24 de abril de 2017.

Banca Examinadora:

---

Prof<sup>o</sup>. Dr. Luciene Pimentel da Silva (Orientador)  
Faculdade de Engenharia – UERJ

---

Prof<sup>o</sup>. Dr. Paulo Luiz da Fonseca (Co-orientador)  
Universidade Federal Fluminense – UFF / Fundação Rio-Águas

---

Prof<sup>o</sup>. Dr. Alfredo Akira Ohnuma Jr.  
Faculdade de Engenharia – UERJ

---

Prof<sup>o</sup>. Dr. Elson Antônio do Nascimento  
Universidade Federal Fluminense – UFF

---

Prof<sup>o</sup>. Dr. Mônica de Aquino Galeano Massera da Hora  
Universidade Federal Fluminense – UFF

Rio de Janeiro

2017

## DEDICATÓRIA

A Deus, que sempre abençoa e ilumina a minha trajetória.

Ao meus pais, meus avós, minha irmã e meu namorado.

A todos os familiares, professores e amigos que acreditaram no meu potencial.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter me dado coragem e força para vencer todas as dificuldades que surgiram ao longo da minha vida.

Aos meus pais, Maria Dulce e Emanuel, por toda paciência, amor, confiança e apoio, principalmente, nas horas de angústia e desânimo. Obrigada por todos os esforços e renúncias que fizeram a fim de me proporcionar uma boa educação.

À minha irmã, Jéssica, por ser minha verdadeira amiga. Agradeço por toda a preocupação e carinho demonstrado por mim, pelos conselhos sugeridos quando necessitei e por representar um exemplo de vida a ser seguido.

Ao meu namorado, Marlon, que entrou na minha vida durante a jornada do mestrado e me tornou uma pessoa melhor e mais forte. Obrigada por todo amor e carinho, incentivo, ajuda e por sempre acreditar no meu potencial. O seu apoio foi fundamental para a concretização deste trabalho.

A todos da minha família, especialmente minha avó Maria Ângela, minha madrinha Ana Paula, minha prima Camilla e minha tia Carminha, que sempre estiveram ao meu lado, compreenderam os momentos de ausência e me impulsionaram a seguir em frente. Meu eterno agradecimento.

Ao Osvaldo que, apesar de não estar mais presente entre nós, sempre se orgulhou de mim e acreditou que eu concluiria esta etapa com sucesso.

À minha orientadora Professora Luciene Pimentel da Silva, por me orientar neste trabalho e por todo empenho dedicado. Muito obrigada pelo apoio, carinho, confiança, paciência, e pelos conhecimentos passados. A senhora é uma profissional brilhante e se tornou muito especial para mim.

Ao meu co-orientador Professor Paulo Fonseca, por ajudar na orientação deste trabalho e por todo apoio, confiança e atenção quando necessitei. Obrigada por acreditar no meu potencial e por ser um grande profissional.

Aos colegas de trabalho do PEAMB, Willker, Wagner e Márcio.

À Daniele Amaral, pelo auxílio no uso do modelo SWMM e fornecimento da base de dados da bacia do rio Morto.

A todos os amigos que surgiram ao longo desta jornada e que compartilharam das vitórias e dificuldades. Obrigada por todo apoio e pelos inúmeros momentos de alegria.

A todos os professores que me proporcionaram o conhecimento e contribuíram para minha formação profissional.

Ao CNPq e FINEP pelo apoio financeiro ao Projeto HIDROCIDADES e à bolsa concedida.

Ao INEA, onde atuo profissionalmente, pelo apoio à conclusão do mestrado.

Suba o primeiro degrau com fé.  
Não é necessário que você veja toda a escada, apenas dê o primeiro passo.

*Martin Luther King*

## RESUMO

NUNES, Dayana Martins. *Gestão das águas pluviais urbanas e elementos da infraestrutura verde: estudo de caso da Bacia Hidrográfica do Rio Morto, Rio de Janeiro*. 2017. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

O aumento da magnitude e frequência das inundações urbanas representa uma das principais consequências das modificações do meio natural. Para restaurar as condições da bacia hidrográfica anterior à urbanização, principalmente os processos de infiltração e armazenamentos naturais, têm-se investido em técnicas não convencionais relacionadas com a drenagem urbana. Neste contexto, a modelagem hidrológica-hidráulica apresenta-se como metodologia relevante para a gestão sustentável das águas urbanas, já que permite a simulação e cenarização de dispositivos de controle dos escoamentos. Esta dissertação teve como objetivo verificar o comportamento hidrológico-hidráulico da bacia hidrográfica do rio Morto diante da simulação da implantação de telhados verdes com o auxílio do modelo *Storm Water Management Model* (SWMM). A bacia está localizada na baixada de Jacarepaguá, na cidade do Rio de Janeiro, e foi constituída como experimental e representativa. A aplicação do modelo SWMM envolveu primeiramente a calibração individual e simultânea dos parâmetros do escoamento superficial e subterrâneo para os eventos de dezembro de 2008 e junho de 2010, resultando em três possíveis conjuntos de parâmetros ajustados que foram utilizados nas etapas de validação e simulação de cenários. A validação do modelo foi feita para abril de 2010, considerado como um dos eventos mais críticos registrados na região. Os coeficientes estatísticos  $R^2$ , NSE, RSR e PBIAS foram calculados para avaliar a eficácia dos ajustes da calibração e validação do modelo. Os resultados obtidos foram considerados satisfatórios, conforme dados da literatura. A simulação de cenários com telhados verdes foi feita para as sub-bacias 36, 37 e 43 para o evento de abril de 2010, considerando que toda a área de cobertura das edificações destas sub-bacias fosse substituída por telhados verdes, correspondendo a 20%, 25% e 50% da área total da sub-bacia, respectivamente. Embora, tenha se constatado que a implantação dos telhados verdes não reverteria a inundação nos trechos dos rios nessas sub-bacias, em que foram constatados extravasamento da calha nas condições atuais de uso e ocupação do solo, verificou-se que em todas as simulações houve redução da vazão de pico e do escoamento gerado em cada sub-bacia. Em relação à vazão de pico, observou-se uma redução média de 11.4%, 14.6% e 3.60%, para as sub-bacias 36, 37 e 43, respectivamente, enquanto que para o volume escoado, obteve-se uma redução média de 9.3%, 10.0% e 3.0%. O cenário com a inserção de telhados verdes de forma conjunta nestas sub-bacias provocou uma ligeira redução da vazão de pico no exutório da bacia do rio Morto da ordem de 1.4%.

Palavras-chave: Inundações Urbanas. Bacias Representativas. Modelagem Hidrológica-Hidráulica. SWMM. Telhados Verdes.

## ABSTRACT

NUNES, Dayana Martins. *Storm flow management and elements of green infrastructure: case study of the Morto River Catchment, Rio de Janeiro*. 2017. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

The increasing of the magnitude and the frequency of urban flooding is one of the consequences of changes in the natural environment. In order to restore the pre-urbanization basin conditions, especially the natural processes of infiltration and storage, it has invested in unconventional techniques related to urban drainage. In this context, hydrological-hydraulic modeling presents itself as a relevant methodology for the sustainable storm flow management, since it allows the simulation and creation of scenarios of flow control devices. The main objective of this dissertation was to verify the hydrological-hydraulic behavior of Morto river catchment before the simulation of the green roofs implantation with the support of the Storm Water Management Model (SWMM). The catchment is located in the lowlands of Jacarepaguá, in the city of Rio de Janeiro, and was constituted as experimental and representative. The application of the SWMM model involved the individual and simultaneous calibration of runoff and groundwater parameters for the events of December 2008 and June 2010, resulting in three possible sets of adjusted parameters that were used in the validation and simulation of scenarios. The validation of the model was made for April 2010, considered as one of the most critical events recorded in the region. The statistical coefficients  $R^2$ , NSE, RSR and PBIAS were calculated to evaluate the effectiveness of calibration adjustments and model validation. The results were considered satisfactory, according to the literature. The simulation of scenarios with green roofs was done for the sub-basins 36, 37 and 43 for the event of April 2010, considering that the entire coverage area of the buildings of these sub-basins were replaced by green roofs, corresponding to 20%, 25% and 50% of the total sub-basin area, respectively. Although it was verified that the implantation of the green roofs did not revert flooding in the stretches of the rivers within sub-basins in which it were verified extravasation of the channels in the current conditions of soil use and occupation of the ground, it was verified that in all the simulations, there was reduction of the peak flow and of the flow generated in each sub-basin. In relation to the peak flow, an average reduction of 11.4%, 14.6% and 3.60% was observed, for the sub-basins 36, 37 and 43, respectively, whereas for the volume drained, an average reduction of 9.3%, 10.0% and 3.0% was obtained. The scenario with the insertion of green roofs jointly in these sub-basins caused a slight reduction of the peak flow in the outlet of the Morto river catchment of the order of 1.4%.

Keywords: Urban Floods. Representative Basins. Hydraulic-Hydraulic Modeling. SWMM. Green Roofs.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Perfil esquemático do processo de inundação em áreas ribeirinhas .....	29
Figura 2 – Diagrama de Hall: Impactos da urbanização no desenvolvimento dos recursos hídricos .....	30
Figura 3 – Modelo de Cidade-Jardim proposto por Ebenezer Howard.....	35
Figura 4 – Camadas construtivas estruturantes dos telhados verdes.....	39
Figura 5 – Telhados verdes extensivos implantados em estruturas modulares plásticas tipo “Cidade Jardim”, planta espécie de suculentas, predominância da <i>Portulaca oleracea</i> (nome popular “onze horas”).....	41
Figura 6 – Telhados verdes intensivos .....	41
Figura 7 - Telhados verdes e agricultura urbana: diferentes etapas dos experimentos do Projeto HIDROCIDADES.....	42
Figura 8 – Ciclo hidrológico com WSUD.....	46
Figura 9 – Evapotranspiração de referência (ET <sub>o</sub> ).....	58
Figura 10 – Localização da bacia hidrográfica do rio Morto .....	62
Figura 11 – Localização da bacia do Rio Morto – Lote 3, bacia de Jacarepaguá .....	64
Figura 12 – Uso e ocupação do solo na bacia do rio Morto .....	68
Figura 13 – Estações de monitoramento na bacia hidrográfica do rio Morto .....	69
Figura 14 – Estação Climatológica SOLAR e FAMA, respectivamente, no Parque Aquático Rio Water Planet.....	70
Figura 15 – Vertedouro de seção retangular instalado no Rio Sacarrão (Parque Estadual da Pedra Branca) .....	71
Figura 16 – Estação fluviométrica (Water Planet) instalada no rio Morto, próxima do exutório da bacia.....	72
Figura 17 – Elementos de drenagem da bacia do rio Morto (total de 43).....	73
Figura 18 – Curva-chave da seção fluviométrica “ <i>Water Planet</i> ” no rio Morto.....	74
Figura 19 – Relação entre os módulos do SWMM .....	79
Figura 20 – Modelo de reservatório não linear.....	80
Figura 21 – Modelo de águas subterrâneas .....	84
Figura 22 – Alturas utilizadas para computar o fluxo subterrâneo .....	85
Figura 23 – Ajustes dos parâmetros da sub-bacia após inserção dos controles LID.....	90
Figura 24 – Definição dos parâmetros do telhado verde .....	91

Figura 25 – Inserção do telhado verde na sub-bacia .....	93
Figura 26 – Nova subdivisão da bacia hidrográfica do rio Morto, com destaque para os elementos alterados.....	94
Figura 27 – Destaque para as sub-bacias 36, 37 e 43, consideradas no cenário com implantação de telhado verde .....	97
Figura 28 – Nova subdivisão da bacia hidrográfica do rio Morto.....	101
Figura 29 – Configuração final da bacia do rio Morto.....	102
Figura 30 – Janela de propriedade dos nós.....	103
Figura 31 – Exportação do projeto no SSA para o SWMM.....	104
Figura 32 – Edição de uma seção transversal da bacia do rio Morto .....	105
Figura 33 – Localização do pluviômetro na sub-bacia 41 .....	106
Figura 34 – Série temporal de chuva de Junho de 2010.....	107
Figura 35 – Série temporal de evapotranspiração de Junho de 2010 .....	108
Figura 36 – Aquíferos da bacia do rio Morto .....	109
Figura 37 – Métodos de cálculo e passo de tempo considerado nas simulações .....	110
Figura 38 – Histograma de dados fluviométricos e climatológicos .....	112
Figura 39 – Série de vazões observadas e precipitação no período de novembro a dezembro de 2008 .....	114
Figura 40 – Série de vazões observadas e precipitação no período de março a junho de 2010 .....	115
Figura 41 – Série de evapotranspiração no período de novembro a dezembro de 2008.....	116
Figura 42 – Série de evapotranspiração no período de março a junho de 2010.....	117
Figura 43 – Calibração individual do modelo SWMM para dezembro de 2008.....	122
Figura 44 – Calibração individual do modelo SWMM para junho de 2010 .....	123
Figura 45 – Calibração do modelo SWMM para dezembro de 2008.....	126
Figura 46 – Calibração do modelo SWMM para junho de 2010.....	127
Figura 47 – Validação do modelo SWMM para abril de 2010 (conjunto de parâmetros obtido na calibração individual de dezembro de 2008).....	130
Figura 48 – Validação do modelo SWMM para abril de 2010 (conjunto de parâmetros obtido na calibração individual de junho de 2010).....	131
Figura 49 – Validação do modelo SWMM para abril de 2010 (conjunto de parâmetros obtido na calibração simultânea de dezembro de 2008 e junho de 2010) .....	132
Figura 50 – Esquema representativo do telhado verde considerado nas simulações do modelo SWMM.....	137

Figura 51 – Hidrogramas dos cenários propostos para a sub-bacia 36 (com utilização dos parâmetros obtidos na calibração de dezembro de 2008).....	138
Figura 52 – Hidrogramas dos cenários propostos para a sub-bacia 36 (com utilização dos parâmetros obtidos na calibração de junho de 2010) .....	139
Figura 53 – Hidrogramas dos cenários propostos para a sub-bacia 36 (com utilização dos parâmetros obtidos na calibração simultânea de dezembro de 2008 e junho de 2010).....	140
Figura 54 – Hidrogramas dos cenários propostos para a sub-bacia 37 (com utilização dos parâmetros obtidos na calibração de dezembro de 2008).....	141
Figura 55 – Hidrogramas dos cenários propostos para a sub-bacia 37 (com utilização dos parâmetros obtidos na calibração de junho de 2010) .....	142
Figura 56 – Hidrogramas dos cenários propostos para a sub-bacia 37 (com utilização dos parâmetros obtidos na calibração simultânea de dezembro de 2008 e junho de 2010).....	143
Figura 57 – Hidrogramas dos cenários propostos para a sub-bacia 43 (com utilização dos parâmetros obtidos na calibração de dezembro de 2008).....	144
Figura 58 – Hidrogramas dos cenários propostos para a sub-bacia 43 (com utilização dos parâmetros obtidos na calibração de junho de 2010) .....	145
Figura 59 – Hidrogramas dos cenários propostos para a sub-bacia 43 (com utilização dos parâmetros obtidos na calibração simultânea de dezembro de 2008 e junho de 2010).....	146
Figura 60 – Capacidade das calhas do rios, considerando o conjunto de parâmetros ajustado para dezembro de 2008.....	150
Figura 61 – Capacidade das calhas do rios, considerando o conjunto de parâmetros ajustado para junho de 2010 .....	151
Figura 62 – Capacidade das calhas do rios, considerando o conjunto de parâmetros ajustado para dezembro de 2008 e junho de 2010 .....	152

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Canalização x Armazenamento .....	33
Quadro 2 – Consolidação das tipologias da infraestrutura verde .....	38
Quadro 3 – Modelos hidrológicos-hidráulicos aplicados para a drenagem urbana.....	50
Quadro 4 – Classificação hidrológica dos solos segundo o NRCS .....	83
Quadro 5 – Parâmetros utilizados no módulo <i>runoff</i> .....	83
Quadro 6 – Parâmetros associados ao armazenamento das águas subterrâneas.....	86
Quadro 7 – Parâmetros do fluxo subterrâneo .....	86
Quadro 8 – Parâmetros utilizados no módulo <i>extran</i> .....	88
Quadro 9 – Valores dos parâmetros relacionados às telhado verdes.....	98
Quadro 10 – Valores típicos para cada classe de textura do solo da literatura sobre a equação de Green-Ampt .....	99
Quadro 11 – Valores dos parâmetros do telhado verde considerados nas simulações do modelo SWMM .....	100
Quadro 12 – Parâmetros dos aquíferos.....	109
Quadro 13 – Ajuste do nível do lençol freático em cada aquífero da bacia do rio Morto.....	119
Quadro 14 – Valores dos parâmetros do escoamento superficial obtidos na calibração do modelo SWMM para dezembro de 2008.....	120
Quadro 15 – Valores dos parâmetros do escoamento superficial obtidos na calibração do modelo SWMM para junho de 2010 .....	121
Quadro 16 – Valores dos parâmetros do escoamento superficial obtidos na calibração do modelo SWMM para dezembro de 2008 e junho de 2010.....	125
Quadro 17 – Parâmetros obtidos na calibração do modelo SWMM em diversas bacias brasileiras.....	128
Quadro 18 – Área de Telhado Verde considerada em cada sub-bacia para simulação no modelo SWMM.....	136
Quadro 19 – Consolidação dos resultados das simulações com telhado verde para as sub-bacias 36, 37 e 43 .....	147
Quadro 20 – Consolidação dos resultados das simulações com telhado verde para a bacia do rio Morto.....	148

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 (continua) – Indicadores estatísticos utilizados na avaliação das simulações hidrológicas .....	53
Tabela 2 – Características morfométricas e fisiográficas da bacia do rio morto até a ponte da Estrada dos Bandeirantes.....	66

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 .....	60
Equação 2 .....	60
Equação 3 .....	75
Equação 4 .....	80
Equação 5 .....	80
Equação 6 .....	82
Equação 7 .....	82
Equação 8 .....	85
Equação 9 .....	87
Equação 10 .....	87
Equação 11 .....	92

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADV	<i>Accoustic Doppler Velocimeter</i>
APP	Área de Preservação Permanente
BMPs	<i>Best Management Practices</i>
BRUM	Bacias Representativas de Uso Misto
CEDAE	Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Estado do Rio de Janeiro
CN	<i>Curve Number</i>
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INEA	Instituto Estadual do Ambiente
IPP	Instituto Pereira Passos
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LID	<i>Low Impact Development</i>
LIUUD	<i>Low Impact Urban Design and Development</i>
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia
MDT	Modelo Digital de Terreno
NRCS	<i>Natural Resource Conservation Service</i>
NSE	<i>Nash-Sutcliffe Efficiency</i>
PBIAS	<i>Percent Bias</i>
RSR	<i>RMSE-Observations Standard Deviation Ratio</i>
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
SIGs	Sistemas de Informações Geográficas
SSA	<i>Storm and Sanitary Analysis</i>
SUDS	<i>Sustainable Urban Drainage Systems</i>
SWMM	<i>Storm Water Management Model</i>
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
US EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
WSUD	<i>Water Sensitive Urban Design</i>

## SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	19
	<b>Problemática e Justificativa</b> .....	19
	<b>Objetivos Geral e Específicos</b> .....	24
	<b>Natureza da Pesquisa e Estrutura da Dissertação</b> .....	24
<b>1.</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO E REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>28</b>
1.1	<b>Inundações Urbanas</b> .....	28
1.1.1	<u>Inundações naturais em áreas ribeirinhas</u> .....	28
1.1.2	<u>Urbanização e inundações</u> .....	29
1.1.3	<u>Controle das Inundações Urbanas</u> .....	31
1.1.3.1	Medidas Estruturais .....	32
1.1.3.2	Medidas Não Estruturais.....	33
1.1.4	<u>Gestão Sustentável das Águas Pluviais</u> .....	34
1.2	<b>Infraestrutura Verde</b> .....	34
1.3	<b>Tipologias da Infraestrutura Verde aplicadas à Drenagem Urbana</b> .....	37
1.3.1	<u>Telhados Verdes</u> .....	39
1.4	<b>Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto (BMPs, LID, WSUD, SUDS, LIUDD)</b> .....	43
1.5	<b>Simulação Hidrológica</b> .....	46
1.6	<b>Classificação dos Modelos Hidrológicos</b> .....	47
1.7	<b>Aplicação de Modelos Hidrológicos</b> .....	48
1.7.1	<u>Seleção do Modelo</u> .....	49
1.7.2	<u>Constituição da Base de Dados</u> .....	51
1.7.3	<u>Calibração e Validação do Modelo</u> .....	51
1.7.4	<u>Avaliação do Desempenho do Modelo</u> .....	52
1.7.5	<u>Simulação de Cenários</u> .....	54
1.7.6	<u>Interpretação dos Resultados</u> .....	55
1.8	<b>Elementos da infraestrutura verde e simulação hidrológica-hidráulica</b> .....	55
1.9	<b>Evapotranspiração</b> .....	56
1.9.1	<u>Evapotranspiração de Referência (ET<sub>0</sub>)</u> .....	57
1.9.2	<u>Métodos para Estimativa da ET<sub>0</sub></u> .....	58

<b>2.</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>61</b>
2.1	<b>Caracterização da Área de Estudo.....</b>	<b>61</b>
2.1.1	<u>Localização da Bacia Hidrográfica .....</u>	61
2.1.2	<u>Características Morfométricas.....</u>	65
2.1.3	<u>Tempo de Concentração.....</u>	67
2.1.4	<u>Uso e Ocupação do Solo .....</u>	67
2.1.5	<u>Clima .....</u>	68
2.1.6	<u>Monitoramento Climatológico e Hidrológico.....</u>	69
2.1.7	<u>Base de Dados Espaciais da Bacia do Rio Morto .....</u>	72
2.1.8	<u>Série histórica de vazão.....</u>	73
2.1.9	<u>Série histórica de evapotranspiração.....</u>	75
2.2	<b>O Modelo SWMM.....</b>	<b>76</b>
2.2.1	<u>Descrição dos Módulos .....</u>	78
2.2.2	<u>O Módulo Chuva-Vazão (Runoff) .....</u>	79
2.2.2.1	Representação da variação de armazenamento no reservatório da superfície do solo.....	80
2.2.2.2	Representação da Infiltração (“f” da equação 4) .....	81
2.2.2.3	Representação do Escoamento Subterrâneo .....	84
2.2.3	<u>O Módulo Transporte nos Conduitos (Extran).....</u>	86
2.2.4	<u>O Módulo Armazenamento/Tratamento (Storage/Treatment).....</u>	88
2.2.4.1	Telhados verdes .....	90
2.3	<b>Aplicação do Modelo SWMM na Bacia do Rio Morto.....</b>	<b>94</b>
2.3.1	<u>Discretização da bacia do rio Morto .....</u>	94
2.3.2	<u>Calibração e validação dos parâmetros do SWMM.....</u>	95
2.3.3	<u>Cenários Estudados no SWMM para a Bacia do Rio Morto.....</u>	96
<b>3.</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>101</b>
3.1	<b>Nova subdivisão espacial da Bacia do Rio Morto .....</b>	<b>101</b>
3.2	<b>Processamento do Modelo SWMM na Bacia Hidrográfica do Rio Morto.....</b>	<b>101</b>
3.2.1	<u>Importação da hidrografia e sub-bacias .....</u>	101
3.2.2	<u>Exportação para o SWMM.....</u>	103
3.2.3	<u>Definição das seções transversais .....</u>	104
3.2.4	<u>Dados de chuva e evapotranspiração .....</u>	106
3.2.5	<u>Definição dos elementos de representação de águas subterrâneas.....</u>	108

3.2.6	<u>Definição dos métodos de cálculo</u> .....	110
3.3	<b>Seleção dos períodos das simulações</b> .....	111
3.4	<b>Calibração</b> .....	118
3.4.1	<u>Calibração Individual para os períodos de 2008 e 2010.</u> ....	118
3.4.2	<u>Calibração Comum para os períodos de 2008 e 2010</u> .....	124
3.5	<b>Validação</b> .....	129
3.6	<b>Resumo e Discussão dos Resultados Obtidos</b> .....	133
4.	<b>SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS</b> .....	136
4.1	<b>Descrição dos Cenários</b> .....	136
4.2	<b>Análise dos Resultados da Simulação de Cenários</b> .....	137
	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	153
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	156
	<b>APÊNDICE A</b> .....	166

## INTRODUÇÃO

### Problemática e Justificativa

Ao longo das últimas décadas, a migração da população rural para as áreas urbanas foi motivada, sobretudo, pelas novas oportunidades de emprego e maior oferta de serviços prestados à população, tais como hospitais, escolas e sistemas de abastecimento de água, que contribuem para uma melhor qualidade de vida. Além disso, durante o século XX observou-se um aumento do crescimento populacional em função das descobertas de cura de várias doenças e das políticas públicas que contribuíram para o aumento da expectativa de vida. Segundo o IBGE (2010), a população urbana no Brasil cresceu de 56% para 84%, entre os anos de 1970 e 2010. No entanto, em muitos locais dos aglomerados urbanos, o desenvolvimento não foi acompanhado de infraestrutura urbana suficiente para garantia da qualidade de vida da população e da sustentabilidade ambiental. Também são críticos os custos e a gestão da manutenção dessas redes de infraestrutura urbana. Além disso, o problema da falta de oferta de moradia, sobretudo para a população de interesse social, resulta, entre outros, na ocupação irregular de áreas de fragilidade ambiental, onde na maior parte das vezes não há infraestrutura urbana, e nem viabilidade técnica e econômica para sua implementação. Dados das Nações Unidas (UNITED NATIONS, 2014) demonstram também que a população nessas regiões cresce à taxas maiores do que no restante das cidades, contribuindo para o agravamento da situação, expondo um contingente maior aos riscos.

Hall (1984) destaca as principais consequências da urbanização no desenvolvimento dos recursos hídricos e para o meio ambiente. Um dos impactos mais expressivos da urbanização refere-se à alteração da qualidade das águas e da disponibilidade hídrica. Dentre os problemas, destaca-se o agravamento das enchentes naturais e a ampliação de sua frequência, além do surgimento de novos pontos de alagamento (CRUZ *et al.*, 2007). A alteração do espaço físico a partir da pavimentação da malha urbana, obras de aterramento e construção de indústrias, comércios e residências aumentam o grau de impermeabilização do solo e diminuem a cobertura vegetal. Desta forma, a parcela de água que antes ficava retida na vegetação, infiltrava e, era armazenada nos solos, passa a integrar em boa parte os escoamentos superficiais. O aumento expressivo do volume e velocidade de escoamento provoca o aumento das vazões máximas na rede de drenagem e favorece a ocorrência dos transbordamentos dos rios e canais, e das inundações urbanas.

O desenvolvimento humano clássico nas cidades e em seu entorno, envolve a implantação de infraestrutura para abastecimento de água, drenagem das águas pluviais e destinação de águas servidas e esgotos sanitários das áreas urbanizadas. No caso da drenagem das águas pluviais, os projetos envolvem a implantação de elementos de micro-drenagem, responsáveis pela coleta dos chamados excessos pluviais (escoamentos superficiais) desde as edificações, lotes, passeios públicos, até o descarte nas chamadas galerias de águas pluviais. Estas, que já compõem as estruturas de macro-drenagem, junto com os cursos d'água naturais, descarregam os volumes pluviais excedentes (que não foram interceptados e nem infiltrados) em corpos hídricos receptores (e.g. lagos, lagoas, baías e oceano). Este processo, sempre veio acompanhado do eventual redesenho, da retificação e canalização dos cursos d'água naturais. Também o assentamento de loteamentos e vias de acesso, envolvem obras de terraplenagem que alteram a trajetória natural dos escoamentos pluviais. Essas instalações visam o controle dos transtornos causados pelos excessos pluviais como enchentes naturais e alagamentos. O redesenho dos cursos d'água naturais com retificação e canalização, visavam dar celeridade a esse processo e evitar a indesejável acumulação de águas pluviais nesta trajetória.

Estas intervenções estavam relacionadas com o conceito higienista da época, que tinha por objetivo afastar rapidamente do local de origem as águas pluviais, efluentes domésticos e industriais, com uso muitas vezes da mesma rede hidráulica para esta finalidade. Esta estratégia mostrou-se muito efetiva, mas ao longo do tempo, diante da dinâmica de desenvolvimento humano e urbano que viriam a ser observados e das mudanças climáticas que se sucederam, levaram a alguns rebatimentos indesejáveis no meio urbano, como a degradação ambiental em várias áreas das cidades e dos corpos hídricos receptores. Na atualidade, o projeto de drenagem clássico tem se mostrado muitas vezes ambientalmente insustentável, sobretudo nos países em desenvolvimento com seus conhecidos problemas sociais e econômicos, que colaboram para o agravamento dos problemas no desenvolvimento dos recursos hídricos que passaram a ser observados.

Dentro deste contexto, a Bacia Hidrográfica da Baixada de Jacarepaguá, situada na zona oeste da cidade do Rio de Janeiro, ganha destaque em decorrência da acelerada alteração do espaço urbano e a elevada especulação imobiliária. Além disso, apresenta grande importância para a Cidade do Rio de Janeiro devido às obras realizadas para as Olimpíadas de 2016. A região é caracterizada por uma densa rede hidrográfica e abrange um importante complexo lagunar, sendo limitada pelo Oceano Atlântico, pelos Maciços da Pedra Branca, da Tijuca, e um escudo rochoso situado ao norte da baixada (FREITAS, 2009). Conforme ressaltado por Amaral (2014), o relevo de baixada, a presença de *wetlands* naturais, favorece,

no período chuvoso, principalmente nos meses de verão, ao transbordamento dos rios, devido à ampliação das áreas alagadas, o que garante a sustentabilidade dos ecossistemas locais.

A intensificação da ocupação da baixada de Jacarepaguá ocorreu a partir das primeiras décadas do século XX, com a instalação de indústrias e a implantação de vias expressas que ligavam a região ao centro da cidade, além de investimentos imobiliários (PRODEC, 1998; ROSA, 2002). Pimentel da Silva *et al.* (2008a) aponta que apesar da região ter tido inicialmente um planejamento para sua ocupação, a pressão imobiliária somada à falta de infraestrutura adequada levou a um cenário de assentamento de condomínios residenciais, que em alguns casos não respeitaram as normas urbanísticas, verticalização e adensamento, e ocupações irregulares. Embora a baixada de Jacarepaguá apresente característica periurbana, com áreas naturais ainda preservadas, a ocupação desordenada tem provocado a degradação ambiental, com comprometimento da qualidade das águas das lagoas e dos rios, aterramento das *wetlands* e impermeabilização do solo. A infraestrutura de drenagem urbana é fragmentada, e, quando existente, baseia-se no conceito tradicional, com canalização e retificação dos rios e canais naturais. Todos estes fatores têm contribuído para o agravamento do problema das inundações em Jacarepaguá.

As maiores enchentes registradas na região ocorreram em 1996, 2010 e 2012. A magnitude destas inundações se deu pela associação de eventos pluviométricos intensos e estágio de maré alta. Os efeitos destrutivos foram severos como, por exemplo, prejuízo econômico, desalojamento de inúmeras famílias e até mesmo perda de vidas.

Tendo em vista os problemas apresentados, o conceito tradicional para os projetos de drenagem urbana tem passado por uma profunda transformação a fim de se obter soluções mais eficientes e sustentáveis, sendo estas alcançadas a partir da gestão integrada da infraestrutura urbana. Observa-se uma quebra de paradigma e as águas pluviais passam a ser vistas como recurso natural a ser conservado e aproveitado de forma sustentável. Neste caso, dispensa-se a ideia de rápido afastamento das águas pluviais, como ocorre nas soluções convencionais. Com base nesta premissa, os novos princípios e medidas buscam compensar as alterações do ciclo hidrológico provocadas pelo processo de urbanização, e privilegia-se condições que aumentem o tempo de concentração da bacia hidrográfica para que os problemas não sejam transferidos para jusante. A busca pela representação das funções naturais tem início na escala do lote, onde os processos de armazenamento e infiltração tendem a ser restaurados.

Esta nova visão integrada da drenagem urbana teve início na década de 80 nos Estados Unidos, sendo conhecida como *Best Management Practices* (BMPS) – “Melhores Práticas de

Gestão”. De acordo com AMEC e CWP (2001), as BMPs correspondem ao conjunto planejado de ações na bacia, com o intuito de diminuir os impactos da urbanização, buscando a gestão dos excessos pluviais, de forma a garantir disponibilidade e qualidade adequada das águas. Posteriormente, estas práticas evoluíram para uma abordagem mais abrangente, denominada *Low Impact Development* (LID) – Desenvolvimento de Baixo Impacto. O LID, entre outros, busca a criação de ambientes funcionais para a reprodução das funções hidrológicas da bacia antes da urbanização com uso de técnicas de infiltração, armazenamento, evaporação e retenção. Em sua concepção, também leva em consideração aspectos físicos, ambientais e socioeconômicos da bacia de estudo. Geralmente, as práticas LID contam com uma série de infraestruturas verdes tais como: (i) estruturas de captação e armazenamento de águas pluviais na escala do lote ou em trechos convenientes nos cursos d’água ou por meio de estruturas de desvio, cujas águas armazenadas podem ser utilizadas após devido tratamento para usos domésticos e industriais menos nobres, em atividades que visam o desenvolvimento socioeconômico, ou ainda, constituírem reservatórios de retenção para efeitos paisagísticos e/ou comerciais, ou de detenção, que armazenam temporariamente a água da chuva e agem no controle da vazão máxima e aumento do tempo de concentração da bacia; (ii) pavimentos permeáveis e outras estruturas de infiltração, que facilitam a infiltração das águas pluviais e reduzem, conseqüentemente, o escoamento superficial; e (iii) telhados verdes, que são medidas transversais no desenvolvimento urbano, entre outros, e favorecem o retardo da vazão de pico e amortecimento dos hidrogramas, já que a vegetação retém águas pluviais e promove evapotranspiração, e o substrato agrícola promove retenção das águas pluviais em excesso (KRÜGER; DZIEDZIC, 2010; ROSSI; SOUSA, 2012). Conforme ressalta Fonseca *et al.* (2006), estas práticas vêm sendo também adotadas em projetos de drenagem urbana em grandes cidades brasileira para o controle de enchentes, de forma a promover a infiltração e o armazenamento temporário das águas pluviais.

A adoção destas medidas, também chamadas de compensatórias, depende do reconhecimento das condições físicas da bacia hidrográfica no momento da intervenção. Assim, torna-se evidente a necessidade de estratégias que auxiliem as ações de intervenção no sistema de drenagem e considerem a bacia hidrográfica de forma integrada. Para avaliar os efeitos da urbanização nos recursos hídricos e as possíveis formas de recuperação das condições naturais da bacia, tem-se investido na técnica de simulação hidrológica por meio do desenvolvimento e aperfeiçoamento de modelos computacionais. Os modelos hidrológico-hidráulicos são capazes de prever o impacto da adoção de alternativas inovadoras para a gestão sustentável das águas urbanas, já que facilitam o processo de diagnóstico físico da

bacia, permitem compreender de forma integrada o comportamento hidrológico sob diferentes cenários de uso e ocupação do solo, e otimizam o dimensionamento e localização das estruturas de controle do escoamento superficial, de forma a maximizar os benefícios de sua aplicação. Atualmente, muitos modelos hidrológicos, classificados como distribuídos, representam a variação espacial e temporal dos processos hidrológicos na bacia. Estes diferem dos modelos concentrados, que consideram as variáveis de entrada e saída, de estado e parâmetros como valores médios para toda a área de drenagem. O conhecimento e entendimento dos parâmetros do modelo torna-se fundamental para representar de forma mais realística os processos físicos observados na bacia sob diferentes eventos pluviométricos, além de permitir uma melhor avaliação de sua resposta em cenários de intervenção.

Um dos desafios atuais refere-se ao controle dos impactos da urbanização sobre os recursos hídricos, à medida do possível de forma a integrar outras políticas e ações com vistas ao desenvolvimento sustentável. As maiores dificuldades são observadas em áreas com elevada taxa de adensamento populacional e de construções, onde a adequação dos espaços, do ponto de vista físico, social e econômico pode ser mais desafiador. Além disso, nestas áreas, a imposição de políticas públicas, que conciliem o desenvolvimento com as condições naturais e socioeconômicas têm caráter prioritário. Diante disso, a aplicação de modelos hidrológicos e hidráulicos serve como metodologia para o planejamento, e junto com sistemas de suporte a tomada de decisão podem auxiliar os órgãos responsáveis pela gestão integrada da infraestrutura urbana e dos recursos hídricos, uma vez que permitem a identificação dos impactos da urbanização e das medidas de controle, com simulação integrada em diferentes cenários. Nesse contexto, o modelo hidrológico *Storm Water Management Model* – SWMM, da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*U.S. Environmental Protection Agency*: USEPA), tem sido bastante utilizado em bacias urbanas e periurbanas para simular os processos de chuva-vazão e avaliar cenários com implantação de dispositivos LID no Brasil e em outros países do mundo (AMARAL, 2014; GURGEL, 2016; JATO-ESPINO *et al.*, 2016; LI *et al.*, 2015).

Destaca-se que o presente projeto de pesquisa integra os objetivos do Projeto HIDROCIDADES (PIMENTEL DA SILVA *et al.*, 2008b), que tem foco na conservação e uso racional da águas em áreas urbanas e periurbanas por meio de medidas que promovam inclusão social, geração de renda, com vistas ao desenvolvimento sustentável. No Projeto HIDROCIDADES foi tomado como objeto de estudo a bacia hidrográfica representativa do rio Morto, onde foram restituídas bases cartográficas, com levantamentos de campo além de monitoramento de processos climatológicos e hidrológicos, que serviram de ponto de partida

para o desenvolvimento desta dissertação de mestrado. O Projeto HIDROCIDADES integra a Rede de Pesquisa de Bacias Representativas de Uso Misto (BRUM), apoiada pelo MCT/FINEP, o qual tem contribuído com alternativas sustentáveis para a gestão dos recursos hídricos.

### **Objetivos Geral e Específicos**

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a adequabilidade do modelo hidrológico SWMM na representação do processo chuva-vazão, assim como seu comportamento hidrológico-hidráulico frente à simulação de cenários a partir da implantação de telhados verdes em determinados eventos observados na bacia hidrográfica do rio Morto, localizada na região da baixada de Jacarepaguá, na cidade do Rio de Janeiro.

Os objetivos específicos são:

- Apresentar os principais marcos teóricos relacionados com o conceito de infraestrutura verde e com as fundamentações e técnicas que envolvem o desenvolvimento urbano de baixo impacto (BMP, LID, WSUD, SUDS e LIUDD);
- Identificar e analisar os usos do modelo SWMM na representação do processo chuva-vazão em bacias urbanas e periurbanas, além das aplicações que envolvem cenários com telhados verdes;
- Analisar a resposta hidrológica e hidráulica da bacia à eventos extremos mediante a simulação da implantação de Telhado Verde.

### **Natureza da Pesquisa e Estrutura da Dissertação**

A pesquisa desta dissertação de mestrado está associada a estudos que envolvem a aplicação dos fundamentos da matemática e da física na resolução de problemas das engenharias de recursos hídricos e ambiental. Mais especificamente, recorreu-se à aplicação de modelos computacionais hidrológicos-hidráulicos, que virtualmente, a partir das equações empíricas e de base física clássicas associadas às ciências da mecânica dos fluidos, hidráulica e hidrologia, simulam fenômenos envolvidos na fase terrestre do ciclo hidrológico.

Estes modelos buscam explicar e representar de forma integrada, a partir da precipitação, a interceptação vegetal e a evapotranspiração, a infiltração e o armazenamento da água nos solos, os escoamentos superficial, sub-superficial e subterrâneo, que compõem os

escoamentos fluviais. A operação obedece a uma lógica recursiva no tempo que respeita o princípio da conservação de massa e tem como base as equações da continuidade e de quantidade de movimento, cuja validade e aplicabilidade para estudos dessa natureza, fazem parte das hipóteses clássicas dos fenômenos de transporte, da mecânica dos fluidos, da hidráulica e da hidrologia. Estes modelos buscam o cálculo das vazões em uma seção fluvial de interesse em função das precipitações, das características climatológicas, fisiográficas e morfométricas de uma bacia hidrográfica, caracterizada pela área que drena as águas pluviais para a seção fluvial de escoamento de interesse e controle.

Tipicamente, são fornecidos como dados de entrada elementos cartográficos da bacia hidrográfica, que permitem, a partir de sistema computacional cartográfico e de rotinas computacionais integradas, a determinação de elementos morfométricos e da fisiografia que influenciam os fenômenos hidrológicos e hidráulicos. Além disso, a operação do modelo depende também do fornecimento de séries temporais de alturas pluviométricas, das alturas de equivalentes em coluna d'água da evapotranspiração, e de um conjunto de vazões observadas na seção fluvial de interesse, que permitirá a calibração dos parâmetros do modelo. É preciso também fornecer alguns parâmetros de estado da bacia hidrográfica como o estado de umidade dos solos no instante inicial, caracterizado no primeiro intervalo de tempo.

A partir das quantidades precipitadas, evaporadas, do estado de umidade dos solos no primeiro intervalo de tempo e volumes escoados, as rotinas computacionais se propõem a atualizar de forma recursiva no tempo o conteúdo de umidade dos solos, com a aplicação da equação da continuidade. Os parâmetros que caracterizam a bacia hidrográfica e fazem parte das equações que compõem o sistema de cálculo, são ajustados de forma a garantir que os valores das vazões calculadas pelo modelo sejam próximos dos valores observados *in situ*.

A partir da finalização da etapa de ajuste dos parâmetros, a aplicação do modelo permite, entre outros, a análise do impacto da alteração de uso e ocupação do solo, ou de outros elementos que condicionam o ciclo hidrológico, na forma ou padrão em que ocorrem as vazões na seção fluvial em estudo no tempo.

Neste trabalho, no contexto do Projeto HIDROCIDADES, as vazões e demais variáveis necessárias à aplicação do modelo hidrológico-hidráulico, vinham sendo obtidos por outros pesquisadores do Projeto por meio do monitoramento e levantamentos *in situ* na bacia hidrográfica representativa, objeto de estudo do Projeto – a bacia do Rio Morto, localizada no Bairro de Vargem Grande na Cidade do Rio de Janeiro.

O modelo utilizado foi o modelo SWMM (*Storm Water Management Model*), que além de assemelhar-se em suas tipicidades a outros modelos hidrológicos-hidráulicos,

permite a representação das redes hidráulicas urbanas de infraestrutura construídas e outros elementos, alternativos, que visam o controle dos excessos pluviais em dada bacia hidrográfica. Estes elementos alternativos, vêm a constituir elementos da chamada infraestrutura verde. Dessa forma, o modelo permite avaliar em partes ou para toda a bacia hidrográfica, o impacto que a adoção de elementos clássicos e da infraestrutura verde teriam no controle dos escoamentos pluviais, e permitir assim a otimização e eficiência da localização desses elementos no controle de alagamentos e enchentes. O SWMM permite ainda, embora que não seja objeto da dissertação, a simulação do estado de qualidade das águas.

O texto que descreve a pesquisa da dissertação foi concebido, de forma a apresentar três partes formais: *introdução*, *desenvolvimento* e *conclusões*.

A *Introdução*, composta pelos elementos pré-textuais, é composta pelos seguintes itens: problemática e justificativa, objetivos geral e específicos e, natureza da pesquisa e estrutura da dissertação.

O *Desenvolvimento* deste projeto está representado por 4 capítulos. O capítulo 1 trata do referencial teórico e da revisão da literatura, no qual são apresentados os principais marcos teóricos à luz de textos de periódicos científicos atuais, relativos ao tema da dissertação. Inicialmente, as inundações urbanas são caracterizadas, sendo consequência de dois processos: enchentes em áreas ribeirinhas e urbanização. Em seguida, apresentam-se as medidas existentes para controle dos escoamentos superficiais, classificadas em estruturais e não estruturais. Os novos princípios e práticas da drenagem urbana são discutidos sob o contexto da gestão integrada dos recursos hídricos e das águas pluviais, apresentando o conceito de infraestrutura verde, além de outros fundamentos relacionados com o desenvolvimento urbano de baixo impacto. Ainda neste capítulo, a modelagem hidrológica é retratada como uma importante metodologia de análise para o planejamento e para a gestão sustentável das águas pluviais. Neste contexto, os modelos hidrológicos são classificados e são descritas as principais etapas para sua aplicação. Por fim, são apresentadas as principais equações de estimativa de evapotranspiração, visto que representa uma das principais e mais complexas variáveis de entrada de um modelo hidrológico.

O capítulo 2 descreve a metodologia utilizada neste estudo, com os seguintes elementos:

- Caracterização da área de estudo (bacia hidrográfica do rio Morto) com sua respectiva localização e descrição dos principais aspectos físicos, morfométricos, hidrológicos e meteorológicos pertinentes a esta pesquisa;

- Descrição do modelo hidrológico-hidráulico SWMM e apresentação das equações empregadas para representação dos processos envolvidos na transformação chuva-vazão;
- Descrição de como é feita a inserção e representação dos telhado verdes no modelo SWMM;
- Descrição dos cenários de intervenção na bacia do rio Morto. Este item define a infraestrutura verde a ser simulada pelo modelo, bem como sua distribuição ao longo da bacia.

O capítulo 3 reúne os resultados obtidos com o processamento do modelo na bacia do rio Morto, referentes à etapa de calibração e validação. A avaliação dos resultados gerados é feita por meio da determinação de coeficientes estatísticos que qualificam os ajustes. Já o Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos com a simulação dos cenários propostos. Neste caso, são avaliados elementos do hidrograma de vazões, como o tempo para o pico, as porcentagens de redução das vazões de pico e volumes escoados.

Por fim, as *Conclusões* da pesquisa são apresentadas, como também as limitações identificadas e as recomendações para trabalhos futuros.

Ressalta-se que nesta dissertação consta um Apêndice composto por um artigo científico submetido à Revista Labor e Engenho, a partir dos resultados alcançados nesta pesquisa.

## 1. REFERENCIAL TEÓRICO E REVISÃO DA LITERATURA

### 1.1 Inundações Urbanas

As inundações caracterizam-se pelo transbordamento de rios, riachos, e canais, quando saem do leito de escoamento principal. Tais eventos podem ter origem natural, durante o período de cheias, como rebatimento do aumento das precipitações, e/ou podem ser consequência das mudanças climáticas pelos impactos nos regimes e magnitude das precipitações. Entretanto, podem ter origem também nas formas e nos rebatimentos do desenvolvimento humano, sobretudo pela ausência ou pelo projeto, instalação ou operação de forma insuficiente dos sistemas de drenagem. São sistemas complexos e podem ocorrer pela combinação desses fatores (TUCCI, 2007).

As inundações urbanas ocorrem em todo o mundo e podem caracterizar desastres naturais a partir de precipitações excepcionais ou do degelo das mesmas. Os principais impactos estão associados à sua devastação, potencializadas eventualmente pelos ventos fortes, raios e movimentos de massa, típicos desses fenômenos da natureza. Tais eventos potencializam prejuízos de ordem econômica e social e podem levar desde transtornos menores na rotina das cidades como perda de vidas humanas. Além disso, ressalta-se o desalojamento de grandes contingentes frequentemente associados às enchentes urbanas, sobretudo daqueles que residem nas áreas de risco. Este desalojamento pode ser temporário, ou dependendo da situação se tornar permanente, de forma a minimizar impactos futuros de eventos pluviométricos com alta frequência (FREITAS; XIMENES, 2012; RAMOS *et al.*, 2011).

Segundo Jha *et al.* (2012), ao longo dos últimos vinte anos, o número de eventos de inundações registrados vem aumentando consideravelmente. Estes eventos estão se tornando mais perigosos e onerosos de gerenciar devido ao aumento da população exposta e ao inadequado uso e ocupação do solo, verificado, principalmente em grandes cidades do Brasil, no crescente número de assentamentos informais localizados em áreas de risco.

#### 1.1.1 Inundações naturais em áreas ribeirinhas

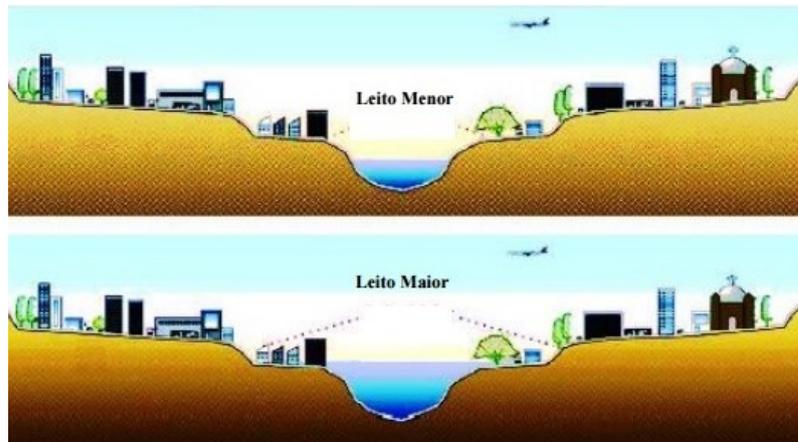
As inundações em áreas ribeirinhas ocorrem de forma natural quando os rios ocupam naturalmente seu leito maior durante eventos pluviométricos de alta intensidade. Nesse caso,

o excesso do volume de água que não consegue ser drenado pelo leito principal irá ocupar as áreas adjacentes aos rios, denominadas planícies de inundação ou várzeas. As principais condicionantes para ocorrência das inundações em áreas ribeirinhas são (AMARAL; RIBEIRO, 2009):

- Formas do relevo;
- Características dos cursos d'água;
- Intensidade, quantidade, distribuição, duração e frequência das chuvas;
- Características do solo e teor de umidade;
- Presença ou ausência de cobertura vegetal.

Os riscos oferecidos por esse tipo de inundação ocorrem quando há ocupação ou presença de pessoas ou animais nas margens dos rios, conforme representado na Figura 1.

Figura 1 – Perfil esquemático do processo de inundação em áreas ribeirinhas



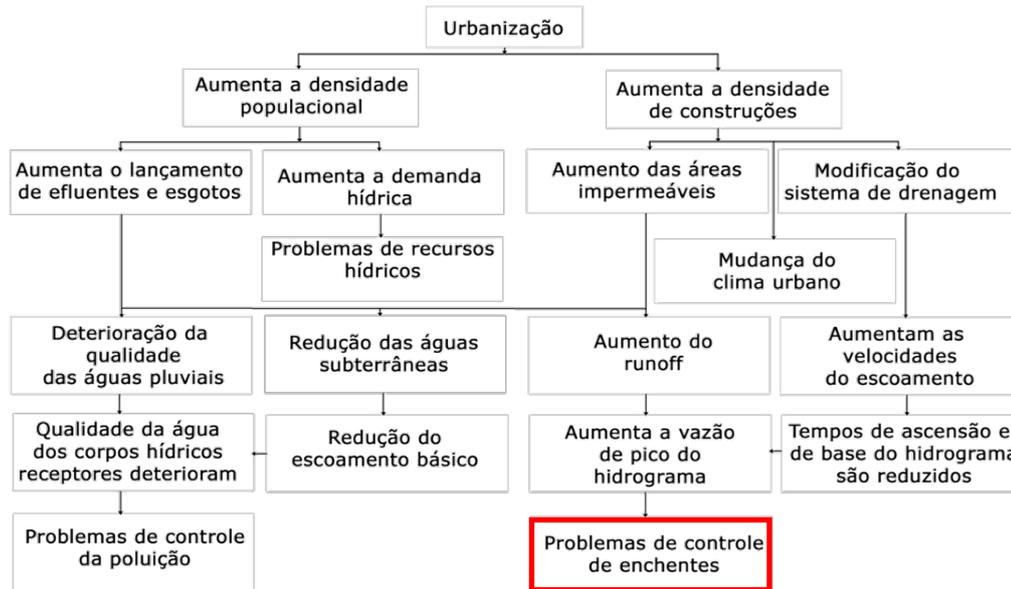
Fonte: Adaptado de PINHEIRO DA SILVA, 2013.

### 1.1.2 Urbanização e inundações

O desenvolvimento das cidades provoca profundas modificações no uso do solo, que alteram diretamente as respostas hidrológicas das áreas urbanas. Desta forma, as inundações devido à urbanização ocorrem devido às profundas alterações do ciclo hidrológico natural, além da presença de sistemas de drenagem obsoletos (FONTES, BARBASSA, 2003; SCHERER, SANTOS, 2012). Hall (1984) apresenta, em um fluxograma, as duas grandes

vertentes para a causa das enchentes, bem como suas principais consequências, conforme mostra a Figura 2.

Figura 2 – Diagrama de Hall: Impactos da urbanização no desenvolvimento dos recursos hídricos



Fonte: PIMENTEL DA SILVA, 2015, a partir de adaptação de HALL, 1984.

As principais alterações provocadas pela urbanização no espaço físico são: remoção da vegetação, impermeabilização do solo, alteração da topografia, depósito de resíduos sólidos em locais inapropriados e retificação/canalização dos cursos d'água.

A impermeabilização ocorre devido à construção de edificações e à pavimentação das vias urbanas, que impedem a água de infiltrar no solo e contribuem para o aumento do escoamento superficial. A redução da taxa de infiltração também pode ser ocasionada pela diminuição da cobertura vegetal e compactação do solo. Desta forma, a parcela de água que antes infiltrava no solo, agora integra o escoamento superficial e exigem, cada vez mais, estruturas maiores para suportar os volumes gerados.

Outro fator que pode favorecer a ocorrência das inundações está relacionado com o sistema convencional de drenagem urbana, que se baseia no conceito de canalização e retificação dos cursos d'água. Inicialmente, a adoção de tal medida tinha como objetivo eliminar os problemas das inundações e assoreamento, e adequar tal corpo hídrico ao crescimento das cidades, aumentando as vias de transporte e as áreas de loteamento. Desta forma, muitos dos cursos d'água presentes em áreas urbanas foram transformados em canais, cobertos por estruturas resistentes como pedra e concreto.

Posteriormente, verificou-se que tal medida é insustentável já que desconsidera as características naturais dos rios e a importâncias destes para o ciclo hidrológico, já que com a impermeabilização a água não infiltra no solo e não atinge o lençol freático. Outro impacto gerado refere-se à retificação dos rios e córregos onde a velocidade de escoamento aumenta consideravelmente. Assim, os trechos a montante podem ser protegidos dos eventos de inundação, porém os pontos posteriores serão afetados.

### 1.1.3 Controle das Inundações Urbanas

A compreensão das causas e efeitos das inundações urbanas, bem como a projeção, investimento e implementação de medidas que reduzam sua ocorrência, ou pelo menos seus impactos, devem estar incluídos nos objetivos mais amplos de desenvolvimento das cidades (JHA *et al.*, 2012). Cundom e Gutiérrez (2001, *apud* NAKAZONE, 2005) observam que a “adoção de medidas de controle depende do reconhecimento do estado atual da bacia hidrográfica e da identificação das oportunidades de implantação, sendo função direta do momento de intervenção local”. Ainda em relação a tais medidas, Nakazone (2005) afirma:

Este controle é realizado não somente através da utilização dos conhecimentos adquiridos ao longo do tempo sobre os fenômenos físicos envolvidos e o aproveitamento destes na criação e aprimoramento de tecnologias alternativas, como também pela observação do comportamento humano e sua maneira e capacidade de interferir nos processos ambientais.

O processo de diagnóstico a ser feito na bacia deve levar em consideração as transformações ocorridas no ciclo hidrológico devido à urbanização, com o intuito de restaurá-la. Desta forma, o resultado das medidas adotadas será mais eficiente uma vez que irá reduzir os efeitos hidrológicos adversos.

No entanto, nenhuma medida, isolada ou conjunta, oferece completa segurança dado que as diversas formas de ocupação irregular crescem constantemente, sinalizando os descumprimentos das normas e legislações existentes. Além disso, as chuvas são eventos aleatórios, ou seja, em qualquer momento, sua intensidade pode superar a intensidade considerada no projeto de engenharia para determinado tempo de recorrência. Assim, o principal objetivo das medidas de controle das inundações urbanas é minimizar as consequências e promover uma convivência harmônica entre a população e tais eventos.

As medidas de controle podem ser classificadas em estruturais e não estruturais, segundo o modo de intervenção na bacia hidrográfica (ANDRADE, 2004 *apud* ZAHED FILHO *et al.*, 2012; CANHOLI, 2005).

#### 1.1.3.1 Medidas Estruturais

As medidas estruturais estão associadas às obras de captação, armazenamento e transporte das águas pluviais, e consideram a quantificação dos riscos e conhecimento prévio das cheias (RIGHETTO, 2009). Segundo Cordero *et al.* (1999), este tipo de medida influencia na estrutura da bacia, tanto na sua extensão (medidas extensivas), quanto localmente (medidas intensivas).

As medidas extensivas agem na bacia de forma a modificar as relações entre precipitação e vazão como, por exemplo, aumentam a área de cobertura vegetal para reduzir e retardar os picos de enchentes e controlam o processo de erosão (TUCCI, 1997). De acordo com Cordero *et al.* (1999), tais medidas podem ser de cunho hidráulico-florestal e hidráulico-agrário como, por exemplo, projetos de conservação do solo e reflorestamento da bacia.

Já as medidas intensivas são aquelas que agem diretamente nos rios e podem ser de três tipos: aceleram o escoamento, como construção de diques e polders, melhoramento do álveo e retificações; retardam o escoamento, representadas pelos reservatórios e bacias de amortecimento, e; obras de desvio do escoamento. Atualmente, as obras de engenharia utilizam bastante essas soluções em ambos os projetos de microdrenagem e macrodrenagem.

As medidas estruturais de controle do escoamento podem ainda ser classificadas em técnicas convencionais (ou de canalização) e técnicas compensatórias (não convencional). A primeira técnica refere-se ao conceito tradicional dos sistemas de drenagem, ou seja, obras destinadas a escoar rapidamente as águas do escoamento superficial por meio do aumento da capacidade hidráulica dos rios e canais. Enquanto que as técnicas compensatórias visam reproduzir o ciclo hidrológico natural a partir do incremento dos processos de infiltração, evapotranspiração e armazenamento das águas pluviais. Estas medidas se relacionam com os elementos da infraestrutura verde, tratado no item 2.

O Quadro 1 expõe uma comparação entre os conceitos das medidas convencionais (canalização) e não convencionais (armazenamento).

Quadro 1 – Canalização x Armazenamento

Característica	Canalização	Armazenamento
Função	- Remoção rápida dos escoamentos	- Contenção temporária para subsequente liberação
Componentes principais	- Canais abertos/galerias	- Reservatórios de superfície livres ou subterrâneos - Retenção subsuperficial
Aplicabilidade	- Instalação em áreas novas - Ampliação de capacidade (difícil em centros urbanos)	- Áreas novas (em implantação) - Áreas existentes (se houver áreas disponíveis)
Impacto à jusante (quantidade)	- Aumento expressivo dos picos de enchente em relação à condição anterior - Maiores dispêndios nos sistemas a jusante	- Áreas novas: pode ser dimensionado para impacto zero (legislação USA e Reino Unido) - Reabilitação de sistemas: vazões à jusante compatíveis com a capacidade disponível
Impacto à jusante (qualidade)	- Transporte de toda carga poluente para o corpo receptor	- Facilita remoção de material flutuante e de sólidos suspensos (sedimentação)
Manutenção/operação	- Manutenção na ocorrência de assoreamento e deposição de lixo - Difícil acessibilidade	- Necessita de limpeza e fiscalização periódicas - Sistema de bombeamento eventual (operação) - Desinfecção eventual (insetos)
Estudos hidráulicos/hidrológicos	- Definição dos picos de enchentes	- Definição dos hidrogramas e volumes das enchentes

Fonte: Adaptado de CANHOLI, 1995 *apud* NAKAZONE, 2005.

### 1.1.3.2 Medidas Não Estruturais

Em relação às medidas não estruturais, estas representam a melhor convivência da população com as inundações. De acordo com Nakazone (2005), tais medidas são definidas como sendo:

[...] aquelas de natureza institucional, administrativa ou financeira, de caráter preventivo e corretivo, normalmente aplicadas de forma difusa sobre a bacia, onde os prejuízos são reduzidos pela melhor convivência da população com as enchentes, podendo ser adotadas individualmente ou em grupo, espontaneamente ou por força de legislação e apoiam-se em aspectos sócio-políticos (exemplos: disciplinamento do uso e ocupação do solo, seguros, sistemas de alertas, incentivos fiscais, educação ambiental, participação pública, etc.).

Alguns exemplos de medidas não estruturais são: zoneamento de áreas inundáveis, item essencial do Plano Diretor; sistemas de alerta e previsão de cheias, com a intenção de informar e prevenir a população da ocorrência de chuvas intensas; educação ambiental, para conscientizar a população sobre os impactos da poluição e impermeabilização dos solos na ocorrência nas inundações, além de apresentar alternativas de armazenamento e reúso das águas pluviais.

#### 1.1.4 Gestão Sustentável das Águas Pluviais

O conceito tradicional para os projetos de drenagem urbana tem passado por uma profunda transformação a fim de se obter soluções mais eficientes e sustentáveis (CRUZ *et al.*, 2007; BAHIENSE, 2013). A nova concepção dos projetos de drenagem busca a integração entre o desenvolvimento urbano e a gestão da ocupação e uso do solo, de forma a garantir uma relação harmônica entre o homem e o meio ambiente. Os novos princípios e medidas buscam compensar as alterações do ciclo hidrológico provocadas pelo processo de urbanização com a implantação de infraestruturas verdes ao longo da bacia, além de auxiliar no controle da qualidade e quantidade dos escoamentos superficiais.

Esta abordagem integrada do manejo sustentável das águas pluviais e do planejamento do uso do solo tem refletido também no desenvolvimento de projetos de requalificação e renaturalização dos corpos hídricos urbanos. Segundo Gusmaroli *et al.* (2011 *apud* VERÓL *et al.*, 2012), a requalificação fluvial urbana visa a melhoria ambiental dos cursos d'água bem como dos aspectos relativos à sua qualidade físico-química, biológica e hidromorfológica, com base em uma abordagem ecossistêmica. Desta forma, a organização e o planejamento das cidades devem considerar os desafios de resgatar a qualidade dos rios no contexto atual e futuro, sendo este um dos principais desafios para a gestão urbana (AFONSO, 2011).

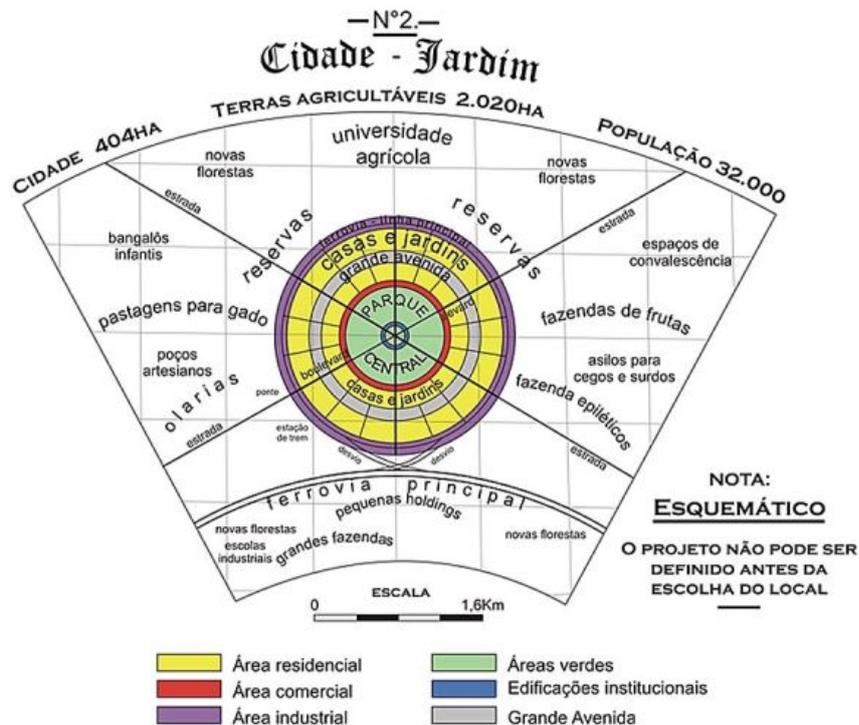
## 1.2 **Infraestrutura Verde**

A infraestrutura verde busca a inclusão de elementos naturais no planejamento urbano, para a redução dos impactos socioambientais além de identificar seu potencial ecossistêmico.

Em grande parte a infraestrutura verde surgiu em decorrência dos problemas ambientais das cidades provenientes das alterações do uso e ocupação do solo. Observou-se que a dinâmica de desenvolvimento das cidades deveria passar por uma profunda alteração, tendo como fundamento os princípios ambientais e ecológicos para preservar a lógica dos ecossistemas que a compõem. Segundo Hannes (2015), o espaço verde foi introduzido pela primeira vez nas cidades no século XIX como elemento mitigador dos danos causados pelo crescimento das cidades.

Um dos marcos históricos que considerou a preservação das funções naturais frente ao desenvolvimento das cidades foi o modelo proposto por Ebenezer Howard, chamado de Cidade-Jardim. Baseado nos problemas socioambientais da cidade, o projeto buscou o equilíbrio entre o campo e a cidade. A Figura 3 apresenta o esquema geral da Cidade-Jardim, composta por seis grandes boulevares (área residencial, comercial, industrial, áreas verdes, edificações institucionais e grande avenida) que caminham em direção ao centro, representado por um parque central. No entorno destas regiões estão áreas rurais, representadas por florestas, fazendas, olarias e reservas. Esta estrutura se assemelha com os primórdios da divisão de usos e da adoção de baixas densidades.

Figura 3 – Modelo de Cidade-Jardim proposto por Ebenezer Howard



Fonte: HOWARD, 1996 *apud* BENINI, 2015.

Com o intuito de estabelecer a importância dos sistemas naturais no contexto urbano, o termo infraestrutura verde foi usado pela primeira vez em 1994 na Flórida, em um documento dirigido ao governo americano sobre estratégias de conservação do meio ambiente (FIREHOCK, 2010). Trata-se de um conceito interdisciplinar, com áreas do Planejamento Urbano, Biologia, Geografia, Engenharia, Arquitetura da Paisagem, Conservação, Patrimônio e Transportes entre outros (HANNES, 2015). Além disso, também caracteriza-se por ser um termo abrangente já que pode ser tratado de diferentes formas, como destacam Benedict e McMahon (2002):

[...] algumas pessoas referem-se às árvores em áreas urbanas como infraestruturas ecológicas devido aos benefícios "verdes" que proporcionam, enquanto outras utilizam infraestruturas verdes para se referirem a estruturas de engenharia (tais como instalações de tratamento de água ou telhados verdes) projetadas para serem ambientalmente amigáveis.

Herzog (2010) define a infraestrutura verde como um conjunto de redes multifuncionais de fragmentos permeáveis e vegetados, que consideram a conexão entre os elementos naturais e projetados e visam manter ou reestabelecer os processos naturais e culturais que asseguram a qualidade da vida urbana. Segundo Benini (2015), a infraestrutura verde representa uma nova possibilidade técnica e ecológica, que agrega aos espaços públicos o conceito de multifuncionalidade, de forma a contribuir para a qualidade ambiental das cidades.

Benedict e McMahon (2002) definem sete princípios e estratégias associadas para o sucesso da infraestrutura verde:

1. Funcionar como estrutura para conservação e desenvolvimento;
2. Projetar e planejar;
3. Conexão entre os sistemas (naturais e projetados);
4. Funcionar em várias jurisdições e em diferentes escalas;
5. Fundamenta-se em uma ciência sólida e teorias e práticas de uso da terra;
6. Investimento público crítico;
7. Engajar parcerias chave e envolve várias partes interessadas.

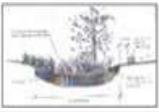
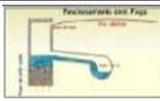
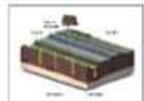
O planejamento de uma infraestrutura urbana propicia a integração da natureza com a cidade, reduz os impactos ambientais e aumenta a resiliência sobre os efeitos decorrentes das alterações climáticas como aumento dos eventos pluviométricos intensos, aumento da temperatura e desertificação.

### **1.3 Tipologias da Infraestrutura Verde aplicadas à Drenagem Urbana**

Apesar dos sistemas convencionais de drenagem urbana terem se tornado, em alguns casos, obsoletos e ineficientes, a complexidade que envolve sua reconstrução é enorme, uma vez que envolve custos econômicos e questões sociais, ambientais e culturais. Tal fato transforma-se em uma justificativa para o desenvolvimento de alternativas que se incorporem ao sistema convencional, mas que busquem a reprodução das condições naturais, anteriores à urbanização. Esta é a base da drenagem urbana sustentável e que tem levado a criação de projetos e políticas que incorporem elementos da infraestrutura verde na cidade visando, sobretudo, o controle das inundações, controle da poluição difusa e reaproveitamento das águas pluviais. Benini (2015) alerta que este tipo de intervenção urbana deve identificar os espaços com maior fragilidade ambiental de modo que sejam prioritários para o tratamento e alcance das possibilidades oferecidas pela infraestrutura verde.

Considerando a existência de vários elementos da infraestrutura verde e que, na literatura, alguns conceitos e nomenclaturas são confundidos, Cerqueira (2012) fez uma consolidação destas tipologias, como apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 – Consolidação das tipologias da infraestrutura verde

Dispositivo	Device	Imagem	Descrição	Finalidade
Bacias de Amortecimento	Wetlands		São áreas no entorno de cursos d'água, que são utilizadas como amortecimento para o sistema de drenagem.	Áreas voltadas para absorver o volume de água proveniente do transbordamento de um rio, lago ou canal.
Bacias de Detenção	Detention Basins		Reservatórios mantidos secos na maior parte do tempo, os quais frequentemente recebem outros usos nos períodos de tempo seco.	Reduzir os picos de cheia à jusante, através do armazenamento temporário das águas pluviais.
Bacias de Retenção	Retention Basins		Reservatórios onde é mantida lâmina d'água mesmo nos períodos de tempo seco.	Reduzir os picos de cheia à jusante, através do armazenamento das águas pluviais e também ser utilizado como espelho d'água.
Caminhos Verdes	Greenways		Vias verdes para pedestres e ciclistas sem pavimentação, semelhantes à parques públicos utilizados para transportes.	Aumento da proporção de áreas verdes, aumento de áreas permeáveis, melhoria da qualidade de vida.
Ciclovias Verdes	Bike Ways		Varição da estrutura Caminhos Verdes, voltada para o transporte em bicicletas, e integradas ao sistema de transporte público.	Aumento da proporção de áreas verdes, aumento de áreas permeáveis, melhoria da qualidade de vida.
Jardim de Chuva	Rain Garden / Water Garden		Jardins ornamentais implantados em estruturas preparadas para absorver água e promover a infiltração desta no solo.	Diminuir o volume do escoamento superficial e aumentar a proporção de áreas verdes nas cidades.
Jardim de Infiltração	Vegeted Infiltration Swale or Bioretention Cell		Jardins implantados em áreas permeáveis, capazes de reter água e promover a infiltração desta no solo.	Diminuir o volume do escoamento superficial e aumentar a proporção de áreas verdes nas cidades.
Pavimento Permeável / Pavimento Poroso	Pervious Surface / Permeable Paving		Implantação de revestimento de pisos de vias e áreas públicas que permitam a penetração das águas pluviais no solo.	Esses dispositivos ampliam a área permeável, contribuindo para a diminuição do escoamento superficial das águas pluviais.
Poço de Infiltração	Pit of Infiltration		Reservatórios de pequena dimensão e fácil instalação. Costumam ser encontrados em variadas metodologias de implantação.	Reduzir os picos de cheia à jusante, através do armazenamento e infiltração das águas pluviais.
Telhados Verdes	Green Roofs		Cobertura de edificações utilizada para plantio de vegetação ornamental ou de gêneros alimentícios.	Redução de volume de águas pluviais, melhoria no desempenho térmico das edificações, aumento da proporção de áreas verdes.
Trincheiras de Infiltração	Infiltration Trench		As trincheiras têm a propriedade de armazenar pequenos volumes enquanto as águas pluviais são infiltradas no solo.	Amplia a área permeável, infiltra água no solo e contribui para a diminuição do escoamento superficial das águas pluviais.
Valas de Infiltração / Biovaleta	Swales of Infiltration		São como calhas capazes de receber as águas pluviais, conduzir o quantitativo de água para jusante e permitir a infiltração de parte dela.	Tais estruturas possuem finalidade semelhante com as das trincheiras, entretanto são simplificadas.

Fonte: CERQUEIRA, 2012.

Cada elemento apresentado, quando inserido e adequado ao desenho urbano, auxilia o controle da drenagem a partir da purificação, detenção, retenção, transporte e infiltração das águas pluviais (PUB, 2014).

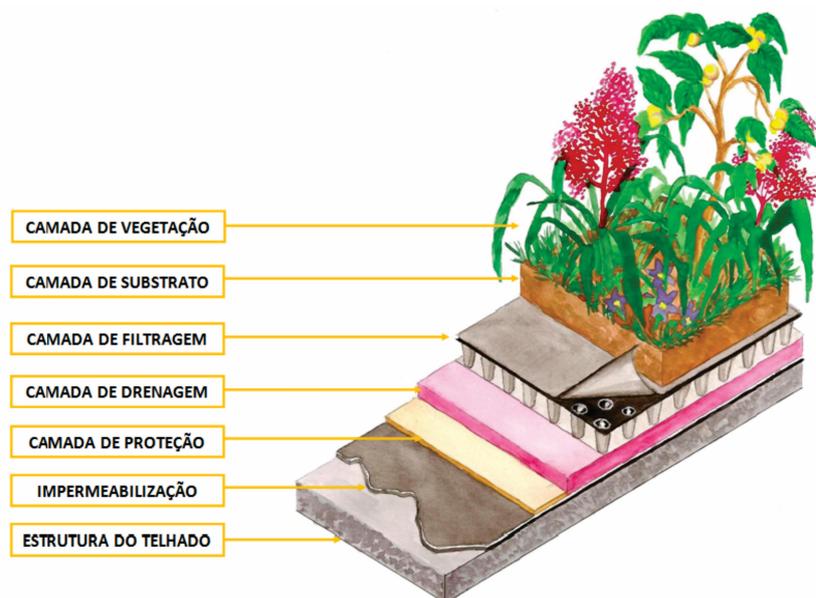
Em relação ao controle das inundações, a infraestrutura verde auxilia o aumento da taxa de infiltração no solo e armazenamento da água e reduz, consideravelmente, a parcela de água contribuinte ao escoamento superficial. Fonseca *et al.* (2006) afirma que, cada vez mais, estas estruturas vem sendo adotadas em grandes cidades brasileiras para o controle das enchentes.

A seguir é feita uma descrição da estrutura e funcionamento do Telhado Verde, considerado no presente estudo como elemento capaz de reduzir, durante eventos de cheia, os escoamentos superficiais na bacia do rio Morto.

### 1.3.1 Telhados Verdes

Os telhados verdes consistem em técnica construtiva que envolve a implantação de vegetação sobre as coberturas das edificações. Tais estruturas são também referenciadas como telhados vivos, biocoberturas e ecotelhados. A Figura 4 apresenta as camadas construtivas estruturantes dos telhados verdes.

Figura 4 – Camadas construtivas estruturantes dos telhados verdes



Fonte: PIMENTEL DA SILVA, 2015 (Elaborado por Maria Luiza Ottoni).

Conforme Mentens *et al.* (2003), cada camada na Figura 4 possui funções distintas:

- Vegetação: propicia o aumento do potencial de retenção de água na camada de substrato, principalmente com a ocorrência da evapotranspiração;
- Substrato: fornece água e nutrientes para a vegetação. Funciona como reservatório temporário de armazenamento de água durante a chuva;
- Camada de filtragem: impede que as partículas presentes no substrato sejam transportadas para a camada de drenagem, e prejudiquem seu funcionamento;
- Camada de drenagem: em telhados quase horizontais se faz necessária a presença de drenagem para evitar o encharcamento e estresse da cultura;
- Camada de proteção: impede o avanço das raízes sobre a camada de impermeabilização e cobertura da edificação;
- Camada de impermeabilização: impede que a umidade penetre no ambiente interno da edificação ou comprometa a estrutura do material de cobertura.

Os telhados verdes são divididos, normalmente, em extensivos e intensivos, dependendo do tipo de vegetação e finalidade de uso. Nos telhados extensivos (Figura 5) são utilizadas vegetações rasteiras, como ervas e gramíneas, e apresentam uma camada fina de substrato, baixo peso estrutural, baixa manutenção, reduzido consumo de água e possibilidade de construção sobre superfícies inclinadas. Já os telhados intensivos (Figura 6), são projetados com base na paisagem natural e, por isso, as gramas, flores, árvores e arbustos são os principais constituintes da vegetação. Assim, apresentam maior peso estrutural, possibilidade de maior retenção de água e utilização do espaço como recreação, embora exija maior manutenção (GETTER; ROWE, 2006; CARTER; BUTLER, 2008).

A frequência de manutenção destes sistemas depende de diversos fatores tais como tipo de vegetação (irrigação, adubação, replantio), controle de pragas, possibilidade de corrosão de calhas e telhas. Neste caso, inclui-se também a manutenção da camada filtrante, de forma a evitar o carreamento de partículas do solo para a camada de drenagem, o que acarreta a colmatação da estrutura e, conseqüentemente, afeta os benefícios proporcionados pelos telhados verdes, sobretudo o armazenamento das águas pluviais.

Figura 5 – Telhados verdes extensivos implantados em estruturas modulares plásticas tipo “Cidade Jardim”, planta espécie de suculentas, predominância da *Portulaca oleracea* (nome popular “onze horas”).



Fonte: Loiola *et al.*, 2015.

Figura 6 – Telhados verdes intensivos



(a)



(b)

Legenda: (a) – Springer House, Berlim 2012; (b) – Shopping Cidade Jardim, São Paulo.

Fonte: MINKS, 2013.

Os telhados verdes nas cidades apresentam múltiplos benefícios à população e ao meio ambiente: redução da temperatura (ilhas de calor), conforto térmico nas residências e edifícios, melhoria da qualidade do ar, contribuição paisagística, redução dos níveis de ruídos externos, redução do consumo de energia, formação de novos habitats, redução do escoamento superficial e aproveitamento das águas pluviais quando associados a reservatórios de armazenamento (BALDESSAR; TAVARES, 2012). Apresentam também potencial para o desenvolvimento da agricultura urbana (Figura 7). O aperfeiçoamento das técnicas construtivas dos telhados verdes e o desenvolvimento de novos materiais conduziram a modernização destas estruturas, de tal forma que, cada vez mais, têm sido aplicadas nas cidades e, em alguns casos, como na Europa, já se tornou uma prática comum (OHNUMA Jr, 2008). Alberto *et al.* (2016) apresenta uma ampla revisão sobre as pesquisas sobre telhados verdes em desenvolvimento no Brasil.

Figura 7 - Telhados verdes e agricultura urbana: diferentes etapas dos experimentos do Projeto HIDROCIDADES



Legenda: (a) – Escola Municipal Teófilo Moreira da Costa em Vargem Grande, Rio de Janeiro: preparo da superfície para plantio em edificação, protótipo em escala real; (b) – Campus UERJ – Maracanã. Experimentos em bancadas em escala piloto; (c) – Escola Municipal Teófilo Moreira da Costa em Vargem Grande, Rio de Janeiro: resultado de técnica para plantio em telhados desenvolvido no Projeto HIDROCIDADES, protótipo em escala real.

Fonte: (a) OLIVEIRA *et al.*, 2009; (b) Acervo do Projeto HIDROCIDADES, cedida pelo Engenheiro Márcio Alexandre Alberto em 2016; (c) PIMENTEL DA SILVA *et al.*, 2012.

#### 1.4 Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto (BMPs, LID, WSUD, SUDS, LIUDD)

O desenvolvimento urbano de baixo impacto engloba um conjunto de políticas e práticas que visam o desenvolvimento urbano sustentável. Em parte, o chamado desenvolvimento urbano de baixo impacto, que se assemelha em diferentes países pelas siglas: *Low Impact Development* (LID) sobretudo nos Estados Unidos, *Water Sensitive Urban Design* (WSUD) na Austrália; *Sustainable Urban Drainage Systems* (SUDS) em alguns países da Europa, sobretudo na Inglaterra; *Low Impact Urban Design and Development* (LIUDD) na Nova Zelândia, foi uma evolução das *Best Management Practices* (BMPs) ou “Melhores práticas de gestão”. Fletcher *et al.* (2015) apresenta a evolução e aplicação de cada terminologia.

As BMPs foram uma abordagem pioneira no contexto da drenagem urbana integrada, tendo início na década de 70 nos Estados Unidos e Canadá. Fletcher *et al.* (2015) destaca que este termo foi inicialmente baseado no processo de tratamento de águas residuais das áreas industriais e/ou esgotos municipais e evoluiu, ao longo do tempo, para práticas relacionadas com a prevenção da poluição. Em relação à gestão das águas pluviais, as BMPs atuam no controle da qualidade das águas em escoamento. Nesse contexto, a EPA (2011) define a BMP como sendo uma técnica, processo, atividade ou estrutura capaz de reduzir os poluentes presentes no escoamento superficial, e podem ser implementadas individualmente ou em conjunto para maximizar sua eficácia. Além disso, considera a relação entre medidas não estruturais e estruturais como, por exemplo, programas de prevenção à poluição e células de biorretenção, respectivamente.

O termo LID (Desenvolvimento de Baixo Impacto) representa uma evolução das BMPs, com uma abordagem mais abrangente que considera a adoção de medidas de controle da qualidade e volumes dos escoamentos superficiais. Estas ações devem ocorrer de forma integrada à área de estudo, ou seja, consideram-se os aspectos físicos, ambientais e socioeconômicos. O LID busca a criação de ambientes funcionais para a reprodução das funções hidrológicas da bacia hidrográfica antes da urbanização com uso de técnicas de infiltração, armazenamento, detenção e retenção, localizadas na fonte. Bahiense (2013) resume a abordagem do LID nos seguintes passos:

- Identificação de regulamentação de zoneamento urbano, uso do solo e outras aplicáveis ao projeto;

- Identificação e estabelecimento dos limites de perturbação do solo e vegetação, respeitando áreas mínimas exigidas para ruas, elementos estruturais, edificações, paisagismo e manuseio de equipamentos;
- Redução de modificações da superfície da terra;
- Utilização de caminhos de fluxo e características naturais do terreno, ao invés de propor drenos artificiais, para minimizar a remoção de vegetação e desconectar áreas impermeáveis do sistema de drenagem, de forma a favorecer todas as oportunidades de infiltração;
- Minimização das taxas de impermeabilização, com uso de telhados verdes, pavimentos porosos, jardins de chuva e ruas mais estreitas;
- Concentração em aspectos hidrológicos naturais como um elemento do projeto, de forma a controlar o excesso de geração de descarga e aumentar vias de drenagem;
- Elaboração de planejamento integrado preliminar para avaliar a efetividade do empreendimento em controlar águas pluviais e produção de sedimentos, além de estimar a necessidade de adoção de práticas de manejo;
- Definição de locais ideais para parques e oportunidades de armazenamento, bem como integração destes aspectos hidrológicos com paisagens urbanas;
- Desenvolvimento de práticas de gestão integrada para tornar o desenvolvimento de baixo impacto efetivo.

Segundo Fletcher *et al.* (2015), o termo LID foi adaptado para a realidade de outros países, com semelhanças e diferenças sutis no seu significado. Na Nova Zelândia recebeu o nome de LIUDD (Projeto e Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto) e baseou-se na gestão local da água, visando o controle da poluição e proteção da população nativa e biodiversidade. A principal característica deste conceito refere-se à inclusão da comunidade local na definição de políticas de uso sustentável da água.

O termo SUDS (Sistema Sustentável de Drenagem Urbana) apareceu na década de 80 no Reino Unido e representa um conjunto de técnicas sustentáveis capaz de controlar a qualidade e quantidade do escoamento na fonte, transportar o volume excedente e realizar seu tratamento, de forma a melhorar o desenho urbano e a gestão dos riscos ambientais. Segundo Bahiense (2013), o conceito de desenvolvimento sustentável é concebido durante o planejamento da drenagem urbana e garante que os impactos sobre a bacia não sejam

transferidos no espaço e no tempo. A fim de maximizar seus benefícios, as técnicas SUDS devem considerar, sempre que possível (CIRIA, 2015):

- Utilização das águas superficiais como recurso;
- Gestão das águas pluviais na fonte;
- Gestão dos escoamentos superficiais;
- Aumentar a infiltração no solo;
- Promover a evapotranspiração;
- Diminuir a velocidade do escoamento superficial e promover seu armazenamento para reproduzir as taxas e volumes naturais do escoamento;
- Reduzir a contaminação do escoamento por meio da prevenção a poluição e controle da qualidade na fonte;
- Promover o tratamento do escoamento superficial para reduzir o risco de poluição ambiental.

Por fim, a terminologia WSUD (Projeto Urbano Sensível às Águas) é a mais nova dentre as apresentadas anteriormente, sendo utilizada pela primeira na vez na Austrália na década de 90. O termo engloba todos os aspectos da gestão integrada da água urbana (abastecimento, esgoto e gestão das águas pluviais), trazendo consigo a preocupação com a água durante todo o seu ciclo de forma a garantir a quantidade de água essencial para as atividades econômicas, melhorar e proteger os sistemas naturais de drenagem, reduzir os riscos de inundação e criar espaços públicos voltados para tratamento e reúso da água. Assim, uma das principais particularidades deste conceito é o reaproveitamento das águas, além do envolvimento das entidades público-privadas e comunidade. A Figura 8 diferencia em um diagrama, o ciclo hidrológico natural, em áreas urbanas e com a aplicação do WSUD.

Figura 8 – Ciclo hidrológico com WSUD



Fonte: RIBEIRO, 2014.

## 1.5 Simulação Hidrológica

As profundas alterações ocorridas nos processos hidrológicos em áreas urbanas, decorrentes das ações antrópicas, exigem o aprofundamento e aperfeiçoamento da técnica de simulação hidrológica. Esta técnica auxilia a tomada de decisões no âmbito do gerenciamento sustentável dos recursos hídricos, por meio da utilização de ferramentas computacionais, denominadas de modelos hidrológicos, que simulam e avaliam cada etapa do ciclo hidrológico em bacias com condições físicas e climatológicas diversificadas. Geralmente, tais modelos são aplicados em bacia urbanas e periurbanas para avaliar o balanço hídrico, simular e prever as alterações do uso do solo e seus impactos sobre a quantidade e qualidade do escoamento superficial e, até mesmo, simular alternativas para os projetos de drenagem urbana, sobretudo para o controle das inundações.

Segundo Mota (1999), modelos hidrológicos buscam representar com eficiência e precisão, os componentes do ciclo hidrológico em uma bacia hidrográfica e estimar eficientemente os volumes escoados, a trajetória dos escoamentos e o armazenamento para eventos pluviométricos excepcionais, menos frequentes, com elevado tempo de recorrência. Todos os processos físicos que ocorrem na bacia durante um evento pluviométrico são representados por equações matemáticas. Assim, o modelo hidrológico pode ser considerado com uma representação numérica do fluxo de água e seus constituintes sobre alguma parte da superfície e/ou subsuperfície terrestre (COLLODEL, 2009).

Os primeiros modelos hidrológicos surgiram entre as décadas de 50 e 60, a partir da utilização e disseminação das técnicas computacionais (CAMPOS, 2009; COLLODEL, 2009). Desde então, surgiram inúmeros modelos que buscam a maior aproximação com a realidade e incluem tanto os aspectos associados à qualidade das águas quanto à disponibilidade hídrica relacionados ao ciclo hidrológico. Além disso, considerando que os processos hidrológicos variam no espaço e no tempo e que os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) são ferramentas inigualáveis para coleta, armazenamento e análise de dados, tem-se buscado a integração dos modelos hidrológicos com o ambiente SIG, visando uma boa representação do meio físico e maior controle do processo de urbanização e dos fatores que conduzem aos eventos de enchentes (ROSA, 2002).

Alguns modelos hidrológicos são chamados de chuva-vazão, pois são utilizados para simular a resposta da bacia à um determinado evento pluviométrico em termos de vazão, em uma seção fluvial de interesse. Os modelos chuva-vazão mais sofisticados são também denominados de modelos hidrológicos-hidráulicos, já que além da geração do hidrograma de cheia no exutório da bacia, propiciam a análise dos processos hidrológicos e hidráulicos com obtenção dos parâmetros de interesse como, por exemplo, velocidade e altura da água nos condutos e canais (SANTOS, 2009). Assim, o modelo hidrológico é responsável pelo processo de transformação chuva-vazão, enquanto que o hidráulico simula a propagação do escoamento superficial na rede de drenagem.

A aplicação da técnica de simulação hidrológica em bacias hidrográficas constitui-se como instrumento importante para o gerenciamento da drenagem urbana, pois permite traçar, a partir da definição e avaliação de cenários que considerem diferentes graus de urbanização e arranjos da drenagem urbana, medidas sustentáveis para a gestão dos recursos hídricos e políticas de uso e ocupação do solo.

## **1.6 Classificação dos Modelos Hidrológicos**

Por terem sido desenvolvidos para diversas finalidades, os modelos hidrológicos podem ser classificados sob diferentes aspectos. Segundo Rennó e Soares (2000), de uma forma geral, os modelos são classificados de acordo com o tipo de variáveis utilizadas na modelagem (determinísticos e estocásticos), tipo de relação entre as variáveis (empíricos e

conceituais), existência de relações espaciais (concentrados e distribuídos), e a existência de dependência temporal (estáticos e dinâmicos).

Um modelo é dito determinístico quando o resultado do sistema é totalmente definido em função do valor das informações de entrada no sistema. Neste caso, cada valor de entrada gera uma única saída. Quando, pelo menos, uma das variáveis tenha comportamento aleatório e a relação entre os dados de entrada e saída apresentem comportamento probabilístico, o modelo é classificado como estocástico.

Nos modelos empíricos, o ajuste entre as variáveis calculadas e observadas é feito apenas por meio de funções matemáticas, que se assemelham ao comportamento das equações físicas que representam os processos da dinâmica dos fluidos, da hidráulica e hidrológicos envolvidos no sistema analisado. Por ser específico para cada região, esse tipo de modelo é pouco aplicado. Em contrapartida, os modelos conceituais são mais complexos e utilizam funções que representem, ao máximo, todos os processos físicos da bacia.

Os modelos concentrados (ou pontuais) consideram que as variáveis de entrada e saída não variam no espaço, sendo representativas de toda a área de estudo. Geralmente, estes modelos são utilizados em bacias de pequeno porte, onde a variabilidade espacial das variáveis não irá influenciar os resultados. Já os modelos distribuídos são aqueles em que os parâmetros variam no espaço geográfico. Para isto, o modelo exige que a bacia seja discretizada (divisão em áreas homogêneas), onde cada elemento irá ter um conjunto de parâmetros específico.

Os modelos são classificados como estáticos quando com um conjunto de dados de entrada produz-se um resultado em apenas um instante, ou seja, as variáveis não variam no tempo. Enquanto que os modelos dinâmicos utilizam os resultados de uma iteração como dado de entrada para a iteração seguinte. Rennó e Soares (2000) apontam que o passo de tempo atribuído para as simulações depende do fenômeno estudado, da disponibilidade de dados e da precisão desejada nos resultados.

## **1.7 Aplicação de Modelos Hidrológicos**

De acordo com Amaral (2014), a aplicação de modelos hidrológicos envolve as etapas:

- a) Seleção do modelo;
- b) Constituição da base de dados;
- c) Calibração e Validação do Modelo;
- d) Avaliação do desempenho do modelo;
- e) Simulação de Cenários;
- f) Interpretação dos resultados.

### 1.7.1 Seleção do Modelo

A escolha do modelo a ser utilizado é uma das etapas mais importantes e depende dos objetivos do estudo, da cobertura espacial considerada, da variabilidade e disponibilidade dos dados, da tecnologia empregada e do conhecimento do modelador (TUCCI, 2001). Os conceitos apresentados no item anterior, “Classificação dos Modelos Hidrológicos”, devem ser considerados durante esta avaliação.

No site do Inventário de Modelagem Hidrológica (*Hydrologic Modeling Inventory Website*<sup>1</sup>), há um levantamento realizado pela *Texas A&M University* e *Bureau of Reclamation* dos principais modelos hidrológicos e hidráulicos e suas especificidades. Elga *et al.* (2015) realizou uma revisão dos modelos hidrológicos aplicados em bacias urbanas utilizados na literatura.

O Quadro 3 apresenta alguns dos principais modelos hidrológicos-hidráulicos voltados para áreas urbanas, com destaque para as características de separação do escoamento e processos simulados.

---

<sup>1</sup> <http://hydrologicmodels.tamu.edu/>

Quadro 3 – Modelos hidrológicos-hidráulicos aplicados para a drenagem urbana

Sistema	Instituição	Separação do Escoamento	Módulo de Separação do Escoamento	Escoamento - Processos Simulados				Acesso	Site	
				Superficial	Subterrâneo	Degelo	Qual. Água			
InfoWorks	Innovyze	Horton, Green- Ampt, Soil Conservation Service (SCS) e mais três modelos que utilizam coeficientes baseados nas características da superfície do solo.	Pode ser feita através de cinco modelos: Double linear reservoir, Large contributing area, SPRINT, Desbordes runoff model e SWMM runoff model. O módulo de propagação do escoamento resolve as equações de Saint Venant em sua forma completa através do esquema implícito de Preissmann.	1 D 2 D	X	X		X	Aquisição do software	<a href="http://www.innovyze.com/products/infoworks_icm/">http://www.innovyze.com/products/infoworks_icm/</a>
Plataforma HEC	U.S. Army Corps of Engineers	Horton, Green and Ampt, SCS concentrado ou semi-distribuído, Smith Parlange (baseado na condutividade hidráulica do solo), método do déficit constante, método do cálculo da umidade do solo	Modelo do hidrograma unitário de Clark, concentrado ou semi-distribuído, modelo de onda cinemática, modelo de hidrograma unitário de Snyder, hidrograma triangular do SCS, concentrado ou semi-distribuído, hidrograma unitário fornecido pelo usuário. Possibilita a simulação unidimensional do escoamento em canais abertos, sob regime permanente e não-permanente e também na condição de fundo móvel (transporte de sedimentos).	1D	X		X	X	Livre	<a href="http://www.hec.usace.army.mil/software/">http://www.hec.usace.army.mil/software/</a>
SOBEK-Urban	Delft Hydraulics	Horton	Resolve as equações completas de Saint Venant através do esquema do Delft Hydraulics Laboratory permitindo a simulação de inundações no sistema, escoamento supercrítico sem simplificação das equações, simulação de redes multiplamente conectadas e ressaltos hidráulicos.	1 D 2 D	X			X	Aquisição do software	<a href="http://www.deltaessystems.com/hydro/product/108282/sobeksuite">http://www.deltaessystems.com/hydro/product/108282/sobeksuite</a>
Plataforma MIKE	Danish Hydraulic Institute – DHI	Solução da equação de Richards 3D e do modelo difusivo 2D utilizando diferenças finitas.	MIKE 11: Simulação hidrodinâmica unidimensional baseada na solução das equações de Saint Venant. MIKE 21: Modelo de escoamento baseado na solução das equações de continuidade e conservação de massa na forma bidimensional, por método de diferenças finitas.	1 D 2 D	X	X	X	X	Aquisição do software	<a href="http://www.dhigroup.com/">http://www.dhigroup.com/</a>
SWMM	Environmental Protection Agency-EPA	Green and Ampt, SCS e Horton	São utilizadas equações hidrodinâmicas completas. A solução do sistema de equações de Saint Venant é obtida por meio de um processo explícito de discretização numérica das equações diferenciais. A solução do sistema de equações não-linear é feita pelo método iterativo de Newton-Raphson.	1 D	X	X	X	X	Livre	<a href="http://www.epa.gov/athens/wwqts/html/swmm.html">http://www.epa.gov/athens/wwqts/html/swmm.html</a> O software traduzido para o português pode ser obtido através do site: <a href="http://www.lenhs.ct.ufpb.br/?page_id=1019">http://www.lenhs.ct.ufpb.br/?page_id=1019</a>

Fonte: AMARAL, 2014.

### 1.7.2 Constituição da Base de Dados

A base de dados é constituída pelas variáveis de entrada (precipitação e evapotranspiração/dados climatológicos), vazões observadas e características do escoamento (e.g. perfil das seções transversais, cota dos condutos ou canais e declividade dos trechos). Amaral (2014) afirma que alguns modelos requerem outros dados espaciais como, por exemplo, características morfométricas, dados de uso e ocupação do solo e divisão da bacia em elementos básicos (células quadráticas, elementos hidrográficos homogêneos e unidades de resposta hidrológica).

Collodel (2009) alerta que para a utilização e aplicação de modelos, torna-se fundamental a existência de um monitoramento hidrológico e climatológico para geração das séries históricas a serem utilizadas nas etapas que envolvem o uso do modelo. Para isto, são utilizadas estações fluviométricas e climatológicas que registram os dados para um intervalo de tempo estabelecido.

### 1.7.3 Calibração e Validação do Modelo

A calibração de um modelo hidrológico pode ser feita de forma manual e/ou automática. O primeiro método consiste no teste de tentativa e erro, onde o usuário irá variar os valores dos parâmetros até obter o melhor ajuste entre os resultados obtidos pelo modelo e os dados observados. Para auxiliar este tipo de ajuste, convém realizar a análise de sensibilidade do modelo para identificar quais parâmetros de entrada têm maior influência nos valores calculados. Desta forma, a cada simulação varia-se um determinado parâmetro mantendo ou não os outros constantes e, em seguida, analisa-se os resultados obtidos.

Na calibração automática, utiliza-se um método matemático de otimização (algoritmo) para minimizar ou maximizar uma ou mais funções objetivos, que medem as diferenças entre as séries de vazão observada e simulada (SHINMA, 2015). Durante o processo de calibração, o algoritmo define novos valores para as funções objetivo até atingir um valor mínimo. Uma das principais vantagens deste tipo de calibração é a maior rapidez e eficiência na obtenção dos parâmetros ajustados. Entretanto, a calibração manual propicia ao usuário o melhor

entendimento de cada etapa da calibração e, conseqüentemente, a melhor concepção da modelagem hidrológica.

Com os parâmetros ajustados, a validação consiste na realização de uma nova simulação com novos dados de entrada. Conforme Bellon (2014), a validação confirma a qualidade e eficiência dos ajustes feitos na calibração, de forma que sua aplicação seja generalizada e usada em outros períodos ou cenários diferentes daqueles que foram monitorados e/ou utilizados na calibração dos parâmetros.

#### 1.7.4 Avaliação do Desempenho do Modelo

Existem diversos indicadores estatísticos que avaliam a eficiência do processo de calibração e validação, e auxiliam na diminuição da subjetividade do ajuste. Tais indicadores podem ser definidos como medidas matemáticas que traduzem a capacidade do modelo em simular as condições hidrológicas da bacia hidrográfica em um determinado momento. Krause *et al.* (2005) alerta que apesar de poucos critérios de eficiência serem frequentemente utilizados nos estudos de modelagem hidrológica, existe um grande número de outros critérios. A escolha de um ou mais indicadores fica condicionada ao objetivo do estudo.

O trabalho de Moriasi *et al.* (2007) tem sido bastante utilizado como referência para definição dos critérios de eficiência dos modelos hidrológicos. Os principais indicadores recomendados para esta avaliação são: coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), tendência percentual bias (PBIAS) e equação da razão RMSE (RSR). Além destes, também destaca-se o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) como critério bastante utilizado e reportado na literatura. A Tabela 1 apresenta os indicadores descritos anteriormente.

Tabela 1 (continua) – Indicadores estatísticos utilizados na avaliação das simulações hidrológicas

Indicador	Descrição*
Nash-Sutcliffe (NSE)	<p>Medida que compara o desempenho em termos da variância das vazões simuladas em relação às observadas, normalizando-as pela variância das vazões médias observadas. Graficamente representa o ajustamento (aderência) das vazões calculadas em relação às observadas. A amplitude de variação está no intervalo <math>(-\infty, 1]</math>. A maior desvantagem do coeficiente deve-se às diferenças entre as vazões simuladas e observadas, que são calculadas como valores quadrados. Como resultado, os erros são superestimados nas vazões maiores da série temporal do que nas vazões mínimas. A expressão de cálculo do indicador é dada por:</p> $NSE = 1 - \frac{\sum(\text{obs} - \text{sim})^2}{\sum(\text{obs} - \text{média obs})^2}$
Determinação ( $R^2$ )	<p>Medida de correlação linear entre as vazões simuladas e observadas cuja amplitude de variação está no intervalo <math>[0,1]</math>, indicando em porcentagem o quanto o modelo estimado consegue explicar os valores observados. Quanto maior o valor de <math>R^2</math> melhor o ajuste entre os hidrogramas. A inclinação da reta mostra a relação entre os valores simulados e observados. A interceptação da reta no eixo-y indica a presença de um deslocamento (atraso ou adiantamento) entre os valores simulados e observados, ou que os dados não estão perfeitamente alinhados. Se a inclinação corresponder a “1” e a reta interceptar o eixo-y na origem o modelo reproduz fielmente as magnitudes dos dados medidos. Naturalmente, a análise pura deste indicador desconsidera a existência de erros relativos aos dados observados, o que raramente acontece na prática. Assim como o NSE o coeficiente de determinação é mais sensível às diferenças maiores entre valores simulados e observados. O cuidado que se deve ter quando se usa o indicador isoladamente é que ele apenas correlaciona a dispersão entre os valores das variáveis simuladas e observadas. Um modelo que sistematicamente subestima ou superestima as previsões na simulação pode resultar em valores próximos de “1”, mesmo que todas as previsões estejam erradas. Em termos gráficos se a inclinação da reta for diferente de “1” é porque existem diferenças de magnitude entre as vazões. A expressão de cálculo do indicador é dada por:</p> $R^2 = \frac{\sum(\text{obs} - \text{média obs}) * (\text{sim} - \text{média sim})}{[(\sum(\text{obs} - \text{média obs})^2 * \sum(\text{sim} - \text{média sim})^2)]^{0,5}}$
Tendência percentual bias (PBIAS)	<p>Medida percentual da tendência das vazões simuladas serem maiores ou menores que as respectivas vazões observadas. Valores próximos de zero ou com baixa magnitude indicam boa simulação sem tendência nas estimativas. Se a fórmula de cálculo considera valores simulados menos valores observados o resultado positivo indica que a vazão simulada está superestimada, e subestimada, se o resultado é negativo. A expressão de cálculo do indicador é dada por:</p> $PBIAS = \frac{\sum(\text{sim} - \text{obs}) * 100}{\sum(\text{obs})}$

Tabela 1 (continuação) – Indicadores estatísticos utilizados na avaliação das simulações hidrológicas

Equação da Razão RMSE (RSR)	<p>Medida sugerida por Moriasi <i>et al.</i> (2007) ainda pouco usada nas avaliações. A normalização da Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) por meio da divisão pelo desvio padrão das vazões observadas torna o coeficiente adimensional, permitindo que seja usado mais facilmente para comparar os resultados das simulações. Quanto menor o valor de RSR melhor a simulação. Valor zero indica simulação perfeita. A expressão de cálculo do indicador é dada por:</p>
	$RSR = \frac{[(\sum(obs - sim)^2)^{0.5}]}{[(\sum(obs - média sim)^2)^{0.5}]}$
<p><b>* Termos usados nas expressões:</b>  obs = vazão observada, média obs = média das vazões observadas  sim = vazão simulada, média sim = média das vazões simuladas</p>	

Fonte: KRAUSE *et al.*, 2005 e MORIASI *et al.*, 2007 *apud* BELLON, 2014.

Conforme Moriasi *et al.* (2007), o desempenho do modelo hidrológico pode ser dito satisfatório quando  $NSE > 0.50$  e  $RSR \leq 0.70$  e,  $PBIAS \pm 25\%$ . Para o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), valores acima de 0.50 são aceitáveis (SANTHI *et al.*, 2001).

### 1.7.5 Simulação de Cenários

Após as etapas de calibração e validação do modelo, a definição de cenários estará condicionada aos objetivos do estudo proposto. São inúmeras as possibilidades, tais como: alterações no uso e ocupação do solo da bacia, mudanças climáticas, alterações no sistema de drenagem e implantação de estruturas de controle de inundações. Neste último caso, geralmente considera-se eventos pluviométricos extremos observados na região ou estimados para um determinado tempo de recorrência.

Os modelos hidrológicos podem apresentar limitações quanto à simulação de certos cenários de intervenção. Sendo assim, o modelador deve escolher o modelo que atenda aos seus objetivos.

### 1.7.6 Interpretação dos Resultados

A compreensão das etapas do ciclo hidrológico e das equações e condições de contorno utilizadas pelo modelo são fundamentais para interpretação dos resultados obtidos nas simulações. Além disso, deve-se levar em conta as limitações existentes, uma vez que qualquer modelo hidrológico fornece resultados com incertezas. Segundo Tucci (2010), as incertezas nos modelos podem ocorrer devido às variáveis de entrada, estrutura do modelo e parâmetros. As incertezas sobre às variáveis de entrada estão associadas à variabilidade natural e, erros de medição e quantificação das mesmas. Já as incertezas da estrutura do modelo se devem às características das equações e sua capacidade de representar o processo envolvido. Por fim, a incerteza dos parâmetros pode estar relacionada com a sua estimativa e com os dados utilizados para ajuste do modelo.

## 1.8 **Elementos da infraestrutura verde e simulação hidrológica-hidráulica**

O avanço da técnica de simulação hidrológica-hidráulica tem sido verificado no desenvolvimento de inúmeros modelos com diversas funções, e que são capazes de simular de forma eficiente os processos mais complexos do ciclo hidrológico e aspectos quali-quantitativos dos escoamentos. Desde o surgimento dos primeiros modelos hidrológicos, muitos foram os avanços observados, que acompanharam a evolução do *hardware* e dos *softwares* associados. Destaca-se neste contexto o surgimentos dos sistemas de informação geográfica, que além de permitir o armazenamento de bases de dados mais detalhadas, permitem várias análises espaciais e apresentação de resultados mais elaboradas. No contexto da pesquisa realizada no desenvolvimento da dissertação, destaca-se a capacidade de alguns modelos em representar e simular o comportamento hidráulico-hidrológico de elementos da infraestrutura verde na bacia hidrográfica que visam, sobretudo, o controle das inundações. Além de avaliar a contribuição destes elementos no controle de enchentes. A modelagem propicia também diferentes concepções de projeto e consideram a implantação das técnicas de forma isolada ou combinada.

Após revisão da literatura, constatou-se que o modelo SWMM tem sido amplamente utilizado para simular e avaliar a eficiência da implantação destes dispositivos na redução do

escoamento superficial. No contexto internacional destacam-se os estudos de: Burszta-Adamiak e Mrowiec (2013), na Polônia; Eichenwald e McGarity (2010) e Lucas e Sample (2015), nos Estados Unidos; Qin *et al.* (2013) e Li *et al.* (2015), na China; Palla e Gnecco (2015), na Itália. No Brasil, foram identificados os seguintes trabalhos: Amaral (2014), no Rio de Janeiro; Feitosa (2015), no Ceará; Gurgel (2016), no Rio Grande do Norte; Leite *et al.* (2016), no Mato Grosso; Silva *et al.* (2013), na Bahia; Silva (2010), no Recife.

A versão mais atual do SWMM (versão 5.1.010) possibilita a simulação de oito elementos da infraestrutura verde, considerados como dispositivos de desenvolvimento de baixo impacto. São eles: células de biorretenção, jardins de chuva, telhado verde, trincheira de infiltração, pavimento permeável, “barris” (reservatórios) de chuva, calha e células vegetativas. O item 2.2.4 deste trabalho descreve como estes elementos são concebidos pelo modelo.

## 1.9 Evapotranspiração

A evapotranspiração constitui-se como uma etapa importante do ciclo hidrológico, sendo responsável pelo retorno de uma parcela da água presente na superfície terrestre para a atmosfera. O termo evapotranspiração foi proposto por Thornthwaite & Wilm (1944 *apud* BORGES; MENDIONDO, 2007) como sendo a ocorrência simultânea e natural dos processos de evaporação e transpiração das plantas. A evaporação, segundo Miranda *et al.* (2010), representa um conjunto de fenômenos físicos que proporcionam a transformação da água, presente em uma superfície úmida ou de água livre (e.g. lagos, rios e mares), em vapor, devido à elementos meteorológicos, tais como radiação solar e temperatura do ar, e aos processos de difusão molecular e turbulenta. Já a transpiração, expressa a parcela de água perdida para a atmosfera na forma de vapor a partir das ações físicas e fisiológicas dos vegetais, por meio dos estômatos e cutículas das plantas.

De acordo com Allen *et al.* (1998), os fatores que afetam a evapotranspiração são os parâmetros meteorológicos, as características da cultura (vegetação), manejo e aspectos ambientais. Em relação aos parâmetros meteorológicos destacam-se a radiação solar, temperatura do ar, umidade e velocidade do vento. De uma forma geral, para uma determinada região, as maiores taxas de evapotranspiração são observadas quando ocorre a maior disponibilidade de energia solar, temperatura do ar e velocidade do vento, e menor

umidade relativa (FIETZ; FISCH, 2009, SENTELHAS, 1998 *apud* FERRAZ, 2008). Ismael Filho *et al.* (2015) verificaram as relações das variáveis climatológicas com a evapotranspiração e constataram que a radiação solar apresenta a maior influência, seguida da temperatura, a velocidade do vento não teve efeito relevante e a umidade do ar apresenta relação inversa, ou seja, quanto maior a umidade do ar menor será a evapotranspiração.

Medeiros (2002) destaca que o vento aumenta a capacidade de evaporação no local ao criar um gradiente de pressão de vapor a partir da remoção da camada logo acima da superfície evaporante enquanto que a umidade relativa do ar afeta a quantidade de vapor que a atmosfera pode absorver.

A taxa de evapotranspiração de uma superfície vegetada está condicionada ao tipo de cultura, variedade e estágio de desenvolvimento, além de aspectos relacionados com a condição na qual está disposta na superfície (rastejante, ereta ou espaldeira), área e arquitetura foliar, altura, rugosidade, reflexão e cobertura do solo (ALLEN *et al.*, 1998; FERRAZ, 2008). Desta forma, para uma mesma condição ambiental, a quantidade de água evapotranspirada varia de acordo com as diferentes características das culturas.

O manejo e os aspectos ambientais do solo e da cultura também são relevantes já que quando se verifica, por exemplo, condições de baixa fertilidade do solo, teor de sais inadequado e ausência de monitoramento de doenças e pragas, a evapotranspiração é reduzida.

Nos modelos hidrológicos as taxas de evapotranspiração podem ser fornecidas na forma de séries temporais, ou o modelo pode prever metodologia para estimativa das mesmas, geralmente a partir das variáveis climatológicas.

### 1.9.1 Evapotranspiração de Referência (ET<sub>0</sub>)

Conforme Carvalho *et al.* (2011), no final da década de 40, surgiu o conceito de evapotranspiração potencial (ET<sub>p</sub>), resultado dos estudos de Thornthwaite (1948) e Penman (1948), com a seguinte definição:

transferência de água do sistema solo-planta para a atmosfera, sob condições padronizadas, ou seja, área com extensa superfície natural, totalmente coberta por vegetação baixa, de altura uniforme e com elevado índice de área foliar (IAF), de crescimento ativo na fase adulta (a grama é a principal vegetação adotada, e, em

alguns tipos de clima, adota-se a alfafa) e teor de água do solo próximo ou na capacidade de campo.

Posteriormente, na década de 70, o termo ETp foi substituído pelo conceito de evapotranspiração de referência (ETo) já que “as definições originais não especificavam o tipo de vegetação, o grau e a cobertura vegetal do solo, as dimensões da superfície e as condições de bordadura” (FRIZZONE, 2004 *apud* ALMEIDA, 2012). Diante das novas definições que existiram para este novo termo, a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (*Food and Agriculture Organization - FAO*) promoveu em 1990 um encontro entre vários especialistas que resultou na consolidação do termo ETo e o método recomendado para sua estimativa foi o Penman-Monteith.

Allen *et al.* (1998) apresenta no Relatório 56 da FAO esta metodologia e define a ETo como sendo aquela de um gramado hipotético com altura de 0,12 m, albedo igual a 0,23 e resistência da superfície ao transporte de vapor d’água de  $69 \text{ s m}^{-1}$ . Este conceito foi introduzido com o objetivo de avaliar a demanda evaporativa da atmosfera independente do tipo de cultura e condições do solo, sendo os parâmetros climáticos os únicos que afetam a ETo. A Figura 9 apresenta em um esquema simplificado a definição de ETo.

Figura 9 – Evapotranspiração de referência (ETo)



Fonte: Adaptado de ALLEN *et al.*, 1998.

### 1.9.2 Métodos para Estimativa da ETo

Existem diversos métodos para estimativa da evapotranspiração de referência (ETo), sendo classificados, de uma forma abrangente, em diretos e indiretos. Carvalho *et al.* (2011) apresenta uma síntese com os métodos mais comuns, encontrados na literatura. A escolha de um ou mais métodos irá depender de diversas questões tais como disponibilidade de dados

meteorológicos, escala de tempo requerida e adaptabilidade do método à região de estudo (MELO, 2009).

O método direto mais utilizado é a lisimetria, pois oferece melhor precisão na obtenção da ETo, apesar do alto custo de implantação e das dificuldades de manutenção do sistema. Aboukhaled *et al.* (1982 *apud* MEDEIROS, 2002) apresentam a definição para lisímetros:

Grandes contêineres preenchidos com solo (ou incluso um bloco de solo) localizados no campo, para representar o ambiente local, com superfície vegetada ou solo nu, para determinação da evapotranspiração de uma cultura em crescimento, ou de uma cobertura de referência, ainda, da evaporação a partir de um solo não vegetado.

As variáveis controladas (precipitação, infiltração, armazenamento, escoamento e percolação) permitem a determinação da evapotranspiração a partir do balanço hídrico. Entretanto, diversos fatores ambientais e de projeto podem interferir na medição da evapotranspiração como, por exemplo, os efeitos de advecção, dimensões do lisímetro e densidade de vegetação dentro e fora do sistema (CAMPECHE *et al.*, 2011). Desta forma, a instalação e operação dos lisímetros devem ser feitas de forma correta para garantir a representação das condições ambientais de estudo.

Já a determinação indireta da evapotranspiração ocorre a partir de evaporímetros e equações empíricas (MOURA, 2009). Segundo Tucci e Beltrame (2001), os evaporímetros são instrumentos que medem o poder evaporativo da atmosfera mediante os efeitos de radiação, temperatura, vento e umidade. Um dos mais conhecidos é o tanque evaporimétrico “Classe A”, que se caracteriza por ser um tanque não enterrado e não telado, montado a céu aberto sobre uma grade de madeira, colocada em nível (VAREJÃO-SILVA, 2006). A determinação da evaporação ocorre com a diferença de leitura do nível d’água no micrômetro, no intervalo de tempo estabelecido. A partir disso, a evapotranspiração pode ser obtida corrigindo o valor da evaporação com o coeficiente do tanque ( $k_p$ ). De acordo com Allen *et al.* (1998), o coeficiente  $k_p$  é específico para cada tipo de tanque e está relacionado também com a cobertura do solo, condições de bordadura, velocidade do vento e umidade.

Em relação às equações empíricas, destaca-se a de Penman-Monteinh como método padrão para estimativa da ETo diária (mm/d), segundo recomendação da FAO. Tal método, descrito no Relatório nº 56 da FAO (ALLEN *et al.*, 1998), toma como base um conjunto de dados meteorológicos (temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar) e é representado pela Equação 1.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

Onde:

$ET_0$  = evapotranspiração de referência, em mm/d;

$\Delta$  = gradiente da curva de pressão de vapor de saturação à temperatura  $T_a$ , em kPa/°C;

$R_n$  = radiação líquida na superfície de referência (grama), em MJ/m<sup>2</sup>d;

$G$  = densidade do fluxo de calor no solo, em MJ/m<sup>2</sup>d;

$\gamma$  = constante psicrométrica, em kPa/°C;

$u_2$  = velocidade média diária do vento, em m/s.

$e_s$  = saturação da pressão de vapor à temperatura  $T_a$ , em kPa;

$e_a$  = pressão atual de vapor de água atmosférico, em kPa;

$T_a$  = temperatura média diária do ar, em °C;

Para os locais com escassez de um ou mais dados meteorológicos, o Relatório nº 56 da FAO apresenta diversas recomendações para sua estimativa. Além disso, são apresentadas equações alternativas, mais simples, para o cálculo da  $ET_0$ . O método de Hargreaves, por exemplo, baseia-se apenas no dado de temperatura do ar e da radiação extraterrestre, como mostra a Equação 2.

$$ET_0 = 0.0023(T_{médica} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5} R_a \quad (2)$$

Onde:

$ET_0$  = evapotranspiração de referência, em mm/d;

$T_{médica}$  = temperatura média diária do ar, em °C;

$T_{max}$  = temperatura máxima diária do ar, em °C;

$T_{min}$  = temperatura mínima diária do ar, em °C;

$R_a$  = radiação extraterrestre, em mm/d.

## **2. METODOLOGIA**

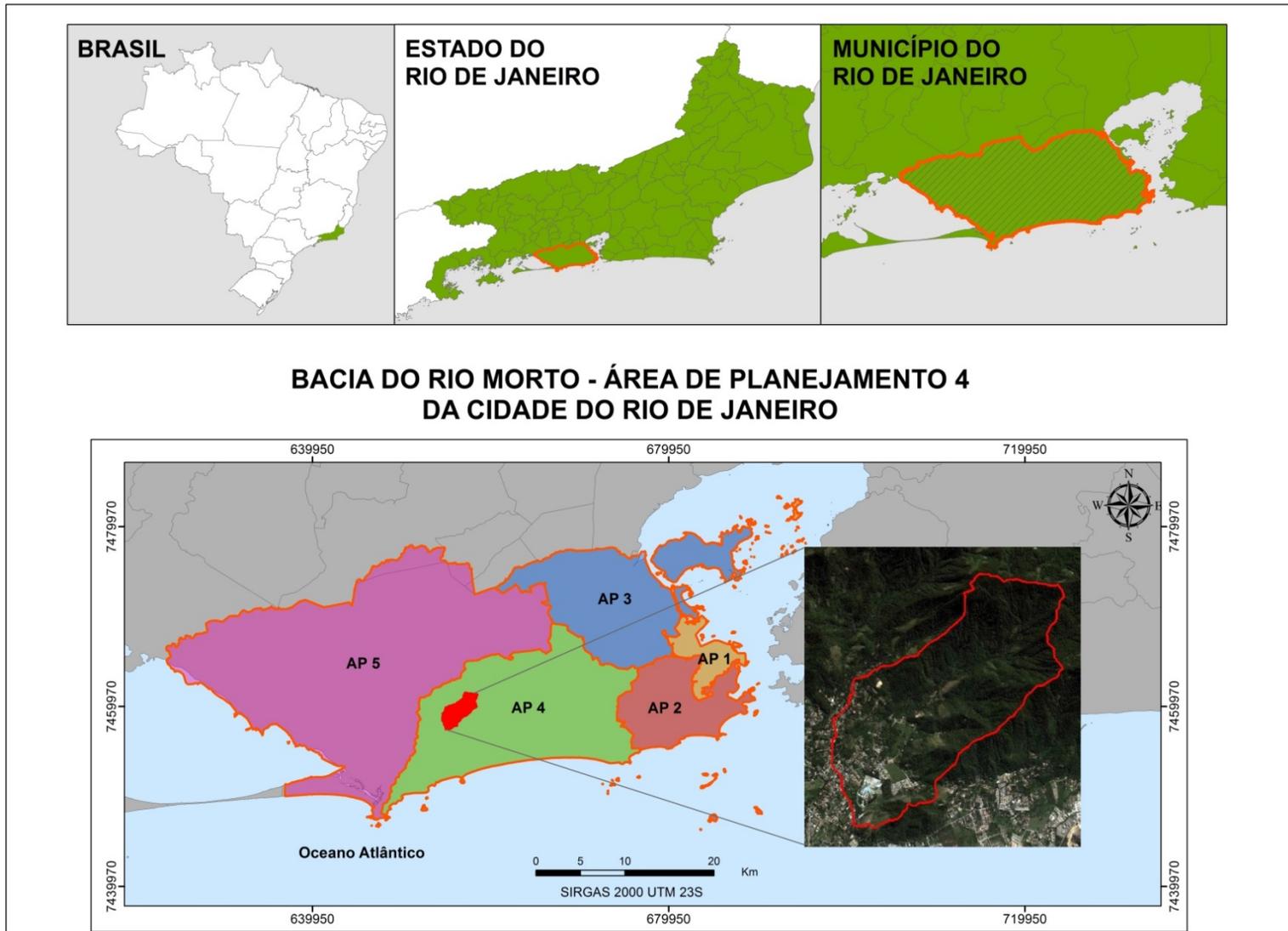
### **2.1 Caracterização da Área de Estudo**

#### **2.1.1 Localização da Bacia Hidrográfica**

A bacia hidrográfica do rio Morto está localizada na região da baixada de Jacarepaguá, zona oeste do município do Rio de Janeiro. Os limites da bacia estão compreendidos entre as coordenadas 43°29'43" e 43°27'10" de longitude oeste e 22°56'43" e 22°59'10" de latitude sul.

Conforme o Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano Sustentável do Município do Rio de Janeiro, estabelecido na Lei Complementar nº 111 de 1º de fevereiro de 2011 (RIO DE JANEIRO, 2011), a baixada de Jacarepaguá e, conseqüentemente, a bacia do rio Morto estão inseridos na Área de Planejamento 4 (AP 4), que abrange as Regiões Administrativas XVI – Jacarepaguá e XXIV – Barra da Tijuca. A Região Administrativa (RA) de Jacarepaguá compreende os seguintes bairros: Jacarepaguá, Anil, Gardênia Azul, Curicica, Freguesia, Pechincha, Taquara, Tanque, Praia Seca, Vila Valqueire e Cidade de Deus. A RA da Barra da Tijuca é composta por: Joá, Itanhangá, Barra da Tijuca, Camorim, Vargem Pequena, Vargem Grande, Recreio dos Bandeirantes e Grumari. A Figura 10 destaca a localização e a delimitação da bacia hidrográfica do rio Morto na AP 4.

Figura 10 – Localização da bacia hidrográfica do rio Morto



Fonte: Elaborado com base em AMARAL, 2014 e PORTAL GEO-RIO, 2016.

A Baixada de Jacarepaguá caracteriza-se por ser uma planície litorânea com área de aproximadamente 300 km<sup>2</sup>, sendo 176 km<sup>2</sup> correspondentes à rede de drenagem e corpos d'água (FREITAS, 2009) e limita-se pelo maciço da Pedra Branca ao norte, o Oceano Atlântico ao sul, o maciço da Tijuca a Leste e a Baixada de Guaratiba a Oeste. Conforme Rosa (2002), esta região possui características próprias da cidade do Rio de Janeiro, como os baixios, contrafortes, características do clima e ocupação urbana, e outras áreas de paisagem periurbana.

Por ser um ambiente de transição entre o ecossistema marinho e terrestre, a região possui uma diversidade física-ambiental particular, com presença de um complexo sistema lagunar, densa rede de drenagem, áreas de preservação e remanescentes de restinga, mangue e floresta. A presença de *wetlands* naturais favorece, no período chuvoso, o transbordamento dos rios devido à ampliação das áreas alagadas, e assegura a manutenção dos ecossistemas locais.

Em virtude das características geográficas que dificultavam o acesso a região, a baixada de Jacarepaguá apresentou por muito tempo uma paisagem rural, com predominância de sítios e chácaras. A partir da década de 60, diante do crescimento populacional da cidade do Rio de Janeiro, o poder público passou a incentivar o avanço da ocupação urbana para a zona oeste por meio da elaboração de projetos de urbanização (CARVALHO, 2013). Já na década de 70, com a implantação do Polo Industrial de Jacarepaguá e construção de vias que ligavam a baixada ao centro da cidade, muitas empresas se instalaram na região e os primeiros loteamentos começaram a ser construídos.

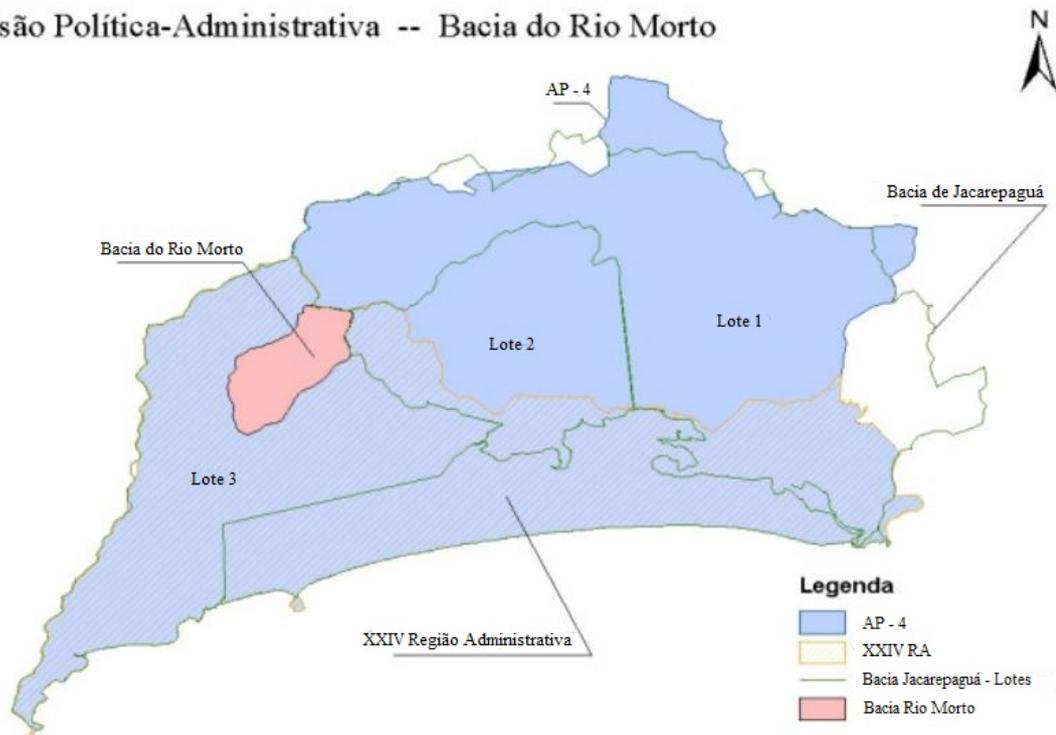
Desde então, a ocupação da baixada de Jacarepaguá foi crescente. Segundo dados do IBGE (2010), entre 2000 e 2010 esta região foi a que apresentou maior crescimento populacional da cidade do Rio de Janeiro, com uma taxa de 33,33%. Apesar disso, Amaral (2014) aponta que o cenário da baixada é diversificado já que os bairros da Barra da Tijuca e Taquara tiveram as maiores taxas de crescimento, e os bairros de Vargem Pequena e Vargem Grande apresentam característica periurbana. Atualmente, a ação do mercado imobiliário na região é bastante forte devido, sobretudo, aos grandes espaços vazios e às obras das Olimpíadas de 2016. Ressalta-se que embora tenha tido um planejamento inicial de urbanização, a ocupação ocorreu de forma desordenada, levando ao surgimento de ocupações irregulares.

Considerando o Projeto de drenagem de águas pluviais, a bacia de Jacarepaguá é composta por 3 sub-bacias, denominadas lotes 1, 2 e 3. A bacia hidrográfica do rio Morto pertence ao lote 3, como representado na Figura 11. Mais especificamente, a bacia está

totalmente inserida no bairro de Vargem Grande, abrangendo uma área de drenagem de 9,41 Km<sup>2</sup> (até aproximadamente ao cruzamento com a Estrada dos Bandeirantes).

Figura 11 – Localização da bacia do Rio Morto – Lote 3, bacia de Jacarepaguá

**Divisão Política-Administrativa -- Bacia do Rio Morto**



Fonte: Adaptado de ROSA *et al.*, 2003.

A parte mais alta da bacia encontra-se dentro dos limites do Parque Estadual da Pedra Branca, Área de Preservação Permanente (APP) com vegetação típica de Mata Atlântica. O restante da bacia localiza-se nos trechos médio e baixo do rio Sacarrão, principal afluente do rio Morto, onde se verifica a presença de condomínios residenciais, pequenos comércios e assentamentos informais.

Ao longo dos últimos anos, como em outros locais em Jacarepaguá, a ocupação da bacia tem se tornado mais expressiva. Entretanto, o processo de urbanização não tem sido acompanhado da execução de planejamento territorial-urbano adequado, com implantação de infraestrutura urbana suficiente, já que as ocupações irregulares não puderam ser contidas, não foi até a presente data construída rede de drenagem de águas pluviais, e nem todas as edificações estão ligadas à rede de esgotamento sanitário existente. Além do lançamento de esgotos, muitas vezes sem nenhum tratamento prévio, contribuem para a degradação dos corpos hídricos locais, sobretudo nos trechos médio e baixo da bacia, o lançamento de outros efluentes e entulhos, assim como a remoção da mata ciliar e ocupação das regiões ripárias. Apesar da iniciativa da Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Estado do Rio de Janeiro

(CEDAE) na ampliação do Sistema Guandu para atendimento da centralidade do bairro de Vargem Grande, a principal fonte de abastecimento de água da bacia provém de uma captação isolada da própria CEDAE no rio Sacarrão e de poços particulares isolados (PIMENTEL DA SILVA *et al.*, 2008b).

Os principais cursos d'água da área de drenagem em estudo são os rios Sacarrão, Branco e o Morto. O rio Sacarrão nasce no Parque Estadual da Pedra Branca, recebe a contribuição do rio Branco e de outros pequenos afluentes e, após a confluência com o canal do morro do Bruno, origina o rio Morto, cujo curso d'água cruza a Estrada dos Bandeirantes, logo recebe as águas do Rio Vargem Grande, e segue em trecho retificado denominado Canal de Sernambetiba, ao longo da Estrada do Rio Morto, até o lançamento de suas águas no Oceano Atlântico no Bairro do Recreio dos Bandeirantes (ROSA, 2002).

A área de drenagem da bacia do rio Morto em estudo, foi constituída, no contexto do Projeto HIDROCIDADES, como experimental e representativa do Lote 3, área de planejamento para o sistema de drenagem de águas pluviais da bacia hidrográfica da Baixada de Jacarepaguá. A área apresenta semelhanças não só relacionadas às características físicas e da paisagem, mas também dos aspectos associados à natureza socioeconômica e cultural (PIMENTEL DA SILVA *et al.*, 2008b).

### 2.1.2 Características Morfométricas

Pimentel da Silva *et al.* (2010) determinaram alguns parâmetros morfométricos da bacia do rio Morto a partir da base cartográfica municipal cedida pelo Instituto Pereira Passos (IPP), pertencente à Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, e de pequenos procedimentos computacionais associados às ferramentas hidrológicas (extensão ArcHydro) do *software* ArcGIS®. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Características morfométricas e fisiográficas da bacia do rio morto até a ponte da Estrada dos Bandeirantes

Características Físicas	Resultados
Área da bacia (A)	9,41 km <sup>2</sup>
Perímetro (P)	18,42 km
Coefficiente de compacidade (k <sub>c</sub> )	1,68
Fator de forma (K <sub>f</sub> )	0,226
Densidade de drenagem (D <sub>d</sub> )	1,934 km/km <sup>2</sup>
Extensão média do escoamento superficial (l)	0,129 km
Declividade da Bacia	0,0083 m/m

Fonte: PIMENTEL DA SILVA *et al.*, 2010.

O coeficiente de compacidade relaciona a forma da bacia com a de um círculo, sendo que valores próximos da unidade correspondem a bacias circulares, que tendem a concentrar mais o escoamento e são mais suscetíveis às inundações. Outro indicativo da tendência de enchente é o fator de forma, já que quanto menor seu valor menos sujeita a bacia é às enchentes. Isso ocorre porque em bacias mais alongadas, a probabilidade de uma chuva cobrir toda sua extensão se torna menor. Comparando os valores destes coeficientes com os encontrados na bacia Ribeirão do Lobo por Villela e Mattos (1975), Pimentel da Silva *et al.* (2010) concluiu que a bacia do rio Morto, no trecho analisado, não estaria muito sujeita às enchentes.

A densidade de drenagem fornece informação sobre o grau de desenvolvimento da rede de drenagem da bacia. De acordo com Villela e Mattos (1975), este índice varia de 0,5 km/km<sup>2</sup>, para bacias com drenagem pobre, a 3,5 km/km<sup>2</sup> ou mais, para bacias excepcionalmente bem drenadas. O valor encontrado para a bacia do rio Morto foi intermediário e revela que esta é bem drenada. O índice extensão média do escoamento superficial representa a distância média que a água da chuva deve percorrer sobre a superfície da bacia até atingir o curso d'água mais próximo. O baixo valor encontrado revela também a tendência para maiores velocidades de escoamento.

Além destes coeficientes, também foi determinada a declividade da bacia. Pimentel da Silva *et al.* (2010) revelam que a declividade da bacia é alta, quando comparada com a bacia Ribeirão do Lobo, confirmando novamente a tendência para maiores velocidades de escoamento. Destaca-se que a montante da bacia encontra-se parte do maciço da Pedra Branca, com valores máximos de altitude em torno de 850 metros. Entretanto, o trecho mais baixo da bacia, já na planície costeira, apresenta declividade baixa.

### 2.1.3 Tempo de Concentração

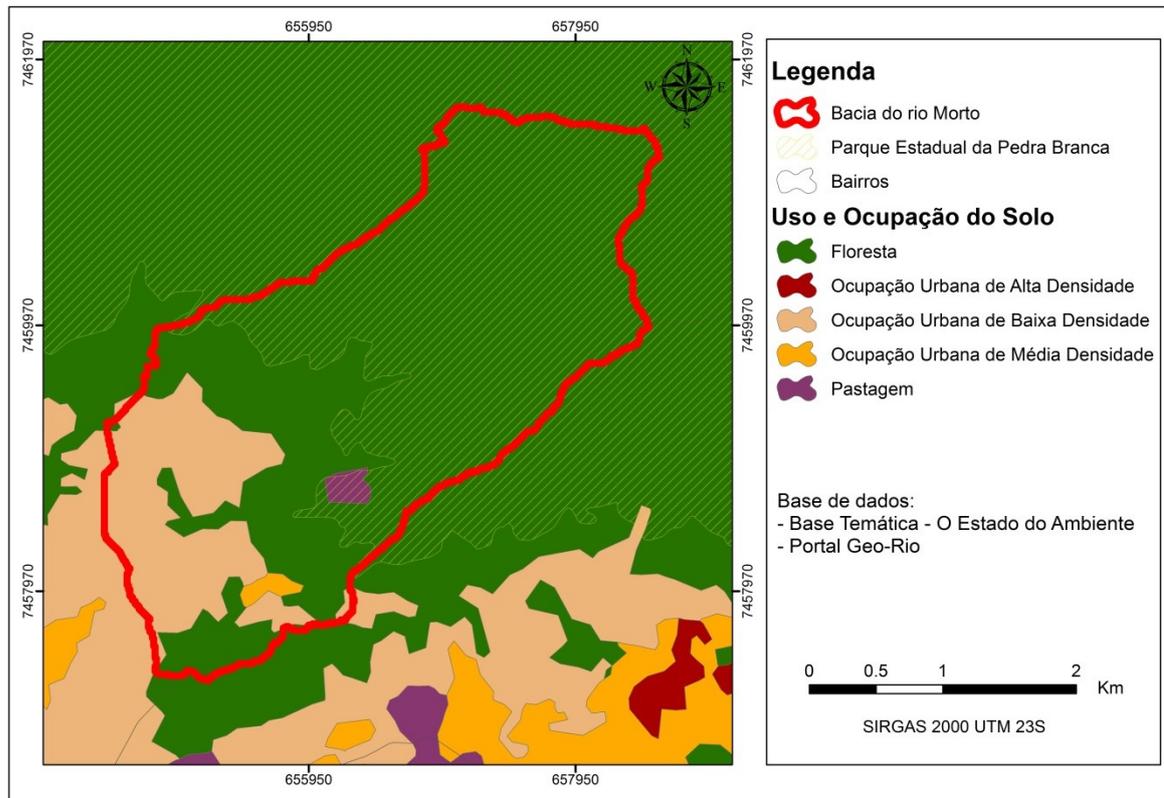
O tempo de concentração da bacia do Rio Morto foi estimado pelos métodos de Ribeiro, Kirpich e Ventura, com valores de 25.16, 10.93 e 9.25 minutos, respectivamente (AMARAL, 2014). Tais resultados conferem à bacia do Rio Morto rápidas respostas às chuvas precipitadas sobre a mesma.

### 2.1.4 Uso e Ocupação do Solo

De acordo com a Base de Dados Espaciais do Estado do Rio de Janeiro (INEA, 2016), na escala de 1:50.000, a bacia do rio morto apresenta os usos do solo: floresta, pastagem, ocupação urbana de baixa e média densidade (Figura 12). Cerca de 60% da área da bacia está inserida no Parque Estadual da Pedra Branca, uma das áreas de remanescentes da Mata Atlântica mais expressiva do estado do Rio de Janeiro. Apesar disso, esta área sofreu por muitos anos com o processo de ocupação e devastação.

Na parte mais a jusante da bacia, observa-se o avanço da urbanização, com presença de residências, condomínios, lojas de plantas, haras, Parque de Águas, pequenos comércios, lojas de materiais de construção, restaurantes e bares, embora com características periurbanas. Dentro dos limites da bacia observa-se o assentamento subnormal da Vila Cascatinha, e outras pequenas comunidades em desenvolvimento (PIMENTEL DA SILVA *et al.*, 2010).

Figura 12 – Uso e ocupação do solo na bacia do rio Morto



Fonte: O Autor, 2017.

### 2.1.5 Clima

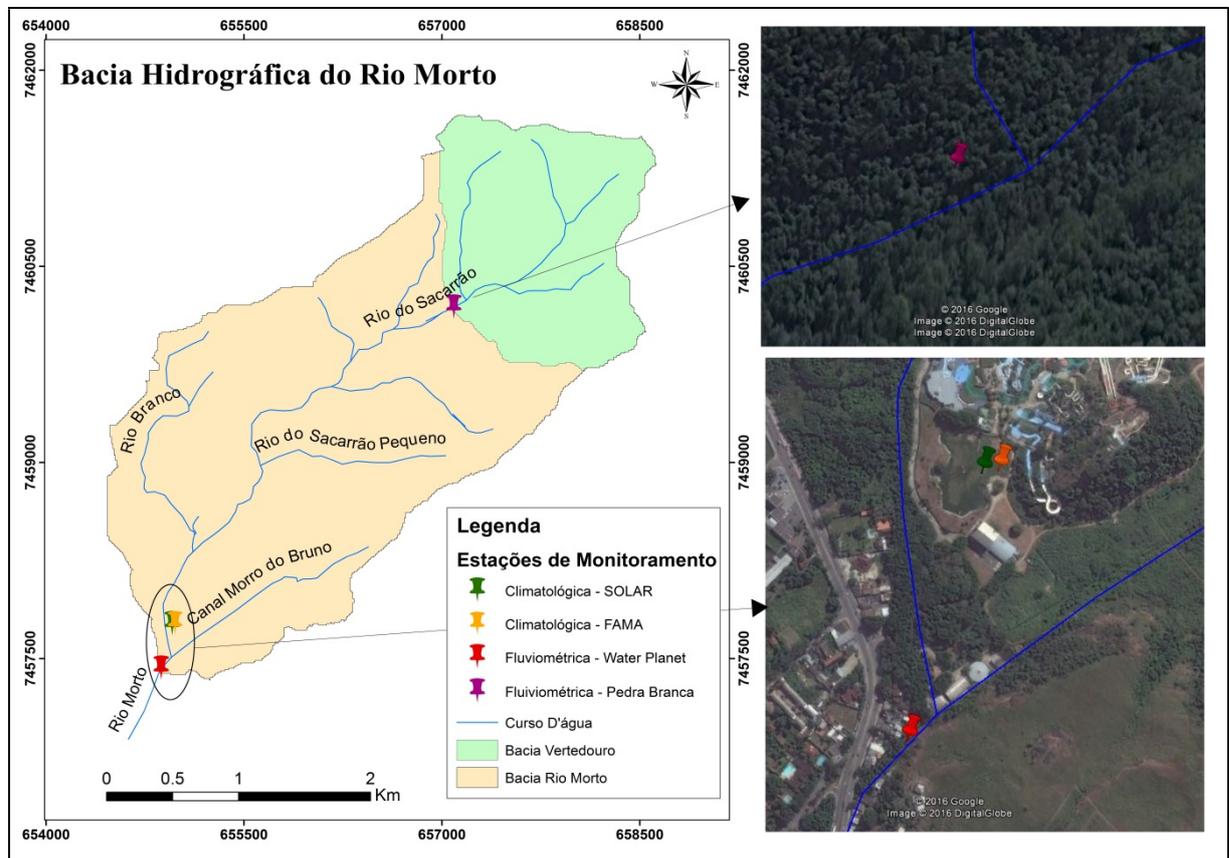
Conforme Calheiros (2006), o clima da região da baixada de Jacarepaguá, segundo classificação de Köppen-Geiger, enquadra-se no grupo “A” (clima tropical) variando aos tipos Af (clima tropical quente e úmido sem estação seca) e Aw (clima tropical quente e úmido, com verão úmido e inverno seco). Esta variação ocorre, sobretudo, devido ao contraste da topografia entre a área de planície e as encostas das montanhas, além da proximidade do mar. A precipitação média anual na região é de 1116,4mm e a temperatura média anual do ar igual a 24,6 °C (SOARES, 1999).

Por se tratar de um local com clima tropical úmido, a maior ocorrência de chuvas acontece durante os meses de verão, onde verifica-se a maior incidência de chuvas e transbordamento dos rios (PIRES DA SILVA, 2010), embora uma das grandes enchentes registradas na região tenha ocorrido no mês de abril em 2010.

### 2.1.6 Monitoramento Climatológico e Hidrológico

O monitoramento climatológico e hidrológico na bacia do rio Morto iniciou-se em 2008, face aos objetivos traçados pelo projeto HIDROCIDADES. Dentro dos limites da bacia, mais especificamente dentro do Parque de Águas, foi instalada uma estação climatológica completa e, depois em 2014, uma segunda estação, também completa, foi instalada próxima à outra. Os registros ocorrem a cada 5 minutos, compatíveis com os registros fluviométricos. A Figura 13 apresenta a localização das estações de monitoramento na bacia.

Figura 13 – Estações de monitoramento na bacia hidrográfica do rio Morto



Fonte: O Autor, 2017.

As estações climatológicas estão localizadas próximo ao exutório da bacia, Parque de Águas Rio *Water Planet*, sendo nomeadas SOLAR (Modelo: SL 2000/Fabricante: SOLAR) que ficou em operação entre 2008 e 2016, e a denominada FAMA (Modelo: Vantage Pro 2/Fabricante: DAVIS), instalada em 2015. A Figura 14 apresenta a configuração de cada estação climatológica.

Cada estação conta com um painel solar para fornecimento de energia e um Datalogger<sup>2</sup> para registros dos dados monitorados, que são: alturas pluviométricas, temperaturas médias, radiação solar, velocidade dos ventos, direção dos ventos, umidade relativa e pressão atmosférica. Estas variáveis irão permitir o cálculo da evapotranspiração, dado de entrada necessário para simulações no modelo SWMM. Em 2015 foi também instalado ao lado das estações climatológicas um tanque evaporimétrico tipo classe A.

Figura 14 – Estação Climatológica SOLAR e FAMA, respectivamente, no Parque Aquático Rio *Water Planet*



Fonte: AMARAL, 2014.

Amaral (2014) alerta que a ocupação urbana verificada nas proximidades do monitoramento pode interferir nas temperaturas, velocidade e direção do vento. Além disso, o relevo e vegetação do maciço da Pedra Branca influenciam a incidência de radiação solar, temperaturas e a variação espacial das chuvas.

Além das estações climatológicas e do tanque evaporimétrico, foi instalada, uma estação pluviométrica dentro dos limites do Parque Estadual da Pedra Branca, nas cotas altimétricas mais altas, e duas estações fluviométricas, que vêm em operação desde 2008 – rios Sacarrão e Morto. As estações foram localizadas de forma a controlar os escoamentos que deixam a parte mais preservada da bacia (rio Sacarrão), dentro do Parque Estadual da Pedra Branca, cerca de 2 km<sup>2</sup> de área de drenagem (denominada “Pedra Branca”); e a outra, a jusante que controla todo o escoamento, com área de drenagem de aproximadamente 9 km<sup>2</sup> (denominado “Water Planet”), no Rio Morto. O Rio Sacarrão é o principal afluente do Rio Morto pela margem direita (drena cerca de 6 km<sup>2</sup> até desaguar no Rio Morto já nas proximidades da Estrada dos Bandeirantes. Em ambos os postos fluviométricos foram

<sup>2</sup> Equipamento que coleta e armazena dados de outros instrumentos a partir de um sistema de contagem de pulsos eletrônicos.

instalados linígrafos automáticos e réguas fluviométricas, de fabricação da HIDROMEC, para registros dos níveis d'água, armazenados a cada 5 minutos. Na estação Pedra Branca, foi construído um vertedor de seção retangular (Figura 15), e as vazões são calculadas pela aplicação da equação teórica para o vertedor. Já na estação “Water Planet” são realizadas periodicamente medições de vazão com o uso de um ADV- *Flow Tracker* de fabricação da Sontek (Medidor Acústico de Velocidades na versão em Português), e pelo método da curva-chave foi obtida a série de vazões em intervalos de tempo de cinco minutos. A seguir, será apresentada a curva-chave da bacia do rio Morto e a metodologia utilizada para sua obtenção. A Figura 16 apresenta a estação fluviométrica instalada próxima ao exutório da bacia.

Figura 15 – Vertedouro de seção retangular instalado no Rio Sacarrão (Parque Estadual da Pedra Branca)



Fonte: LUZ JÚNIOR, 2016.

Figura 16 – Estação fluviométrica (Water Planet) instalada no rio Morto, próxima do exutório da bacia



Fonte: Acervo Projeto HIDROCIDADES.

A organização dos dados climatológicos e hidrológicos foi feita em planilhas MS Excel, compreendendo os anos de 2008 a 2015. Em função dos objetivos traçados neste projeto, considerou-se apenas o posto fluviométrico no exutório da bacia de estudo. Dentro do contexto do Projeto HIDROCIDADES, outros monitoramentos foram realizados na bacia como, por exemplo, levantamento de seções topobatimétricas e dados topográficos, obtenção de parâmetros físico-hídricos do solo e qualidade das águas, e dados de uso e ocupação do solo.

#### 2.1.7 Base de Dados Espaciais da Bacia do Rio Morto

A base cartográfica constituída para estes estudos foi obtida em estudos anteriores, sobretudo Rosa (2002) e Amaral (2014). Amaral realizou a implementação da base de dados espaciais da Bacia Hidrográfica do Rio Morto para fins de aplicação do modelo hidrológico SWMM. A base de dados formada por Amaral tomou por base Rosa (2002) e Pimentel da Silva *et al.* (2010), tendo como referência os dados espaciais levantados pelo Instituto Pereira Passos em 1999 na escala de 1:10.000 e 1:2.000 (na região de baixada), ortofotos obtidas no

mesmo levantamento, e ortofotos mais recentes cedidas pela Rio Águas, que já incluíam a nova topografia do trecho correspondente da Estrada dos Bandeirantes, após obras de alargamento e urbanização concluídas em 2013. A base é composta, sobretudo, pelas curvas de nível, hidrografia e contorno da bacia hidrográfica. Amaral (2014) promoveu a divisão espacial da bacia em 43 elementos de drenagem, de acordo com a topografia da região, e o levantamento preliminar das características físicas de cada sub-bacia/elemento de drenagem. A Figura 17 apresenta a bacia do rio Morto dividida em 43 sub-bacias, adotados no desenvolvimento desta dissertação.

Figura 17 – Elementos de drenagem da bacia do rio Morto (total de 43)



Fonte: AMARAL, 2014.

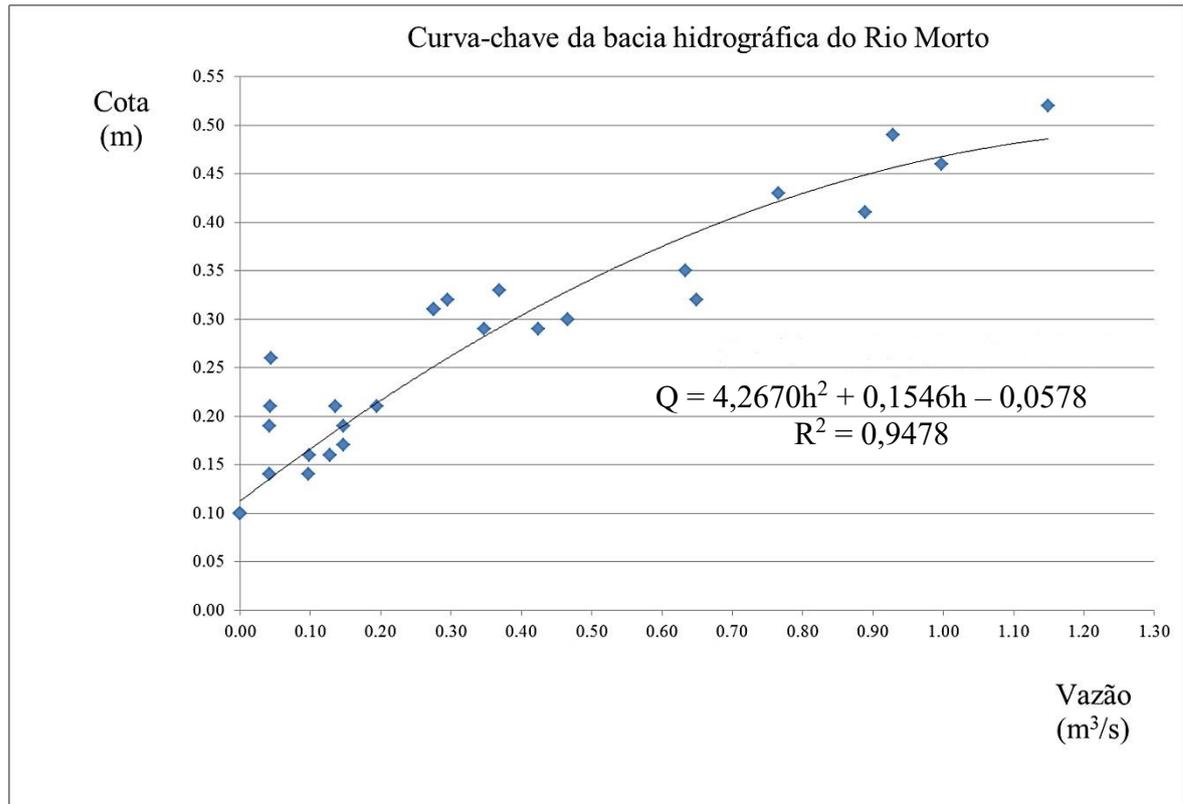
### 2.1.8 Série histórica de vazão

Para geração da série histórica de vazão, dos anos de 2008 a 2015, utilizou-se a versão atual da curva-chave da bacia do rio Morto, representada na Figura 18. Os dados medidos (observados) de cota (h) e vazão (Q) na seção fluviométrica do Rio Morto compreenderam o

período de 20/03/2009 a 13/08/2015. A equação gerada representa um polinômio de segundo grau com coeficiente de determinação igual à 0,9478, que corresponde a um bom ajuste.

Em virtude de algumas limitações, não foi possível medir dados de cota e vazão durante cheias expressivas. A partir da Figura 18, observa-se que a maior cota e vazão medida nesta seção fluviométrica foi de 0,52 m e 1,18 m<sup>3</sup>/s, respectivamente.

Figura 18 – Curva-chave da seção fluviométrica “Water Planet” no rio Morto



Fonte: Acervo de documentos do Projeto HIDROCIDADES.

Apesar da curva-chave obtida para a bacia do rio Morto apresentar um bom ajuste, conforme o valor encontrado para o coeficiente de determinação, deve-se ressaltar sua fragilidade por ser uma função polinomial de grau 2 na qual, a partir de um determinado instante, há inversão da tendência da curva. Os eventos selecionados para realizar a calibração do modelo SWMM atenderam ao valor limite máximo de vazão correspondente à maior cota fluviométrica observada na bacia, ressaltando-se que não houve extrapolação da curva-chave.

### 2.1.9 Série histórica de evapotranspiração

O cálculo da evapotranspiração na bacia do rio Morto será baseado no método de Hargreaves, apresentado pela FAO – *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (ALLEN *et al.*, 1998). O método calcula especificamente a evapotranspiração de referência a partir dos dados médios, máximos e mínimos de temperatura do ar, e da radiação solar extraterrestre. A expressão geral para o cálculo da evapotranspiração diária, pelo método de Hargreaves é dada pela Equação 2.

$$ET_o = 0.0023(T_{médica} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5}R_a \quad (2)$$

Onde:

$ET_o$  = evapotranspiração de referência, em mm/d;

$T_{médica}$  = temperatura média diária do ar, em °C;

$T_{max}$  = temperatura máxima diária do ar, em °C;

$T_{min}$  = temperatura mínima diária do ar, em °C;

$R_a$  = radiação extraterrestre, em mm/d.

A radiação solar extraterrestre ( $R_a$ ) pode ser estimada por meio da Equação 3.

$$R_a = (24 \times 60/\pi)dr \times G_{sc}[\omega s \times \sin \Phi \times \sin \delta + \cos \delta \times \cos \Phi \times \sin \omega s] \quad (3)$$

Sendo:

$R_a$  = radiação extraterrestre, em MJ/m<sup>2</sup>.d;

$G_{sc}$  = constante solar, igual a 0.0820 MJ/m<sup>2</sup>.min;

$\omega s$  = ângulo solar, em rad;

$\Phi$  = latitude, em rad;

$\delta$  = declinação solar, em rad;

$dr$  = distância relativa da Terra ao Sol, em mm/d.

Para obtenção da  $R_a$  foram considerados a latitude da estação climatológica SOLAR e os valores dos Dias Julianos (contagem dos dias de forma corrida em um ano) para o período considerado na estimativa da evapotranspiração. Ressalta-se que para transformar  $R_a$  de

MJ/m<sup>2</sup>.d para mm/d basta multiplicar o valor obtido por 0,408. As equações que determinam as variáveis da Equação 3 estão detalhadas em Allen *et al.* (1998).

Para os períodos em que as estações climatológicas da bacia do rio Morto apresentaram falhas de monitoramento, foram utilizados os dados horários de temperatura registrados pela estação Marambaia, operada pelo INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Esta estação climatológica está a 9 m de altitude e dista, aproximadamente, 13 km das estações climatológicas instaladas na bacia do rio Morto.

## 2.2 O Modelo SWMM

O modelo SWMM – *Storm Water Management Model* foi desenvolvido pela primeira vez em 1971 pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*United States Environmental Protection Agency – U.S. EPA*) e desde então vem sofrendo diversas atualizações, sendo a Versão 5.1 a mais atual (ROSSMAN, 2015). Este programa computacional é de domínio público e tem seu código de programação aberto, o que possibilitou, por exemplo, sua integração com o ambiente SIG e CAD. Nesta dissertação foi aplicada a Versão 5.1.010, que corresponde a uma extensão da versão 5.1.

O SWMM é um modelo chuva-vazão capaz de simular a quantidade e qualidade do escoamento superficial de um único evento chuvoso ou de um evento de longo prazo (contínuo) em bacias especialmente urbanas. Entretanto, Bastos (2007) destaca que o modelo apresenta-se como ferramenta importante para o gerenciamento e planejamento da drenagem pluvial em bacias rurais e periurbanas.

O SWMM apresenta uma série completa de ferramentas capazes de simular todos os aspectos da drenagem urbana, que vão desde a representação de todos os processos envolvidos na transformação chuva-vazão até a análise da qualidade das águas do escoamento superficial na bacia. Além disso, propicia a projeção dos sistemas de drenagem das águas pluviais e sistemas coletores de águas residuárias (unitários ou mistos), bem como dispositivos de controle e tratamento das águas do escoamento superficial.

Em relação à drenagem urbana, o SWMM considera uma série de fluxos e materiais entre quatro compartimentos ambientais (ROSSMAN, 2015). Tais compartimentos incluem:

- 1) Atmosfera: geração da precipitação e depósito de poluentes na superfície terrestre;
- 2) Superfície Terrestre: recebe a precipitação da atmosfera na forma de chuva ou neve, transformando-a em evaporação, infiltração e escoamento superficial e cargas poluidoras;
- 3) Água Subterrânea: recebe a infiltração da superfície e transfere parte deste fluxo para o compartimento transporte;
- 4) Transporte: composto por elementos de transporte (canais, tubos, bombas e reguladores) e unidades de armazenamento/tratamento que conduzem o fluxo para descarga final ou sistema de tratamento. As entradas deste compartimento provêm do escoamento superficial, fluxo subterrâneo, esgoto sanitário ou hidrograma definido pelo usuário.

Devido à facilidade de uso e as diversas ferramentas oferecidas, o modelo SWMM tem sido bastante utilizado em escala mundial para diversos estudos e projetos, fornecendo subsídios para a gestão das águas pluviais. De acordo com UFPB (2012), as aplicações mais usuais são:

- Concepção e dimensionamento de componentes da rede de drenagem para controle de inundações;
- Dimensionamento de estruturas de retenção e acessórios para o controle de inundações e a proteção da qualidade das águas;
- Delimitação de zonas de inundação em leitos naturais;
- Concepção de estratégias de controle para minimizar o transbordamento de sistemas unitários e mistos;
- Avaliação do impacto de contribuições e infiltrações sobre o transbordamento de sistemas de drenagem de águas residuárias;
- Geração de poluição difusa para estudos de lançamento de efluentes (carga de contaminantes);
- Avaliação da eficácia das BMPs para reduzir o carreamento de poluentes durante a chuva.

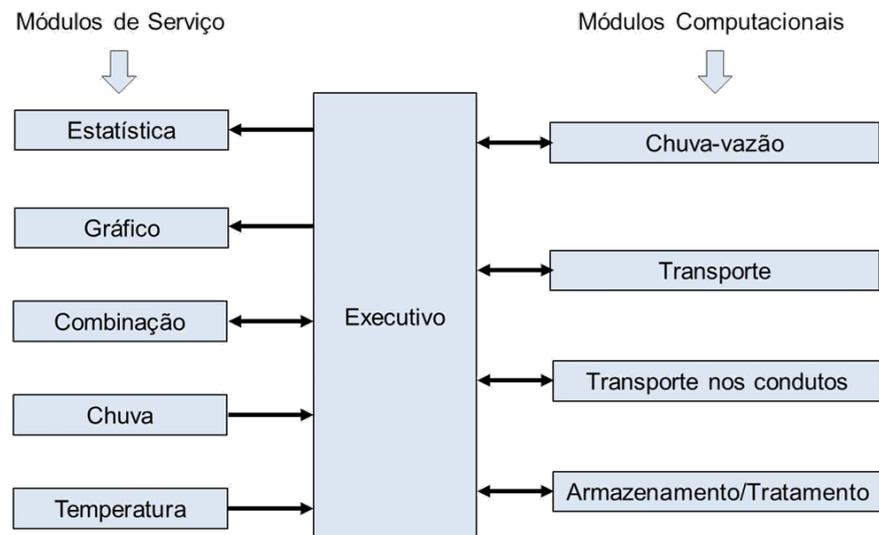
### 2.2.1 Descrição dos Módulos

Huber & Dickinson (1992) apresentam uma visão geral da estrutura do modelo SWMM, que é composta por seis módulos de serviço e quatro módulos computacionais, conforme mostra a Figura 19.

Os módulos computacionais são responsáveis pelas principais etapas de cálculo e incluem: o módulo Chuva-vazão (*Runoff*), responsável pela geração do escoamento superficial e subsuperficial com base na definição de um hidrograma, condições antecedentes de umidade do solo, uso do solo e topografia; o módulo Transporte (*Transport*), que trata da propagação do escoamento na rede de drenagem segundo o conceito de onda cinemática; o módulo Transporte nos Conduitos (*Extran*), que considera os fenômenos mais complexos no escoamento em condutos e canais, incluindo o escoamento sob pressão; o módulo Armazenamento/Tratamento (*Storage/Treatment*), que caracteriza os efeitos dos dispositivos de controle da vazão e qualidade da água.

Os módulos de serviço auxiliam os módulos computacionais, e são compostos por: o módulo Estatístico (*Estatistics*), que possui diversas funções tais como avaliação dos resultados da simulação para o passo de tempo estabelecido e classificação de eventos de acordo com algum critério adotado (e.g. vazão de pico e carga poluidora); o módulo Gráfico (*Graph*), que trata da representação dos resultados de séries temporais na forma de gráficos; o módulo Combinação (*Combine*), que agrega resultados de várias execuções anteriores para entrada em módulos subsequentes; os módulos Chuva (*Rain*) e Temperatura (*Temp*), que tratam da organização dos dados de precipitação e temperatura, respectivamente; o módulo Executivo (*Executive*), que dentre suas inúmeras funções é responsável pela geração de arquivos de saída, verificação dos erros de entrada e controle da sequência dos módulos a serem executados.

Figura 19 – Relação entre os módulos do SWMM



Fonte: Adaptado de HUBER & DICKINSON, 1992.

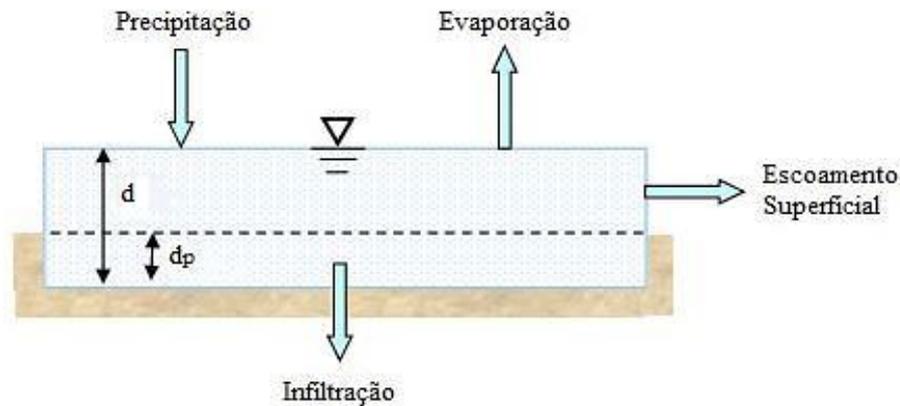
Como o objetivo desta dissertação é simular a geração de vazão para determinado evento pluviométrico e, posteriormente, avaliar o efeito da implantação de Telhado Verde na bacia hidrográfica do rio Morto, torna-se necessário à apresentação das equações e conceitos dos processos utilizados pelo modelo SWMM. Desta forma, as equações utilizadas para geração e propagação do escoamento superficial serão apresentadas nos itens a seguir.

### 2.2.2 O Módulo Chuva-Vazão (*Runoff*)

O SWMM permite que a área de estudo seja dividida em sub-bacias a fim de representar de forma mais adequada a influência que a variação da topografia, rede de drenagem, cobertura do solo e características do solo tem na geração do escoamento (ROSSMAN; HUBER, 2016).

Desta forma, a vazão é calculada para cada sub-bacia considerando-a como um reservatório abstrato não linear, conforme esquema da Figura 20. Neste sistema, a entrada corresponde à precipitação (chuva ou neve) e as saídas são representadas pela infiltração, evaporação e escoamento superficial (*runoff*). A capacidade do reservatório é definida por “d” e o valor máximo do armazenamento em depressões -  $d_p$ , (devido à interceptação nos telhados e plantas, alagamento e encharcamento dos solos superficiais). O escoamento superficial ocorre quando o nível d’água no reservatório excede o valor de  $d_p$ .

Figura 20 – Modelo de reservatório não linear



Fonte: Adaptado de ROSSMAN & HUBER, 2016.

### 2.2.2.1 Representação da variação de armazenamento no reservatório da superfície do solo

Considerando as condições adotadas pelo SWMM e que foram descritas anteriormente, o escoamento superficial em cada sub-bacia é obtido a partir de uma equação diferencial não linear (Equação 4), que se refere à combinação das Equações de Manning e do balanço de massa.

$$\frac{dd}{dt} = i - e - f - \alpha(d - d_p)^{5/3} \quad (4)$$

Onde:

$i$  = taxa de precipitação + neve (dado de entrada para o modelo);

$e$  = taxa de evaporação da superfície (dado de entrada para o modelo);

$f$  = taxa de infiltração (cálculo descrito a seguir);

$d$  = nível d'água no reservatório;

$d_p$  = altura do armazenamento em depressões ao longo da bacia;

$t$  = ao passo de tempo.

A variável  $\alpha$  é definida pela Equação 5:

$$\alpha = \frac{1.49WS^{1/2}}{An} \quad (5)$$

Onde:

$W$  = largura representativa da sub-bacia;

$S$  = declividade da sub-bacia;

$A$  = área da sub-bacia;

$n$  = coeficiente de rugosidade de Manning.

Uma vez que as variáveis  $i$ ,  $e$ ,  $f$ ,  $\alpha$  e  $d_p$  são conhecidas, a Equação 4 pode ser resolvida para valores de  $d$  desconhecidos, por meio do processo iterativo de Newton-Raphson. Tal processo é feito para cada passo de tempo estabelecido.

O SWMM considera que cada sub-bacia apresenta uma porção permeável e impermeável (com e sem armazenamento em depressões). O parâmetro porcentagem de área impermeável ( $A_i$ ), que deverá ser ajustado pelo usuário, irá determinar a parcela da área total da sub-bacia que corresponde a cada tipo de superfície. Assim, a Equação 4 é resolvida para cada tipo de área da sub-bacia, sendo que os resultados obtidos são combinados a fim de se obter o escoamento superficial total.

#### 2.2.2.2 Representação da Infiltração (“ $f$ ” da equação 4)

O SWMM permite ao usuário escolher um dentre quatro métodos de cálculo da infiltração: Horton, Horton modificado, Green-Ampt e Curva Número. Em todos os métodos, os parâmetros estão diretamente relacionados com o tipo e condição do solo. Além disso, a infiltração é calculada apenas para a porção permeável de cada sub-bacia, assumindo-se que a taxa de infiltração é sempre zero para a zona impermeável (com ou sem armazenamento em depressões). Desta forma, todos os parâmetros de infiltração são definidos apenas para a porção permeável da sub-bacia.

Neste estudo, foi escolhido o procedimento “Curva Número (CN)”, que baseia-se no método SCS (*Soil Conservation Service*, atualmente conhecido como *Natural Resource Conservation Service – NRCS*), utilizado para o cálculo do escoamento superficial e representado pela Equação 6 (ROSSMAN; HUBER, 2016).

$$Q_s = \frac{P^2}{P + S_{max}} \quad (6)$$

Onde:

$Q_s$  = escoamento superficial (*runoff*)<sup>3</sup>;

P = precipitação total acumulada;

$S_{max}$  = capacidade máxima de armazenamento no solo.

A capacidade máxima de armazenamento do solo da sub-bacia é obtida a partir do parâmetro empírico Curva Número, sendo expressa pela Equação 7. Durante os eventos de chuva, essa capacidade de retenção é alterada em função da chuva acumulada e da capacidade restante.

$$S_{max} = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (7)$$

No método formal do SCS, a Equação 6 é reescrita com P substituído por  $P - I_a$ , onde  $I_a$  se refere às perdas iniciais devido à interceptação, evaporação e armazenamento. Visto que o SWMM já considera essas perdas por meio da definição do parâmetro  $d_p$ , esta condição não é incluída nesta etapa. Assim, o modelo assume que toda a parcela da precipitação que não gera escoamento superficial infiltra e, então, a infiltração em cada passo de tempo é obtida pela diferença entre a precipitação total acumulada (P) e a vazão total (Q).

O valor de CN varia na escala de 0 (cobertura totalmente permável) a 100 (cobertura totalmente impermeável), embora raramente assumam esses valores limítrofes. Esta variação ocorre em função do tipo de solo, cobertura do solo e condições de umidade antecedente. Percebe-se que quanto maior o valor de CN, menor a capacidade de retenção de água e, consequentemente, maior será o volume escoado superficialmente.

O NRCS (1999) classificou os solos em quatro tipos (A, B, C e D) de acordo com sua capacidade de infiltração, conforme mostra o Quadro 4.

---

<sup>3</sup> Neste caso, é a parcela da precipitação que não infiltra.

Quadro 4 – Classificação hidrológica dos solos segundo o NRCS

Tipos de Solo	Características dos solos
Tipo A	Baixo potencial de escoamento superficial e alta capacidade de infiltração. Solos com menos de 10% de teor de argila e mais de 90% de teor de areia ou cascalho.
Tipo B	Moderado potencial de escoamento superficial e boa capacidade de infiltração. Solos com teor de argila entre 10% e 20%, e teor de areia entre 50% e 90%.
Tipo C	Alto potencial de escoamento superficial e capacidade de infiltração um pouco restrita. Solos com teor de argila entre 20% e 40%, e teor de areia inferior a 50%.
Tipo D	Elevado potencial de escoamento superficial e capacidade de infiltração muito restrita. Solos com teor de argila acima de 40% e teor de areia menor que 50%.

Fonte: Adaptado de NRCS, 1999.

Os valores de CN para áreas urbanas, suburbanas e rurais em função do tipo e uso/cobertura do solo podem ser encontrados em NRCS (2004). Quando as condições do solo na sub-bacia forem heterogêneas, o valor final de CN será a média ponderada dos CNs correspondentes às várias regiões em que se pode subdividir o elemento de drenagem.

O Quadro 5 apresenta os parâmetros do módulo “*runoff*” considerados durante a calibração do modelo SWMM.

Quadro 5 – Parâmetros utilizados no módulo *runoff*

Sigla	Parâmetro	Unidade
A	Área	ha
S	Declividade	%
W	Largura de escoamento da sub-bacia	M
Ai	Porcentagem de área impermeável	%
np	Coefficiente de rugosidade de Manning das áreas permeáveis	-
ni	Coefficiente de rugosidade de Manning das áreas impermeáveis	-
dp	Altura de armazenamento das áreas permeáveis	Mm
di	Altura de armazenamento das áreas impermeáveis	Mm
CN	Curva Número	-

Fonte: O Autor, 2017.

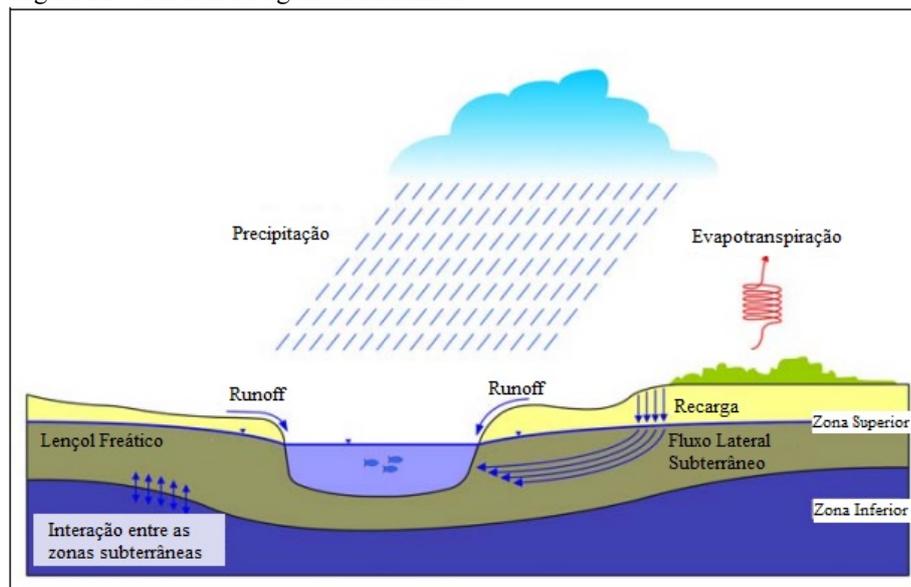
Os parâmetros área (A), declividade (S) e largura do escoamento da sub-bacia (W) são obtidos diretamente pela caracterização física de cada elemento da bacia hidrográfica. Os demais parâmetros devem ser ajustados até que os resultados gerados pelo modelo tenham uma boa aproximação com os dados observados. Os valores iniciais para estes parâmetros podem ser retirados da literatura.

### 2.2.2.3 Representação do Escoamento Subterrâneo

A simulação do escoamento subterrâneo no modelo SWMM ocorre a partir da definição do sistema de águas subterrâneas associado(s) a uma ou mais sub-bacias. Deste modo, a representação desses elementos tem por objetivo modelar o movimento vertical do fluxo devido à infiltração nas áreas permeáveis e, posteriormente, calcular a troca de fluxo subterrâneo com o sistema de drenagem ou estabelecer o escoamento de base (AUTODESK, 2013).

O sistema de águas subterrâneas é composto por uma zona insaturada (superior) e uma zona saturada (inferior). A Figura 21 apresenta de forma esquemática a estrutura deste sistema, bem como a interação entre os fluxos que envolvem este sistema, ou seja, precipitação, evapotranspiração, infiltração e fluxo lateral subterrâneo.

Figura 21 – Modelo de águas subterrâneas



Fonte: Adaptado de AUTODESK, 2013.

Os parâmetros a serem definidos e ajustados para caracterização do aquífero são: porosidade do solo, condutividade hidráulica, taxa de evapotranspiração, elevação da base, taxa de perda para o aquífero profundo, elevação inicial do lençol freático, teor de umidade inicial da zona insaturada.

A descarga do aquífero (fluxo lateral da zona saturada) é obtida pela Equação 8 (ROSSMAN; HUBER, 2016). A Figura 22 ilustra o fluxo  $f_G$ , que define o escoamento de base, e cada uma das profundidades utilizadas na equação 8.

$$f_G = A1. (d_L - h^*)^{B1} - A2. (h_{sw} - h^*)^{B2} + A3. d_L. h_{sw} \quad (8)$$

Onde:

$f_G$  = Fluxo do escoamento subterrâneo, em m<sup>3</sup>/s/ha;

$h_{sw}$  = Altura de água acima da zona inferior do aquífero, em m;

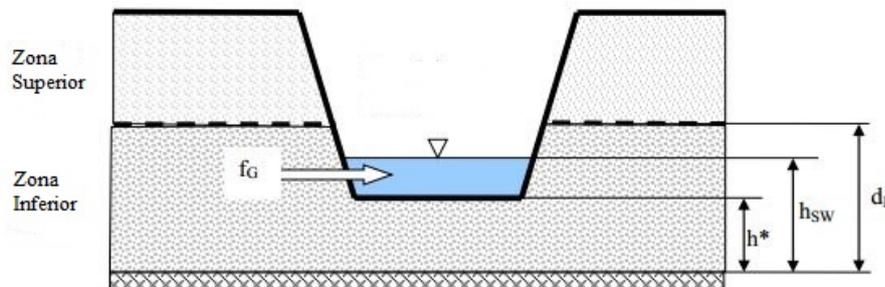
$h^*$  = Altura de referência do aquífero, em m;

A1, B1 = Coeficiente e expoente de fluxo subterrâneo, respectivamente;

A2, B2 = Coeficiente e expoente de fluxo superficial, respectivamente;

A3 = Coeficiente de interação aquífero-superfície.

Figura 22 – Alturas utilizadas para computar o fluxo subterrâneo



Fonte: Adaptado de ROSSMAN & HUBER, 2016.

Os Quadros 6 e 7 apresentam, respectivamente, os parâmetros associados ao armazenamento das águas subterrâneas e os parâmetros associados ao fluxo subterrâneo, ajustados na etapa de calibração do modelo SWMM.

Quadro 6 – Parâmetros associados ao armazenamento das águas subterrâneas

Parâmetro	Unidade
Porosidade	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>
Ponto de Murcha	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>
Capacidade de Campo	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>
Condutividade Hidráulica	mm/h
Declividade da Condutividade Hidráulica	Mm
Declividade da Curva de Retenção	Mm
Razão de Evaporação da Camada Superior	-
Profundidade da Evaporação da Camada Inferior	M
Taxa de Percolação	mm/h
Umidade da Zona não Saturada	-

Fonte: O Autor, 2017.

Quadro 7 – Parâmetros do fluxo subterrâneo

Sigla	Parâmetro
A1	Coefficiente de fluxo subterrâneo
A2	Coefficiente de fluxo superficial
A3	Coefficiente de interação aquífero-superfície
B1	Expoente de fluxo subterrâneo
B2	Expoente de fluxo superficial

Fonte: O Autor, 2017.

### 2.2.3 O Módulo Transporte nos Condutos (Extran)

O módulo Transporte nos Condutos (*Extran*) foi incorporado ao SWMM em 1976, sendo uma versão mais sofisticada do módulo Transporte (*Transport*) já que representa fenômenos mais complexos da propagação do escoamento na rede de drenagem tais como remanso e fluxo sob pressão (HUBER & DICKINSON, 1992). Este modelo hidrodinâmico utiliza as equações completas de *Saint Venant*, que são resolvidas a partir da técnica de solução explícita que avança no tempo, com intervalos de simulação que variam de 5 a 60 segundos (ROESNER *et al.*, 1988).

O modelo SWMM representa o sistema de drenagem com um conjunto de links e nós. Os links são responsáveis pela propagação do escoamento enquanto que os nós possuem

função de armazenamento, sendo a equação da quantidade de movimento e da continuidade aplicadas em cada elemento, respectivamente. A vazão ( $Q_t$ ) é computada ao longo da rede de drenagem a partir da Equação 9 (GARCIA, 2005).

$$Q_{t+\Delta t} = \frac{1}{1 + (g \cdot n^2 \cdot \Delta t) \frac{|V|}{R^{-4/3}}} \left\{ Q_t + 2 \cdot \bar{V} \left( \frac{\Delta A}{\Delta t} \right)_t + \bar{V}^2 \left[ \frac{(A_2 \cdot A_1)}{L} \right] \cdot \Delta t - g \bar{A} \left[ \frac{(H_2 \cdot H_1)}{L} \right] \cdot \Delta t \right\} \quad (9)$$

Onde:

$g$  = aceleração de gravidade, em  $m/s^2$ ;

$n$  = coeficiente de rugosidade de Manning;

$R$  = raio hidráulico, em  $m$ ;

$A$  = superfície da seção transversal do conduto, em  $m^2$ ;

$L$  = comprimento do conduto, em  $m$ ;

$H$  = cota piezométrica, em  $m$ ;

$V$  = velocidade no conduto, em  $m/s$ .

Os valores de  $R$ ,  $A$  e  $V$  correspondem às médias ponderadas no extremo de jusante do conduto no tempo  $t$  e os sub índices 1 e 2 referem-se aos extremos de montante e jusante no conduto, respectivamente. As incógnitas da equação são  $Q_{t+\Delta t}$ ,  $H_2$  e  $H_1$ , sendo que as variáveis  $R$ ,  $A$  e  $V$  podem ser relacionadas com  $Q$  e  $H$  por meio da equação da continuidade aplicada aos nós (Equação 10).

$$H_{t+\Delta t} = H_t + \sum \left( \frac{Q_t \cdot \Delta t}{A_{nt}} \right) \quad (10)$$

Onde:

$A_n$  = área superficial associada a cada nó, em  $m^2$ ;

Desta forma, a cada passo de tempo estabelecido, a Equação 10 determina a cota piezométrica em cada nó e pela Equação 9, a descarga em cada *link*.

No Quadro 8 são apresentados os parâmetros do módulo *extran*, ajustados na etapa de calibração do modelo SWMM.

Quadro 8 – Parâmetros utilizados no módulo extran

Sigla	Parâmetro
Nc	Coefficiente de rugosidade de Manning no leito do canal
Nl	Coefficiente de rugosidade de Manning na margem esquerda do canal
Nr	Coefficiente de rugosidade de Manning na margem direita do canal

Fonte: O Autor, 2017.

#### 2.2.4 O Módulo Armazenamento/Tratamento (Storage/Treatment)

Recentemente, a versão 5 do SWMM foi estendida para a versão 5.1.010, de modo a possibilitar a representação do desempenho hidrológico dos dispositivos de desenvolvimento de baixo impacto, responsáveis pela redução da vazão de pico e melhoria da qualidade das águas escoadas em bacias urbanas e periurbanas. O usuário tem a opção de escolher oito tipos diferentes de dispositivos LID para representar na área de estudo. Rossman (2015) descreve cada um deles:

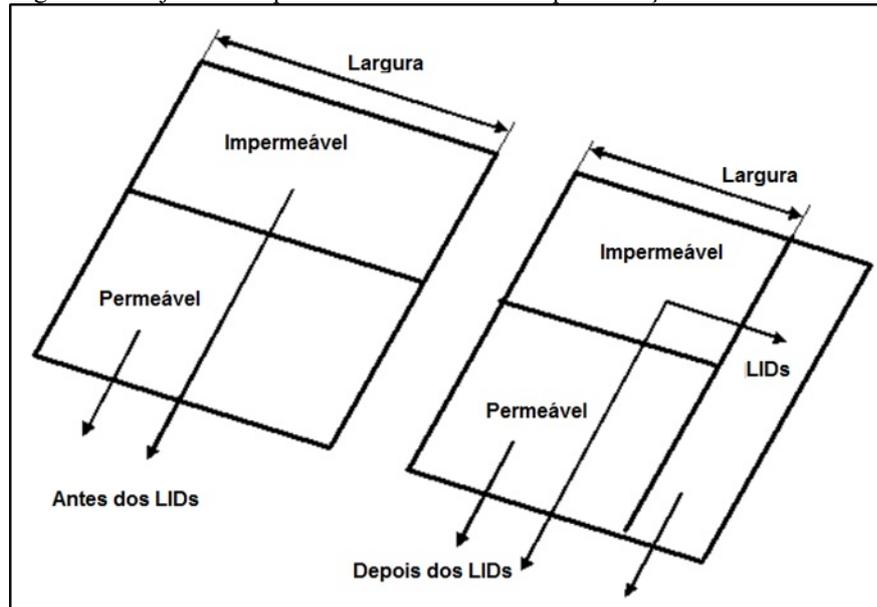
- Células de Biorretenção: depressões que contêm vegetação cultivada em uma mistura de solo colocada acima de uma camada de drenagem feita de cascalho. Fornecem o armazenamento, infiltração e evaporação da chuva que cai diretamente nesta área e do escoamento superficial de áreas vizinhas;
- Jardins de Chuva: tipo de célula de biorretenção, porém sem a camada de cascalho abaixo da mistura de solo;
- Telhados Verdes: cobertura vegetal feita com grama ou plantas, instalada sobre lajes ou telhados convencionais, que considera uma camada impermeabilizante e um material especial de drenagem abaixo da camada de solo;
- Trincheiras de Infiltração: valas estreitas preenchidas de cascalho que interceptam o escoamento de áreas impermeáveis. Fornecem o volume de armazenamento e o tempo adicional para o escoamento interceptado infiltrar no solo;
- Pavimento permeável: áreas escavadas preenchidas com cascalho e pavimentadas com uma mistura de concreto ou asfalto poroso. Geralmente, toda chuva passa do pavimento para camada inferior (de cascalho), onde poderá infiltrar a taxas naturais, de acordo com o tipo de solo;

- Barris de chuva (ou cisternas): reservatórios que coletam o escoamento gerado pelos telhados durante eventos de chuva, podendo liberar ou reutilizar a água da chuva durante períodos de seca;
- Calhas: lançam o escoamento captado em áreas verdes, ao invés de bueiros. Também podem modelar telhados a partir da ligação direta de drenos que conduzem o excesso de água para áreas permeáveis;
- Células vegetativas: canais ou áreas com depressão, que possuem as laterais inclinadas e cobertas com grama ou outro tipo de vegetação. Estas estruturas retardam o transporte do escoamento interceptado, permitindo mais tempo para infiltrar no solo.

O modelo SWMM permite inserir estes elementos de duas formas: colocar um ou mais dispositivos LIDs em uma sub-bacia já existente, substituir a mesma parcela de área da sub-bacia que não tenha controle LID ou criar uma nova sub-bacia exclusivamente para representar um único dispositivo. Na literatura tem-se observado o emprego da primeira opção que permite a combinação de vários dispositivos em uma mesma sub-bacia. Neste caso, o escoamento superficial a ser captado por estas estruturas provém das áreas impermeáveis, com exceção dos telhados verdes e calhas que tratam diretamente a precipitação que cai sobre estas superfícies.

Após inserir o(s) dispositivo(s) LID, a propriedade percentual de área impermeável e largura da sub-bacia podem exigir ajustes para compensar a quantidade de área sem LID substituída no novo cenário. A Figura 23 apresenta um esquema de como o modelo SWMM representa os dispositivos LID em cada sub-bacia.

Figura 23 – Ajustes dos parâmetros da sub-bacia após inserção dos controles LID



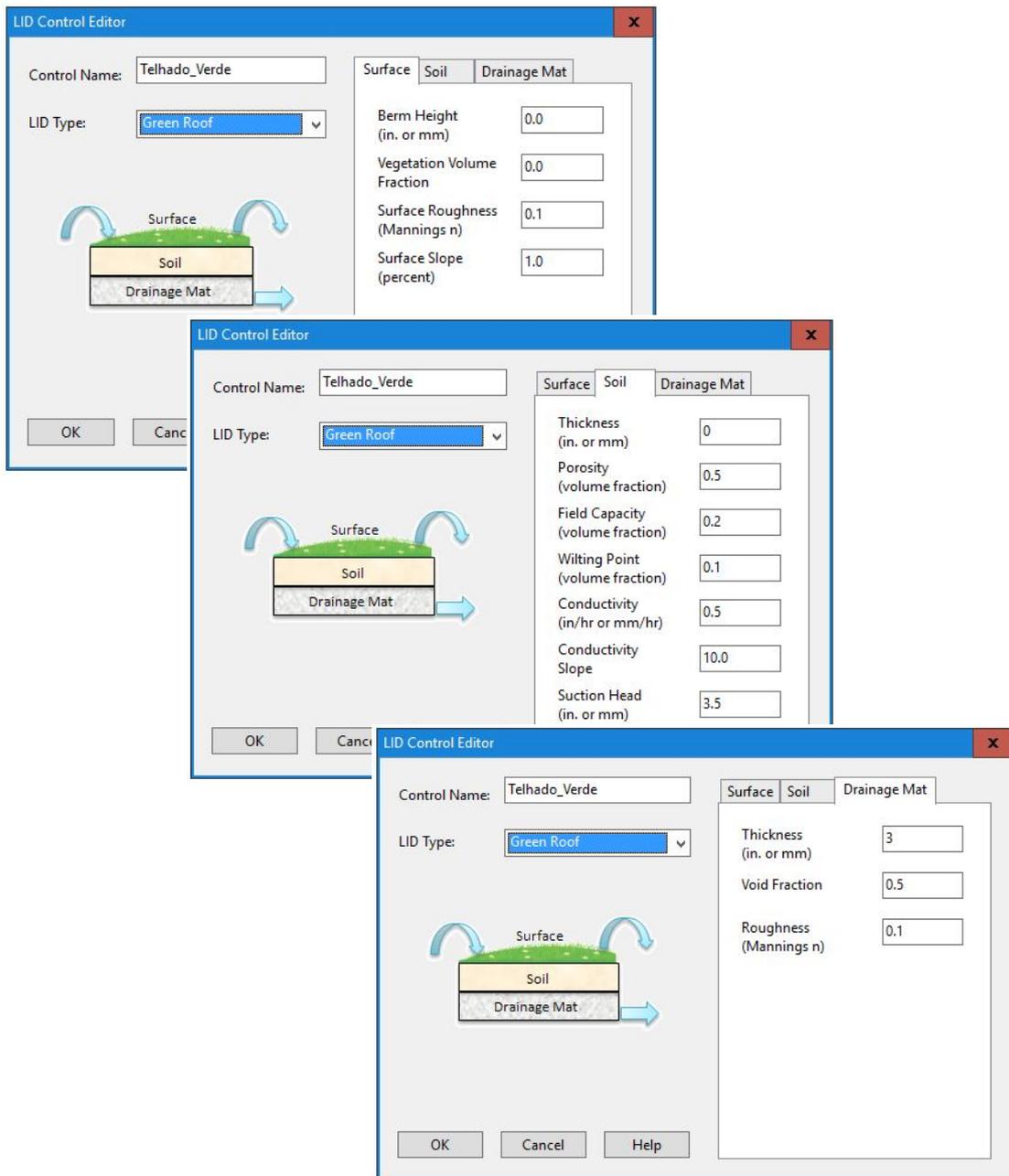
Fonte: Adaptado de ROSSMAN, 2015.

A seguir, é feita uma descrição da representação dos Telhados Verdes no modelo SWMM. Além disso, cada parâmetro de dimensionamentos dessa estrutura é listado e discutido.

#### 2.2.4.1 Telhados verdes

Primeiramente, utiliza-se o editor de controle LID (*LID Control Editor*) para definir o dispositivo de interesse e suas respectivas características. O design do controle LID é feito por unidade de área de base, de modo que possa ser colocado em qualquer sub-bacia em diferentes tamanhos ou número de repetições. A Figura 24 apresenta a janela de edição dos Telhados Verdes.

Figura 24 – Definição dos parâmetros do telhado verde



Fonte: A partir de uma das telas de entrada de dados do SWMM.

No SWMM, a estrutura do telhado verde é composta por três camadas: superfície, solo e drenagem. Para cada camada torna-se necessário a definição de parâmetros específicos, descritos a seguir com base em Rossman (2015).

Em relação à superfície, os parâmetros são: *profundidade de armazenamento* (polegadas (in) ou mm), que representa a altura máxima de armazenamento de água antes que ocorra o transbordamento; *fração do volume de vegetação*, que corresponde ao volume ocupado pelas folhas e caules, não sendo a área de cobertura da superfície; *coeficiente de*

*rugosidade de Manning*, que varia em função do tipo de superfície (e.g. solos cultivados e gramas); *declividade do telhado* (porcentagem).

Para a determinação das taxas de infiltração nos sistemas de telhados verdes, o SWMM adota a equação de infiltração de Green-Ampt (1911), conforme Equação 11.

$$T_i = K_o \left( 1 + \frac{\Psi(\theta_s - \theta_i)}{I} \right) \quad (11)$$

Onde:

$T_i$  = taxa de infiltração da água no solo, em mm/h;

$K_o$  = condutividade hidráulica do solo saturado, em mm/h;

$\Psi$  = sucção capilar média, em mm;

$\theta_s$  = umidade do solo na saturação, em  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;

$\theta_i$  = umidade inicial do solo, em  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;

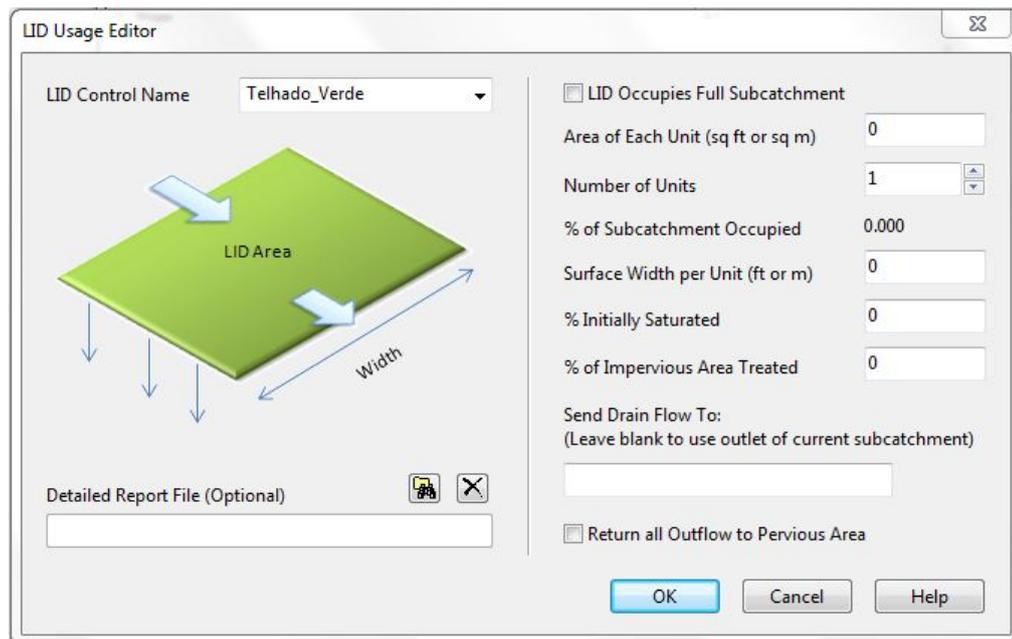
$I$  = infiltração acumulada, em mm.

Dessa forma, os parâmetros que definem o solo no modelo SWMM são: *espessura*, que para este tipo de dispositivo varia de 75 a 150 mm; *porosidade*; umidade à *capacidade de campo*; umidade no *ponto de murchar*; *condutividade hidráulica saturada* (in/h ou mm/h); *gradiente da curva de condutividade hidráulica*, que representa a inclinação da curva logarítmica (condutividade) versus o teor de umidade do solo, podendo ser estimado com base nas características do solo, a partir da expressão:  $0,48(\% \text{ areia}) + 0,85(\% \text{ argila})$ ; *sucção capilar* (in ou mm).

O sistema de drenagem, que transfere a água que drena através da camada de solo para fora do telhado, é caracterizado pela *espessura da camada drenante* (in ou mm), *fração de vazios*, variando de 0,5 a 0,6, e *coeficiente de rugosidade de Manning*, utilizado para calcular o fluxo horizontal na camada, com valores entre 0,1 (menos rugoso) e 0,4 (mais rugoso).

Após definir as propriedades do telhado verde, deve-se atribuir este dispositivo LID para a(s) sub-bacia(s) de interesse. A Figura 25 apresenta a janela que define como o dispositivo LID pode ser implantado na sub-bacia.

Figura 25 – Inserção do telhado verde na sub-bacia



Fonte: A partir de uma das telas de entrada de dados do SWMM.

Se o dispositivo LID ocupar toda a sub-bacia, a opção *LID Occupies Full Subcatchment* deverá ser marcada. Visto que os telhados verdes serão implantados apenas nas áreas de telhados do elemento de drenagem, então deve-se definir a *área de base de cada unidade* e o *número de unidades* a serem replicadas na sub-bacia. Após definir estes parâmetros, o modelo calcula automaticamente o *percentual da sub-bacia ocupada* por telhado verde.

A *largura de superfície* de cada unidade representa a largura de saída do escoamento de cada dispositivo. Este parâmetro aplica-se apenas para dispositivos que transportam o escoamento superficial para fora da unidade tais como os telhados verdes, pavimentos permeáveis e trincheiras e valas de infiltração. Para os outros dispositivos, pode ser definido como zero.

A *porcentagem de solo inicialmente saturada* pode variar de 0% (ponto de murcha) a 100% (totalmente saturado). Já a *porcentagem de área impermeável tratada*, que refere-se ao percentual da área impermeável que será tratada pela técnica LID, deve ser zero para o uso de telhado verde, uma vez que este dispositivo recebe diretamente a chuva.

A opção *Return all Outflow to Pervious Area* deverá ser marcada se o fluxo de saída do dispositivo LID for encaminhado para a área permeável da sub-bacia.

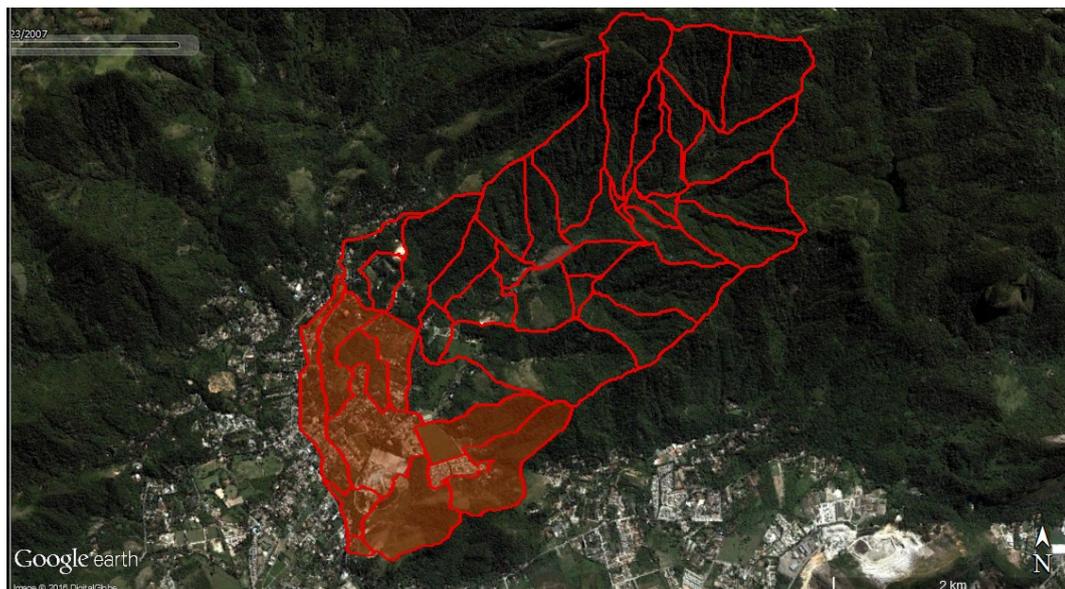
## 2.3 Aplicação do Modelo SWMM na Bacia do Rio Morto

### 2.3.1 Discretização da bacia do rio Morto

A aplicação do modelo SWMM exige que a bacia hidrográfica seja dividida em áreas homogêneas, denominadas sub-bacias ou elementos de drenagem. Baseado nisto, Amaral (2014) ao implementar o modelo SWMM na bacia do rio Morto, utilizou-se do Modelo Digital de Terreno (MDT) para definição dos limites das sub-bacias. Desta forma, a bacia do rio Morto foi dividida em 43 sub-bacias, de acordo com a topografia da região.

A partir dos estudos desenvolvidos por Amaral (2014), observou-se a necessidade de revisão da discretização da bacia do rio Morto, de forma a considerar, além da lógica topográfica e a topologia da rede de drenagem, as características de uso e ocupação do solo. Sobretudo, pelas motivações do estudo em analisar cenários com implementação de telhados verdes nas edificações, de forma a verificar o impacto na forma do hidrograma de vazões e no controle de enchentes. A Figura 26 apresenta a nova subdivisão da bacia, que foi realizada com o auxílio das Ortofotos cedidas pelo IPP e do software ArcGIS.

Figura 26 – Nova subdivisão da bacia hidrográfica do rio Morto, com destaque para os elementos alterados



Fonte: O Autor, 2017.

A discretização original da parte montante da bacia foi preservada e apenas os elementos mais próximos do exutório foram alterados, conforme destacados na Figura 26.

Ainda assim, a bacia hidrográfica do rio Morto ficou dividida em 43 elementos de drenagem, como adotado por Amaral (2014), a partir de Rosa (2002).

### 2.3.2 Calibração e validação dos parâmetros do SWMM

Para os parâmetros que não são passíveis de determinação direta por meio de medidas em mapas ou caracterização física das sub-bacias, a calibração foi feita pelo método da tentativa e erro, calibração manual, onde os valores dos parâmetros são gradativamente variados, individualmente (cada um de uma vez) ou simultaneamente. A calibração dos parâmetros para a bacia do rio Morto foi precedida de estudo e análise de sensibilidade dos parâmetros. Foram também considerados os valores atribuídos aos parâmetros em outras aplicações do SWMM em bacias hidrográficas brasileiras (NUNES *et al.*, 2015). A revisão de literatura promovida por Nunes *et al.* (2015) revelaram que a maior parte das aplicações do SWMM dizem respeito à simulação do escoamento superficial em bacias com urbanização plena e consolidada, que se distingue desta aplicação, em área de paisagem periurbana.

Os valores atribuídos aos parâmetros do SWMM também para a bacia do rio Morto em Amaral (2014), serviram como ponto de partida na calibração dos parâmetros. No entanto, Amaral considerou uma versão anterior de curva-chave, e que teve os trechos superiores extrapolados. Nesse estudo, foram selecionados eventos que conformavam exclusivamente trechos com vazões observadas, incluindo um maior número de medições de descarga do que a versão adotada por Amaral (2014). O estudo da mesma autora revelou também que a inicialização das variáveis de estado influenciam de forma importante os escoamentos. Destaca-se nesta bacia de características periurbanas, a relevância maior dos parâmetros que interferem no cálculo do escoamento de base apresentados nos Quadros 6 e 7, que respectivamente, apresentam os parâmetros que caracterizam o armazenamento e os fluxos das águas subterrâneas.

Para a calibração foram escolhidos dois períodos de aproximadamente 30 dias, para eventos com registros de valores máximos observados e também durante a estiagem, que pudessem cobrir a amplitude dos valores das vazões medidas. O processo de calibração priorizou o ajuste de um conjunto de parâmetros comum aos dois eventos escolhidos. Então, os parâmetros foram variados um a um, e foram avaliados os ajustes. Com o auxílio das ferramentas do MS Excel foram elaborados os hidrogramas das vazões observadas e

calculadas para analisar visualmente a aproximação entre as vazões calculadas pelo SWMM e as vazões observadas. Além disso, foram usados como indicadores de qualidade de ajuste o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), tendência percentuais bias (PBIAS) e equação da razão RMSE (RSR), conforme recomendado por Moriasi *et al.* (2007), além do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), de aplicação relevante na avaliação da eficiência do modelo hidrológico SWMM (BASTOS, 2007; CAMPOS, 2009; FARIA, 2013; AMARAL, 2014). A descrição destes coeficientes está apresentada na Tabela 1, no Capítulo 1 desta dissertação.

Após a etapa de calibração, procedeu-se à validação dos parâmetros do modelo. Neste caso, foram selecionados outros eventos (distintos dos usados na calibração), simulando-se as vazões conforme os procedimentos do SWMM. Foram então inferidos os indicadores de ajuste entre as vazões simuladas e as observadas. Nos casos em que o resultado da validação não foi satisfatório, retornou-se ao processo de calibração para aprimoramento dos ajustes feitos anteriormente. Os indicadores de qualidade dos ajustes foram os mesmos utilizados para calibração do modelo.

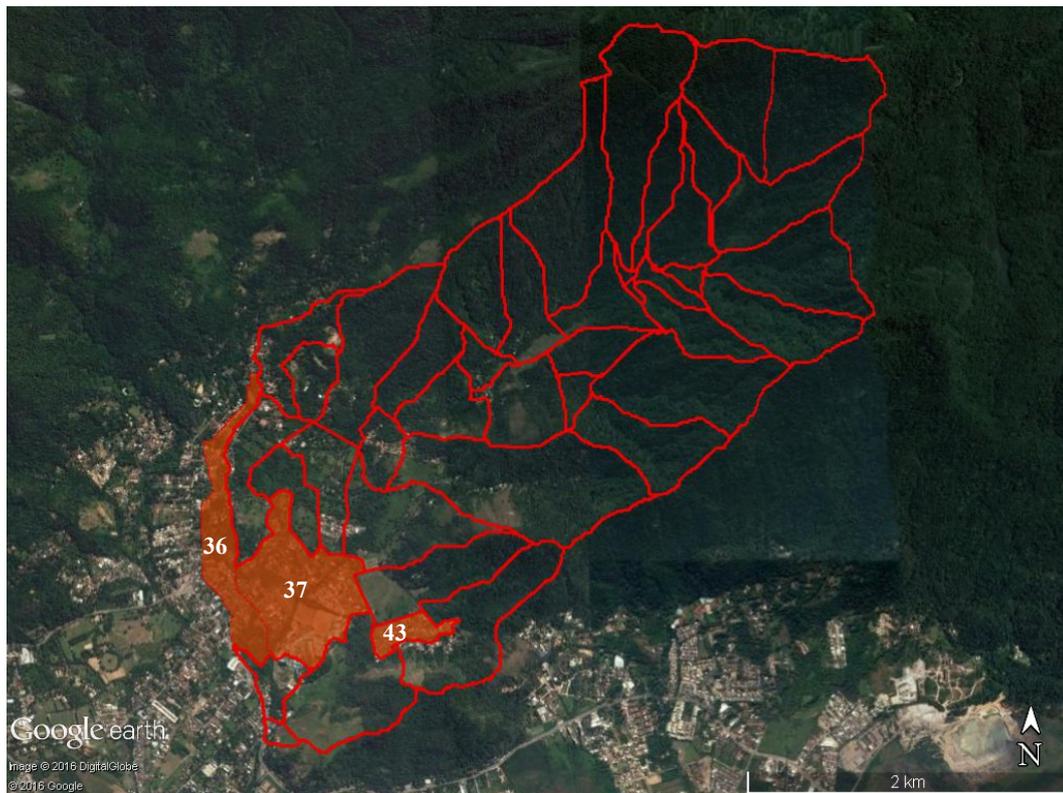
Ressalta-se que os parâmetros ajustados na etapa de calibração do modelo SWMM, estão apresentados nos Quadros 5 a 8, de acordo com a descrição dos módulos do modelo.

### 2.3.3 Cenários Estudados no SWMM para a Bacia do Rio Morto

Os cenários estudados no SWMM para a bacia do rio Morto consideram: 1) a situação atual da bacia; 2) a implantação de telhado verde para redução do escoamento superficial. O evento pluviométrico considerado nas simulações refere-se à Abril de 2010, caracterizado pela ocorrência de cheia emblemática na região.

O cenário 2 considera a implantação de telhado verde na parte baixa da bacia, onde verifica-se um processo crescente de urbanização com presença considerável de condomínios residenciais e assentos informais. A Figura 27 destaca os elementos de drenagem considerados neste cenário.

Figura 27 – Destaque para as sub-bacias 36, 37 e 43, consideradas no cenário com implantação de telhado verde



Fonte: O Autor, 2017.

A partir das ortofotos da bacia do rio Morto e das ferramentas do software ArcGIS 10.1 foram traçadas e contabilizadas as áreas de telhado em cada sub-bacia de interesse. O objetivo de tal análise é computar a porcentagem de área impermeável (telhado) da sub-bacia a ser substituída por telhado verdes em simulações virtuais.

A estrutura de telhados verde hipoteticamente consideradas na simulação refere-se ao telhado extensivo. Como já dito anteriormente, o telhado verde é representado por três camadas no modelo SWMM. A definição dos parâmetros de cada camada teve como referência os trabalhos desenvolvidos por Loiola (2015), Garrido Neto (2016), Jato-Espino *et al.* (2016) e Krebs *et al.* (2015). Também foram utilizados os valores de referência apresentados no manual do SWMM (ROSSMAN, 2015). O Quadro 9 lista os valores dos parâmetros utilizados pelos autores que fizeram uso do modelo SWMM para simulação de telhado verdes, além dos valores de referência consultados no manual do modelo. Ressalta-se que os trabalhos de Loiola *et al.* (2015) e Garrido Neto (2016) consistiram no estudo experimental deste dispositivo.

Quadro 9 – Valores dos parâmetros relacionados às telhado verdes

Superfície	Krebs <i>et al.</i> (2015)	Jato-Espino <i>et al.</i> (2016)	Rossmann (2015)
Profundidade de armazenamento (mm)	30	-	-
Fração do volume de vegetação	0.1	0.5	0.1 - 0.2
Coefficiente de rugosidade de Manning	0.168	0.15	0.011 - 0.80
Declividade do telhado (%)	8	-	-
<b>Solo</b>			
Espessura (mm)	100	100	75 – 150
Porosidade (fração de volume)	0.41	0.5	-
Capacidade de campo (fração de volume)	0.29	0.2	-
Ponto de murcha (fração de volume)	0.02	0.1	-
Condutividade hidráulica (mm/h)	37.9	12.7	-
Inclinação da condutividade	40	10	30 – 60
Sucção capilar (mm)	61.3	88.9	-
<b>Camada de Drenagem</b>			
Espessura (mm)	3.8	10	25.4 - 50.8
Fração de vazios	0.41	0.75	0.5 - 0.6
Coefficiente de rugosidade de Manning	0.01	0.03	0.1 - 0.4

Fonte: O Autor, 2017.

Em relação aos parâmetros porosidade, capacidade de campo, ponto de murcha, condutividade hidráulica e sucção capilar, Rossmann (2015) destacou valores típicos para cada tipo de solo da literatura típica sobre a equação de infiltração de Green-Ampt, conforme destacado no Quadro 10.

Quadro 10 – Valores típicos para cada classe de textura do solo da literatura sobre a equação de Green-Ampt

Classe de Textura do Solo	K	$\Psi$	$\phi$	FC	WP
Arenoso	120.40	49.02	0.437	0.062	0.024
Areia franca	29.97	60.96	0.437	0.105	0.047
<b>Franco-arenosa</b>	<b>10.92</b>	<b>109.98</b>	<b>0.453</b>	<b>0.19</b>	<b>0.085</b>
Franca	3.30	88.90	0.463	0.232	0.116
Franco-siltosa	6.60	169.93	0.501	0.284	0.135
Franco-argilo-arenosa	1.52	219.96	0.398	0.244	0.136
Franco-argilosa	1.02	210.06	0.464	0.31	0.187
Franco-argilo-siltosa	1.02	270.00	0.471	0.342	0.21
Argilo-arenosa	0.51	240.03	0.43	0.321	0.221
Argilo-siltosa	0.51	290.07	0.479	0.371	0.251
Argilosa	0.25	320.04	0.475	0.378	0.265

K = condutividade hidráulica, em mm/hr;  $\Psi$  = sucção capilar, em mm;  $\phi$  = porosidade, fração; FC = capacidade de campo, fração; WP = ponto de murcha, fração.

Fonte: Adaptado de ROSSMAN, 2015.

Os valores assinalados nos quadros anteriores foram aproximadamente os atribuídos ao telhado verde típico considerado nas simulações de cenários nesta pesquisa. Foi considerado hipoteticamente que o solo apresenta textura franco-arenosa, o Quadro 11 consolida os parâmetros definidos para o telhado verde típico considerado nas simulações do modelo SWMM. A declividade do telhado verde foi atribuída àquela típica dos telhados encontrados nas edificações existentes na Comunidade da Vila Cascatinha, representadas na sub-bacia de número 43, Figura 27 (conforme Loiola *et al.*, 2015).

Quadro 11 – Valores dos parâmetros do telhado verde considerados nas simulações do modelo SWMM

<b>Superfície</b>	
Profundidade de armazenamento (mm)	75
Fração do volume de vegetação	0.1
Coefficiente de rugosidade de Manning	0.24
Declividade do telhado (%)	6
<b>Solo</b>	
Espessura (mm)	150
Porosidade (fração de volume)	0.45
Capacidade de campo (fração de volume)	0.19
Ponto de murcha (fração de volume)	0.085
Condutividade hidráulica (mm/h)	11
Gradiente da Curva de condutividade	10
Sucção capilar (mm)	110
<b>Camada de Drenagem</b>	
Espessura (mm)	25
Fração de vazios	0.6
Coefficiente de rugosidade de Manning	0.4

Fonte: O Autor, 2017.

A partir dos resultados gerados pelo modelo SWMM para os cenários estudados, foram analisadas as vazões máximas de pico, o horário de ocorrência, e os volumes escoados superficialmente. O objetivo de tal análise é verificar a redução e, possivelmente, o retardo da vazão de pico no cenário que considera a implantação de telhados verdes. Neste caso, também foram traçados os hidrogramas para analisar visualmente os resultados obtidos nas simulações. Além disso, a eficiência dos telhados verdes para amortecimento das vazões foi comparada com dados de outros estudos apresentados na literatura.

### 3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

#### 3.1 Nova subdivisão espacial da Bacia do Rio Morto

A nova subdivisão espacial da bacia do rio Morto buscou tornar os elementos de drenagem mais homogêneos quanto à intensidade de ocupação. Desta forma, a seleção das sub-bacias com elevado grau de ocupação/impermeabilização se torna mais rápida e a avaliação da eficiência dos elementos da infraestrutura verde no controle do escoamento superficial mais evidente. A Figura 28 apresenta esta nova subdivisão da bacia.

Figura 28 – Nova subdivisão da bacia hidrográfica do rio Morto



Fonte: O Autor, 2017.

#### 3.2 Processamento do Modelo SWMM na Bacia Hidrográfica do Rio Morto

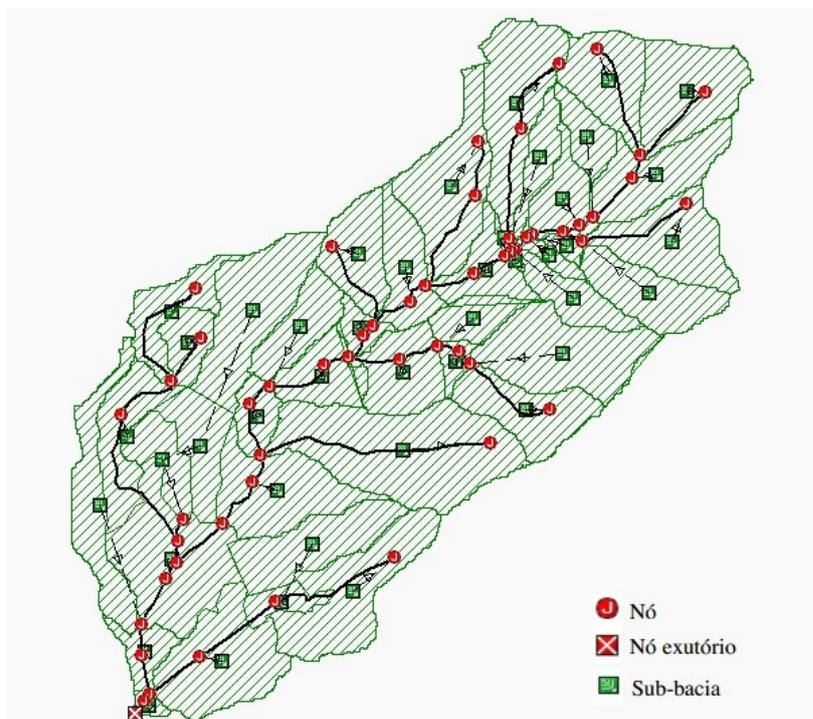
##### 3.2.1 Importação da hidrografia e sub-bacias

A importação da hidrografia e sub-bacias é feita a partir de arquivos no formato *shapefile*, provenientes do ArcGIS (a versão adotada aqui foi a 10.1). Não foi identificada na

versão 5.1 do SWMM uma ferramenta específica para a realização deste procedimento. Desta forma, recorreu-se a interface SSA (Autodesk® *Storm and Sanitary Analysis* 2015), que é um *software* integrado ao sistema AutoCAD Civil 3D® utilizado, sobretudo, em análises e projetos de sistemas de drenagem urbana e esgotamento sanitário.

Durante o procedimento de importação, o SSA trata os cursos d'água como *links* e cria automaticamente nós (*junctions*) nas nascentes e confluências de rios. Foi necessária a conexão de cada elemento de drenagem a um nó específico a fim de representar a contribuição do escoamento superficial gerado pela sub-bacia no curso d'água. Em alguns trechos dos cursos d'água foi necessária a inserção de novos nós. Após a realização destas operações chegou-se à configuração final da bacia do rio Morto, representada pela Figura 29.

Figura 29 – Configuração final da bacia do rio Morto



Fonte: O Autor, 2017.

Com o auxílio do Modelo Digital de Terreno (MDT) e da base de dados para a bacia do rio Morto gerada por Amaral (2014), foi possível definir para cada nó a elevação de fundo do curso d'água (*invert elevation*) e a elevação máxima da calha (*max/rim elevation*). A atribuição destes valores é importante já que irá definir a direção do escoamento superficial em cada sub-bacia até o exutório. A Figura 30 apresenta a janela de propriedades do nó onde são definidos tais valores.

Figura 30 – Janela de propriedade dos nós

The screenshot shows the 'Junctions' window with the following sections:

- General:** Junction ID: Jun-40
- Flow properties:** External inflows: NO, Treatments: NO
- Physical properties:**
  - Invert elevation: 94.91 m
  - Max/rim elev.: 95.46 m
  - Surcharge elev.: 0 m
  - Ponded area: 0 m<sup>2</sup>
  - WSEL initial: 0 m
- Analysis summary:**
  - Max water depth: N/A m
  - Peak inflow: N/A cms
  - Max water elevation: N/A m
  - Max flooded overflow: N/A cms
  - Total flooded vol.: N/A ha-mm
  - Total time flooded: N/A min
- Table:**

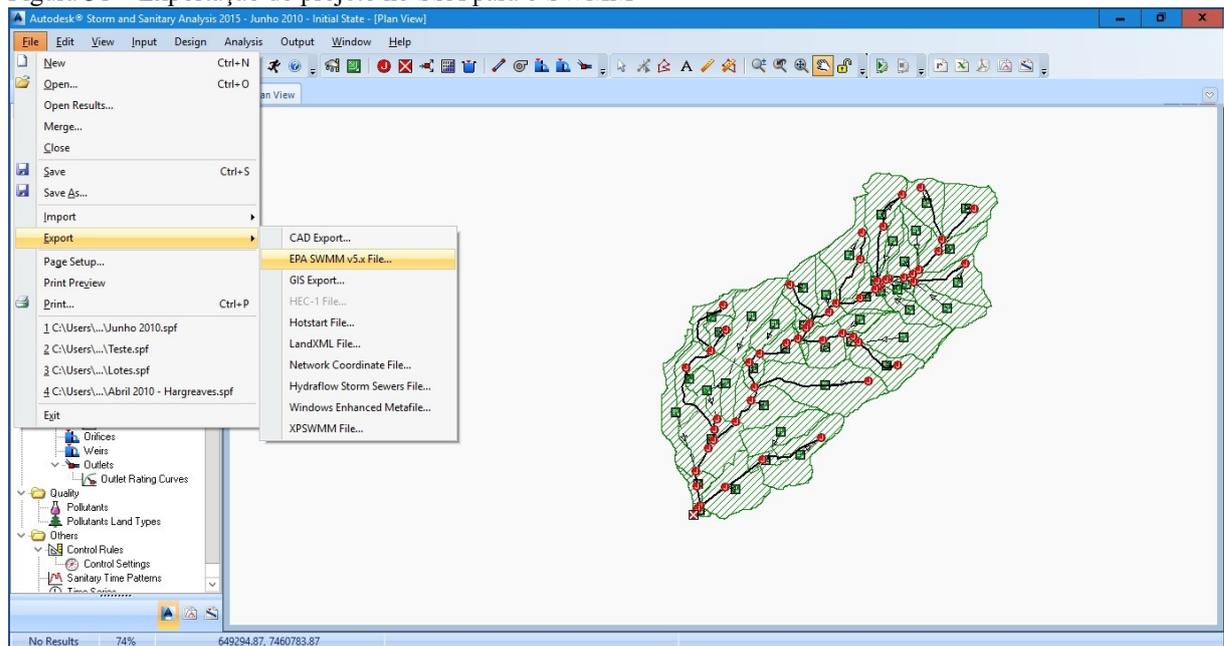
ID /	Invert Elev.	Max/Rim Elev.	WSEL Initial	Sur. Elev.	Ponded Area	Lateral Inflows	Treatments
39 Jun-40	94.91	95.46	0	0	0	NO	NO
40 Jun-41	74.28	74.83	0	0	0	NO	NO
41 Jun-42	59.97	61.83	0	0	0	NO	NO
42 Jun-43	34.88	35.43	0	0	0	NO	NO
43 Jun-44	19.20	21.86	0	0	0	NO	NO
44 Jun-45	15	18	0	0	0	NO	NO

Fonte: Elaborado pela autora a partir das telas do SWMM.

### 3.2.2 Exportação para o SWMM

A interface SSA permite exportar o projeto elaborado somente para a versão 5 ou posterior do modelo SWMM, como mostra a Figura 31.

Figura 31 – Exportação do projeto no SSA para o SWMM



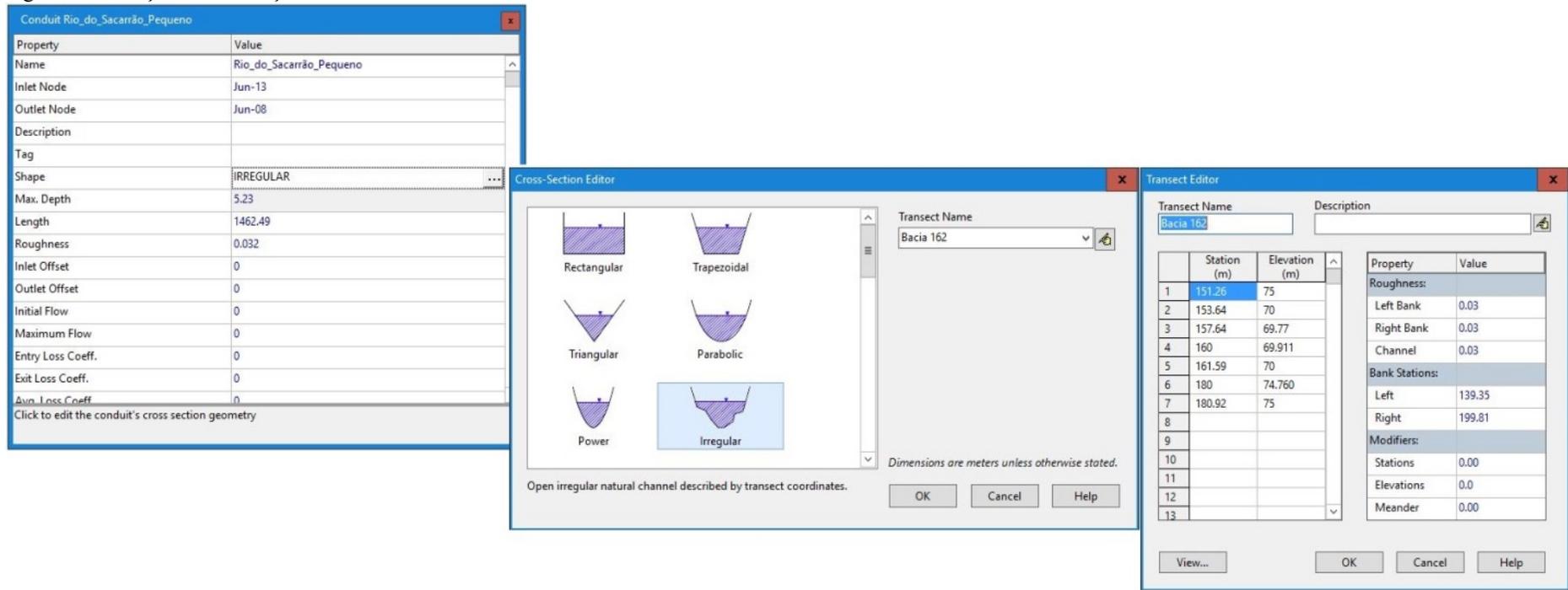
Fonte: Elaborado pela autora a partir das telas do SWMM.

### 3.2.3 Definição das seções transversais

Para cada trecho do curso d'água compreendido entre dois nós é necessária a definição de uma seção transversal de escoamento. Visto que todos os cursos d'água pertencentes à bacia do rio Morto apresentam calha natural, as seções foram definidas como irregulares.

Todas as seções transversais utilizadas no presente trabalho foram obtidas a partir de levantamento de campo, descrito por Amaral (2014). Além disso, foi considerado o coeficiente de Manning igual a 0.03 para o fundo, margem esquerda e margem direita de todos os cursos d'água, conforme definição preliminar de Amaral (2014). A Figura 32 exemplifica a edição de uma seção transversal da bacia do rio Morto no modelo SWMM.

Figura 32 – Edição de uma seção transversal da bacia do rio Morto

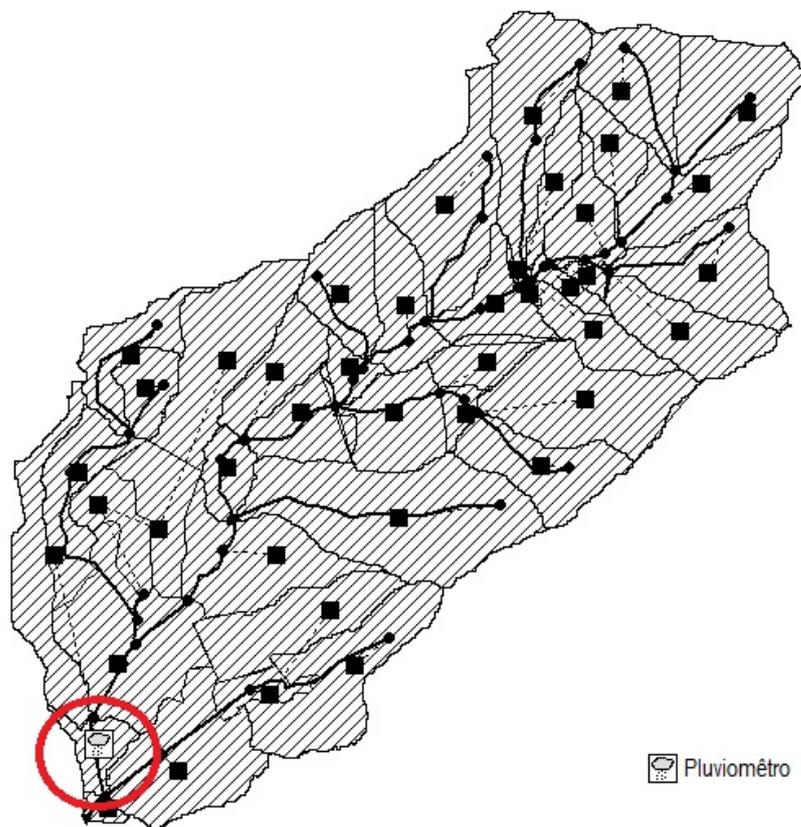


Fonte: Elaborado pela autora a partir das telas do SWMM.

### 3.2.4 Dados de chuva e evapotranspiração

Para a representação da chuva nas sub-bacias do rio Morto, foi inserido no modelo SWMM um pluviômetro (*rain gage*) na mesma localização da estação climatológica SOLAR, ou seja, dentro do parque de águas *Water Planet* e com a coordenada de referência 654937.660 E / 7457775.320 N. Na discretização da bacia, o pluviômetro encontra-se na sub-bacia 41 (Figura 33).

Figura 33 – Localização do pluviômetro na sub-bacia 41



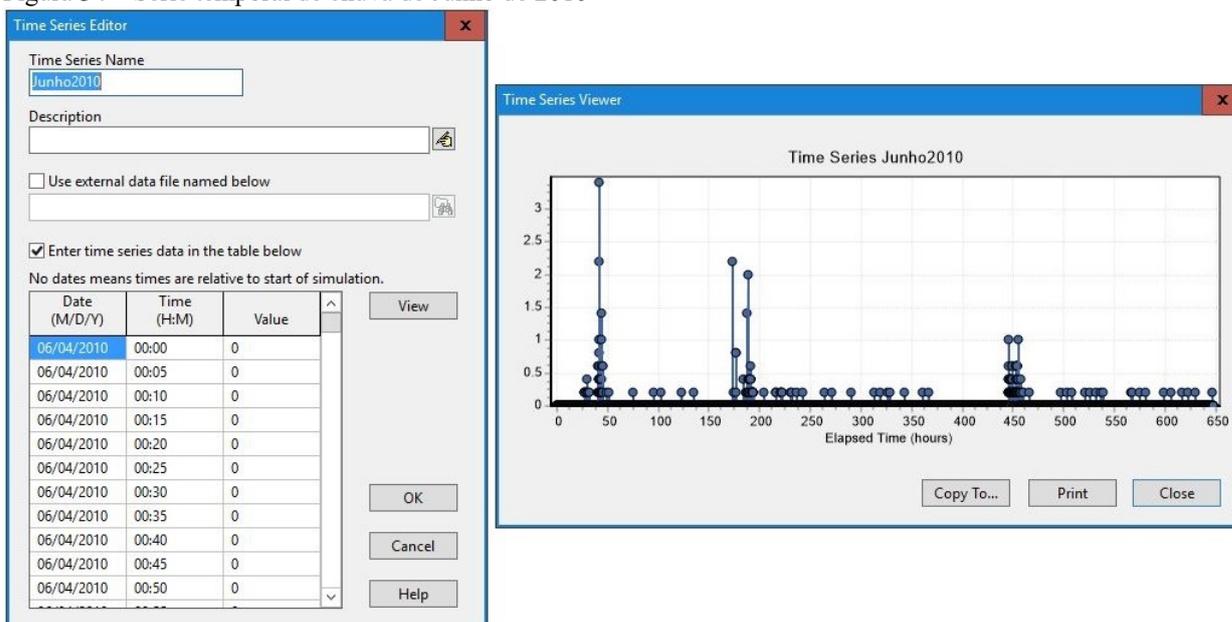
Fonte: O Autor, 2017.

Todas as sub-bacias foram associadas a esse pluviômetro, de forma que recebem o mesmo volume precipitado durante um evento pluviométrico.

Os pluviômetros no modelo SWMM permitem inserir os dados de chuva por meio da definição de uma série temporal na opção *Time Series* ou a partir de um arquivo externo. Para as duas opções são necessárias a definição do tipo de dado de chuva (intensidade ou volume acumulado em mm) e do intervalo do tempo de dados.

Para as simulações na bacia do rio Morto, foram inseridas séries temporais de chuva com dados (volume precipitado em mm) a cada 5 minutos. A Figura 34 apresenta a ferramenta do modelo SWMM (*Time Series Editor*) utilizada para inserção dos dados de chuva de Junho de 2010, por exemplo, e o respectivo gráfico gerado. Para o correto funcionamento das simulações, os dados inseridos devem estar de acordo com a formatação da hora e do tempo adotada pelo modelo.

Figura 34 – Série temporal de chuva de Junho de 2010

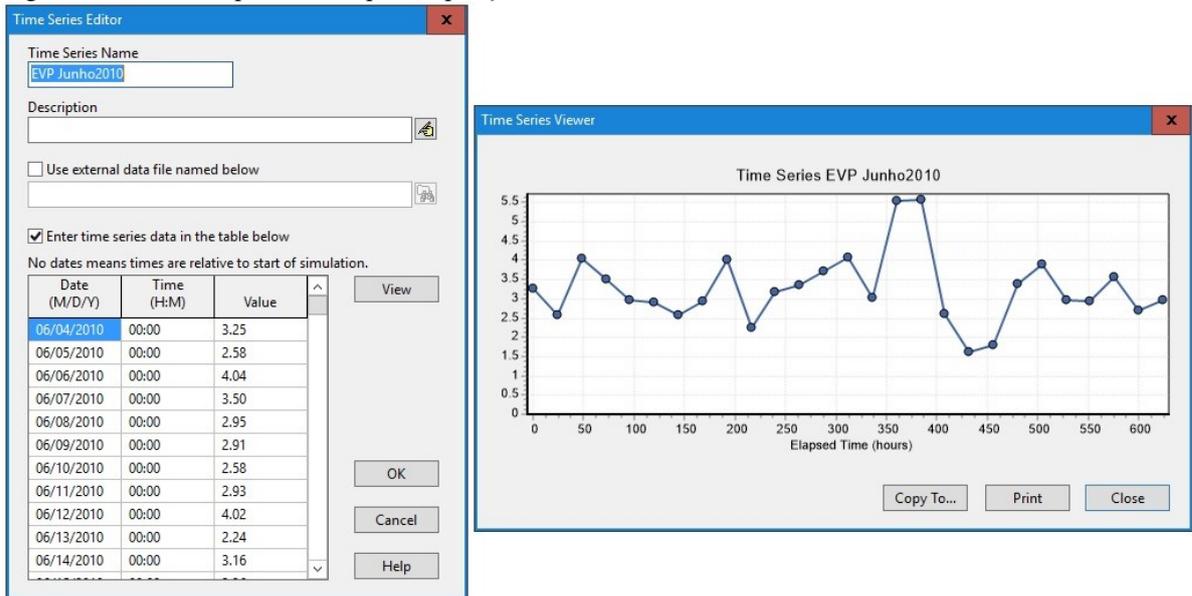


Fonte: O Autor, 2017.

Em relação aos dados de evapotranspiração, o SWMM oferece como possibilidades: definição de um valor constante, inserção de séries temporais, arquivo externo, médias mensais e dados de temperatura. Ressalta-se que o modelo SWMM adota dados diários de evapotranspiração. Nas rotinas de cálculo o total diário é distribuído igualmente pelos intervalos de tempo menores.

A Figura 35 apresenta os dados de evapotranspiração (em mm) para Junho de 2010.

Figura 35 – Série temporal de evapotranspiração de Junho de 2010

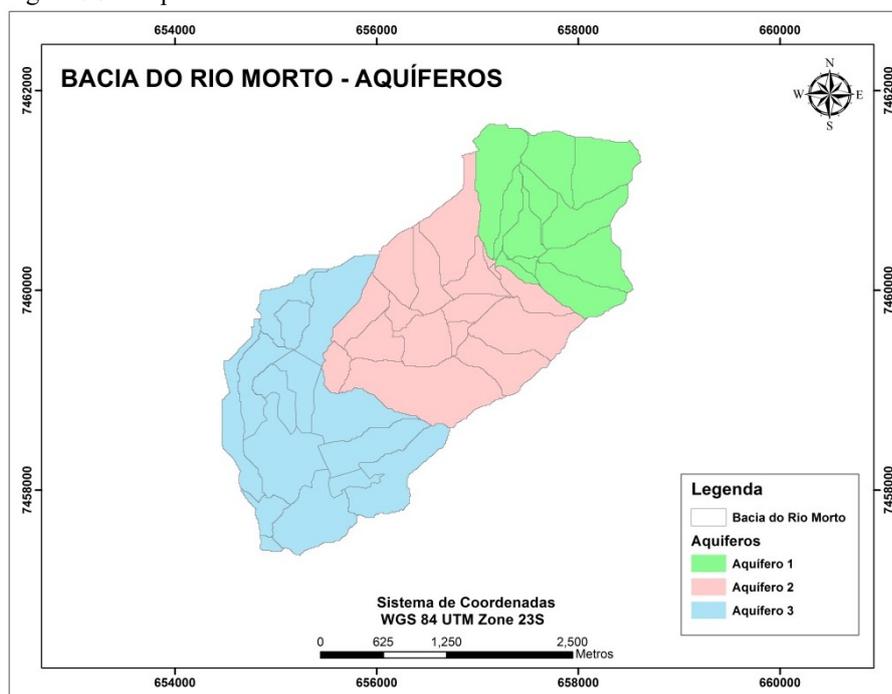


Fonte: O Autor, 2017.

### 3.2.5 Definição dos elementos de representação de águas subterrâneas

Os sistemas de águas subterrâneas são definidos por meio da ferramenta *Aquifers* localizada na parte hidrológica do SWMM. Conforme proposto por Amaral (2014), considerou-se a existência de três sistemas de aquíferos na bacia do rio Morto. A Figura 36 apresenta o conjunto de sub-bacias associado a cada aquífero. Ressalta-se que os aquíferos considerados acabam condicionando a camada não saturada de solos que se sobrepõem na representação das águas subterrâneas do SWMM.

Figura 36 – Aquíferos da bacia do rio Morto



Fonte: Elaborado pela autora a partir da proposta de AMARAL, 2014.

Os parâmetros que caracterizam cada aquífero foram extraídos de Amaral (2014) e estão apresentados no Quadro 12.

Quadro 12 – Parâmetros dos aquíferos

Parâmetros	Aquífero 1	Aquífero 2	Aquífero 3
Porosidade ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )	0.6	0.6	0.65
Ponto de Murcha ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )	0.15	0.15	0.15
Capacidade de Campo ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )	0.2	0.2	0.2
Condutividade Hidráulica (mm/h)	40	15	15
Gradiente da Curva de Condutividade Hidráulica (mm)	10	10	10
Gradiente da Curva de Retenção (mm)	15	15	15
Razão de Evaporação da Camada Superior	0.35	0.35	0.35
Profundidade da Evaporação da Camada Inferior (m)	14	14	14
Taxa de Percolação (mm/h)	0.002	0.002	0.002
Umidade da Zona não Saturada	0.15	0.15	0.15

Fonte: AMARAL, 2014.

Quando se atribui um aquífero para cada sub-bacia, torna-se necessária a definição de mais 5 parâmetros a serem utilizados no cálculo do fluxo subterrâneo, como coeficiente de

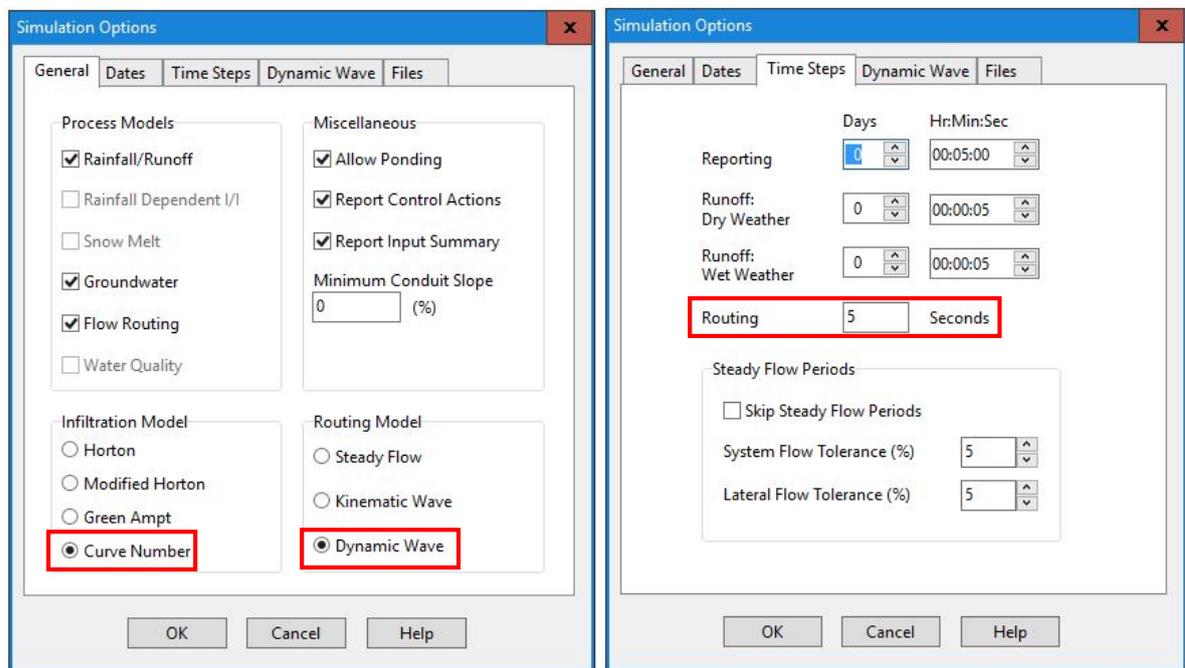
fluxo subterrâneo (A1), coeficiente de fluxo superficial (A2), coeficiente de interação aquífero-superfície (A3), expoente de fluxo subterrâneo (B1) e expoente de fluxo superficial (B2).

Beling (2013) e Acosta (2009) atribuíram zero aos parâmetros A2, A3 e B2, desconsiderando, desta forma, o fluxo na direção do leito dos canais. Inicialmente, adotou-se A1 igual a 0.0000023 e B1 igual a 1.9, conforme ajuste obtido por Amaral (2014).

### 3.2.6 Definição dos métodos de cálculo

Na ferramenta *Simulation Options* (Figura 37) foi definido como método de infiltração o Curva Número - SCS e o modelo de propagação da onda dinâmica para a realização das simulações. Além disso, adotou-se um passo de tempo para propagação do fluxo igual a 5 segundos, com o objetivo de identificar os valores de pico dos hidrogramas.

Figura 37 – Métodos de cálculo e passo de tempo considerado nas simulações



Fonte: O Autor, 2017.

### 3.3 Seleção dos períodos das simulações

A seleção dos períodos para a realização das etapas de calibração e validação do modelo SWMM foi feita com base na existência de dados registrados pelas estações de monitoramento da bacia do rio Morto. Para subsidiar esta análise foi elaborado um histograma de dados fluviométricos e climatológicos, no período de 2008 a 2015, conforme mostra a Figura 38. Considerou-se apenas os dados da estação climatológica SOLAR, devido ao maior período de dados registrados, e do posto fluviométrico situado no rio Morto, no exutório da bacia. Como pode ser observado no histograma, foi verificada a existência ou não de dados, bem como períodos com falhas e dados espúrios.

Figura 38 – Histograma de dados fluviométricos e climatológicos

Dados	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Cotas Fluviométricas	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
Altura Pluviométrica	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
Temperatura Média	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
Radiação Solar	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
Velocidade do Vento	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
Direção do Vento	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
Umidade Relativa	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
Pressão Atmosférica	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

- LEGENDA**
- 1 Mês
  - 1 Dados registrados
  - Períodos com falhas ou mês incompleto
  - 1 Dados espúrios
  - 1 Dados não disponíveis

Fonte: O Autor, 2017.

Particularmente para a etapa de calibração, os períodos selecionados restringiram-se ao valor da maior cota fluviométrica observada *in loco*, igual à 52 cm, deixando possíveis extrapolação além desta cota, para as simulações do modelo SWMM. Aplicado o método da curva-chave, esta cota corresponde à uma vazão de 1,18 m<sup>3</sup>/s. Desta forma, a calibração do modelo SWMM para a bacia do rio Morto será feita apenas com dados que foram observados na bacia, sem necessidade da extrapolação da curva-chave.

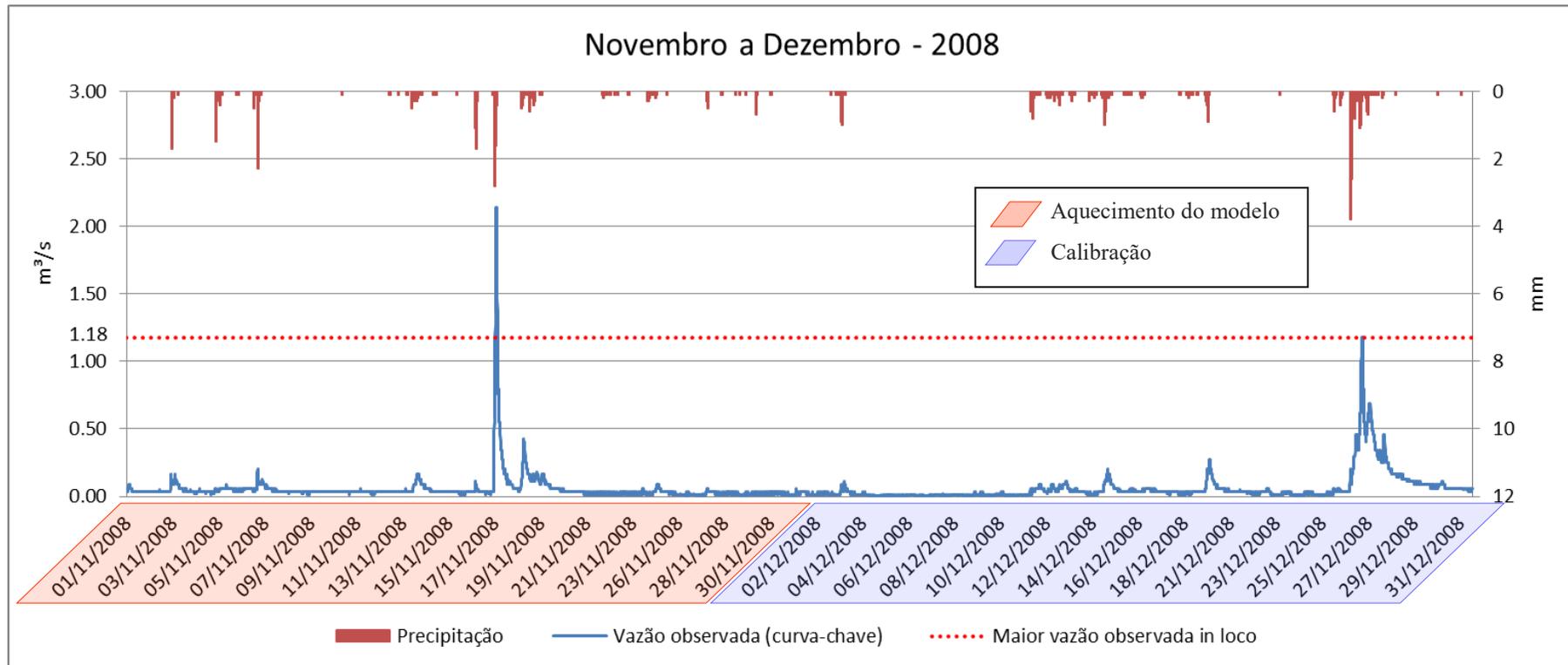
Considerando o exposto acima, para as etapas de calibração e validação do modelo SWMM foram adotados, respectivamente, os períodos de dezembro de 2008 e junho de 2010 (do dia 04 ao dia 30), e abril de 2010. Ressalta-se que para aquecimento do modelo foram utilizados os dados climatológicos e fluviométricos do mês anterior ao período simulado.

Apesar de a FAO recomendar como método padrão o de Penman-Monteith para a estimativa da evapotranspiração de referência, as taxas evapotranspirimétricas diárias foram calculadas pelo método de Hargreaves (ALLEN *et al.*, 1998), visto que necessita apenas dos dados de temperatura do ar e radiação extraterrestre. Como verificado no histograma (Figura 38), a estação climatológica SOLAR apresenta falhas para os meses de maio e junho de 2010. Neste caso, foram utilizados os dados de temperatura do ar registrados pela estação Marambaia que dista, aproximadamente, 13 km das estações climatológicas da bacia do rio Morto, mas apresenta características de localização semelhantes.

As Figuras 39 e 40 apresentam, respectivamente, a série de vazões observadas e precipitação na bacia do rio Morto no período de novembro a dezembro de 2008 e março a junho de 2010. A linha vermelha destacada nestas figuras representa a vazão, obtida pelo método da curva-chave, a partir da maior cota fluviométrica observada *in loco*, no valor de 1,8 m<sup>3</sup>/s. As vazões que superam este limite seriam as vazões se o método de extrapolação da curva-chave fosse o logarítmico

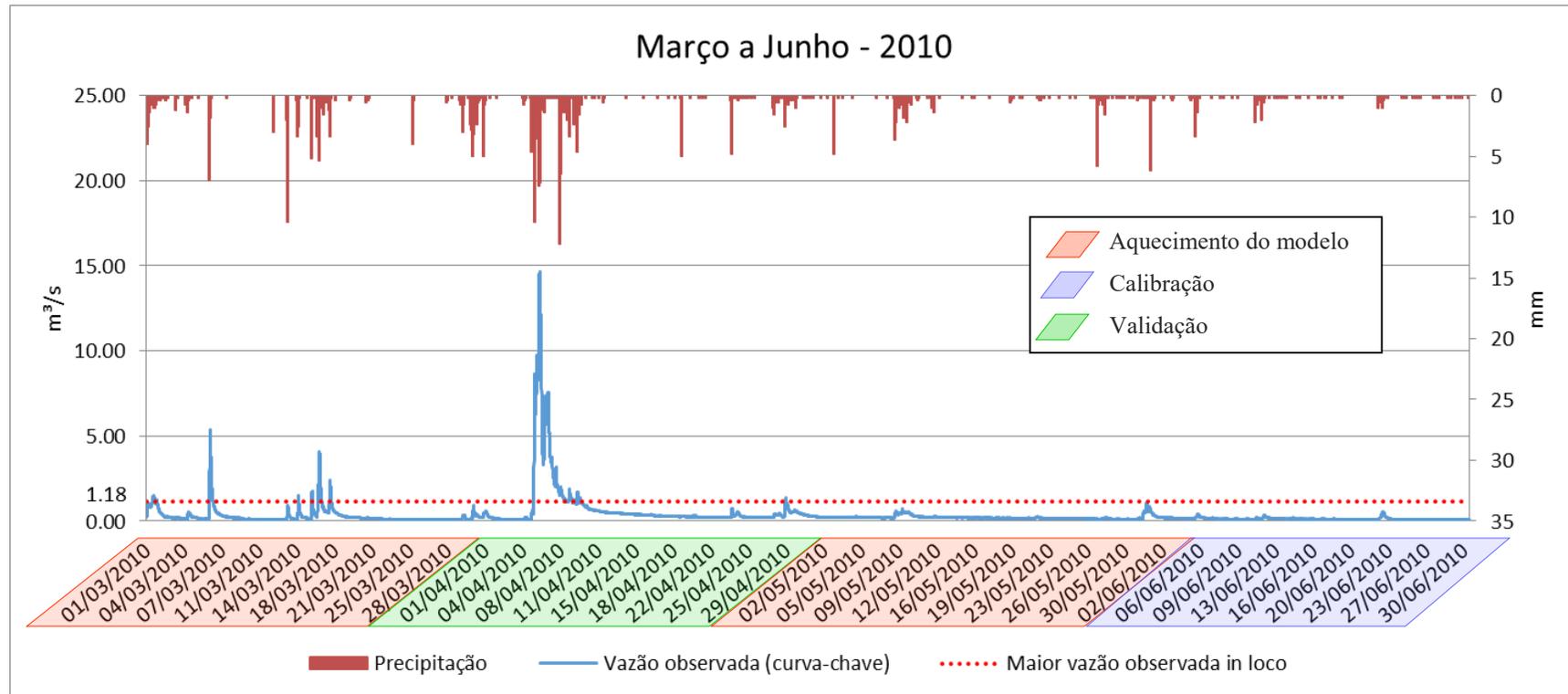
As Figuras 41 e 42 apresentam as taxas evapotranspirimétricas diárias para os mesmos períodos.

Figura 39 – Série de vazões observadas e precipitação no período de novembro a dezembro de 2008



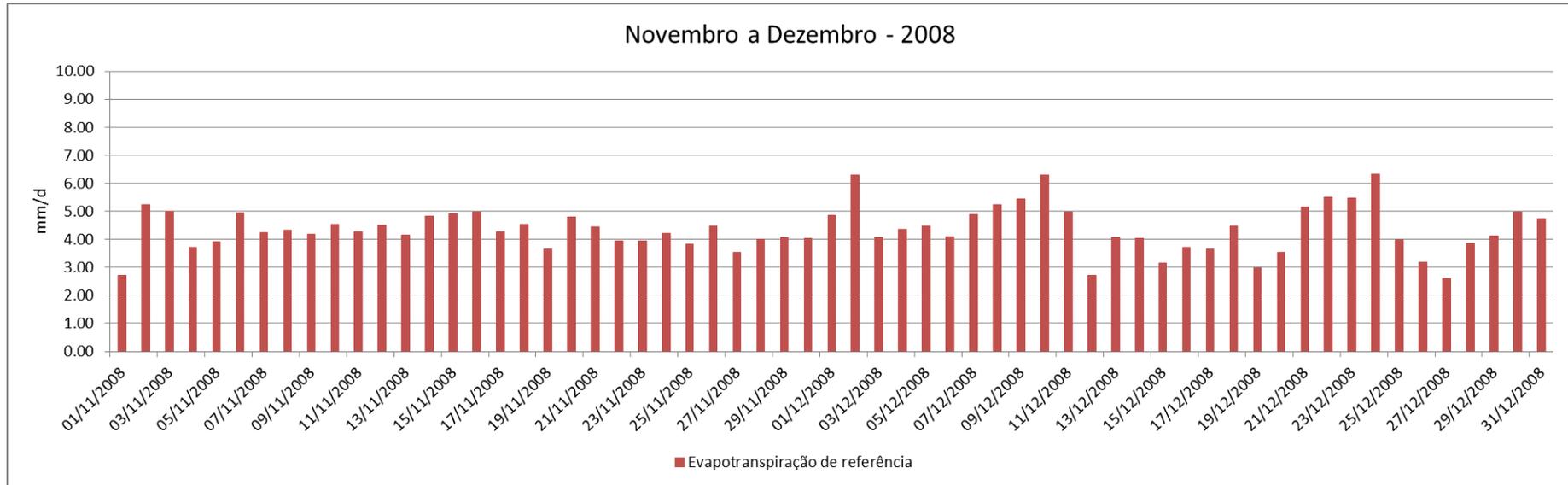
Fonte: O Autor, 2017.

Figura 40 – Série de vazões observadas e precipitação no período de março a junho de 2010



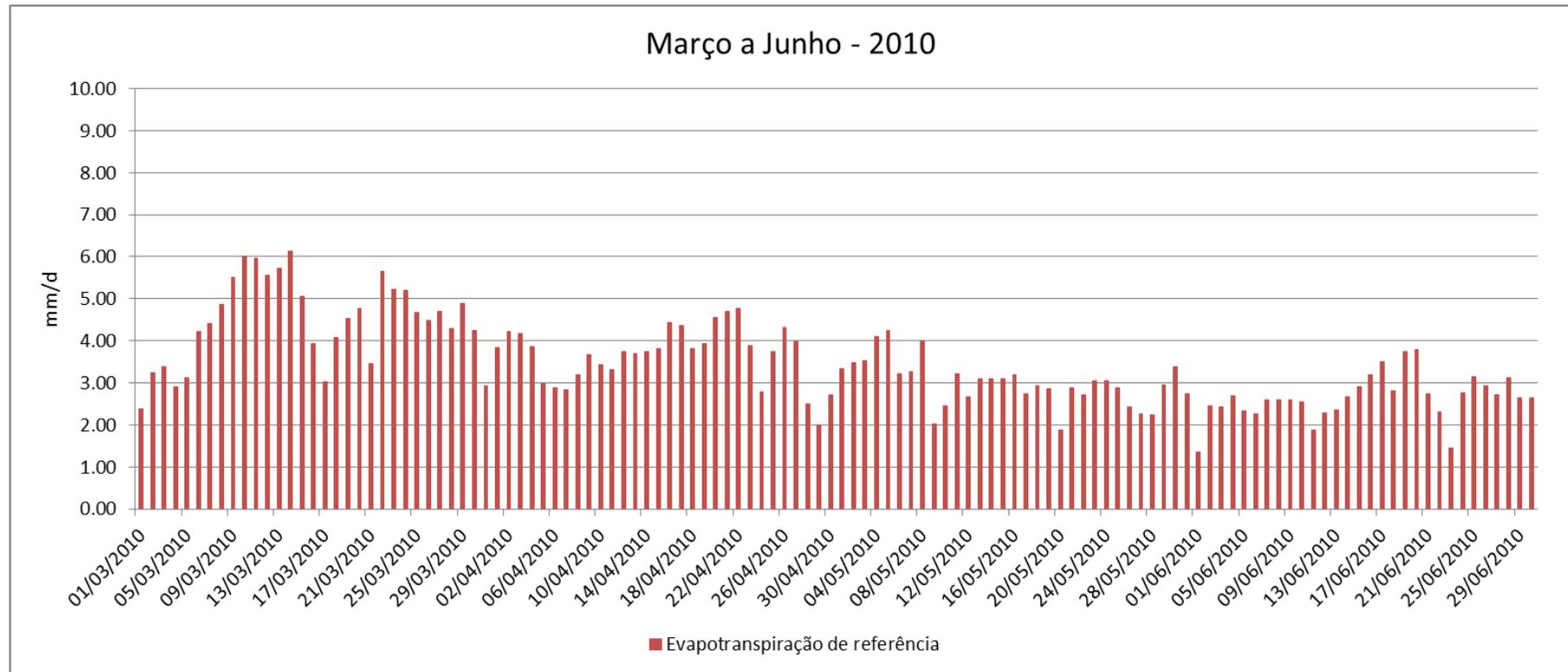
Fonte: O Autor, 2017.

Figura 41 – Série de evapotranspiração no período de novembro a dezembro de 2008



Fonte: O Autor, 2017.

Figura 42 – Série de evapotranspiração no período de março a junho de 2010



Fonte: O Autor, 2017.

### 3.4 Calibração

Os parâmetros são ajustados individualmente para cada elemento de drenagem obtidos nas sub-bacias, totalizando 43.

Conforme esperado, constatou-se que o conjunto de parâmetros obtido por Amaral (2014) autora não representava de forma adequada os eventos selecionados para a calibração nesta dissertação, já que a curva-chave foi atualizada e não foi considerada nenhuma forma de extrapolação da mesma. Ou seja, a curva-chave da bacia foi revisada e alterada. Sendo assim, procedeu-se com o ajuste minucioso dos parâmetros do modelo, levando em conta os valores de referência sugeridos pelo manual do SSA (AUTODESK, 2013).

Como já mencionado, os eventos selecionados para a calibração do modelo SWMM são: dezembro de 2008 e junho de 2010 (do dia 04/06/10 até o dia 30/06/10). Primeiramente, realizou-se a calibração individual de cada evento e, em seguida, a calibração simultânea dos dois eventos. Em todos os casos, a calibração teve início com o ajuste do escoamento de base. A determinação desta vazão foi feita a partir da função estatística “moda”, disponível no MS Excel, que identifica o valor que ocorreu com maior frequência na série de dados observados e calculados. Após o ajuste da vazão de base, foi realizado o ajuste das vazões de pico e, em alguns casos, a recessão do hidrograma.

#### 3.4.1 Calibração Individual para os períodos de 2008 e 2010.

Para o evento de dezembro de 2008, o coeficiente A1 foi definido como 0.0000023 e B1 como 1.8. As vazões de base observada e calculada foram, respectivamente, iguais a 0.03 e 0.02. Já para junho de 2010, o coeficiente A1 foi definido como 0.0000023 e B1 como 1.7. Neste evento, as vazões de base observada e calculada foram, respectivamente, iguais a 0.09 e 0.12. Visto que os eventos selecionados para a calibração ocorreram em tempos meteorológicos distintos, a definição da condição inicial de umidade do solo torna-se imprescindível para o ajuste da vazão de base. No modelo SWMM, tal condição é estabelecida ajustando-se o nível do lençol freático (nível estático) em cada aquífero e utilizando-se os arquivos *Hotstart*. Neste último caso, é feita a simulação do modelo para o período anterior ao desejado e exporta-se o resultado gerado como arquivo *Hotstart*. O

Quadro 13 apresenta as cotas da base dos aquíferos definidos para a bacia do rio Morto bem como o nível do lençol freático em cada evento. Ver também Figura 36. O Aquífero 1 está localizado nas partes mais altas da bacia, o 2 na parte intermediária e o 3 já localizado na região de baixada.

Quadro 13 – Ajuste do nível do lençol freático em cada aquífero da bacia do rio Morto

Parâmetros	Aquífero 1	Aquífero 2	Aquífero 3
Cota da Base do Aquífero (m)	213.00	18.03	5.56
Nível Estático (m) – Dezembro de 2008	213.40	18.20	5.66
Nível Estático (m) – Junho de 2010	214.50	19.00	5.86

Fonte: O Autor, 2017.

No melhor ajuste, o coeficiente de Manning para todos os canais (leito, margem esquerda e direita) manteve-se como 0.05 para os dois eventos, mesmo valor adotado por Amaral (2014).

Para facilitar o processo de calibração dos parâmetros do escoamento superficial, a bacia do rio Morto foi dividida em três classes, segundo a porcentagem de área impermeável: Classe 1) sub-bacias com área impermeável igual a 0%; Classe 2) sub-bacias com área impermeável maior que 0% e menor que 50%; Classe 3) sub-bacias com área impermeável maior que 50%. Deste modo, o ajuste dos parâmetros foi feito por classe.

Os Quadros 14 e 15 apresentam, nesta ordem, os valores ajustados dos parâmetros do escoamento superficial do modelo SWMM para dezembro de 2008 e junho de 2010, obtidos após diversas tentativas de calibração. Nestes quadros, as três classes de sub-bacias foram diferenciadas por cores. As Figuras 43 e 44 apresentam os hidrogramas resultantes destas calibrações.

Quadro 14 – Valores dos parâmetros do escoamento superficial obtidos na calibração do modelo SWMM para dezembro de 2008

Sub-bacias	Área Permeável			Área Impermeável		
	Armazenamento em depressões	Coefficiente de Manning	CN (Curva Número)	Percentual Impermeável	Armazenamento em depressões	Coefficiente de Manning
1	6.0000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
2	6.0000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
3	6.0000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
4	6.0000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
5	6.0000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
6	6.0000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
7	6.0000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
8	6.0000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
9	6.0000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
10	6.0000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
11	6.0000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
12	6.0000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
13	6.0000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
14	6.0000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
15	6.0000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
16	6.0000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
17	6.0000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
18	6.0000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
19	4.5000	0.2000	85.00	34.00	1.2500	0.0500
20	6.0000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
21	4.5000	0.2000	93.00	34.00	1.2500	0.0500
22	6.0000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
23	6.0000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
24	6.0000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
25	6.0000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
26	6.0000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
27	6.0000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
28	6.0000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
29	4.5000	0.2000	85.00	34.00	1.2500	0.0500
30	4.5000	0.2000	93.00	34.00	1.2500	0.0500
31	4.5000	0.2000	93.00	34.00	1.2500	0.0500
32	4.5000	0.2000	85.00	34.00	1.2500	0.0500
33	4.5000	0.2000	85.00	34.00	1.2500	0.0500
34	4.5000	0.2000	85.00	34.00	1.2500	0.0500
35	4.5000	0.2000	93.00	34.00	1.2500	0.0500
36	2.0000	0.2000	95.00	76.00	1.2500	0.0500
37	2.0000	0.2000	95.00	76.00	1.2500	0.0500
38	4.5000	0.2000	85.00	34.00	1.2500	0.0500
39	6.0000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
40	6.0000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
41	4.5000	0.2000	93.00	34.00	1.2500	0.0500
42	4.5000	0.2000	93.00	34.00	1.2500	0.0500
43	2.0000	0.2000	98.00	98.00	1.2500	0.0500

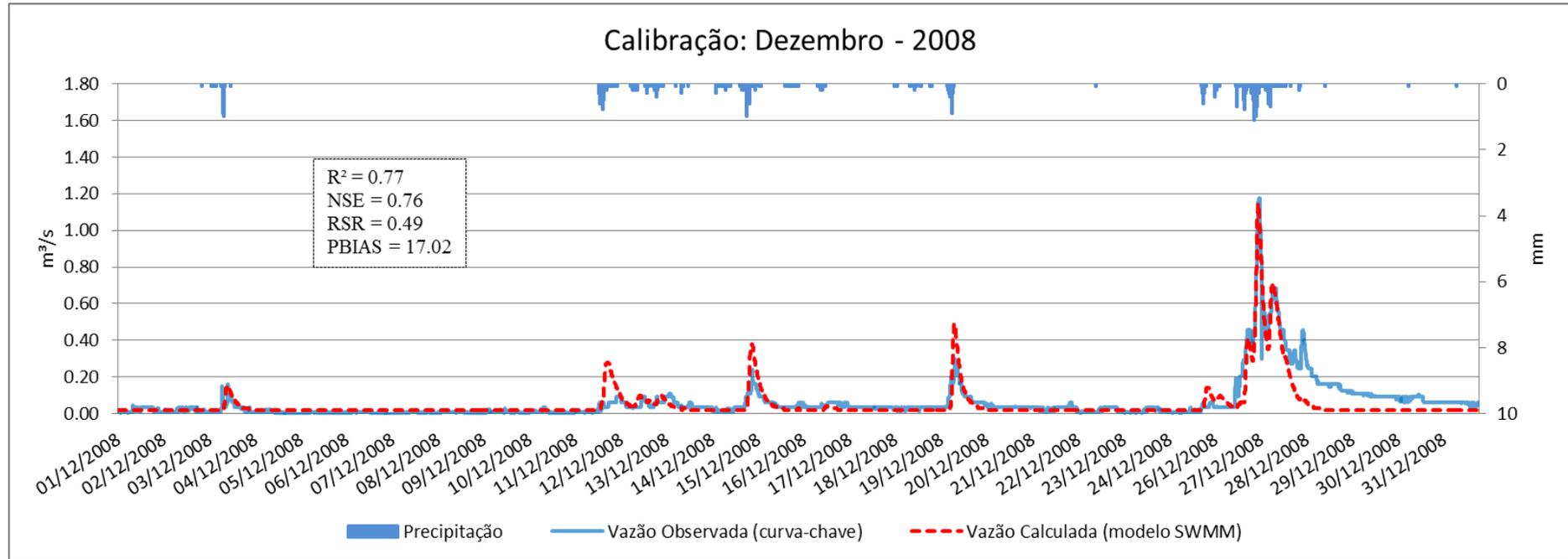
Fonte: O Autor, 2017.

Quadro 15 – Valores dos parâmetros do escoamento superficial obtidos na calibração do modelo SWMM para junho de 2010

Sub-bacias	Área Permeável			Área Impermeável		
	Armazenamento em depressões	Coefficiente de Manning	CN (Curva Número)	Percentual Impermeável	Armazenamento em depressões	Coefficiente de Manning
1	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
2	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
3	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
4	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
5	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
6	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
7	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
8	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
9	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
10	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
11	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
12	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
13	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
14	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
15	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
16	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
17	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
18	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
19	6.5000	0.8000	77.00	5.00	2.5000	0.1500
20	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
21	5.0000	0.8000	85.00	16.00	2.5000	0.1500
22	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
23	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
24	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
25	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
26	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
27	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
28	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
29	6.5000	0.8000	77.00	6.00	2.5000	0.1500
30	5.0000	0.8000	85.00	16.00	2.5000	0.1500
31	5.0000	0.8000	85.00	15.00	2.5000	0.1500
32	6.5000	0.8000	77.00	5.00	2.5000	0.1500
33	6.5000	0.8000	77.00	6.00	2.5000	0.1500
34	6.5000	0.8000	77.00	6.00	2.5000	0.1500
35	5.0000	0.8000	85.00	25.00	2.5000	0.1500
36	2.5000	0.4000	91.00	55.00	2.5000	0.1500
37	2.5000	0.4000	91.00	57.00	2.5000	0.1500
38	6.5000	0.8000	77.00	8.00	2.5000	0.1500
39	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
40	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
41	5.0000	0.8000	85.00	16.00	2.5000	0.1500
42	5.0000	0.8000	85.00	25.00	2.5000	0.1500
43	2.5000	0.4000	95.00	94.00	2.5000	0.1500

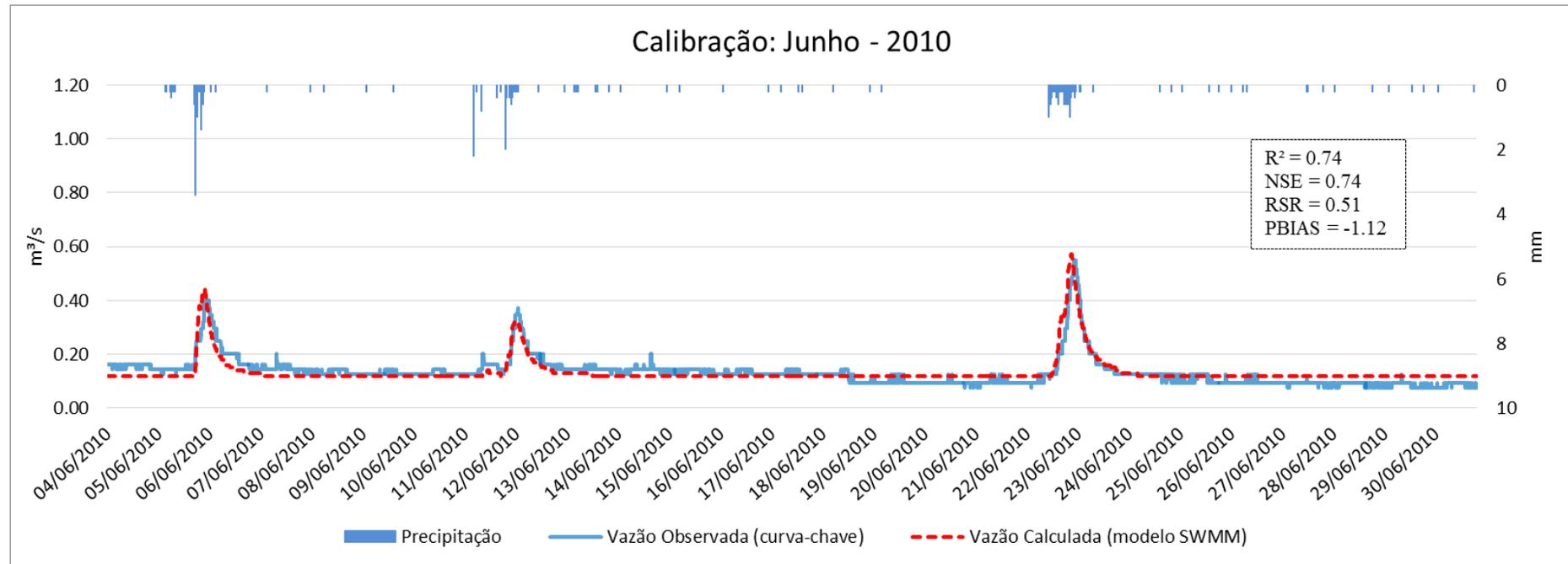
Fonte: O Autor, 2017.

Figura 43 – Calibração individual do modelo SWMM para dezembro de 2008



Fonte: O Autor, 2017.

Figura 44 – Calibração individual do modelo SWMM para junho de 2010



Fonte: O Autor, 2017.

As Figuras 43 e 44 reproduzem os melhores resultados obtidos de forma individual para cada período de calibração. De forma geral, os resultados obtidos na calibração individual dos parâmetros para os dois eventos considerados obtiveram bons ajustes, conforme os valores dos coeficientes que avaliam o desempenho da simulação (MORIASI *et al.*, 2007; SANTHI *et al.*, 2001). Entretanto, para junho de 2010, o coeficiente PBIAS não foi satisfatório, já que apresentou valor negativo, indicando que o resultado foi ligeiramente subestimado, ou seja, a vazão simulada foi inferior à observada.

A calibração de dezembro de 2008 buscou o melhor ajuste do último pico do hidrograma, devido a sua maior significância em relação aos outros. Em virtude disto, as vazões calculadas dos três picos antecedentes foram maiores que as observadas.

### 3.4.2 Calibração Comum para os períodos de 2008 e 2010

Visto que a calibração de um modelo hidrológico tem como objetivo priorizar a identificação de um único conjunto de parâmetros comum a todos os eventos. O que em princípio permite utilizar este único conjunto para a simulação/previsão a partir de qualquer evento pluviométrico. Assim, o estudo relatado a seguir teve o objetivo de obtenção de um único conjunto de parâmetros para os eventos de dezembro de 2008 e junho de 2010.

Para este caso, o coeficiente A1 foi definido como 0.0000023 e B1 como 1.8. A condição inicial de umidade do solo para cada evento foi a mesma utilizada na calibração individual (Quadro 13). Assim, para dezembro de 2008 as vazões de base observadas e calculadas foram, respectivamente, iguais a 0.03 e 0.02, enquanto que para junho de 2010 foram iguais a 0.09 e 0.16. Neste último evento, a vazão de base calculada pelo modelo foi maior do que a obtida na calibração individual.

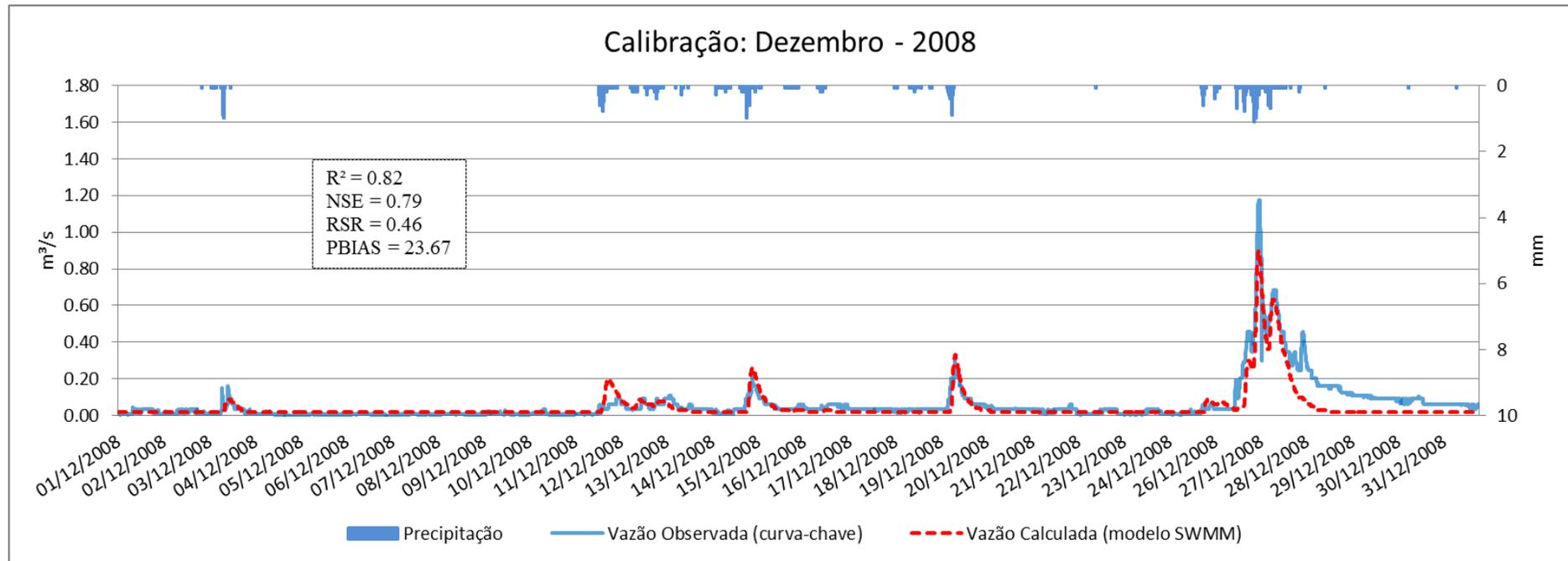
O coeficiente de Manning para todos os canais (leito, margem esquerda e direita) manteve-se igual a 0.05. Para o ajuste dos parâmetros do escoamento superficial foi mantida a divisão da bacia em classes, segundo a porcentagem de área impermeável. O Quadro 16 apresenta o conjunto único de parâmetros ajustados para dezembro de 2008 e junho de 2010. As Figuras 45 e 46 apresentam os hidrogramas gerados para cada evento.

Quadro 16 – Valores dos parâmetros do escoamento superficial obtidos na calibração do modelo SWMM para dezembro de 2008 e junho de 2010

Sub-bacias	Área Permeável			Área Impermeável		
	Armazenamento em depressões	Coefficiente de Manning	CN (Curva Número)	Percentual Impermeável	Armazenamento em depressões	Coefficiente de Manning
1	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
2	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
3	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
4	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
5	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
6	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
7	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
8	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
9	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
10	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
11	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
12	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
13	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
14	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
15	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
16	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
17	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
18	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
19	5.0000	0.2000	85.00	29.00	1.5000	0.0900
20	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
21	5.0000	0.2000	93.00	29.00	1.5000	0.0900
22	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
23	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
24	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
25	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
26	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
27	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
28	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
29	5.0000	0.2000	85.00	29.00	1.5000	0.0900
30	5.0000	0.2000	93.00	29.00	1.5000	0.0900
31	5.0000	0.2000	93.00	29.00	1.5000	0.0900
32	5.0000	0.2000	85.00	29.00	1.5000	0.0900
33	5.0000	0.2000	85.00	29.00	1.5000	0.0900
34	5.0000	0.2000	85.00	29.00	1.5000	0.0900
35	5.0000	0.2000	93.00	29.00	1.5000	0.0900
36	2.5000	0.2000	95.00	76.00	1.5000	0.0900
37	2.5000	0.2000	95.00	76.00	1.5000	0.0900
38	5.0000	0.2000	85.00	29.00	1.5000	0.0900
39	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
40	6.5000	0.8000	70.00	0.00	0.0000	0.0000
41	5.0000	0.2000	93.00	29.00	1.5000	0.0900
42	5.0000	0.2000	93.00	29.00	1.5000	0.0900
43	2.5000	0.2000	98.00	98.00	1.5000	0.0900

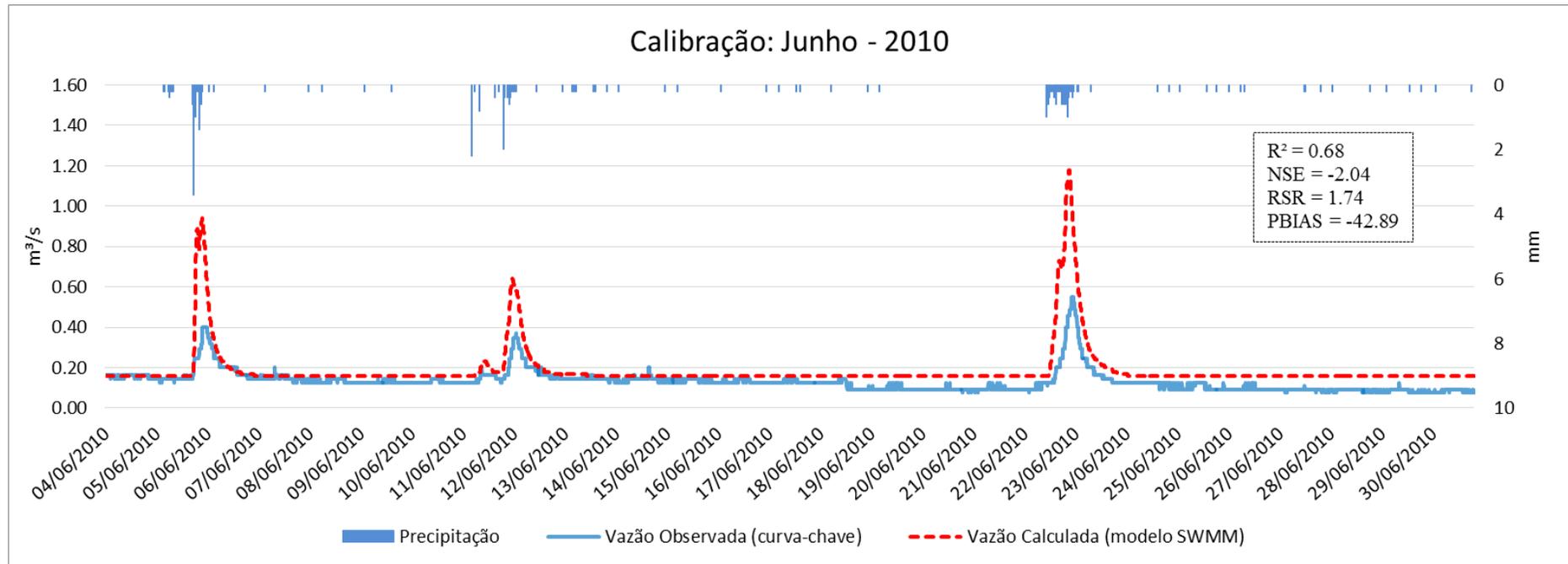
Fonte: O Autor, 2017.

Figura 45 – Calibração do modelo SWMM para dezembro de 2008



Fonte: O Autor, 2017.

Figura 46 – Calibração do modelo SWMM para junho de 2010



Fonte: O Autor, 2017.

Com base nos valores dos coeficientes de eficiência da simulação, o conjunto único de parâmetros ajustados para o modelo SWMM foi satisfatório apenas para dezembro de 2008. Apesar da vazão calculada no último pico do hidrograma deste evento estar notavelmente abaixo da observada, este foi o melhor resultado obtido para dezembro de 2008 em todas as calibrações. Este mesmo conjunto de parâmetros não produziu um resultado satisfatório para junho de 2010, visto que o modelo gerou vazões de pico superestimadas. Para este caso, apenas o coeficiente de determinação apresentou resultado satisfatório.

Tanto na calibração individual quanto na calibração simultânea dos eventos selecionados, os valores dos parâmetros do escoamento superficial estiveram dentro dos limites sugeridos pelo manual do SSA (AUTODESK, 2013). Além disso, é importante destacar o trabalho de Nunes *et al.* (2015), que realizou um levantamento das aplicações do modelo SWMM em bacias hidrográficas brasileiras para simulação do escoamento superficial, com análise dos parâmetros ajustados na etapa de calibração. O Quadro 17 apresenta, de forma consolidada, os valores ajustados para o modelo SWMM em diversas bacias brasileiras. Pode-se constatar que os valores dos parâmetros obtidos nas calibrações para a bacia do rio Morto estão coerentes com os valores obtidos por outros autores.

Quadro 17 – Parâmetros obtidos na calibração do modelo SWMM em diversas bacias brasileiras

Bacia	Área Permeável		Área Impermeável		
	Armazenamento em depressões	Coefficiente de Manning	Percentual Impermeável	Armazenamento em depressões	Coefficiente de Manning
Sítio do Tio Pedro <sup>1</sup>	4.86	0.470	13.09	2.89	0.132
Sítio do Tio Pedro <sup>2</sup>	3.25	0.320	13.09	2.235	0.045
Córrego do Gregório	3.13	0.124	32.27	1.47	0.020
Córrego do Barbado	4.55	0.365	55.07	1.70	0.014
Arroio Cancela	5.90	0.372	34.62	4.00	0.024
Ralph Stettinger	7.00	0.25	80.00	2.52	0.010
Córrego Samambaia	5.08	0.15	24.50	1.90	0.011
<sup>1</sup> Utilizando a equação de Horton para determinar os parâmetros de infiltração.					
<sup>2</sup> Utilizando Método de Green-Ampt para determinar os parâmetros de infiltração.					

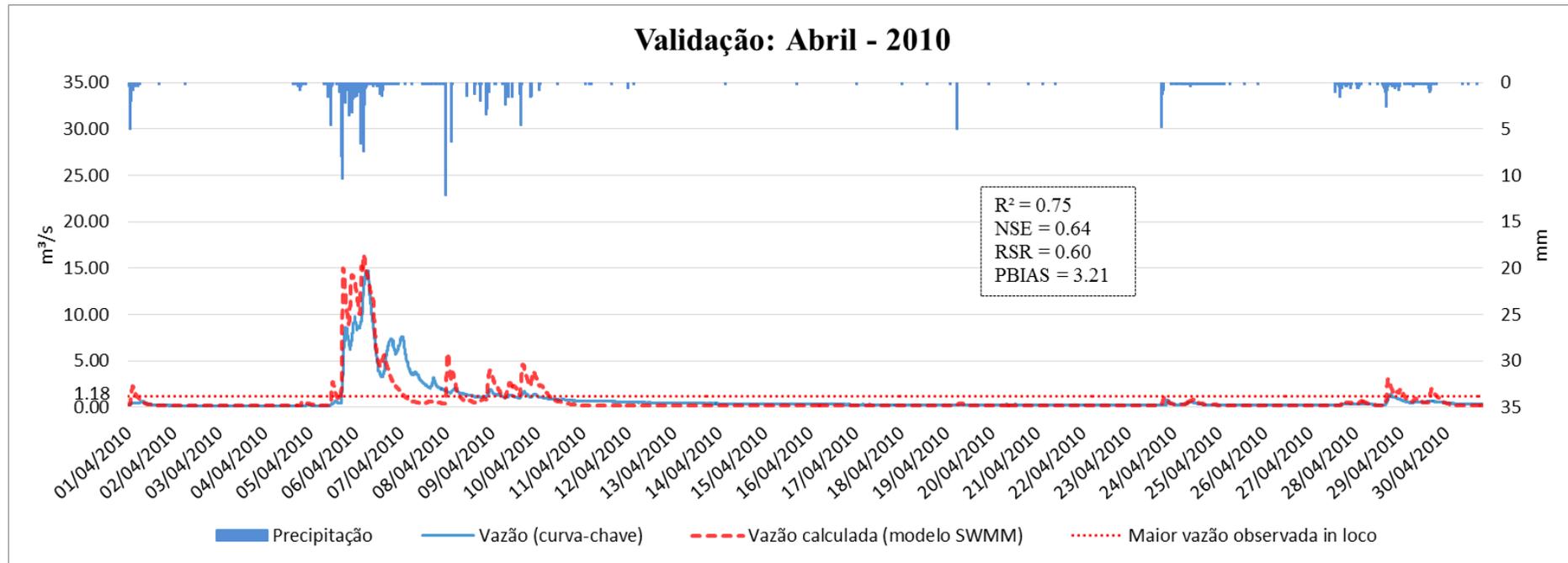
Fonte: NUNES *et al.*, 2015.

Em todas as calibrações o modelo SWMM representou bem o regime hidrológico da bacia do rio Morto para os eventos analisados. Mas, para o período de 2010, o conjunto comum de parâmetros superestimou todos os picos. Desta forma, optou-se por dar sequência à validação e simulação de cenários considerando telhados verdes com os três conjuntos de parâmetros obtidos nas calibrações, sendo dois para a calibração individual e um para a calibração comum.

### 3.5 Validação

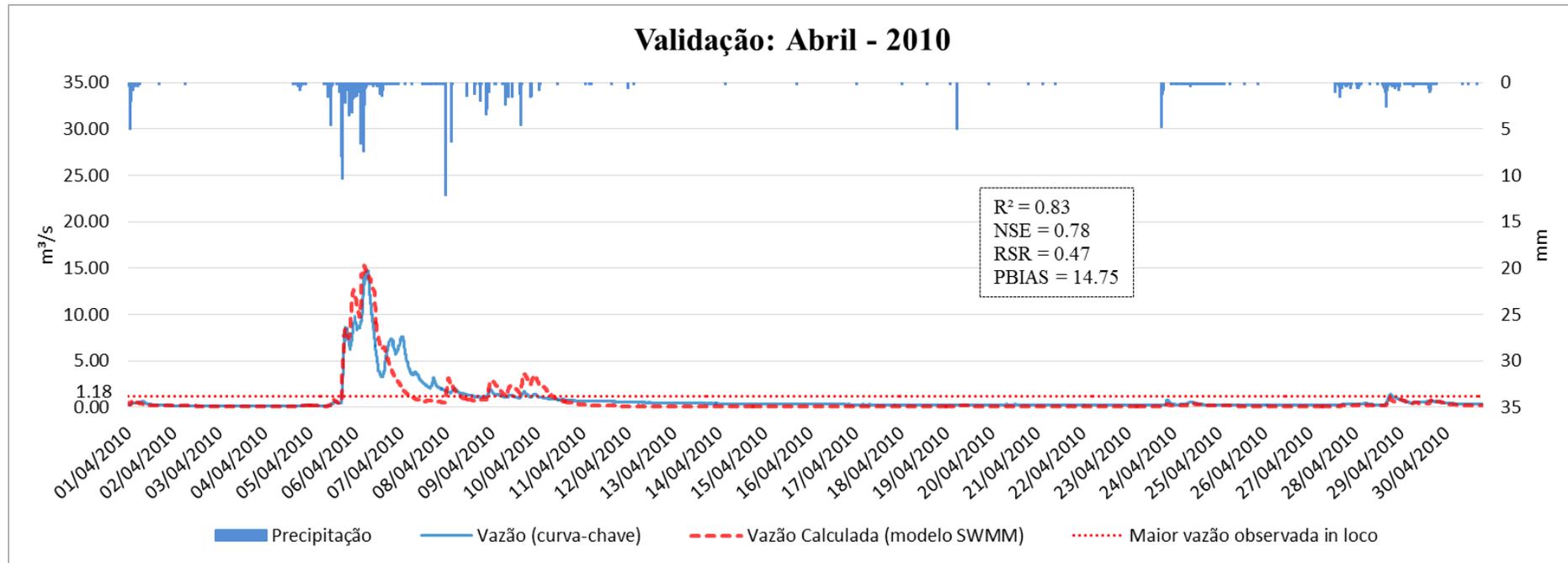
A validação do modelo SWMM foi realizada para o evento de Abril de 2010, marcado pela ocorrência de uma das cheias mais graves em Vargem Grande, local onde está inserida a bacia do rio Morto. Utilizando o prolongamento da tendência superior da equação da curva-chave da bacia, ou seja extrapolação logarítmica, a vazão de pico observada seria igual a 14.7 m<sup>3</sup>/s. Ressalta-se, no entanto, que se considera em princípio mais realístico o valor a ser simulado pelo modelo SWMM, visto que para essa cota elevada, o modelo implícito na curva-chave não se sustentaria. Os escoamentos extravasam as calhas fluviais e atingem as ruas pavimentadas. Nas Figuras 47, 48 e 49 são apresentados os hidrogramas de validação referentes à calibração individual para dezembro de 2008 e junho de 2010 e à calibração simultânea comum para os dois eventos.

Figura 47 – Validação do modelo SWMM para abril de 2010 (conjunto de parâmetros obtido na calibração individual de dezembro de 2008)



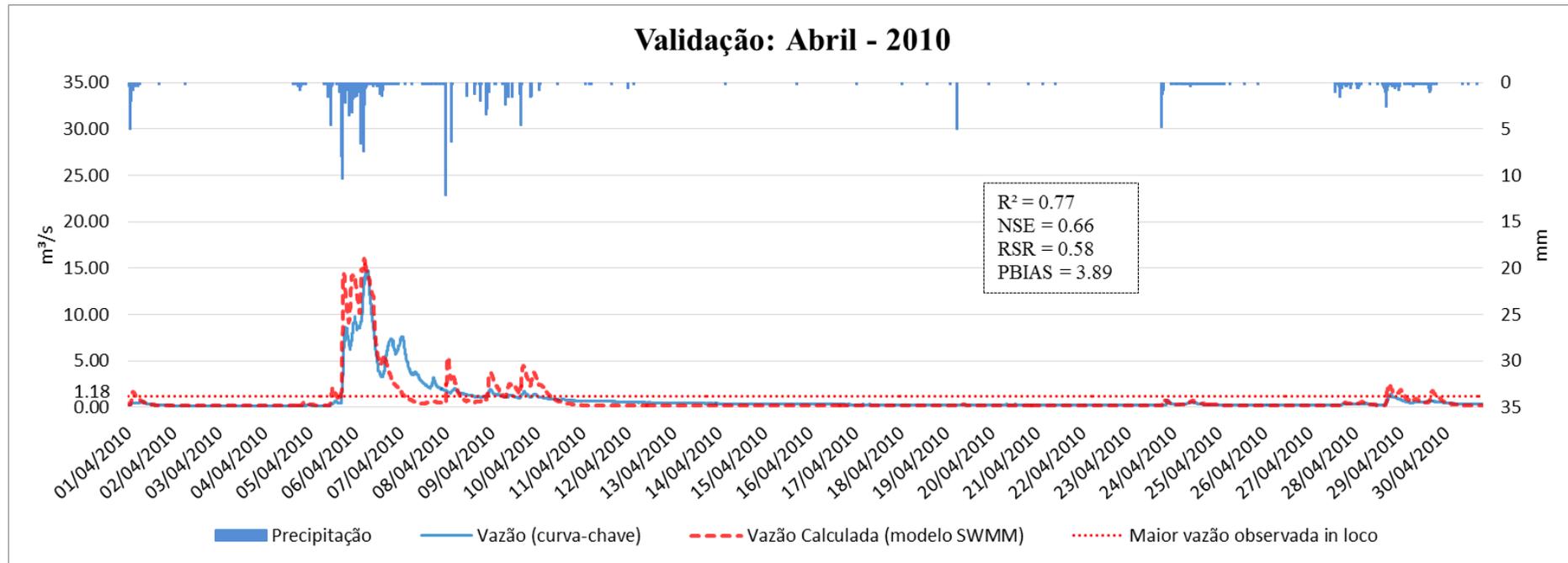
Fonte: O Autor, 2017.

Figura 48 – Validação do modelo SWMM para abril de 2010 (conjunto de parâmetros obtido na calibração individual de junho de 2010)



Fonte: O Autor, 2017.

Figura 49 – Validação do modelo SWMM para abril de 2010 (conjunto de parâmetros obtido na calibração simultânea de dezembro de 2008 e junho de 2010)



Fonte: O Autor, 2017.

Foi interessante observar que a estimativa das vazões máximas pelo modelo SWMM se assemelham às obtidas pela adoção do método logarítmico da curva-chave. Seria necessário o aprofundamento na análise integrada de todas as equações e hipóteses do modelo para aprofundar a compreensão de se esta situação de semelhança entre vazões simuladas pela extrapolação da curva-chave pelo método logarítmico já não seria esperada. De qualquer forma, procedeu-se à estimativa dos coeficientes de ajuste no processo de validação tomando por base as vazões extrapoladas pela curva-chave. De acordo com os valores dos coeficientes estatísticos obtidos e dos hidrogramas gerados, pode-se observar que a representação do modelo SWMM se aproximou bem do “pseudo” valor de pico obtido pela curva-chave, o que se refletiu nos coeficientes matemáticos de ajuste, até melhores do que os obtidos na fase de calibração do modelo. Mas, atenção deve ser dada a esse resultado, que pode ser pura coincidência. Ressalta-se que o valor da vazão máxima simulada pelo modelo SWMM ou pelo modelo de curva-chave é cerca de 13 vezes maior do que as maiores vazões medida e obtida pela curva-chave ajustada em torno de 1.20 m<sup>3</sup>/s (que já apresenta incertezas intrínsecas ao método) e maior cota fluviométrica observada, de cerca de 52 cm.

### 3.6 Resumo e Discussão dos Resultados Obtidos

A seguir, são destacados os principais resultados obtidos durante o processamento do modelo SWMM na bacia hidrográfica do rio Morto:

- A nova discretização realizada na bacia do rio Morto tornou os elementos de drenagem mais homogêneos quanto à intensidade de ocupação, facilitando o ajuste dos parâmetros na etapa de calibração e auxiliando a seleção das sub-bacias com maior porcentagem de área impermeável para simulação dos cenários com telhados verdes. Apesar de ter sido realizada nova discretização, a bacia do rio Morto ficou dividida em 43 elementos de drenagem, como obtido por Rosa (2002). A definição das propriedades de cada sub-bacia e as seções transversais dos cursos d'água foram retiradas de Amaral (2014) e, em alguns casos, obtidas com o auxílio do MDT e ferramentas do ArcGIS;
- Uma das limitações verificadas na versão atual do modelo SWMM e, conseqüentemente, em versões anteriores, foi que este não faz integração com o ambiente SIG. Desta forma, teve-se que recorrer ao software *Storm and Sanitary*

*Analysis* – SSA, que é uma extensão do sistema AutoCAD Civil 3D®, para realizar a importação das sub-bacias e hidrografia da bacia do rio Morto no formato *shapefile* e, posteriormente, a exportação do projeto para o SWMM. Destaca-se que o SSA permite a simulação hidrológica e hidráulica da bacia utilizando os métodos do SWMM. Entretanto, ainda não apresenta um módulo específico para simulação das técnicas LID;

- Foi feita a organização, em planilhas do MS Excel, dos dados hidroclimatológicos registrados a cada 5 minutos, no período de 2008 a 2015. Após isso, foi verificada a existência ou não de dados registrados, bem como períodos com falhas e dados espúrios, resultando em um histograma de dados (fluviométricos e climatológicos). A geração deste histograma foi essencial para subsidiar a escolha dos eventos pluviométricos que estiveram dentro dos limites observados *in loco* na bacia;
- Dado que a bacia do rio Morto apresenta características de paisagem periurbana, o escoamento de base tem grande relevância e deve ser considerado na calibração. Entretanto, o SWMM é amplamente utilizado em bacias intensamente urbanizadas e a maioria dos autores despreza a representação dessa vazão. Devido a isto, foram obtidos poucos trabalhos como referência para ajuste dos parâmetros do escoamento de base, que são os coeficientes A1 e B1 e os parâmetros dos aquíferos. Conforme Amaral (2014) foram definidos três aquíferos representativos de um conjunto de sub-bacias. Ressalta-se que, para determinar a vazão de base nos eventos selecionados, foi utilizada a função “moda”, disponível no MS Excel;
- O ajuste dos parâmetros do escoamento superficial do modelo SWMM foi feito de forma individual para cada evento selecionado e, posteriormente, de forma conjunta. Para otimizar o processo de calibração, a bacia do rio Morto foi dividida em três classes, segundo a porcentagem de área impermeável. Desta forma, o ajuste dos parâmetros do escoamento superficial ( $A_i$ ,  $n_i$ ,  $n_p$ ,  $d_i$ ,  $d_p$ , CN e  $n_c$ ) foi feito por classe. A eficiência das calibrações foi avaliada por meio dos coeficientes estatísticos  $R^2$ , NSE, RSR e PBIAS. Verificou-se que a calibração considerando os dois eventos de forma simultânea teve resultado satisfatório apenas para dezembro de 2008. Desta forma, os resultados obtidos nas calibrações individuais, que apresentaram valores satisfatórios para todos os coeficientes, não foram descartados. Assim, os três conjuntos de dados obtidos na etapa de calibração, sendo dois para a calibração individual e um para a calibração comum dos dois eventos, foram considerados nas etapas de validação e simulação de cenários. Esta decisão gera incertezas nos resultados obtidos pelo

modelo nos cenários propostos, tendo como questionamento qual conjunto de parâmetros deveria ser realmente considerado nesse caso. Por outro lado, independentemente do conjunto de parâmetros considerados no estudo de cenários, sempre foi obtido algum benefício, seja na redução da vazão de pico, ou do volume de escoamento superficial, com a introdução dos telhados verdes;

- Considerando a calibração individual de cada evento, o coeficiente A1 foi definido como 0.0000023 e B1 como 1.8, para dezembro de 2008. As vazões de base observadas e calculadas foram, respectivamente, iguais a 0.03 e 0.02. Já para junho de 2010, o coeficiente A1 foi definido como 0.0000023 e B1 como 1.7. Neste evento, as vazões de base observadas e calculadas foram, respectivamente, iguais a 0.09 e 0.12.
- Considerando a calibração simultânea dos dois eventos, o coeficiente A1 foi definido como 0.0000023 e B1 como 1.8. Para dezembro de 2008 as vazões de base observadas e calculadas foram, respectivamente, iguais a 0.03 e 0.02, enquanto que para junho de 2010 foram iguais a 0.09 e 0.16;
- A validação do modelo SWMM foi feita para abril de 2010. De acordo com os resultados obtidos (hidrogramas e coeficientes estatísticos), pode-se afirmar que o modelo SWMM foi capaz de representar de forma adequada o comportamento hidrológico e hidráulico da bacia do rio Morto para um evento de cheia, considerando todos os conjuntos de parâmetros ajustados na calibração;

## 4. SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS

### 4.1 Descrição dos Cenários

Conforme descrito no Capítulo 2, a simulação computacional de cenários no modelo SWMM para a bacia do rio Morto considerou a situação atual da bacia e a situação com implantação de telhados verdes, para o evento pluviométrico de Abril de 2010. Foram selecionados os elementos de drenagem 36, 37 e 43 para implantação de telhados verdes, já que representam as sub-bacias com maior grau de ocupação urbana da bacia do rio Morto, localizados próximos do exutório.

Ressalta-se que a simulação dos cenários traçados envolveu os três conjuntos de parâmetros obtidos na etapa de calibração. Em todos os casos, considerou-se a implantação de telhados verde em 100% das áreas de telhado contabilizadas em cada sub-bacia, conforme apresentado no Quadro 18.

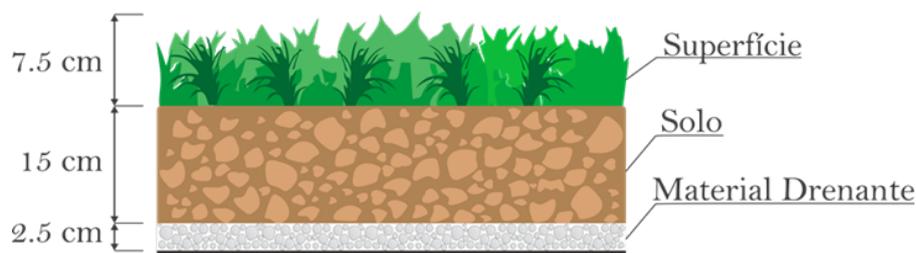
Quadro 18 – Área de Telhado Verde considerada em cada sub-bacia para simulação no modelo SWMM

Sub-bacia	Área total (m <sup>2</sup> )	Área de Telhado/Telhado Verde (m <sup>2</sup> )	% de Telhado Verde
36	273800	54760.00	20
37	475859	118964.75	25
43	74711	37355.50	50

Fonte: O Autor, 2017.

Foram definidos os parâmetros para coberturas com telhados verdes (superfície vegetal, solo e camada de drenagem) com base nos dados da literatura, atribuindo-se ao solo a textura franco-arenosa, conforme definido anteriormente. A Figura 50 apresenta um esquema simplificado do Telhado Verde considerado nas simulações.

Figura 50 – Esquema representativo do telhado verde considerado nas simulações do modelo SWMM



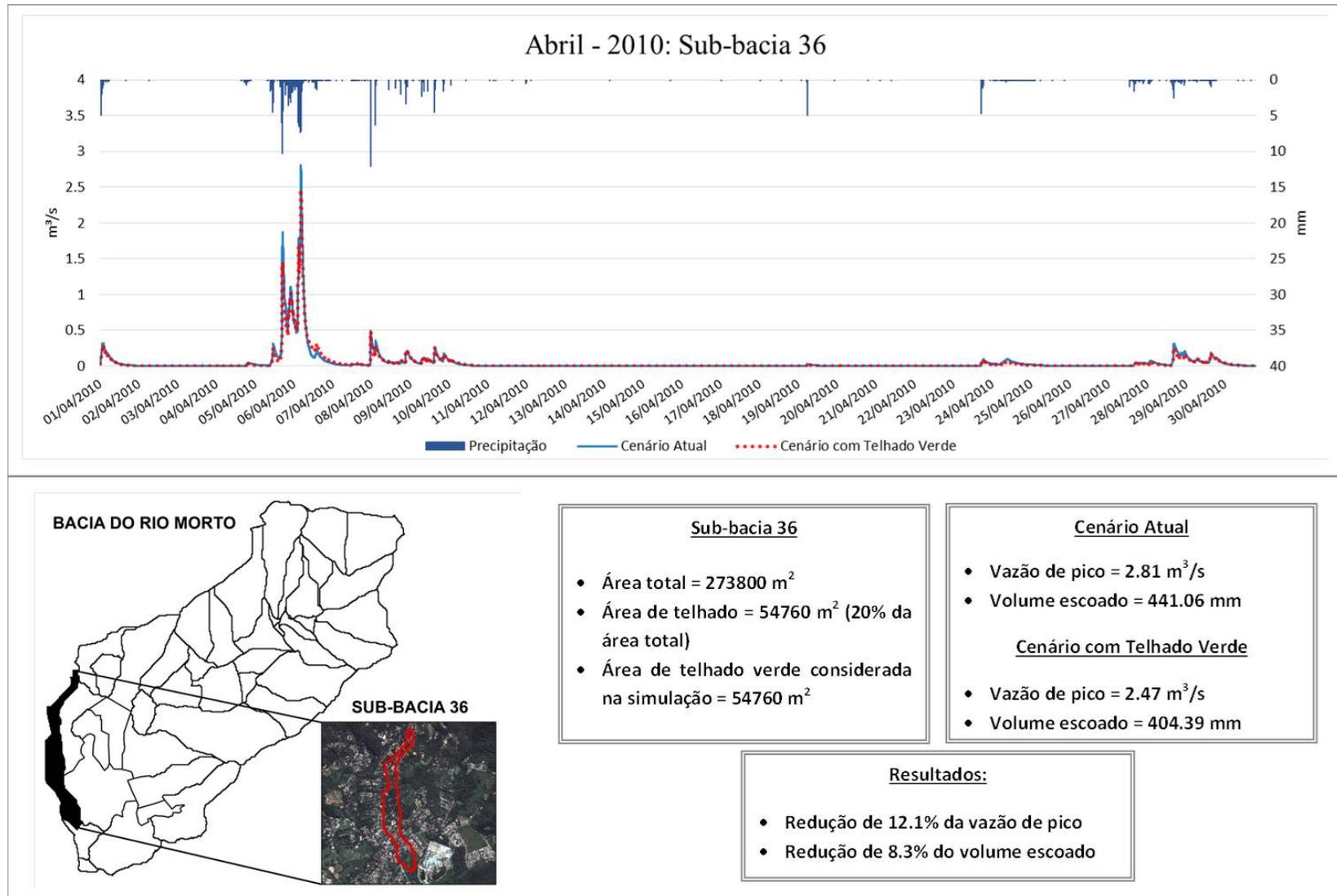
Fonte: O Autor, 2017.

Ressalta-se que durante a etapa de definição dos parâmetros do telhado verde no SWMM, constatou-se que o modelo utiliza o método de green-ampt para representar o processo de infiltração. O modelo poderia dar a opção ao usuário de escolher o método a ser utilizado, assim como ocorre para a bacia. Além disso, não ficou explícito como o modelo considera a evapotranspiração nestes dispositivos.

#### 4.2 Análise dos Resultados da Simulação de Cenários

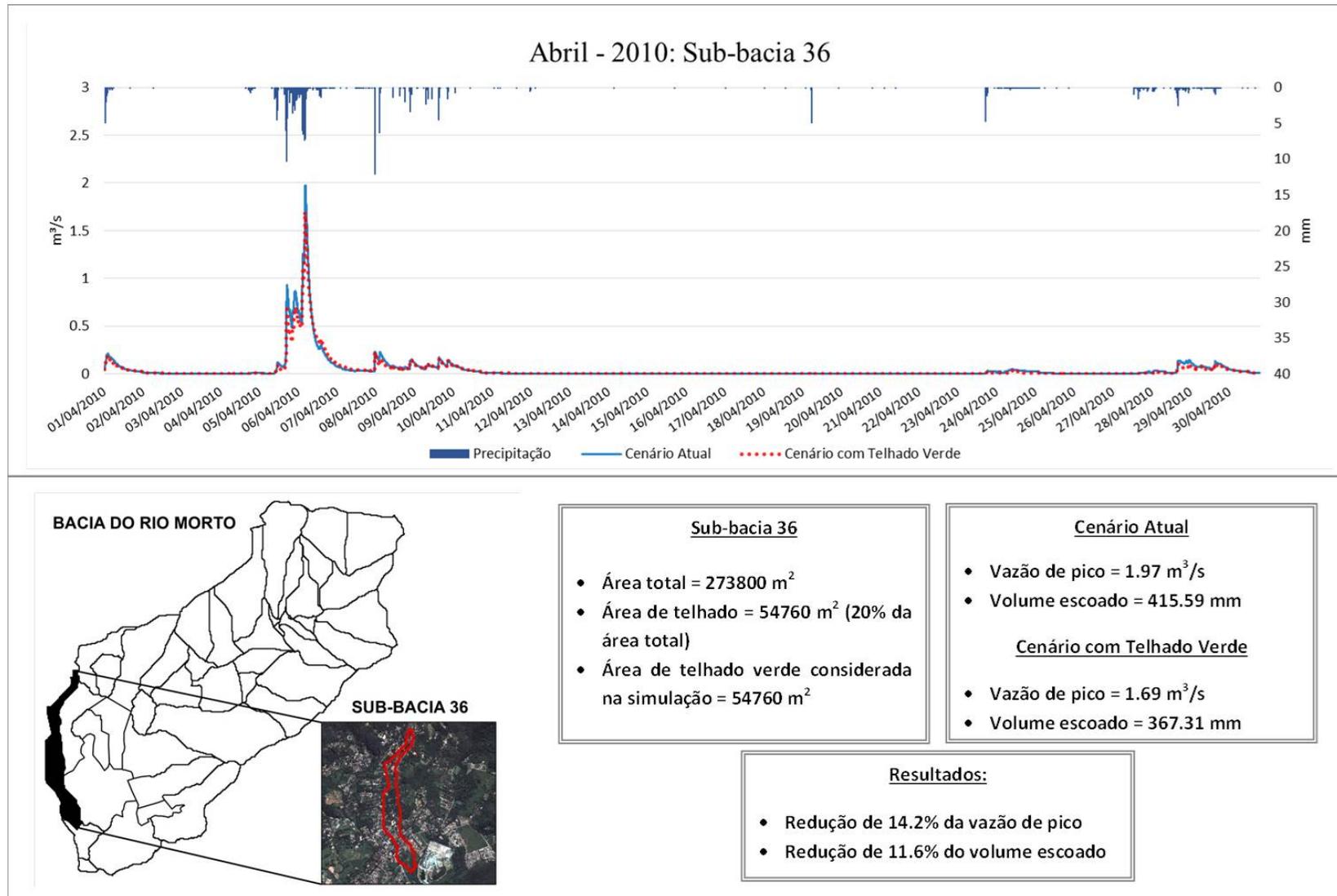
Nas Figuras 51, 52 e 53 são apresentados os hidrogramas gerados para a sub-bacia 36, comparando o cenário atual da sub-bacia com o cenário de implantação de telhados verdes, considerando o conjunto de parâmetros obtidos na calibração de dezembro de 2008, junho de 2010, e calibração simultânea dos dois eventos, respectivamente. Seguindo esta mesma ordem, as Figuras 54, 55 e 56 apresentam os resultados para a sub-bacia 37 e as Figuras 57, 58 e 59 para a sub-bacia 43.

Figura 51 – Hidrogramas dos cenários propostos para a sub-bacia 36 (com utilização dos parâmetros obtidos na calibração de dezembro de 2008)



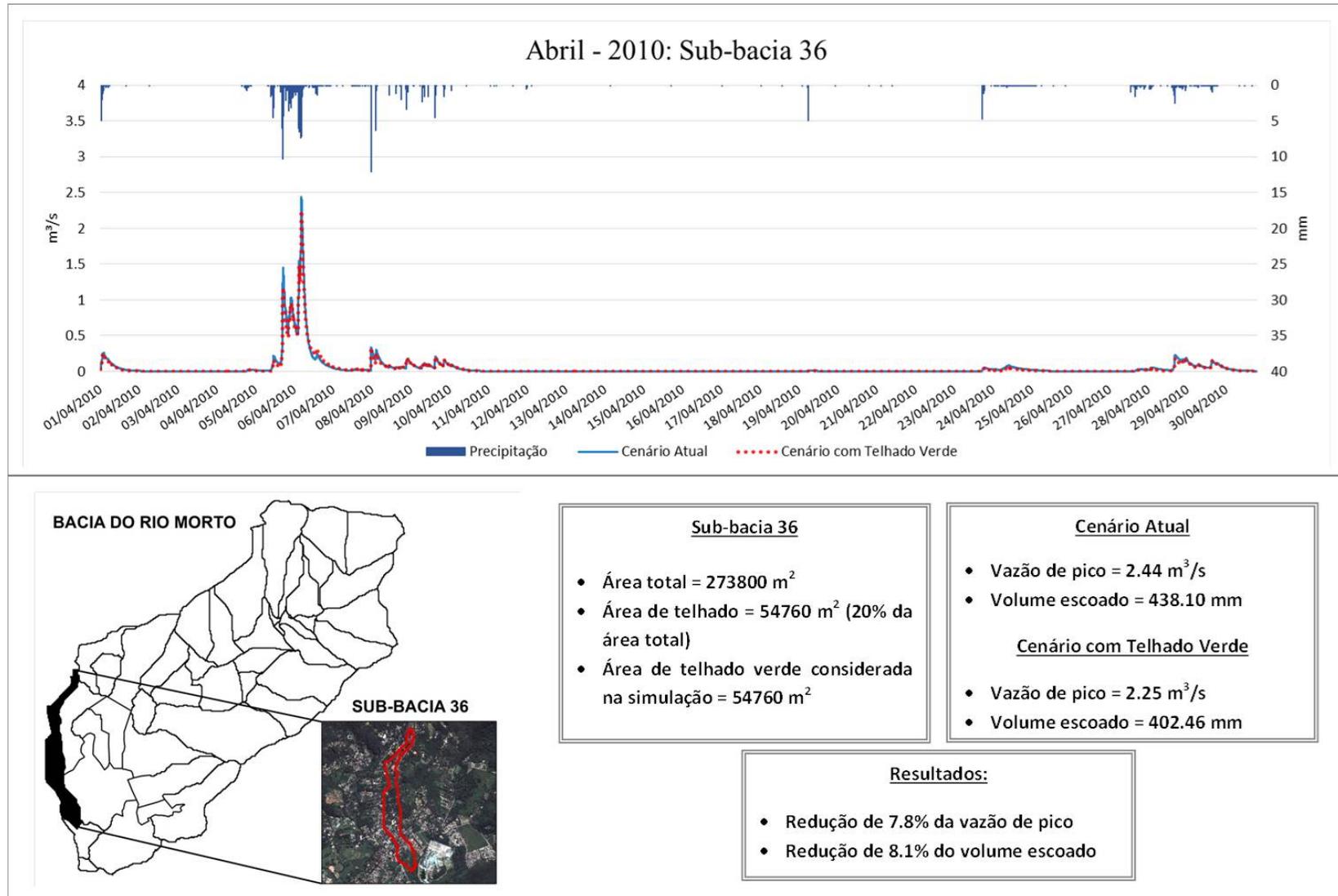
Fonte: O Autor, 2017.

Figura 52 – Hidrogramas dos cenários propostos para a sub-bacia 36 (com utilização dos parâmetros obtidos na calibração de junho de 2010)



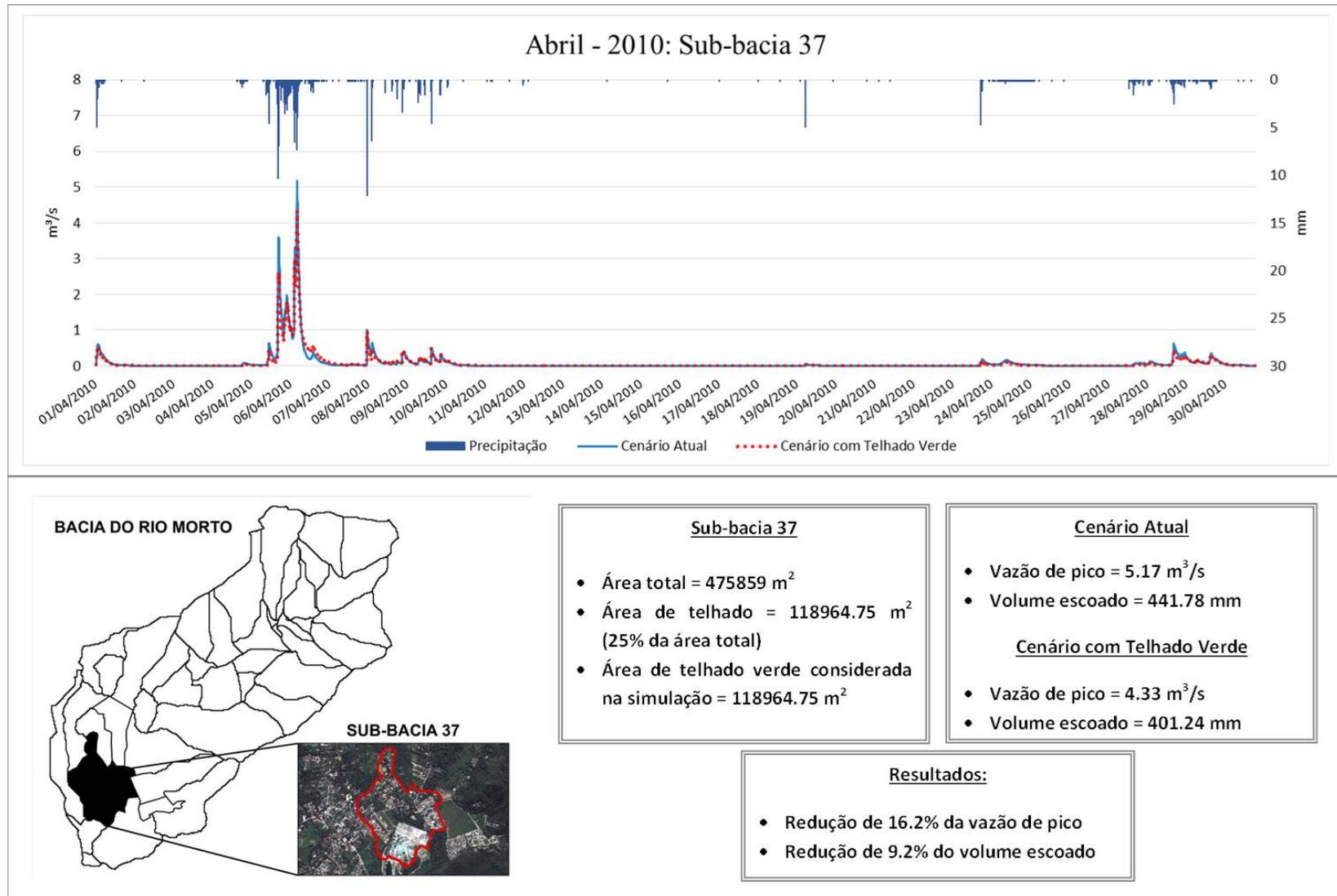
Fonte: O Autor, 2017.

Figura 53 – Hidrogramas dos cenários propostos para a sub-bacia 36 (com utilização dos parâmetros obtidos na calibração simultânea de dezembro de 2008 e junho de 2010)



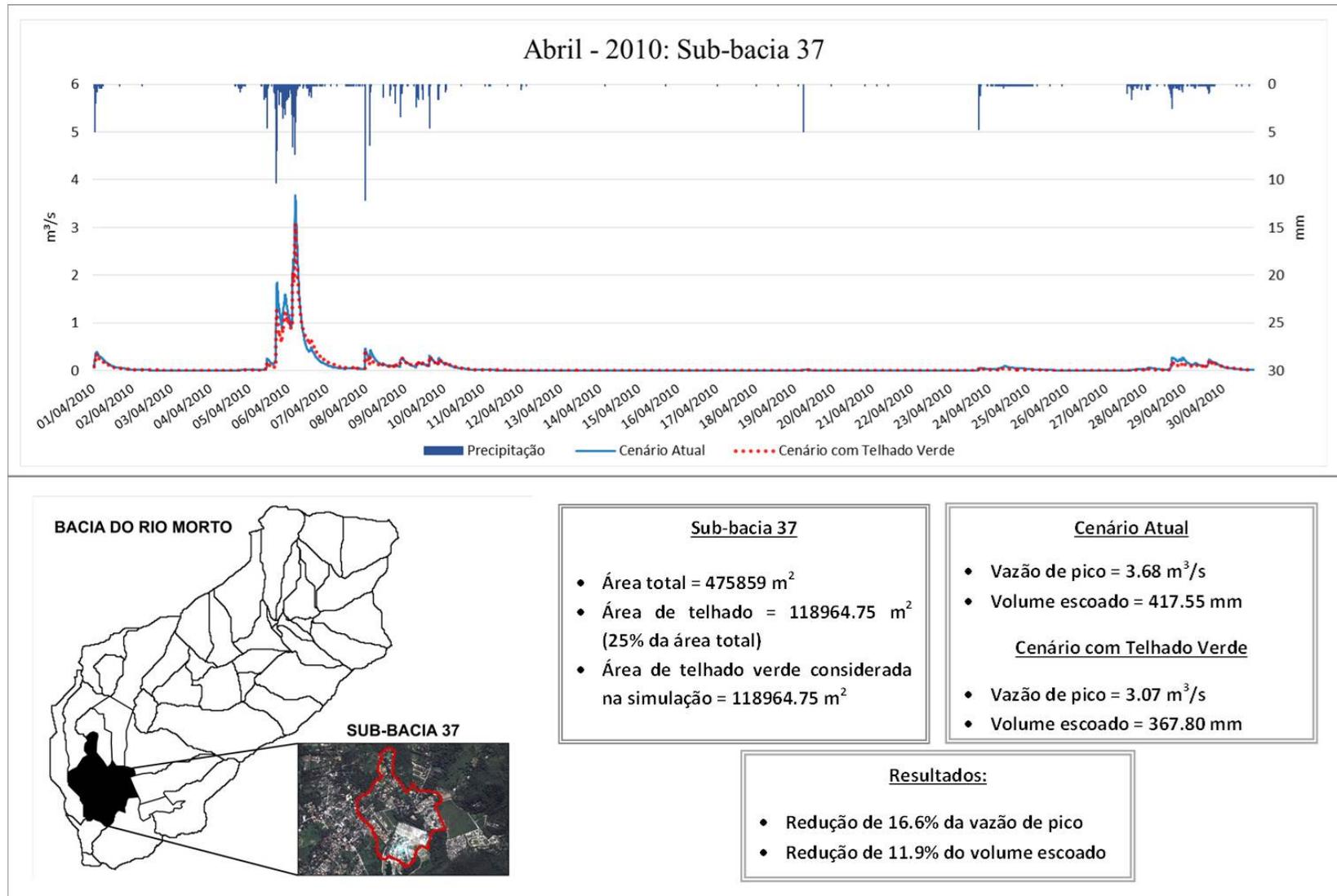
Fonte: O Autor, 2017.

Figura 54 – Hidrogramas dos cenários propostos para a sub-bacia 37 (com utilização dos parâmetros obtidos na calibração de dezembro de 2008)



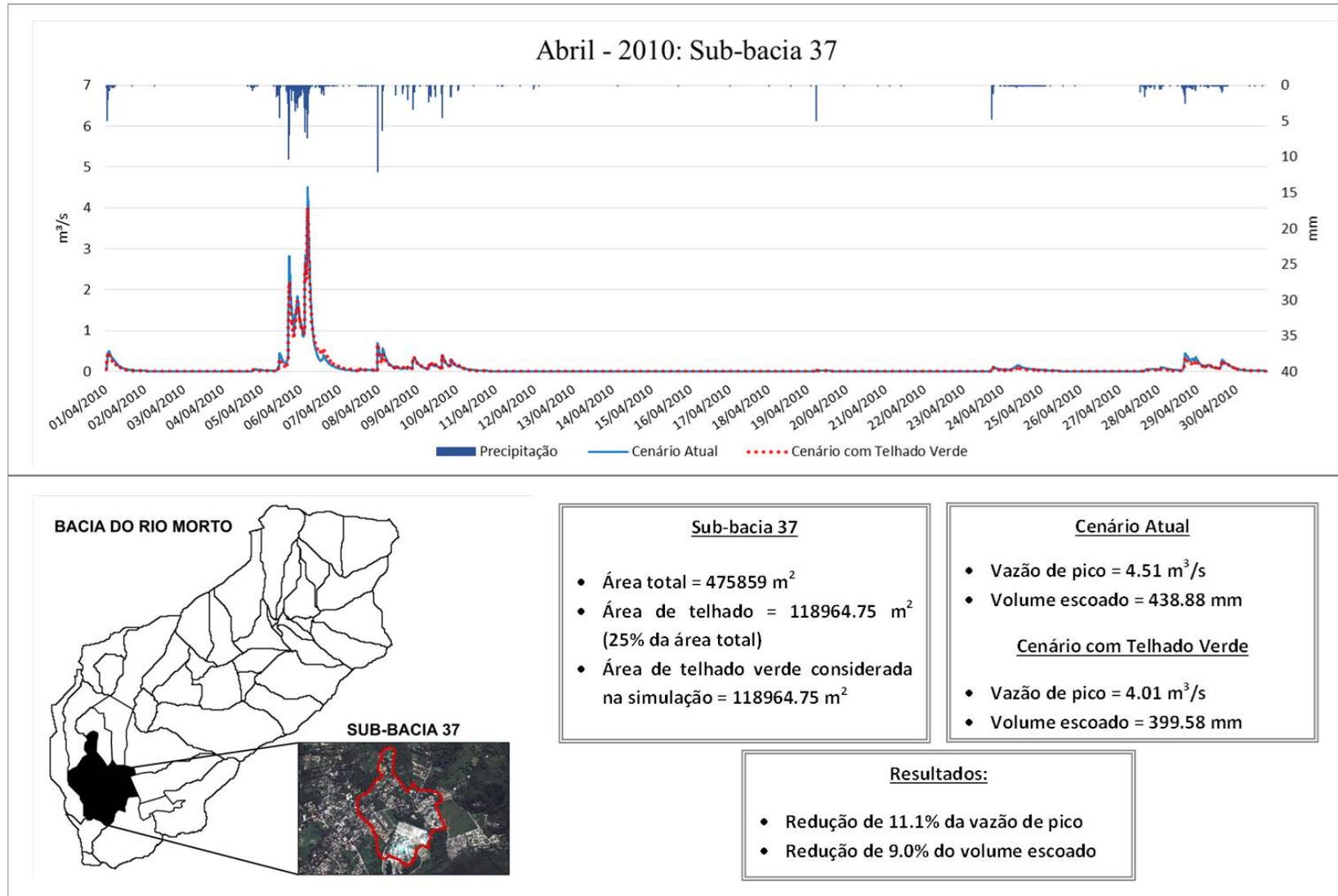
Fonte: O Autor, 2017.

Figura 55 – Hidrogramas dos cenários propostos para a sub-bacia 37 (com utilização dos parâmetros obtidos na calibração de junho de 2010)



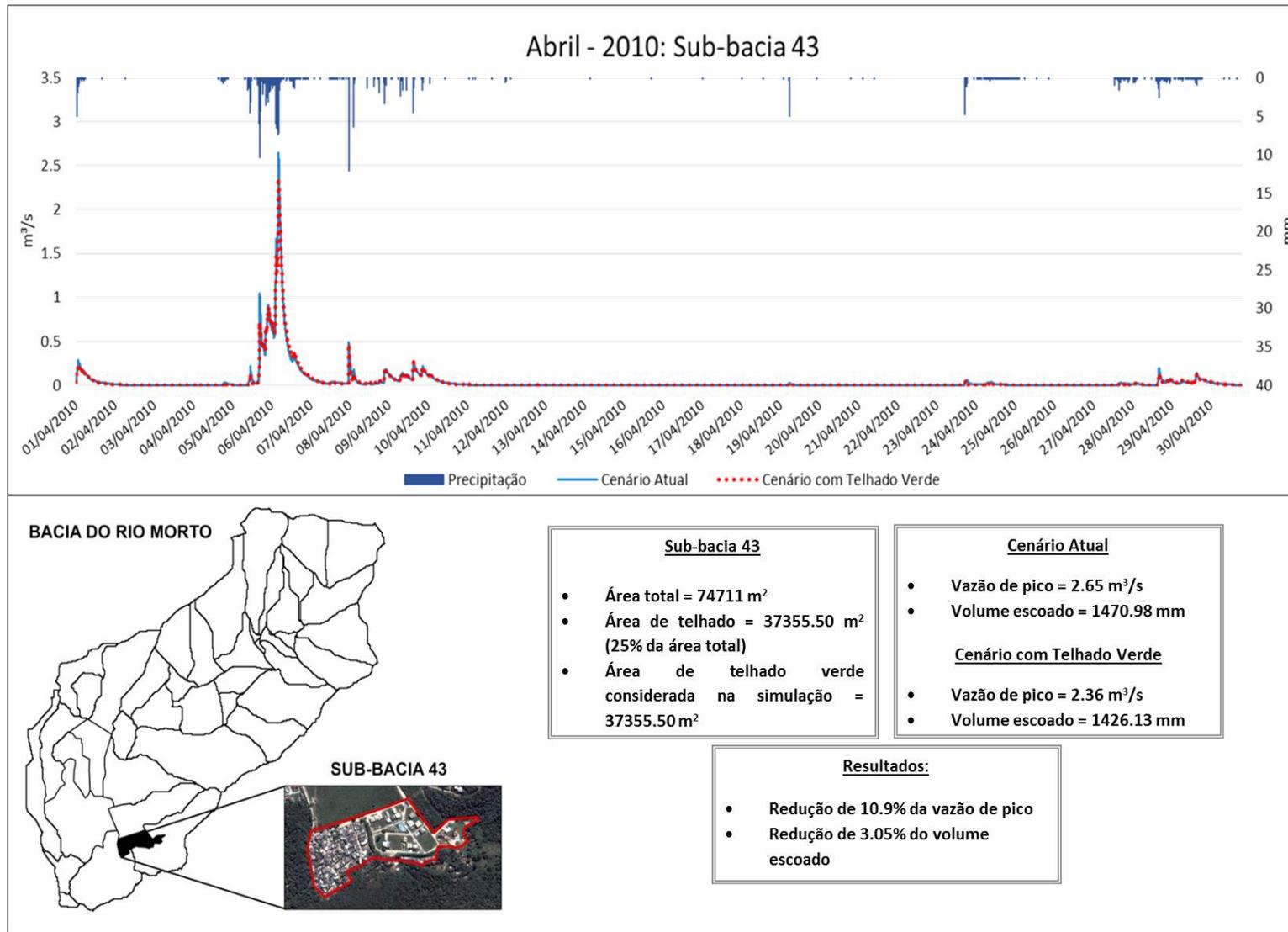
Fonte: O Autor, 2017.

Figura 56 – Hidrogramas dos cenários propostos para a sub-bacia 37 (com utilização dos parâmetros obtidos na calibração simultânea de dezembro de 2008 e junho de 2010)



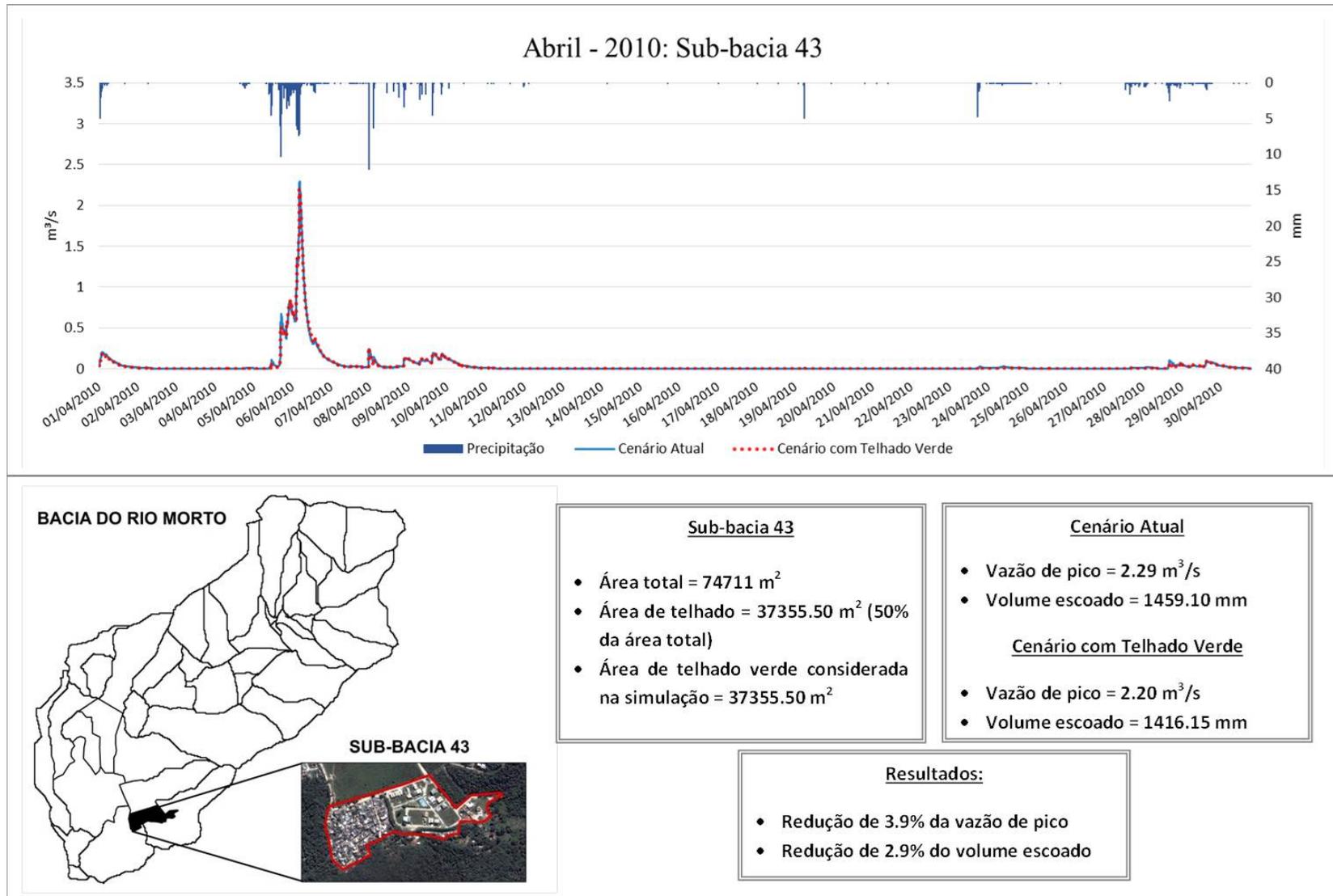
Fonte: O Autor, 2017.

Figura 57 – Hidrogramas dos cenários propostos para a sub-bacia 43 (com utilização dos parâmetros obtidos na calibração de dezembro de 2008)



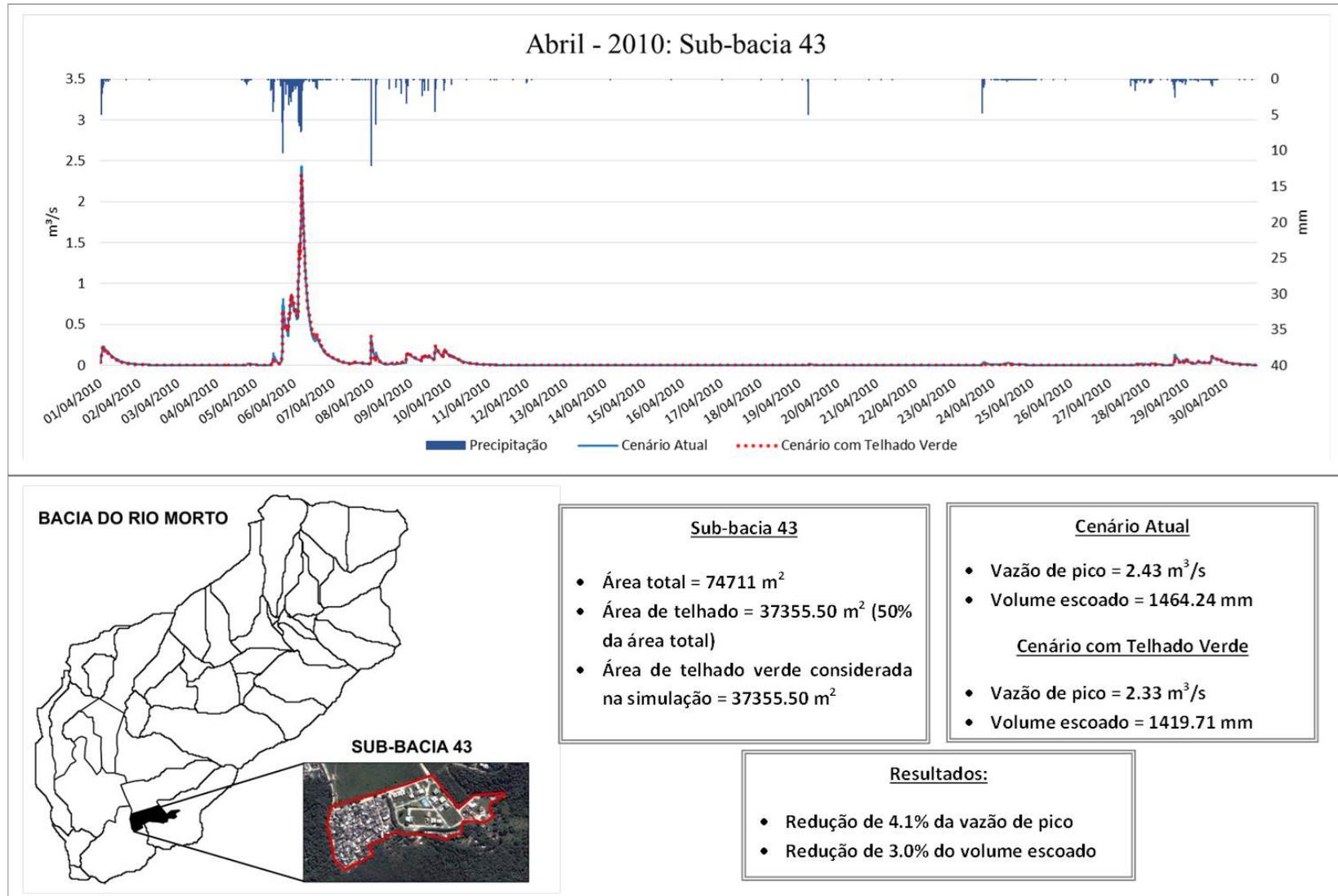
Fonte: O Autor, 2017.

Figura 58 – Hidrogramas dos cenários propostos para a sub-bacia 43 (com utilização dos parâmetros obtidos na calibração de junho de 2010)



Fonte: O Autor, 2017.

Figura 59 – Hidrogramas dos cenários propostos para a sub-bacia 43 (com utilização dos parâmetros obtidos na calibração simultânea de dezembro de 2008 e junho de 2010)



Fonte: O Autor, 2017.

Para facilitar a análise dos resultados obtidos na simulações, o Quadro 19 apresenta, para cada conjunto de parâmetros utilizados e para cada sub-bacia, a redução da vazão de pico e do volume escoado com a implantação de telhado verde.

Quadro 19 – Consolidação dos resultados das simulações com telhado verde para as sub-bacias 36, 37 e 43

<b>Redução da Vazão de Pico</b>			
<b>Conjunto de Parâmetros</b>	<b>Sub-bacia 36</b>	<b>Sub-bacia 37</b>	<b>Sub-bacia 43</b>
Dezembro de 2008	12.10%	16.20%	10.90%
Junho de 2010	14.20%	16.60%	3.90%
Dezembro de 2008 / Junho de 2010	7.80%	11.10%	4.10%
<b>Redução do Volume Escoado</b>			
<b>Conjunto de Parâmetros</b>	<b>Sub-bacia 36</b>	<b>Sub-bacia 37</b>	<b>Sub-bacia 43</b>
Dezembro de 2008	8.30%	9.20%	3.05%
Junho de 2010	11.60%	11.90%	2.90%
Dezembro de 2008 / Junho de 2010	8.10%	9.00%	3.00%

Fonte: O Autor, 2017.

Em todas as simulações com telhados verdes foram observadas a redução da vazão de pico e do volume escoado. Apesar do evento pluviométrico ser o mesmo para todos os cenários (Abril de 2010), constatou-se que para diferentes conjuntos de parâmetros ajustados para o modelo SWMM, os telhados verdes apresentaram eficiências variáveis na redução do escoamento superficial. Por exemplo, a simulação com telhados verdes que considerou o conjunto de parâmetros ajustados para junho de 2010 gerou a maior redução da vazão de pico e do volume escoado nas sub-bacias 36 e 37. Entretanto, para a sub-bacia 43, a melhor eficiência dos telhados verdes para redução do escoamento superficial foi obtida com a utilização do conjunto de parâmetros ajustados para dezembro de 2008. Além disso, não foi observado o retardo da vazão de pico em nenhum hidrograma gerado para as sub-bacias analisadas.

Considerando a atuação dos telhados verdes de forma conjunta nas sub-bacias 36, 37 e 43, foi feita uma análise sobre o hidrograma no exutório da bacia do rio Morto, com o objetivo de verificar se este dispositivo de controle do escoamento superficial influencia na redução da vazão de pico observada na bacia como um todo. Conforme mostra o Quadro 20, foram observadas reduções bem pequenas nas vazões de pico, sem a constatação do retardo das mesmas.

Quadro 20 – Consolidação dos resultados das simulações com telhado verde para a bacia do rio Morto

Conjunto de Parâmetros	Vazão de Pico (m <sup>3</sup> /s)		Ocorrência da Vazão de Pico	Redução da Vp em relação ao cenário atual
	Cenário Atual	Cenário com Telhado Verde		
Dezembro de 2008	16.82	16.55	Dia 06 às 05:15h	1.60%
Junho de 2010	15.73	15.50	Dia 06 às 05:15h	1.50%
Dezembro de 2008 / Junho de 2010	16.45	16.30	Dia 06 às 05:15h	1.00%

Fonte: O Autor, 2017.

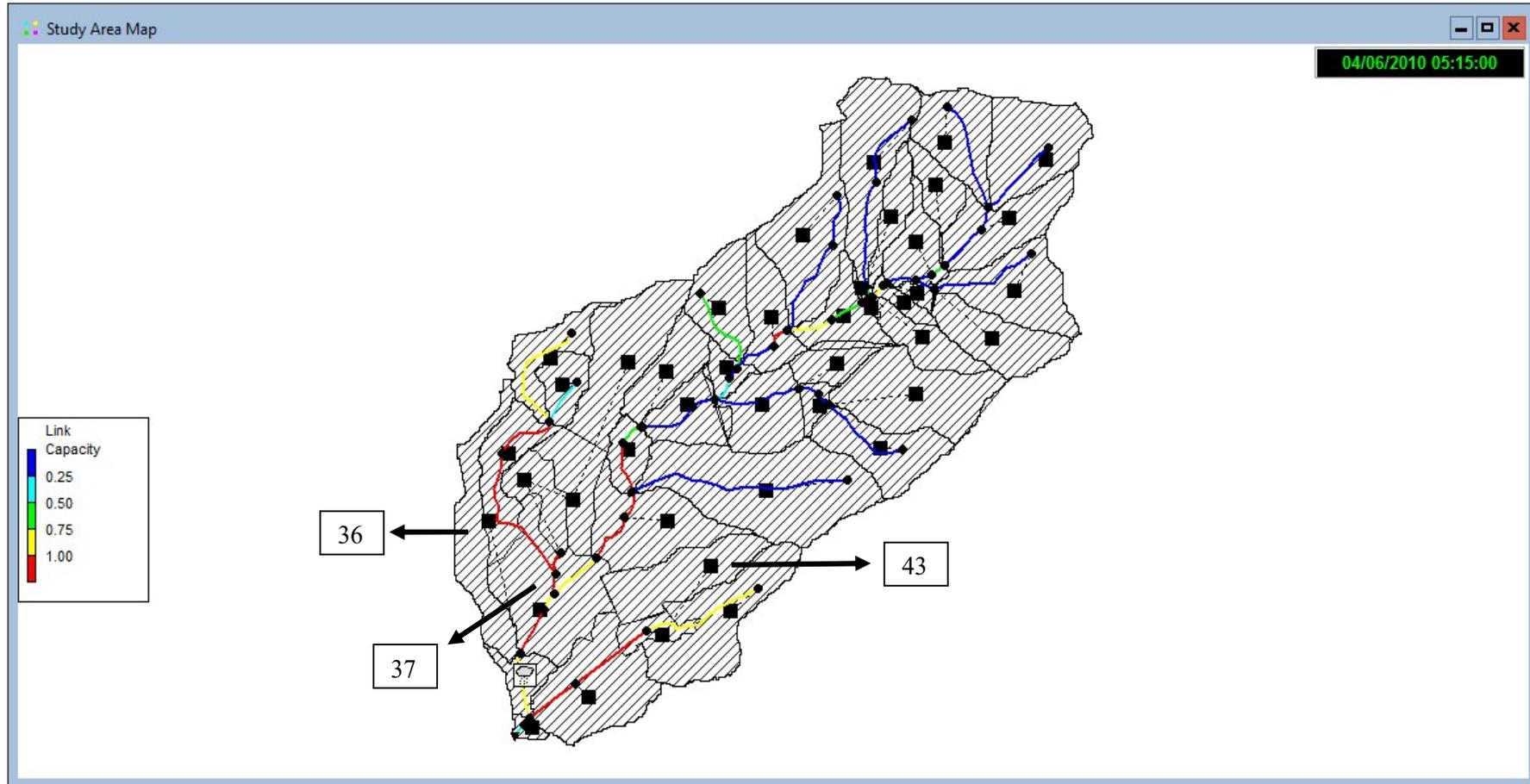
Em comparação com os dados da literatura, foram analisados os estudos de Shin e Kim (2015) e Masseroni e Cislighi (2016), que utilizaram a mesma versão do modelo SWMM para simular cenários com telhados verdes em bacias urbanas. Masseroni e Cislighi (2016) considerou a implantação de telhados verdes em 5%, 30% e 100% da área impermeável da bacia de Seveso, localizada na Itália e com área de drenagem igual a 95 km<sup>2</sup>, obtendo uma porcentagem média de redução da vazão de pico de 1.3%, 1.4% e 30%, respectivamente. Shim e kim (2015), considerando a implantação de telhados verde em todos as áreas de telhado de uma bacia localizada na Coreia, e com área igual a 4.7 km<sup>2</sup>, obteve uma redução de 25.6% do escoamento superficial. As reduções das vazões de pico observadas no exutório da bacia do rio Morto estiveram bem abaixo das reduções dos estudos analisados. Entretanto, deve-se considerar que a bacia do rio Morto apresenta característica periurbana e que as áreas de telhados convertidas em telhados verdes nas simulações corresponde a apenas 2% da área total da bacia.

Por fim, com o auxílio do modelo SWMM, foi feita uma avaliação da capacidade da calha dos rios da bacia do rio Morto para as vazões calculadas no dia 06/04/2010 às 05:15h, horário mais crítico do evento de Abril de 2010. Nas Figuras 60, 61 e 62 são apresentados os mapas da bacia com representação da capacidade das calhas dos rios, numa escala de 0 a 100%, para as simulações com telhados verdes considerando os conjuntos de parâmetros obtidos na calibração. Os rios destacados com a cor vermelha indicam a ocorrência de transbordamento da calha (inundação). Verificou-se que não houve nenhuma mudança antes e depois da implantação conjunta de telhados verdes nas sub-bacias 36, 37 e 43.

Após as simulações com os cenários propostos, verificou-se que com a implantação de telhados verdes nas sub-bacias 36, 37 e 43 as vazões de pico nestes elementos de drenagem reduziram de forma mais significativa. Além disso, a atuação conjunta dos telhados verdes nestes elementos provocou uma ligeira redução da vazão de pico no exutório da bacia do rio

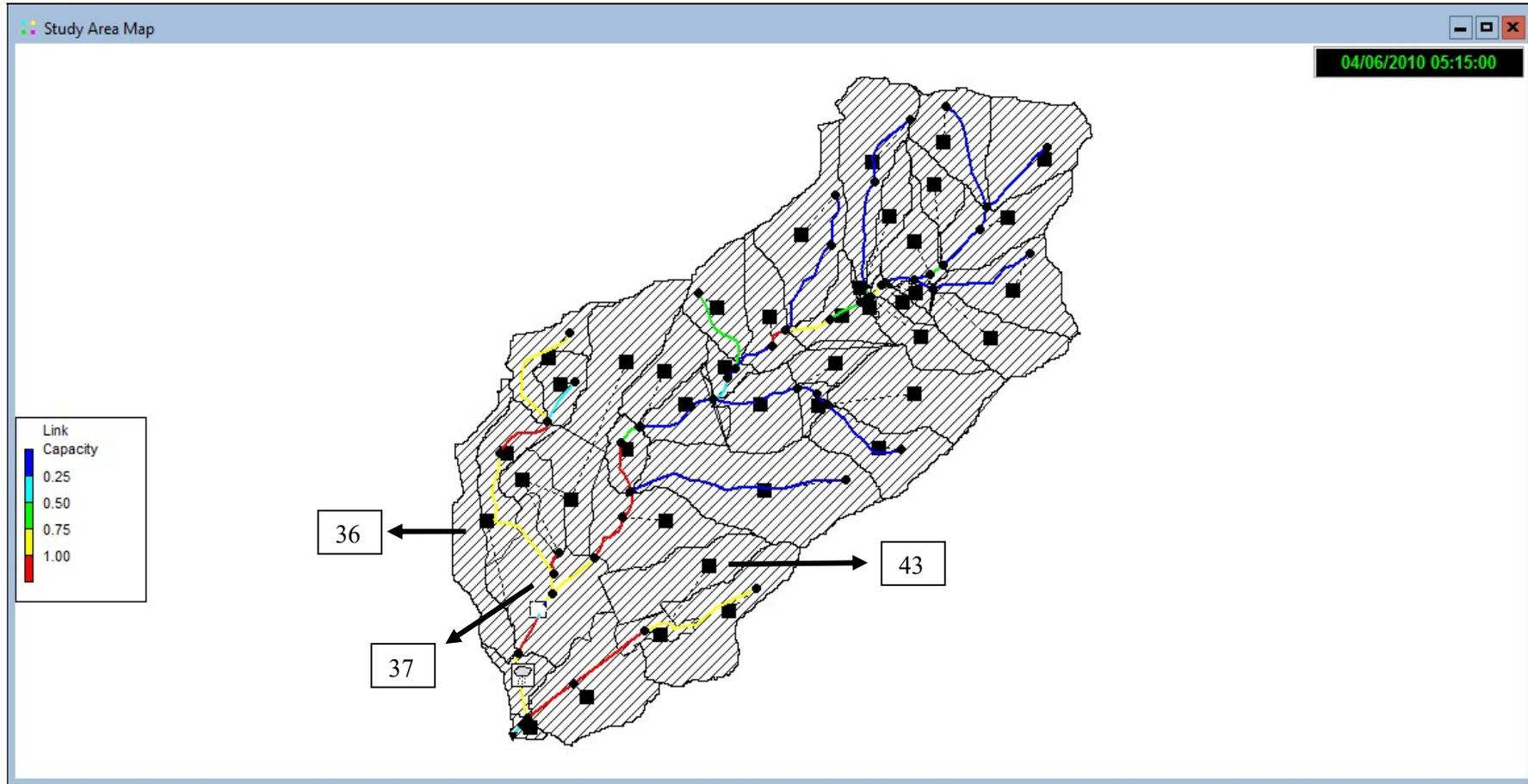
Morto. Entretanto, não foi observada a mitigação nas inundações nos trechos dos rios destacados em vermelho nas Figuras 60, 61 e 62, onde houve extravasamento da calha.

Figura 60 – Capacidade das calhas do rios, considerando o conjunto de parâmetros ajustado para dezembro de 2008



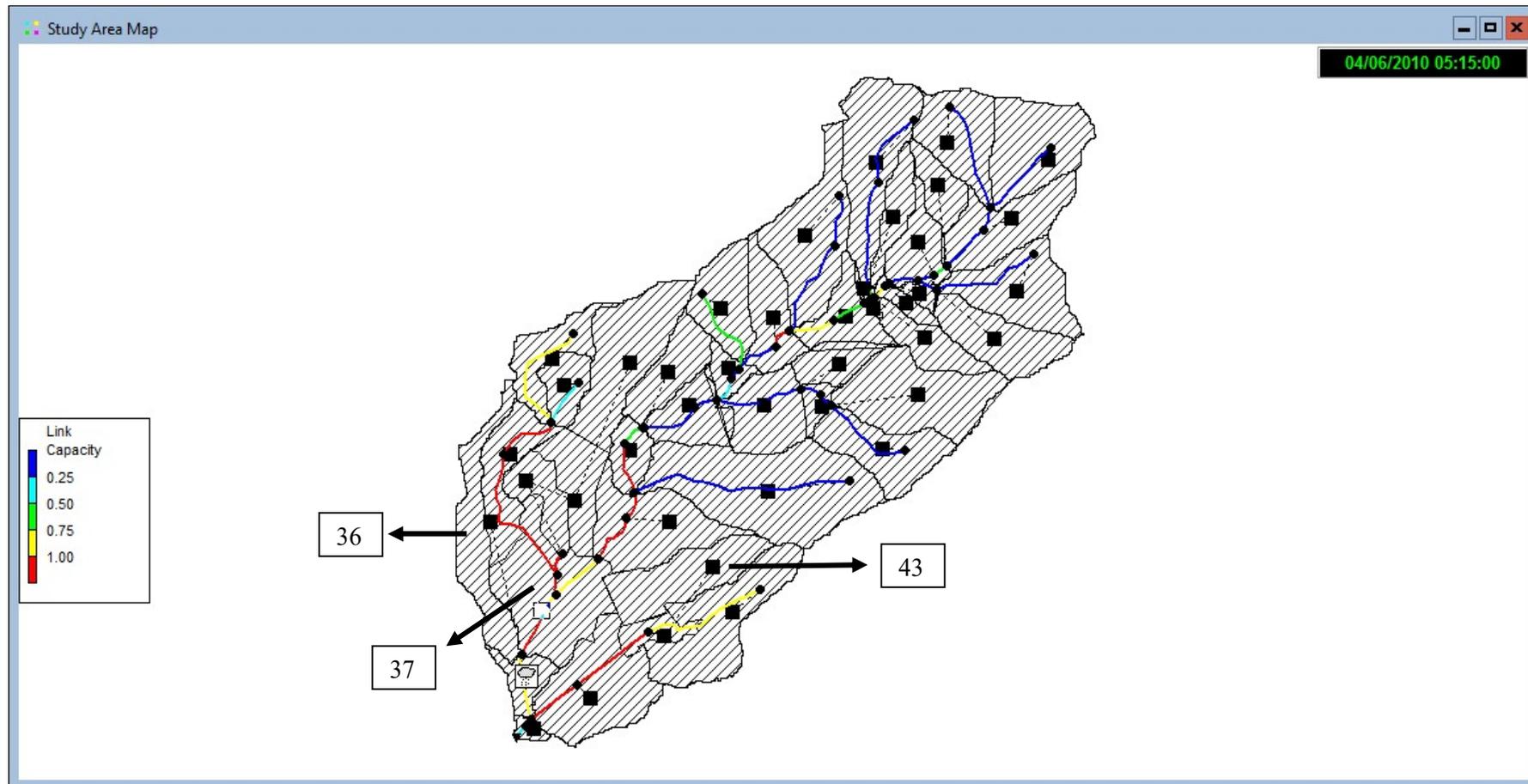
Fonte: O Autor, 2017.

Figura 61 – Capacidade das calhas do rios, considerando o conjunto de parâmetros ajustado para junho de 2010



Fonte: O Autor, 2017.

Figura 62 – Capacidade das calhas do rios, considerando o conjunto de parâmetros ajustado para dezembro de 2008 e junho de 2010



Fonte: O Autor, 2017.

## CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O objetivo geral desta pesquisa foi avaliar a adequabilidade do modelo SWMM na representação do processo chuva-vazão verificado na bacia hidrográfica do rio Morto para os eventos pluviométricos selecionados e verificar seu comportamento hidrológico-hidráulico frente à simulação de cenários envolvendo a implantação de telhados verdes para o evento de abril de 2010, considerado como um dos mais críticos registrados na região.

A simulação de cenários com telhados verdes foi feita para as sub-bacias 36, 37 e 43, elementos com maior porcentagem de área impermeável, para o evento pluviométrico de Abril de 2010. Considerou-se que toda a área de cobertura das edificações destas sub-bacias fosse substituída por telhados verdes, correspondendo a 20%, 25% e 50% da área total da sub-bacia, respectivamente. Verificou-se que em todas as simulações houve redução da vazão de pico e do escoamento gerado em cada sub-bacia. As reduções médias da vazão de pico foram iguais a 11.4%, 14.6% e 3.6% enquanto que para o volume escoado foram observadas reduções médias de 9.3%, 10.0% e 3.0%, respectivamente.

No entanto, a atuação dos telhados verdes de forma conjunta nas sub-bacias 43, 37 e 36 provoca uma ligeira redução da vazão de pico no exutório da bacia do rio Morto. Para o conjunto de parâmetros ajustados individualmente para dezembro de 2008 e junho de 2010 foi observada uma redução de 1.60% e 1.50%, respectivamente. Com o conjunto de parâmetros ajustado para os dois eventos foi observada uma redução de 1.00%. Além disso, a implantação de telhados verdes nas sub-bacias estudadas não reverteu a inundação dos trechos dos rios em que foram constatados, por meio do modelo SWMM, extravasamento da calha.

Constatou-se que, para diferentes conjuntos de parâmetros ajustados no processo de calibração do modelo SWMM, a alocação (virtual) de telhados verdes apresentou eficiência variável na redução da vazão de pico e do volume escoado em cada sub-bacia estudada. Este resultado gera incertezas sobre qual conjunto de parâmetros deve ser utilizado para o estudo de alternativas de controle do escoamento superficial na bacia do rio Morto.

Com relação a esta etapa de calibração do modelo, que envolveu o ajuste manual dos parâmetros do modelo para os eventos de dezembro de 2008 e junho de 2010, observou-se que apesar de esforço considerável na busca de um único conjunto de parâmetros que pudesse atender ao ajuste dos hidrogramas observado e simulado de forma equivalente, os resultados da calibração para os eventos selecionados de forma individual, reproduziu resultados bem superiores, o que acabou levando à decisão de considerar os três conjuntos de parâmetros

obtidos no processo de validação para o evento crítico de abril de 2010, subsequente, e no estudo de cenários.

O processo de calibração exigiu bastante esforço, mas por outro lado enriqueceu o domínio sobre a conceituação dos sistemas hidrológico-hidráulico implementados no modelo SWMM.

Em suma, esta pesquisa representa uma contribuição metodológica para o uso do modelo SWMM envolvendo simulações hidrológico-hidráulicas que considerem cenários com telhados verdes. Apesar do módulo para representação de telhados verdes no SWMM ser relativamente recente, e não existir uma extensa literatura a respeito, os resultados encontrados estão compatíveis com os dados da literatura. Além disso, verificou-se que o modelo SWMM é capaz de representar, de forma adequada, as vazões de base e vazões superficiais em bacias periurbanas. Os valores ajustados para os parâmetros do escoamento superficial e subterrâneo do modelo SWMM estão dentro das faixas admissíveis, conforme estudos realizados com o modelo no Brasil e no mundo. Dado o impacto observado nos hidrogramas nas simulações virtuais com cenários de telhados verdes na bacia do Rio Morto, que não é ainda tão urbanizada, entende-se que estes dispositivos podem ter impacto ainda mais relevante em bacias densamente urbanizadas. Assim, apesar de considerar que os estudos de calibração do modelo SWMM na bacia do rio Morto devam ser aprofundados para obtenção de um conjunto único de parâmetros ajustados, torna-se aceitável admitir que este modelo pode ser utilizado como ferramenta para a busca da gestão sustentável das águas pluviais. Cabe ainda ressaltar o impacto da implantação de telhados verdes na redução do escoamento superficial no âmbito da microdrenagem local, bem como a importância do seu valor agregado. Além disso, o dispositivo de telhados verdes apresenta inúmeras vantagens com relação a outras questões da sustentabilidade tais como redução da temperatura, melhoria da qualidade do ar, contribuição paisagística, redução dos níveis de ruídos externos e redução do consumo de energia.

Para trabalhos futuros na bacia do rio Morto ou que utilizem o modelo SWMM em outras bacias, recomenda-se:

- Realizar levantamento topobatimétrico em todos os cursos d'água pertencentes à bacia do rio Morto, para melhor definição das seções transversais, a fim de obter resultados mais realistas quanto ao extravasamento das calhas;
- Ampliar o monitoramento fluviométrico e climatológico e investir em estações mais robustas que minimizem as falhas de monitoramento;
- Revisar a curva-chave da bacia, incluindo medições de cheias;

- Aprofundar a calibração do modelo SWMM, considerando outros eventos pluviométricos, de forma a obter apenas um conjunto de parâmetros ajustados;
- Validar o modelo SWMM para outros eventos de cheia;
- Realizar estudos experimentais para encontrar uma configuração ótima de telhado verde para a região e, posteriormente, verificar a efetividade dos dispositivos para a bacia do rio Morto, por meio de simulação de cenários com o modelo SWMM;
- Avaliar o custo de implantação (R\$/m<sup>2</sup>), bem como a operação dos telhados verdes na bacia do rio Morto;
- Simular cenários com telhados verdes para intensidades pluviométricas variadas e avaliar o efeito de retenção neste dispositivo.
- Simular cenários envolvendo o uso conjunto de telhado verde e outras técnicas LID (e.g. pavimentos permeáveis e barris de chuva), e avaliar a eficiência integrada na redução da vazão de pico;
- Avaliar o impacto dos dispositivos LID na rede de drenagem tradicional, comparando com o custo de implantação das medidas;
- Dado que o modelo SWMM tem código de programação aberto, poderiam ser feitos os seguintes ajustes:
  - Integração com o ambiente SIG;
  - Possibilidade de inserção dos dados de evapotranspiração em escala horária;
  - Possibilidade de escolha do método de infiltração no telhado verde.

## REFERÊNCIAS

- ACOSTA, I. R. *Design and Implementation of Hydrologic Unit Watersheds for Rainfall-Runoff Modelling in Urban Areas*. 2009. 125 f. Tese (Doutorado) – Colorado State University, Fort Collins, Colorado, EUA, 2009.
- AFONSO, J. A. C. *Renaturalização e revitalização de rios urbanos: uma abordagem sistêmica*. 2011. 135 f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2011.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO – Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ALMEIDA, B. M. *Evapotranspiração, coeficiente de cultura e produção do milho sob condições de salinidade residual*. 2012. 80f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró-RN, 2012.
- AMARAL, D. P. B. *Aplicação do modelo hidrológico SWMM na gestão das águas pluviais urbanas: estudo de caso da bacia hidrográfica do Rio Morto*. 2014. 153f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2014.
- AMARAL, R.; RIBEIRO, R. R. *Inundação e enchentes*. In: TOMINAGA, L. K. et. al. *Desastres naturais: conhecer para prevenir*. Instituto Geológico. São Paulo, 2009. p. 39- 52.
- AMEC; CWP. *Georgia Stormwater Management Manual, Volume 2: Technical Handbook*. AMEC Earth and Environmentals, Center for Watershed Protection, Atlanta – USA, 2001, 844 p.
- AUTODESK. *Storm and Sanitary Analysis 2014 User's Guide*: Autodesk, 2013.
- BAHIENSE, J. M.. *Avaliação de Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana Baseadas no Conceito de Desenvolvimento de Baixo Impacto, com o Apoio de Modelagem Matemática*. 2013. 144 p. Dissertação (Mestrado) - Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2013.
- BALDESSAR, S. M. N.; TAVARES, S. F. *Telhado verde e sua contribuição na redução da vazão da água pluvial escoada*. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 14, 2012, Juiz de Fora. **Anais...** Juiz De Fora: ANTAC, 2012.
- BASTOS, G.A.P. *Análise dos parâmetros do modelo SWMM para avaliação do escoamento em duas bacias periurbanas em Santa Maria-RS*. 2007. 169f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul. 2007.
- BELING, F. A. *Análise do Desempenho do Modelo SWMM5 Acoplado ao Calibrador Pest na Bacia do Arroio Cancela/RS*. 2013. 157 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2013.

BELLON, E. *Planejamento de recursos hídricos de áreas rurais degradadas: aplicação do modelo SWAT em bacia hidrográfica experimental na região Noroeste do Estado do Rio de Janeiro*. 2014. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

BENEDICT, M. A.; MCMAHON, E. T. *Green Infrastructure: Smart Conservation for the 21st Century*. Washington, D.C., Sprawl Watch Clearing House. May 2002. Disponível em: <<http://www.sprawlwatch.org/greeninfrastructure.pdf>>. Acessado em: 04 de março de 2017.

BENINI, S. M. *Infraestrutura Verde como Prática Sustentável para Subsidiar a Elaboração de Planos de Drenagem Urbana: Estudo de Caso da Cidade de Tupã/SP*. 2015. 220 f. Tese (Doutorado) – Pós-graduação em Geografia, Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente. 2015.

BORGES, A. C.; MENDIONDO, E. M. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Rio Jacupiranga. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 11, n. 3, p. 293-300, 2007.

BURSZTA-ADAMIAK, E.; MROWIEC, M. Modelling of Green roofs' hydrologic performance using EPA's SWMM. *Water Science and Technology*, v. 68, n. 1, p. 36–42, 2013.

CALHEIROS, A. L. S. *Variações do nível relativo do mar nos últimos 7.000 anos A.P. na planície costeira de Jacarepaguá – Rio de Janeiro*. 2006. 113 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CAMPECHE, L. F. M. S. et al. Lisímetro de pesagem de grande porte. Parte I: desenvolvimento e calibração. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, n. 5, p.519-525, 2011.

CAMPOS, E. F. *Avaliação da distribuição das chuvas nas vazões máximas urbanas usando dados de radar e de pluviógrafo*. 2009. 170f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Campinas, São Paulo. 2009.

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

CARTER, T.; BUTLER, C. Ecological impacts of replacing traditional roofs with green roofs in two urban areas. *Cities and the Environment*, v. 1, n. 2, p. 1-17, 2008.

CARVALHO, L. G.; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L.; CASTRO NETO, P. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 41, n. 3, p. 456-465, 2011.

CARVALHO, R. P. B. Qualidade urbana /ambiental no território carioca: o caso do planejamento da Baixada de Jacarepaguá, Rio de Janeiro. *Caderno de Geografia*, v. 23, n. 40, p. 67-88, 2013.

CERQUEIRA, L. F. F. *Redesenho urbanístico de assentamentos informais com vistas à conservação da água e sustentabilidade ambiental*. Tese de Doutorado. - Rio de Janeiro: UERJ, 2012.

CIRIA. *CIRIA SuDS Manual*. Publication C753. 2015.

COLLODEL, M. G. *Aplicação do modelo hidrológico SWMM na avaliação de diferentes níveis de detalhamento da bacia hidrográfica submetida ao processo de transformação chuva-vazão*. 2009. 219f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Paulo. 2009.

CORDERO, A.; LEON, A. T.; MEDEIROS, P. A. Medidas de Controle de Cheias e Erosões. *Revista de Estudos Ambientais*, Blumenau, 1999.

CRUZ, M. A. S.; SOUZA, C. F.; TUCCI, C. E. M. *Controle da drenagem urbana no Brasil: avanços e mecanismos para sua sustentabilidade*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17, 2007, São Paulo. **Anais...** Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2007. 18 p.

ELGA, S.; JAN, B.; OKKE, B. Hydrological modelling of urbanized catchments: a review and future directions. *Journal of Hydrology*, v. 529, n. 1, p 62-81, 2015.

EICHENWALD, Z.; MCGARITY, A. E. *Watershed-based Optimal Stormwater Management: Part 2 - Hydrologic Modeling of LID/BMP Sites on Little Crum Creek in Suburban Philadelphia*. World Environmental and Water Resources Congress 2010: Challenges of Change, ASCE, p. 2522-2530. 2010.

EPA. *BMPs & Management Measures Structural & Nonstructural*. National Tribal Water Quality Conference. 2011.

FARIA, N.O. *Estudo da impermeabilização, modelagem e simulação de cenários para a bacia do Barbado – Cuiabá/MT*. 2013. 146f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Paulo. 2013.

FEITOSA, F. F. S. *Avaliação do uso de trincheiras de infiltração para atenuação de picos de cheia utilizando o SWMM*. 2015. 101 f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

FERRAZ, P. A. *Estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) para Região de Rio Branco - Acre*. 2008. 85f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Ciências Biológicas e da Natureza, Universidade Federal do Acre, Rio Branco-Acre, 2008.

FIETZ, C. R.; FISCH, G. F. Avaliação de modelos de estimativa do saldo de radiação e do método de Priestley-Taylor para a região de Dourados, MS. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 13, n. 4, p. 449-453, 2009.

FIREHOCK, K. *A short history of the term green infrastructure and selected literature*. 2010. Disponível em: < <http://www.gicinc.org/PDFs/GI%20History.pdf>>. Acessado em: 04 de março de 2017.

FLETCHER, T. D. et al. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, v. 12, n. 7, p. 525–542, 2015.

FONSECA, P. L.; NASCIMENTO, E. A.; LONGO, O. C. *Gestão ambiental de bacias hidrográficas: medidas não convencionais no controle de cheias urbanas - principais aspectos, considerações e ações integradas*. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 13, 2006, Bauru, São Paulo. **Anais...** Universidade Estadual Paulista, 2006. 8 p.

FONTES, A. R. M.; BARBASSA, A. P. Diagnóstico e prognóstico da ocupação e impermeabilização urbanas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 8, n. 2, p. 137-147, 2003.

FREITAS, A. M. *Qualidade das Águas Fluviais: Estudo de Caso da Bacia Hidrográfica de Jacarepaguá – RJ*. 2009. 170 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2009.

FREITAS, C. F.; XIMENES, E. F. Enchentes e saúde pública – uma questão na literatura científica recente das causas, consequências e respostas para prevenção e mitigação. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 17, n. 6, p. 1601-1615, 2012.

GARCIA, J.I.B. *Monitoramento hidrológico e modelagem da drenagem urbana da bacia hidrográfica do Arroio Cancela*. 2005. 169f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul. 2005.

GARRIDO NETO, P. S. *Telhados verdes como técnica compensatória em drenagem urbana na cidade do Rio de Janeiro: Estudo experimental e avaliação de sua adoção na bacia do rio Joana a partir do uso de modelagem matemática*. 2016. 340 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

GETTER, K. L.; ROWE, D. B. The Role of Extensive Green Roofs in Sustainable Development. *HortsScience*, v. 41, n. 5, p. 1276-1285, 2006.

Green, W. H.; Ampt, G. A. Studies on soil physics-1. The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science*, Cambridge, v.4, n.1, p.1-24, 1911.

GURGEL, G. M. *Crescimento urbano e seus impactos no sistema de drenagem de uma bacia em Natal/RN*. 2016. 96f. Dissertação (Mestrado) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

HALL, M.J. *Urban Hydrology*. Belfast: The Universities Press, Elsevier Applied Science Publishers Ltd, 1984. 299p.

HANNES, E. Infraestrutura Verde como Instrumento de Legislação Urbana: Uma Análise do Plano Diretor Estratégico de São Paulo. *Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes*, v. 3, n. 6, p. 55-61, 2015.

HERZOG, C. Seção IV: Ambiente Construído. *Infra-estrutura para Cidades Mais Sustentáveis – Produtos e Sistemas Relativos a Infra-estrutura*. Teoria e Prática em Construções Sustentáveis no Brasil – Projeto CCPS. 2010. Disponível em: <[https://inverde.files.wordpress.com/2011/05/secao-iv\\_3\\_infra\\_verde\\_docfinal\\_rev.pdf](https://inverde.files.wordpress.com/2011/05/secao-iv_3_infra_verde_docfinal_rev.pdf)>. Acessado em: 04 de março de 2017.

HUBER, W. C.; DICKINSON, R. E. *Storm Water Management Model, Version 4: User's Manual*. Athens, Georgia : U.S. Environmental Protection Agency, 1992.

IBGE. *Censo Brasileiro de 2010*. Disponível em: <<http://censo2010.ibge.gov.br/>>. Acessado em: 9 de março de 2017.

INEA. *Base Temática – O Estado do Ambiente*. Disponível em: <<http://www.inea.rj.gov.br/Portal/MegaDropDown/EstudosePublicacoes/EstadodoAmbiente/index.htm&lang>>. Acessado em: 10 de agosto de 2016.

ISMAEL FILHO, A. et al. Influência das variáveis climáticas sobre a evapotranspiração. *Gaia Scientia*, v. 9, n. 1, p. 62-66, 2015.

JATO-ESPINO, D. et al. Rainfall–Runoff Simulations to Assess the Potential of SuDS for Mitigating Flooding in Highly Urbanized Catchments. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 13, n. 2, p 1-13, 2016.

JHA, K. A.; BLOCH, R.; LAMOND, J. *Cidades e Inundações: Um Guia para a Gestão Integrada do Risco de Inundação Urbana para o Século XXI*. GFDRR, 2012.

KRAUSE, P.; BOYLE, D.P.; BÄSEL, F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, v. 5, p. 89-97, 2005.

KREBS, G. et al. Simulation of green roof test bed runoff. *Hydrological Processes*, p. 1-13, 2015.

KRÜGER, C. M.; DZIEDZIC, M. *Drenagem Urbana*. Prefeitura Municipal de Curitiba, Instituto Municipal de Administração Pública/IMAP. Plano de Desenvolvimento de Competências. Curitiba, 2010.

LEITE, B. P.; FUJIMURA, J. M.; FERNANDES, J. S. A. *Avaliação dos impactos na drenagem urbana com a implantação de telhados verdes na UFMT – Campus Cuiabá utilizando o software SWMM*. In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIA NO PANTANAL, 6, 2016, Cuiabá, Mato Grosso. **Anais...** Embrapa Informática Agropecuária/INPE, 2016, 10 p.

LI, T. et al. *Applying New Features of Low-Impact Development Techniques in the Master Planning of Guangzhou Educational Town*. International Low Impact Development Conference 2015: pp. 428-437.

LOIOLA, C. M. *Relação chuva-vazão nos telhados verdes modulares sob chuva simulada induzida*. 2015. 128f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

LUCAS, W. C.; SAMPLE, D. J. Reducing combined sewer overflows by using outlet controls for green stormwater infrastructure: case study in Richmond, Virginia. *Journal of Hydrology*, v. 520, p. 473–488, 2015.

LUZ JÚNIOR, W. F. *Implementação e Estudo da Aplicabilidade do Modelo Hidrológico DHSVM à Micro-Bacia Representativa em Mata Atlântica, Jacarepaguá, Rio de Janeiro*. 2016. 135f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

MASSERONI, D.; CISLAGHI, A. *Green roof benefits for reducing flood risk at the catchment scale*. *Environ Earth Sci*, v. 75, n. 7, p. 1-11, 2016.

MEDEIROS, A. T. *Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Paraipaba, CE*. 2002. 103 f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP, 2002.

MELO, T. K. *Evapotranspiração, coeficiente de cultura e produção do melão Gália irrigado com água de diferentes salinidades*. 2009. 87f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró-RN, 2009.

MENTENS, J.; RAES, D.; HERMY, M. *Greenroofs as a part of urban water management*. In: Brebbia, C.A. (Ed) *Water Resources Management II*. WIT Press, Southampton, UK, p. 35–44. 2003.

MINKS, V. A Rede de Design Verde Urbano – Uma Alternativa Sustentável para Megacidades? *Revista LABVERDE*, n. 7, Artigo nº 06, p. 120-141, 2013.

MIRANDA, R. A. C.; OLIVEIRA, M. V. S.; SILVA, D. F. Ciclo Hidrológico Planetário: abordagens e conceitos. *GEO UERJ*, v. 1, n. 21, p. 109-119, 2010.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.

MOTA, J. L. O. *Modelos Matemáticos y su Aplicación al Manejo de Cuencas Hidrográficas*. In: CONGRESO NACIONAL DE IRRIGACION, Culiacán, Sinaloa, México, 1999.

MOURA, A. R. C. *Estimativa da evapotranspiração de referência em bacia experimental na região nordeste*. 2009. 115 f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

NAKAZONE, L. M. *Implantação de Reservatórios de Detenção em Conjuntos Habitacionais: a Experiência da CDHU*. 2005. 287 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

NRCS. *Urban Hydrology for Small Watersheds TR-55*. United States Department of Agriculture, 1999, 164 p.

NRCS. Part 360 Hydrology. National Engineering Handbook. *Chapter 9 Hydrologic Soil-Cover Complexes*. Unites States Department of Agriculture, 2004, 14 p.

NUNES, D. M.; PIMENTEL DA SILVA, L.; AMARAL, D. P. B.; FONSECA, P. L. *Análise dos parâmetros ajustados para o modelo hidrológico SWMM para bacias hidrográficas brasileiras*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 21, 2015, Brasília, Distrito Federal. **Anais...** Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2015, 8 p.

OHNUMA JÚNIOR, A. A. *Medidas não-convencionais de reservação d'água e controle da poluição em lotes domiciliares*. 2008. 331 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

OLIVEIRA NETTO, E. W. N.; PIMENTEL DA SILVA, L.; MARY, W. Telhados verdes em habitações de interesse social e retenção das águas pluviais para drenagem urbana sustentável. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18, 2009, Campo Grande. **Anais...** Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2009, 18 p.

PALLA, A.; GNECCO, I. Hydrologic modeling of Low Impact Development systems at the urban catchment scale. *Journal of Hydrology*, v. 528, p. 361–368, 2015.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, *Mathematical and Physical Sciences*, v. 193, n. 1032, p. 120-145, 1948.

PIMENTEL DA SILVA, L. *Hidrologia: Engenharia e Meio Ambiente*, 1ª edição, Elsevier, ISBN 978-85-352-7734-0, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2015.

PIMENTEL DA SILVA, L. et al. *HIDROCIDADES – Métodos Não Convencionais na Conservação da Água em Bacias Peri-Urbanas*. VIII Encontro Nacional de Águas Urbanas, Rio de Janeiro, Brasil. 2008a.

PIMENTEL DA SILVA, L. et al. *HIDROCIDADES - Cities, Quality of Life and Water Resources: Integrated Water Resources Management and Urban Planning for Low-Land Region of Jacarepaguá, Rio de Janeiro, Brazil*. In: International Congress on Urban Drainage, 2008, Edinburgh. 11th ICUD. 2008b.

PIMENTEL DA SILVA, L.; ROSA, E. U.; SILVA, C. P. P. Caracterização dos parâmetros físicos e do saneamento ambiental de bacia experimental-representativa localizada na Baixada de Jacarepaguá, Rio de Janeiro, Brasil. *Revista Ambiente & Água*, v. 5, n. 3, p. 232-244, 2010.

PINHEIRO DA SILVA, R. *Riscos Associados às Inundações na Área Urbana do Município de Pedra Branca do Amapari – Amapá*. 2013. 178 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Amapá, Macapá. 2013.

PRODEC. Diagnóstico do Meio Socioambiental. In: Projeto de Recuperação Ambiental da Macrobacia de Jacarepaguá, v. 4, 1998.

PIRES DA SILVA, C. P. *Estudos de impactos ambientais na bacia hidrográfica do rio Morto – Jacarepaguá/RJ*. In: ENCONTRO NACIONAL DOS GEÓGRAFOS, 16, 2010, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. **Anais...** Associação dos Geógrafos Brasileiros, 2006, 9 p.

PORTAL GEO-RIO. *Armazém de Dados. Mapa Digital do Rio de Janeiro*. Base Geoweb - Extração de Base de Dados Geográficos. Disponível em: [http://portalgeo.rio.rj.gov.br/mapa\\_digital\\_rio/?config=config/ipp/basegeoweb.xml](http://portalgeo.rio.rj.gov.br/mapa_digital_rio/?config=config/ipp/basegeoweb.xml). Acessado em 14 de julho de 2016.

PUB. Singapore's National Water Agency. *Active Beautiful Clean Waters – Design Guidelines*. 2014. Disponível em: <[https://www.pub.gov.sg/abcwaters/Documents/ABC\\_DG\\_2014.pdf](https://www.pub.gov.sg/abcwaters/Documents/ABC_DG_2014.pdf)>. Acessado em: 04 de março de 2017.

QIN, Hua-peng; LI, Zhuo-xi; FU, Guangtao. The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics. *Journal of Environmental Management*, v. 129, p. 577–585, 2013.

RAMOS, W.; SOARES, S. C.; ALENCASTRO, M. S.; MOTTA, A. L. T. S. As enchentes no contexto dos desastres naturais. VI Encontro Nacional e IV Encontro Latino-americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, Vitória – ES, 2011.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. *Modelos hidrológicos para gestão ambiental*. São José dos Campos: INPE, 2000. 60 p.

RIBEIRO, A. M. *BMP's em drenagem urbana: aplicabilidade em cidades brasileiras*. 2014. 104 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

RIGHETTO, A. M. *Manejo de águas pluviais*. Rio de Janeiro: ABES, 2009.

RIO DE JANEIRO. Lei Complementar nº 111, de 1º de fevereiro de 2011 (Dispõe sobre a Política Urbana e Ambiental do Município, institui o Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano Sustentável do Município do Rio de Janeiro e dá outras providências).

ROESNER, A. R.; ALDRICH, J. A.; DICKINSON, R. E. *Storm Water Management Model, version 4: EXTRAN ADDENDUM*. EPA/600/3-88/001b (NTIS PB88-236658/AS). U. S. Environmental Protection Agency. Athens, Georgia, 1988.

ROSA, E. U. *Desenvolvimento de Procedimentos Computacionais para Integração de Sistemas de Informação Geográfica com Modelo Hidrológico Chuva-Vazão em Bacias Urbanas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Computação) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

ROSA, E. U.; KAUFFMANN, M. O.; PIMENTEL DA SILVA, L. *Gestão do Parcelamento e Ocupação do Solo na Cidade do Rio de Janeiro*. VII Congresso Brasileiro de Defesa do Meio Ambiente. *Anais...* Clube de Engenharia, Rio de Janeiro RJ, 2003.

ROSSI, E. ; SOUSA, L. M. G. *Ecotécnicas de drenagem urbana: urbanização de impacto ambiental reduzido*. In: Simpósio de pós-graduação em engenharia urbana, 2012, Maringá. Caderno de Resumos - SIMPGEU. Maringá: UEM, 2012. v. 3. p. 97-97.

ROSSMAN, L.A. *Storm Water Management Model – User’s Manual Version 5.1*. Cincinnati, OH: U. S. Environmental Protection Agency, 2015, 352p.

ROSSMAN, L. A.; HUBER, W. C. *Storm Water Management Model – Reference Manual. Volume I – Hydrology*. (Revised). Cincinnati, OH: U. S. Environmental Protection Agency, 2016, 231p.

SANTHI, C.; ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R.; DUGAS, W. A.; SRINIVASAN, R.; HAUCK, L. M. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 37, n. 5, p 1169-1188, 2001.

SANTOS, L. L. Modelos Hidráulicos-Hidrológicos: Conceitos e Aplicações. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 2, n.3, p 1-19, 2009.

SCHERER, R. B.; SANTOS, R. C. Inundações em Centros Urbanos: Impactos Ambientais Gerados pelo Crescimento Populacional. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental*, v.6, n.1, p. 42-45, 2012.

SHIN, E.; KIM, H. Analysing Green Roof Effects in an Urban Environment: A Case of Bangbae-dong, Seoul. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, v. 14, n. 2, p. 315-322, 2015.

SHINMA, T. A. *Avaliação de incertezas na calibração automática do modelo SWMM*. 210 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos – São Paulo, 2015.

SILVA, M. P.; COSTA, L. H. M.; CASTRO, M. A. H. *Aplicação do Modelo de Gestão de Drenagem Urbana SWMM no Controle de Alagamentos em Barreiras – BA*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20, 2013, Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul. **Anais...** Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2013, 8 p.

SILVA, P. O. *Análise de técnicas compensatórias de drenagem urbana para atenuação de inundações em uma sub-bacia do rio Jiquiá no Recife*. 2010. 139 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

SOARES, M. L. G. Estrutura vegetal e conservação dos manguezais da Lagoa da Tijuca, Rio de Janeiro, Brasil. *Revista Brasileira de Biologia*, v. 59, n. 3, p. 503-515, 1999.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.

TUCCI, C. E. M. *Água no Meio Urbano*. Capítulo 14 do Livro *Água Doce*. IPH/UFRGS, 1997. 40 p.

TUCCI, C. E. M. *Urban drainage issues in developing countries*. In: *Urban Drainage in Humid Tropics*, C. E. M. Tucci (ed.), *Urban Drainage in Specific Climates*, C. Maksimovic (ch. ed.), UNESCO Technical Documents in Hydrology, No. 40, Vol I, 23-40. 2001.

TUCCI, C. M. *Inundações Urbanas*. Porto Alegre: ABRH/RHAMA, 2007, 393p.

TUCCI, C. E. M. *Incertezas no modelo chuva-vazão*. 2010. Disponível em: <  
<http://rhama.com.br/blog/index.php/sem-categoria/incertezas-no-modelo-chuva-vazao/>>.  
Acessado em: 9 de março de 2017.

TUCCI, C. E. M.; BELTRAME, F. S. *Evaporação e Evapotranspiração*. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. 2.ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, ABRH, p. 253-287, 2001.

UFPB. Universidade Federal da Paraíba. *Manual do Usuário EPA SWMM 5.0: Modelo de Gestão de Drenagem Urbana*. Tradução de LENHS, UFPB, João Pessoa, 2012.

UNITED NATIONS. *World Urbanization Prospects – The 2014 Revision*. New York: DESA, Population Division, 2014.

VAREJÃO-SILVA, M. A. *Meteorologia e Climatologia*. Recife: 2006. Versão Digital, 449p.

VERÓL, A. P.; MIGUEZ, M. G.; LOURENÇO, I. B.; BRITTO, A. L. N. P.; AMARAL, B. S. Requalificação fluvial em áreas urbanas. In: ENCONTRO NACIONAL DE ÁGUAS URBANAS, 9, 2012, Belo Horizonte, Minas Gerais. **Anais...** Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2012.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. *Hidrologia Aplicada*. McGraw-Hill, São Paulo - SP, 1975.

ZAHED FILHO, K.; MARTINS, J. R. S., PORTO, M. F. A.; CUCIO, M. S. Coleção Águas Urbanas. Fascículo 3: Inundações Urbanas. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, PHA2537 – Água em Ambientes Urbanos, 2012.

**APÊNDICE A** — Artigo Científico submetido à Revista Labor & Engenho