

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

ALLANA ABREU CAVALCANTI

**UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE SWMM NA MODELAGEM HIDOLÓGICA DA SUB-
BACIA DO RIBEIRÃO VAI E VOLTA – POÇOS DE CALDAS/MG**

Poços de Caldas/MG

2020

ALLANA ABREU CAVALCANTI

UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE SWMM NA MODELAGEM HIDROLÓGICA DA SUB-
BACIA DO RIBEIRÃO VAI E VOLTA – POÇOS DE CALDAS/MG

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pelo Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Silveira
Coorientador: Prof. Dr. Frederico Carlos Martins de Menezes Filho

Poços de Caldas/MG

2020

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca campus Poços de Caldas

Cavalcanti, Allana Abreu.

C376u Utilização do software SWMM na modelagem hidrológica da sub-bacia do ribeirão Vai e Volta – Poços de Caldas/MG / Allana Abreu Cavalcanti. – Poços de Caldas/MG, 2020.
76 f. –

Orientador(a): Alexandre Silveira.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) –
Universidade Federal de Alfenas, campus Poços de Caldas, 2020.
Bibliografia.

1. Recursos hídricos. 2. Drenagem urbana. 3. Modelos hidrológicos. I. Silveira, Alexandre. II. Título.

CDD – 628.1

ALLANA ABREU CAVALCANTI

UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE SWMM NA MODELAGEM HIDROLÓGICA DA SUB-BACIA DO RIBEIRÃO VAI E VOLTA – POÇOS DE CALDAS/MG

A Banca examinadora abaixo-assinada aprova a Dissertação/Tese apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Ciência e Engenharia Ambiental.

Aprovada em: 07 de outubro de 2020.

Prof. Dr. Alexandre Silveira

Instituição: Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG

Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi

Instituição: Universidade Estadual Paulista - UNESP

Prof. Dr. Rafael de Oliveira Tiezzi

Instituição: Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG



Documento assinado eletronicamente por Alexandre Silveira, Professor do Magistério Superior, em 08/10/2020, às 17:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por Rafael de Oliveira Tiezzi, Professor do Magistério Superior, em 14/10/2020, às 22:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por RODRIGO BRAGA MORUZZI, Usuário Externo, em 26/10/2020, às 11:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 0390500 e o código CRC D4108A8F.

AGRADECIMENTOS

Ao meu marido, minha família e amigos pelo apoio e compreensão das horas dedicadas a este trabalho em detrimento do convívio social, bem como pelo incentivo e suporte emocional para condução e conclusão dos estudos.

À Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL *campus* Poços de Caldas e seu corpo docente, em especial ao Prof. Dr. Alexandre Silveira, e também ao Prof. Dr. Frederico Menezes Filho da Universidade Federal de Viçosa - UFV que possibilitaram o ensino, o aprendizado e o aprimoramento de conhecimentos em drenagem urbana.

Aos colegas do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia Ambiental – PPGCEA pelos momentos e experiências compartilhadas.

A FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (APQ-01982-14) pelo apoio financeiro no desenvolvimento dos estudos.

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a elaboração e a conclusão deste trabalho na área de meio ambiente e recursos hídricos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

Resultante do processo de urbanização, a impermeabilização das áreas contribui para o agravamento de enchentes e inundações em meio urbano através do aumento das vazões e dos volumes escoados, ocasionando problemas socioambientais em bacias urbanas. Com o intuito de estudar o comportamento da drenagem urbana frente a eventos de precipitação, modelos hidrológicos são utilizados no âmbito da bacia hidrográfica. Deste modo, o presente trabalho tem como objetivo aplicar o modelo SWMM na sub-bacia do ribeirão Vai e Volta, localizada no município de Poços de Caldas-MG, de forma a retratar o comportamento hidrológico da bacia urbana e contribuir na tomada de decisões em gerenciamento e manejo de águas pluviais do município. Realizou-se a caracterização da bacia hidrográfica em estudo, o monitoramento fluvio-pluviométrico, bem como a análise de sensibilidade e a calibração manual do modelo de chuva-vazão no *software Storm Water Management Model* – SWMM. Observou-se que os parâmetros mais sensíveis ao modelo são: a área impermeável das sub-áreas (AI), o coeficiente de rugosidade relativo à parcelas das sub-áreas impermeáveis (n -imperv), a largura das sub-áreas (W) e, em menor grau, a declividade das sub-áreas (S). Nos processos de calibração e de validação do modelo obteve-se coeficientes de Nash-Sutcliffe (NSE) médios de 0,73 e 0,79, respectivamente, e erros da vazão de pico e do volume escoado médios inferiores a 15%. Os resultados sinalizam um desempenho satisfatório do modelo hidrológico SWMM na representação da sub-bacia do ribeirão Vai e Volta. Espera-se através da modelagem hidrológica contribuir no desenvolvimento de estudos sobre drenagem urbana sustentável.

Palavras-chave: SWMM. Análise de sensibilidade. Calibração manual. Drenagem urbana.

ABSTRACT

As a result of the urbanization process, the waterproofing of areas contributes to the aggravation of flooding and inundation in urban areas through the increase of flows and drained volumes, causing socio-environmental problems in urban watersheds. In order to study the behavior of urban drainage related to precipitation events, hydrological models are used within the watershed. Thus, the present work aims to apply the SWMM model in the sub-watershed of the Vai e Volta stream, located in the city of Poços de Caldas-MG, in order to portray the hydrological behavior of the urban watershed and contribute to decision-making tool in management and rainwater management in the city. The characterization of the watershed under study, the fluvio-pluviometric monitoring, as well as the sensitivity analysis and manual calibration of the rain-flow model were performed using the Storm Water Management Model - SWMM software. It was observed that the most sensitive parameters to the model are: the impermeable area of the sub-areas (AI), the roughness coefficient relative to the portions of the impermeable sub-areas (n_{imperv}), the width of the sub-areas (W) and, to a lesser extent, the slope of the sub-areas (S). In the calibration and model validation processes the results obtained related to the mean Nash-Sutcliffe (NSE) coefficients are 0.73 and 0.79, respectively, and errors in peak flow and mean flow are less than 15%. The results show a satisfactory performance of the SWMM hydrological model in the representation of the Vai and Volta stream subwatershed. It is expected through hydrological modeling to contribute to the development of studies on sustainable urban drainage.

Keywords: SWMM. Sensibility analysis. Manual calibration. Urban drainage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação de uma bacia hidrográfica.....	12
Figura 2 – Processo de transformação de chuva em vazão.	13
Figura 3 – Ietograma e hidrograma associado.	18
Figura 4 – Hidrogramas comparativos para bacias de mesma área.	19
Figura 5 – Ilustração do processo de inundação.....	22
Figura 6 – Impactos da urbanização em uma bacia urbana.	23
Figura 7 – Processo iterativo de calibração.	25
Figura 8 – Sub-bacia como reservatório não-linear.....	28
Figura 9 – Localização da sub-bacia do ribeirão Vai e Volta.	43
Figura 10 - Discretização da área de estudo em sub-áreas, trechos e nós.	47
Figura 11 – Análise de sensibilidade do evento 19/11/17.	53
Figura 12 – Hidrogramas do evento 19/11/2017.....	55
Figura 13 – Hidrogramas do evento 22/11/2017.....	56
Figura 14 – Hidrogramas do evento 26/11/2017.....	57
Figura 15 – Hidrogramas do evento 07/12/2017.....	57
Figura 16 – Hidrogramas do evento 30/12/2017.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Evolução dos conceitos em drenagem urbana.....	21
Tabela 2 - Resumo comparativo dos modelos hidrológicos.....	27
Tabela 3 – Características físicas da sub-bacia do ribeirão Vai e Volta.	45
Tabela 4 – Parâmetros da análise de sensibilidade do modelo SWMM.	49
Tabela 5 – Eventos de precipitação selecionados neste estudo.....	52
Tabela 6 – Calibração individual para os eventos de 19/11/2017 e 22/11/2017	54
Tabela 7 – Resultado da etapa de calibração para os eventos de 19/11/2017 e 22/11/2017.....	55
Tabela 8 – Resultados da validação para os eventos 26/11/2017, 07/12/2017 e 30/12/2017.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
BMP	<i>Best Management Practice</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CHM	<i>Chicago Hydrograph Model</i>
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
FAPEMIG	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ILLUDAS	<i>Illinois Urban Drainage Area Simulator</i>
IPHS1	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
LID	<i>Low Impact Development</i>
NSE	Coeficiente de Nash e Stueliffe
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
STORM	<i>Storage Treatment Overflow Runoff Model</i>
SUDS	<i>Sustainable Urban Drainage System</i>
SWMM	<i>Storm Water Management Model</i>
USA	Estados Unidos das Américas
WSUD	<i>Water Sensitive Urban Design</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVOS.....	11
2	REVISÃO DE LITERATURA	12
2.1	BACIAS HIDROGRÁFICAS.....	12
2.2	PRECIPITAÇÃO.....	16
2.3	VAZÃO.....	17
2.4	DRENAGEM URBANA.....	19
2.5	MODELOS HIDROLÓGICOS.....	23
2.5.1	SWMM - Storm Water Management Model.....	27
2.6	ESTUDOS SOBRE MODELAGEM HIDROLÓGICA NO SWMM.....	29
3	ARTIGO	37
4	CONCLUSÃO	63
	REFERÊNCIAS	65
	APÊNDICES	68

1 INTRODUÇÃO

Com a crescente urbanização, problemas relacionados à drenagem urbana, em especial enchentes e inundações, vem sendo recorrentes em cidades de pequeno a grande porte de países desenvolvidos ou em desenvolvimento, como é o caso das cidades brasileiras.

As inundações urbanas resultam do crescimento populacional atrelado à ocupação desordenada do solo e das planícies de inundação (áreas ribeirinhas), promovendo o aumento das áreas impermeáveis e comprometendo os processos de infiltração e evapotranspiração das águas pluviais em um ciclo hidrológico. Esta impermeabilização contribui significativamente para o aumento do escoamento superficial e a diminuição do tempo de concentração da bacia urbana, apresentando uma elevação na vazão de pico e nos volumes escoados em um curto intervalo de tempo e conseqüentemente o agravamento das enchentes e inundações. Tem-se, ainda, o comprometimento da qualidade da água pela presença de sedimentos transportados no sistema de drenagem provenientes da intensificação de processos erosivos pelo aumento do escoamento superficial.

O conhecimento dos processos do ciclo hidrológico na bacia hidrográfica é de fundamental importância para projetos de engenharia com vistas ao controle e ao amortecimento de cheias em uma bacia urbana. Estes são desenvolvidos a partir de dados hidrológicos e da caracterização da bacia hidrográfica inseridos em modelos de análise hidrológica de forma a simular detalhadamente os processos hidrológicos que ocorrem em uma bacia. Os modelos de simulação podem, ainda, ser empregados na previsão de enchentes e inundações em áreas urbanas, bem como na avaliação da qualidade e da disponibilidade hídrica de uma bacia, de forma a contribuir para o adequado planejamento e gestão dos recursos hídricos.

Dentre os modelos hidrológicos, o SWMM – *Storm Water Management Model*, desenvolvido nos Estados Unidos pela EPA – *Environmental Protection Agency*, se destaca nos estudos de drenagem urbana por se tratar de uma ferramenta computacional de modelagem capaz de simular quantitativamente e qualitativamente os processos do ciclo hidrológico, além de ser um software de domínio público livre com código de fonte aberto.

Neste contexto, há algumas décadas em países desenvolvidos e mais recentemente no Brasil o SWMM vem sendo empregado no planejamento e gestão

das águas pluviais com foco na redução de enchentes e inundações urbanas, através da compreensão dos efeitos da urbanização e a proposição de técnicas compensatórias, que buscam atenuar os picos de cheia através do retardamento, redução parcial ou total do escoamento superficial.

Localizado na região sudoeste do estado de Minas Gerais, o município de Poços de Caldas, com área total de 546,67 km², altitude média de 1.200 m e população de 152.435 habitantes (IBGE, 2010), tem enfrentado episódios de alagamentos e inundações em sua área central. Isso se deve ao aumento da concentração de empreendimentos imobiliários nas bacias dos ribeirões da Serra, Ponte Alta e Vai e Volta que atrelado às intervenções nestes cursos d'água (canalizações e/ou retificações), contribuem para o aumento do escoamento superficial em um curto período de tempo, elevando a vazão e o volume escoado do ribeirão Poços de Caldas na região central do município, que é formado pela confluência desses ribeirões.

Face ao exposto, este trabalho visa a aplicação do modelo hidrológico SWMM na representação do comportamento da sub-bacia do ribeirão Vai e Volta, frente à eventos de precipitação monitorados experimentalmente, como ferramenta de diagnóstico para subsidiar estudos futuros que priorizem a gestão integrada e sustentável das águas urbanas do município de Poços de Caldas – MG.

1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral a aplicação do modelo SWMM – *Storm Water Management Model* na representação computacional da sub-bacia do ribeirão Vai e Volta, no município de Poços de Caldas - MG.

Definem-se como objetivos específicos:

- a) Avaliação do monitoramento hidrológico realizado na estação fluvio-pluviométrica instalada na sub-bacia;
- b) Determinação das características fisiográficas da área em estudo;
- c) Avaliação dos parâmetros de entrada do modelo que exercem influência nos hidrogramas simulados;
- d) Calibração manual e validação dos hidrogramas de cheia da sub-bacia do ribeirão Vai e Volta no modelo SWMM.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste item é apresentada a revisão bibliográfica sobre a temática da drenagem urbana, contemplando desde elementos teóricos e conceituais até a aplicação prática da modelagem hidrológica para bacias urbanas.

2.1 BACIAS HIDROGRÁFICAS

São áreas de captação de água constituídas por divisores topográficos e geológicos que direcionam o escoamento superficial por uma rede de drenagem, constituída por um curso d'água principal e seus afluentes, até a seção de controle da bacia, denominada exutório (Figura 1).

Figura 1 – Representação de uma bacia hidrográfica

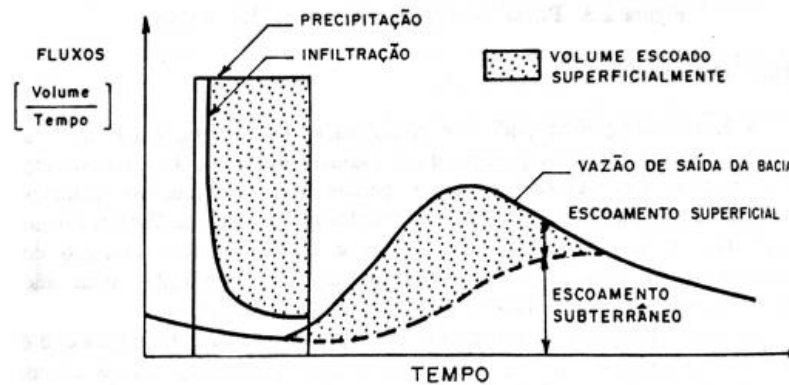


Fonte: Adaptado de Atlas Digital das Águas de Minas (2011).

Pode-se considerar a bacia hidrográfica como um sistema físico do ciclo hidrológico, ou seja, a entrada deste é a água precipitada e a saída é a água escoada pela seção de controle, havendo-se perdas nos processos de evaporação, transpiração e infiltração, que podem ser desconsideradas quando se analisa um

evento isolado (TUCCI, 2004). A representação do processo de transformação de chuva em vazão é apresentada na Figura 2.

Figura 2 – Processo de transformação de chuva em vazão



Fonte: Tucci (2004, p.42).

No contexto hidrológico, o comportamento temporal do escoamento superficial é influenciado pelas características da bacia hidrográfica, podendo, por exemplo, ser mais elevado em bacias urbanas cuja impermeabilização das áreas dificulta a infiltração de água no solo.

De acordo com Calijuri e Cunha (2013), a caracterização da bacia hidrográfica composta por aspectos físicos (pedologia, geomorfologia, geologia, relevo, clima, rede de drenagem, uso e ocupação do solo), ecológicos (fauna e flora) e socioeconômicos (atividades desenvolvidas, demografia, crescimento populacional, economia regional) atrelada aos estudos hidrológicos são dados importantes na tomada de decisões de planejamento e gestão de recursos hídricos.

O conhecimento das características morfométricas contribui para compreensão dos riscos de enchentes e inundações, dos processos erosivos e de medidas mitigadoras para bacia hidrográfica, destacando as principais variáveis (ANA, 2012; CALIJURI; CUNHA, 2013; MELLO; SILVA, 2013):

a) Coeficiente de Compacidade (K_c)

Relação entre o perímetro da bacia e a circunferência de um círculo de área igual a bacia, variando de acordo com a forma da bacia e sendo adimensional.

Bacias com K_c próximo de 1 possuem maior potencialidade de picos de enchentes devido a rápida conversão do escoamento superficial para um pequeno trecho do rio principal.

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

Em que: K_c é o coeficiente de compacidade, P é o perímetro da bacia (m), e A é a área da bacia (m^2).

b) Fator de Forma (K_f)

Relação entre a largura média da bacia e seu comprimento axial (linha que liga os extremos de um polígono construído contornando a bacia).

Bacias com baixo K_f possuem menor propensão a enchentes, tendo em vista a menor probabilidade de chuvas intensas cobrindo toda a sua extensão.

$$K_f = \frac{\bar{L}}{L_{ax}} \quad (2)$$

Em que: K_f é o fator de forma, \bar{L} é a largura média da bacia (m), e L_{ax} é o comprimento axial da bacia (m).

c) Índice de Conformação (I_c)

Relação entre a área da bacia e a área de um quadrado de lado igual ao comprimento axial da bacia.

Bacias I_c próximo de 1 possuem maior propensão a enchentes pois estas se aproximam de um quadrado com maior concentração de fluxo.

$$I_c = \frac{A}{(L_{ax})^2} \quad (3)$$

Em que: I_c é o índice de conformação, A é a área da bacia (m^2), e L_{ax} é o comprimento axial da bacia (m).

d) Densidade de Drenagem (D_d)

Relação entre o comprimento total dos canais que constituem a rede de drenagem da bacia e a área da bacia.

Bacias com maior D_d são mais acentuadas e tendem a gerar maior escoamento superficial direto para um mesmo evento de precipitação.

$$D_d = \frac{L_t}{A} \quad (4)$$

Em que: D_d é a densidade de drenagem ($m.m^{-2}$), L_t é o comprimento total dos canais (m) e A é a área da bacia (m^2).

e) Extensão Média do Escoamento Superficial (C_m)

Relação entre a densidade de drenagem da bacia e o comprimento médio lateral da rede de drenagem, sendo um parâmetro importante no cálculo de tempo de concentração da bacia.

Quanto maior a densidade de drenagem, maior a capacidade da bacia de gerar escoamentos rápidos no exutório.

$$C_m = \frac{1}{4 \cdot D_d} \quad (5)$$

Em que: C_m é a extensão média do escoamento superficial (m) e D_d é a densidade de drenagem ($m.m^{-2}$).

f) Declividade do Curso D'Água Principal (S)

Relação entre a diferença de cotas da nascente e da seção controle e o comprimento do curso d'água principal (cálculo direto).

Este parâmetro exerce influência direta na velocidade do escoamento superficial no canal e conseqüentemente no tempo de concentração da bacia.

$$S (\%) = \frac{(h_0 - h_1)}{L} \cdot 100 \quad (6)$$

Em que: S é a declividade do canal (%), h_0 é a cota da nascente (m), h_1 é a cota da seção de controle (m) e L é o comprimento do canal (m).

Ressalta-se que de acordo com a Lei nº 9.433/1997, a bacia hidrográfica é a unidade territorial para atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos. Esta tem como objetivos: assegurar a disponibilidade hídrica, em padrões de qualidade, às gerações atual e futuras; a utilização racional e integrada das águas; entre outros, através dos seguintes instrumentos: planos de recursos hídricos, enquadramento dos corpos d'água em classes, outorga de direito de uso e cobrança pelo uso de recursos hídricos, compensação a municípios e Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos.

2.2 PRECIPITAÇÃO

A precipitação representa a incidência da água, sob suas várias formas: chuva, neve, granizo, neblina, orvalho, saraiva e geada, na superfície terrestre, sendo, portanto, um componente de entrada da água na bacia hidrográfica.

Destas, a chuva é a forma de precipitação mais importante no contexto hidrológico de uma bacia tendo em vista a sua capacidade de gerar escoamento, com consequente ocorrência de enchentes e inundações, dependendo da sua intensidade.

De acordo com Tucci (2004) e Mello e Silva (2013), as principais grandezas características da chuva são:

- Altura pluviométrica (h): altura da lâmina d'água incidente em uma região (mm ou cm);
- Duração (t): período de tempo entre o início e o final da precipitação (min ou h);
- Intensidade (I): variação da lâmina d'água precipitada por unidade de tempo (mm/h ou mm/min);
- Frequência (f): número de ocorrências da precipitação em um determinado tempo. Inverso do período de retorno (T) que representa o número médio de anos que um evento de precipitação é igualado ou superado.

Segundo Righetto (1998), Tucci (2004), Mello e Silva (2013), a quantificação das chuvas intensas são de fundamental importância para obras de engenharia tendo em vista o seu poder de gerar elevado escoamento superficial direto, contribuindo para processos erosivos, transporte de sedimentos e enchentes e inundações no sistema de drenagem.

Por definição, chuva intensa é todo evento no qual a lâmina de água precipitada, ou sua intensidade, supera um determinado valor mínimo em função do tempo de duração da chuva, sendo, portanto, retratada pela Equação de Chuvas Intensas, Equação 7 (MELLO; SILVA, 2013; RIGHETTO, 1998; TUCCI, 2004). Esta equação, também denominada Equação IDF (intensidade, duração e frequência), varia de acordo com as características de cada região hidrográfica.

$$i = \frac{a \cdot T^m}{(b + d_c)^n} \quad (7)$$

Em que: i é a intensidade de chuva (mm/h), T é o período de retorno (anos), d_c é a duração da chuva (min) e a, b, m, n são parâmetros com valores específicos para cada localidade.

De acordo com ANA (2012), intensidade de precipitações com mesma duração é diretamente proporcional ao período de retorno e inversamente proporcional à área de precipitação.

2.3 VAZÃO

A vazão, grandeza característica de escoamento, corresponde ao volume de água que escoou pela seção transversal de um curso d'água em um determinado intervalo de tempo, sendo expressa geralmente em metros cúbicos por segundo (m^3/s) ou litros por segundo (L/s).

Está relacionada ao deflúvio superficial, compartimento do ciclo hidrológico, gerado a partir do excesso de água precipitada, não infiltrado no solo, que acumula-se inicialmente em pequenas depressões formando depois uma lâmina de água que escoou pela bacia hidrográfica (RIGHETTO, 1998).

Quando utilizada na comparação entre bacias hidrográficas, é denominada vazão específica e representa a vazão por unidade de área da bacia ($m^3/s.ha$ ou L/s.ha).

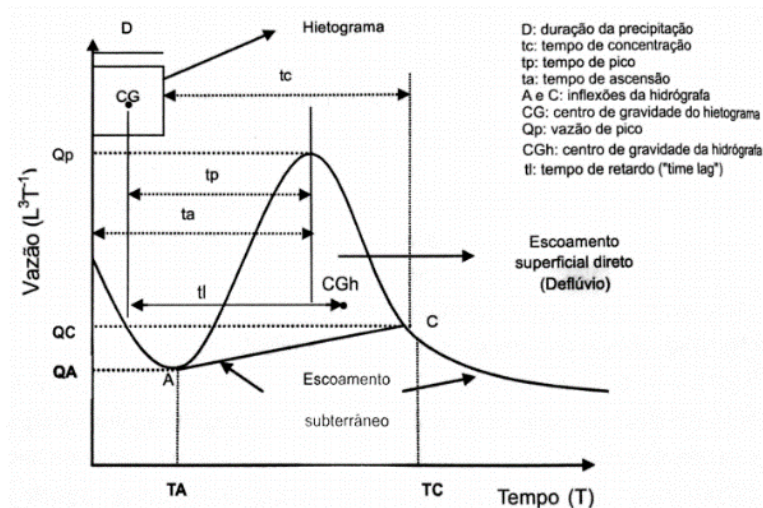
Como forma de se caracterizar as condições de escoamento são utilizadas as vazões máxima, média e mínima de longa duração, sendo a vazão máxima empregada no projeto de obras hidráulicas e na previsão de enchentes; a vazão média em estudos de regularização de vazões e a vazão mínima no cálculo da disponibilidade hídrica de uma bacia hidrográfica (PRUSKI; SILVA; KOETZ, 2006).

Segundo Righetto (1998) as vazões resultantes dos eventos de precipitação podem ser determinadas por diversos métodos, a depender da análise do processo de transformação de chuva em vazão a ser realizada. Assim, para avaliar o sistema de drenagem urbana em um município, por exemplo, pode-se quantificar a vazão por meio de modelos matemáticos baseados na hidráulica dos escoamentos superficiais de uma bacia, além da utilização de modelagem hidrológica.

A representação gráfica do comportamento das vazões ao longo do tempo em uma dada seção do curso d'água é denominada hidrograma. Este retrata a resposta de uma bacia hidrográfica ou área de drenagem frente à eventos de precipitação

(MELLO; SILVA, 2013; PRUSKI; SILVA; KOETZ, 2006; RIGHETTO, 1998; TUCCI, 2004), sendo apresentado na Figura 3.

Figura 3 – letograma e hidrograma associado

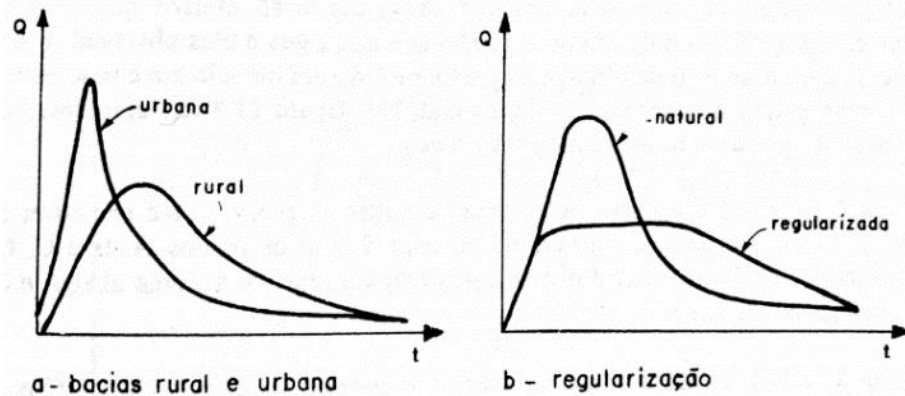


Fonte: Mello e Silva (2013, p.346).

A análise do hidrograma da Figura 3 permite identificar inicialmente o escoamento subterrâneo (escoamento base) até o ponto A resultante de uma zona saturada da bacia. A partir desse ponto inicia-se o escoamento superficial direto retratado pela ascensão da curva até se atingir a vazão de pico, que é quando toda a bacia contribui para o escoamento na seção de controle. Após o término da chuva, tem-se a fase de recessão do hidrograma até o ponto C, com predominância do escoamento subterrâneo que passa a contribuir exclusivamente para a vazão do curso d'água.

Ressalta-se que o escoamento superficial direto se processa após o início da precipitação, tendo em vista às abstrações iniciais por interceptação da vegetação, umedecimento, acumulação de água em depressões, além do retardo da resposta da bacia por conta do deslocamento da água na mesma (MELLO; SILVA, 2013; PRUSKI; SILVA; KOETZ, 2006; RIGHETTO, 1998; TUCCI, 2004).

Figura 4 – Hidrogramas comparativos para bacias de mesma área



Fonte: Tucci (2004, p.395).

Na Figura 4 são apresentados os hidrogramas de escoamento superficial referentes à duas bacias hidrográficas de mesma área, porém com diferentes condições de ocupação do solo e presença de reservatório para regularização da vazão. Nota-se na Figura 4a maior pico de vazão com menor tempo de concentração na bacia urbana, quando comparada com a bacia rural, tendo em vista a impermeabilização da primeira com menor rugosidade da superfície, contribuindo para um aumento do volume de água escoado superficialmente em detrimento da redução do volume de água infiltrado e armazenado no solo. Já na Figura 4b tem-se um amortecimento no pico de vazão da bacia com reservatório de acumulação, quando comparada com a bacia natural, uma vez que por meio da reservação do volume escoado haverá um aumento no tempo de concentração da bacia com liberação da água progressivamente ao longo do tempo (PRUSKI; SILVA; KOETZ, 2006).

2.4 DRENAGEM URBANA

A drenagem urbana consiste na coleta e condução das águas pluviais através de um sistema de microdrenagem, definido pelo traçado das vias e composto por rede de coletores, sarjetas, meio-fio, bocas de lobo, poços de visita, entre outros, até um ponto de lançamento final na macrodrenagem, correspondente à drenagem natural.

Tucci (2007, 2008), aborda a evolução dos conceitos em drenagem e gestão das águas urbanas que surgiu em meados do século XIX quando o crescimento das áreas urbanas, juntamente com precárias condições sanitárias das cidades, propiciaram a proliferação de doenças de veiculação hídrica e a maior frequência de

enchentes e inundações em meio urbano. Neste contexto, foram implantados sistemas de drenagem com o intuito de remover rapidamente as águas do meio urbano, através da coleta e do lançamento de esgotos sem tratamento a jusante do manancial de abastecimento de água, retratando, assim, uma visão higienista sobre a drenagem. A partir da década de 70 a visão higienista deu lugar a visão corretiva, com o desenvolvimento de tecnologias de tratamento de efluentes sanitário e industrial e de medidas de atenuação de cheias de forma a melhorar as condições ambientais das cidades. Na década de 90 ganhou força a visão do desenvolvimento sustentável com investimentos em mais etapas de tratamento de efluentes, bem como a adoção de Melhores Práticas de Gestão (BMPs – *Best Management Practices*) que visam a integração do espaço público com a gestão das águas urbanas.

A abordagem sustentável da drenagem urbana visa melhorias no meio com redução dos impactos da urbanização através da adoção de medidas estruturais e não estruturais que priorizam os processos de infiltração de água no solo e retenção em bacias, a fim de promover a recarga dos lençóis freáticos, o retardamento e a redução dos escoamentos superficiais, sendo estas medidas denominadas técnicas compensatórias no Brasil, WSUD – *Water Sensitive Urban Design* na Austrália, LID – *Low Impact Development* nos Estados Unidos, SUDS – *Sustainable Urban Drainage System* no Reino Unido, entre outros. (SILVA, 2016).

Na Tabela 1 são apresentadas as fases de desenvolvimento dos conceitos em drenagem abordados por Tucci (2007).

Tabela 1 – Evolução dos conceitos em drenagem urbana

Fase	Características	Consequências
<u>Pré-higienista:</u> até o início do século XX	Lançamento de esgotos em fossa ou drenagem, sem coleta e tratamento; Obtenção de água de fontes próximas (poços ou rios).	Doenças e epidemias; Aumento da mortalidade; Aumento de inundações.
<u>Higienista:</u> anterior à 1970	Transporte de esgotos para áreas distantes dos centros urbanos; Canalização do escoamento.	Redução das doenças; Contaminação de cursos de água; Impactos nas fontes de água e inundações.
<u>Corretiva:</u> entre 1970 e 1990	Tratamento de efluentes doméstico e industrial; Amortecimento do escoamento.	Recuperação dos rios, restando poluição difusa; obras hidráulicas e impacto ambiental.
<u>Desenvolvimento sustentável:</u> após 1990	Tratamento terciário de efluentes; Tratamento do escoamento pluvial; Novas tecnologias que preservam o sistema natural.	Conservação ambiental; Redução das inundações; Melhoria da qualidade de vida.

Fonte: Tucci (2007, p. 53).

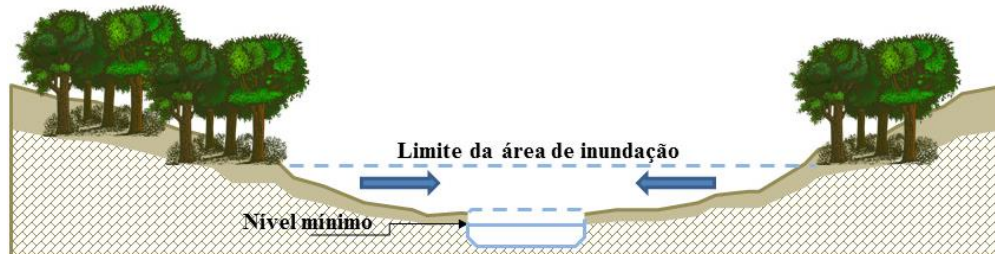
A ocupação crescente e desordenada do solo, sem o adequado planejamento urbano, propicia o aumento de áreas impermeabilizadas, em especial daquelas sujeitas a alagamentos naturais. Com isso, tem-se uma redução das áreas de infiltração de água no solo que atrelada às intervenções no leito dos cursos de água (retificações e canalizações) e sistemas de drenagem de águas pluviais obsoletos contribuem significativamente para o aumento e a aceleração do escoamento superficial. Tem-se, assim, a elevação na vazão de pico e nos volumes escoados em um curto período de tempo, com episódios de enchentes e inundações recorrentes em bacias urbanas e também maior deterioração da qualidade da água pela presença de sedimentos e resíduos urbanos carreados pelo escoamento.

De acordo com Tucci (2007), a inundação é um processo natural do ciclo hidrológico, onde a capacidade máxima de infiltração de água no solo é atingida, quando de uma precipitação intensa, gerando um volume excedente de água que escoar para a rede de drenagem ultrapassando a calha do rio e ocupando seu leito maior de escoamento, também denominado área de várzea (Figura 5).

Com a expansão urbana e a modificação no uso e ocupação do solo de uma bacia ocorrem alterações no ciclo hidrológico natural, gerando uma elevação na vazão

e no volume do escoamento superficial que contribuem para a ocorrência de enchentes e inundações nas áreas de várzeas ocupadas pela população.

Figura 5 – Ilustração do processo de inundação



Fonte: Adaptado de Tucci (2007).

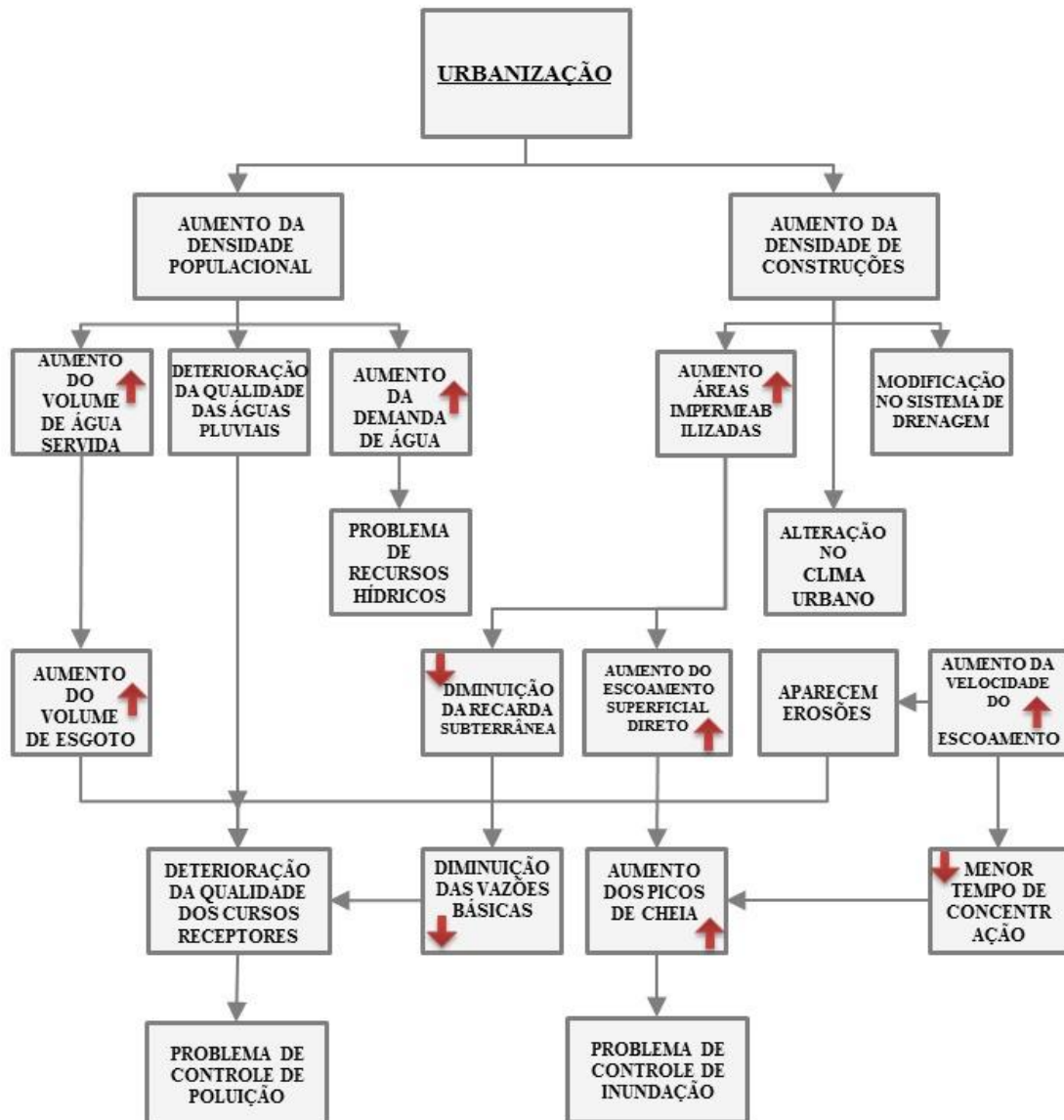
Segundo Schueler (1987), para um mesmo evento de precipitação, uma bacia moderadamente urbanizada pode gerar escoamentos superficiais 50% maiores que àsquelas produzidas em uma bacia natural.

Em decorrência da urbanização podem, ainda, ser observadas as seguintes alterações no escoamento superficial (TUCCI, 2005):

- Deterioração de qualidade da água por ligações clandestinas de esgotos e lançamento de resíduos sólidos no sistema de drenagem;
- Aumento nos casos de doenças de veiculação hídrica;
- Erosões hídricas nas margens dos cursos de água provocadas pelo aumento da velocidade de escoamento;
- Aporte de sedimentos no leito dos cursos de água e conseqüente assoreamento;
- Redução da capacidade de infiltração do solo e da recarga dos aquíferos com geração de maior volume de água escoado.

Os impactos da urbanização em uma bacia hidrográfica são apresentados resumidamente na Figura 6 a seguir.

Figura 6 – Impactos da urbanização em uma bacia urbana



Fonte: Adaptado de Hall (1984) *apud* Tucci (2004).

2.5 MODELOS HIDROLÓGICOS

Modelos consistem na representação simplificada da realidade através da utilização de sistemas de equações matemáticas e procedimentos computacionais compostos por variáveis e parâmetros capazes de prever comportamentos, transformações ou evoluções (CHRISTOFOLLETTI, 1999).

Na hidrologia, os modelos mais comumente empregados para representar os processos hidrológicos em bacias hidrográficas são os modelos de simulação, que descrevem matematicamente a resposta de um sistema hidrológico à uma série de

eventos de precipitação através da geração de hidrogramas (CHRISTOFOLETTI, 1999; LIMA *et al.*, 2013). Integrados as técnicas de geoprocessamento e ao monitoramento hidrológico contribuem para a compreensão do comportamento da bacia, constituindo uma importante ferramenta para a gestão das águas urbanas.

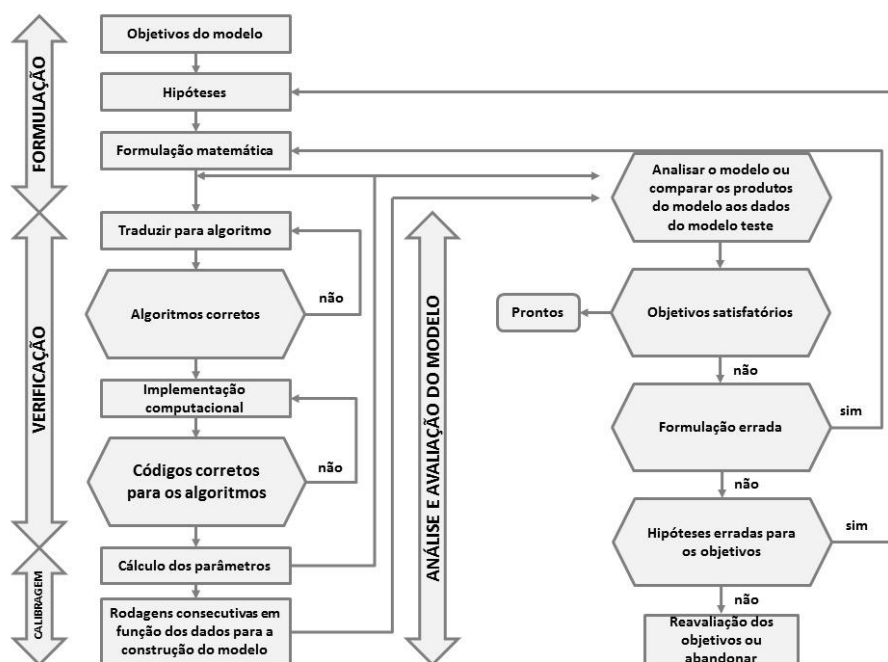
Com as simulações hidrológicas pode-se avaliar os efeitos da urbanização em bacias hidrográficas, o desempenho da rede de drenagem urbana e possíveis pontos de alagamentos e inundações. Podem, ainda, ser utilizadas na avaliação da disponibilidade e da qualidade hídrica, no dimensionamento de sistemas de drenagem e na previsão de enchentes, contribuindo na tomada de decisão de investimentos em drenagem urbana no âmbito da bacia.

De acordo com Lima *et al.* (2013), os modelos de simulação em drenagem urbana possuem dois módulos interligados, sendo um para transformação de chuva em vazão, quantificados através de algoritmos, e outro para simulação do escoamento, representando o comportamento da água no sistema de drenagem de águas pluviais.

A modelagem hidrológica pode ser considerada um instrumento de pesquisa científica em recursos hídricos, tendo em vista a necessidade de formulação de hipóteses a serem avaliadas para compreensão dos processos do ciclo hidrológico em bacias hidrográficas.

Segundo Christofolletti (1999), Tucci (2007), Collodel (2009) e Lima *et al.* (2013), dada a complexidade de processos, parâmetros e variáveis, bem como as hipóteses a serem testadas por um modelo, sua construção deve seguir uma sequência de normas, de passos (seleção do modelo, formulação matemática, verificação, calibração, validação) de forma a ajustar os resultados simulados aos resultados observados, assegurando menores erros em eventuais previsões. A sequência de passos sugerida por Christofolletti (1999) é apresentada na Figura 7.

Figura 7 – Processo iterativo de calibração



Fonte: Adaptado de Christofolletti (1999).

Assim, objetivando representar adequadamente nos modelos hidrológicos a bacia em estudo, faz-se necessário o ajuste dos parâmetros de entrada através de métodos de calibração. Isso, pois, com o desenvolvimento e a atualização dos modelos um número maior de parâmetros, muitos deles de difícil obtenção em campo e/ou mensuração, são utilizados, e/ou até mesmo simplificações nos modelos matemáticos podem ser adotadas. (BELING, 2013; COLLODEL, 2009; FORMIGA *et al.*, 2016; RABORI; GHAZAVI; REVESHTY, 2017; SHINMA, 2011; TUCCI, 2005).

Conforme Christofolletti (1999), a calibração de um modelo consiste no estabelecimento de parâmetros de entrada e condições internas do sistema visando a adequabilidade das respostas, ou seja, dos parâmetros ajustados ao modelo e sua potencialidade de uso. Trata-se de um processo iterativo, no qual realiza-se a variação dos parâmetros dentro de um intervalo de valores coerentes com os conceitos representados e referências bibliográficas aplicáveis, com o intuito de se obter resultados simulados mais próximos aos observados experimentalmente (BELING, 2013; COLLODEL, 2009; FORMIGA *et al.*, 2016; LIMA, *et al.*, 2013; SHINMA, 2011).

A calibração de um modelo hidrológico pode ser realizada de duas formas, sendo a primeira manual, através do processo de tentativa e erro, ou automatizada, na qual são utilizados algoritmos de otimização para calibrar o modelo. O método de

tentativa e erro através da alteração dos parâmetros manualmente, apesar de subjetivo e mais trabalhoso, proporciona ao pesquisador maior conhecimento sobre o comportamento do modelo frente aos diferentes valores de parâmetros testados, sendo possível observar a sensibilidade do modelo. Já a calibração automatizada é mais rápida na execução do processo iterativo uma vez que trabalha com um algoritmo de otimização, funções objetivo e critérios de parada.

Segundo Lima *et al.* (2013), por se tratarem de representações aproximadas da realidade com certo grau de simplificações, independente da qualidade das etapas de calibração e validação, os modelos apresentam algum grau de incerteza que pode estar associada aos dados de entrada, à estrutura do modelo e ao processo de calibração. Observa-se, assim, que os modelos apresentam restrições e aplicações diferentes a que se destinam.

De acordo com Zoppou (2001) há inúmeros modelos computacionais desenvolvidos por entidades públicas e privadas que podem ser empregados no planejamento e gestão das águas urbanas. Este revisou 12 modelos capazes de simular quali-quantitativamente o comportamento das águas pluviais em meio urbano, incluindo modelos estatísticos, empíricos, hidráulicos e hidrológicos, quanto a abordagem e disponibilidade do modelo, as variáveis empregadas na qualidade da água, componentes simulados e outras características. Ressaltou que a escolha do modelo depende dos objetivos propostos, da disponibilidade de dados, da área em estudo, bem como das condições de aplicabilidade do mesmo.

Atualmente muitos dos modelos de simulação são empregados na abordagem sustentável da gestão das águas urbanas com o intuito de readequar ou aumentar a eficiência hidráulica dos sistemas de drenagem, reduzindo os impactos socioambientais da urbanização. Elliott e Trowsdale (2007) revisaram 10 modelos hidrológicos capazes de simular o funcionamento de dispositivos de controle da drenagem urbana em uma bacia por meio do incremento da infiltração de água no solo e/ou retardamento, redução parcial ou total do escoamento superficial, atuando, ainda, na redução de contaminantes das águas. Frisaram a necessidade de aprimoramento e desenvolvimento de modelos que retratem melhor o transporte de contaminantes nas águas e nos dispositivos de controle, bem como o fluxo de escoamento das parcelas permeáveis e o tratamento de componentes do escoamento base (águas subterrâneas), abordem um número maior de contaminantes, entre outros.

Collodel (2009), quando do estudo da avaliação dos diferentes níveis de discretização da bacia do córrego do Gregório/SP, apresentou a comparação de 5 modelos hidrológicos utilizados em drenagem urbana quanto suas potencialidades em simulações, conforme Tabela 2. Concluiu pela maior potencialidade em simulações do modelo SWMM, justificando, portanto, o seu emprego neste trabalho.

Tabela 2 - Resumo comparativo dos modelos hidrológicos

Capacidades de Simulação	Modelos Hidrológicos				
	CHM	ILLUDAS	STORM	IPHS1	SWMM
Múltiplas sub-bacias	•	•	-	•	•
Entrada de diversos hietogramas	•	-	-	•	•
Evaporação	•	-	•	-	•
Degelo	-	•	•	-	•
Escoamento de base	•	•	-	•	•
Escoamento de superfície de áreas impermeáveis	•	•	•	•	•
Escoamento de superfície de áreas permeáveis	•	•	•	•	•
Áreas diretamente conectadas	-	•	-	-	•
Balanco hídrico entre eventos	•	-	•	•	•
Escoamento em sarjetas	•	•	•	-	•
Propagação em galerias	•	•	•	•	•
Múltiplas seções transversais	-	-	-	-	•
Escoamento sob pressão	-	-	-	-	•
Derivação	-	•	•	•	•
Estações elevatórias	-	•	-	-	•
Armazenamento	-	•	•	•	•
Cálculo de nível	-	•	-	•	•
Cálculo de velocidades	-	•	-	•	•
Simulação contínua	-	-	•	•	•
Escolha do passo de tempo	•	•	-	•	•
Cálculo de projetos	•	•	-	•	•
Código computacional disponível	•	•	•	•	•
	Legenda:	• →	Possibilita a simulação		
		- →	Não possibilita a simulação		

Fonte: Adaptado de Collodel (2009).

2.5.1 SWMM - STORM WATER MANAGEMENT MODEL

O SWMM - *Storm Water Management Model* é um modelo hidrológico de transformação chuva-vazão desenvolvido na década de 70 pela agência ambiental americana USA EPA – *United States of America Enviromental Protection Agency*, empregado na gestão das águas pluviais em simulações dos processos hidrológicos

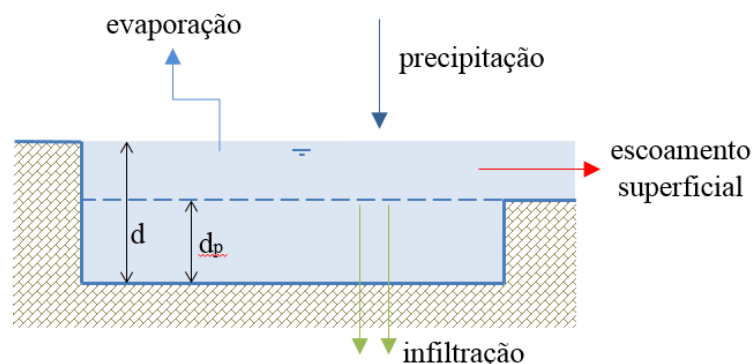
em uma bacia, especialmente nos aspectos quali-quantitativos do escoamento superficial (LENHS, 2012).

Trata-se de um modelo físico de simulação temporal discreta, distribuído, de código de fonte aberto, cujo algoritmo vem sendo alterado e atualizado por pesquisadores com o intuito de melhorar sua *performance* na representação dos processos hidrológicos. (COLLODEL, 2009, FORMIGA, *et al.* 2016; LENHS, 2012,).

A versão disponível e mais atualizada do SWMM, versão 5.1, conta com uma interface gráfica para inserção dos dados de entrada do modelo e permite a simulação da implantação de técnicas compensatórias no controle do escoamento superficial.

De acordo com Zoppou (2001), Silva (2010), LENHS (2012), Beling (2013) e Silva (2016), no SWMM a bacia hidrográfica é representada por sub-bacias que atuam como reservatórios não-lineares, apresentando como fluxos de entrada a precipitação e de saída a evaporação, a infiltração e o escoamento superficial (Figura 8). Neste as sub-bacias se aproximam de reservatórios retangulares de largura W com capacidade de retenção d_p , representando as abstrações iniciais por interceptação, umedecimento e acumulação. O escoamento superficial Q ocorre quando o total precipitado excede a capacidade de retenção d_p , sendo obtido pela equação da continuidade combinada à equação de Manning, e permitindo a determinação da altura da lâmina de água d no reservatório a cada passo de tempo, conforme Equação 8.

Figura 8 – Sub-bacia como reservatório não-linear



Fonte: Adaptado de LENHS (2012).

$$\frac{dd}{dt} = i - \frac{W}{A \cdot n} \cdot (d - d_p)^{5/3} \cdot S^{1/2} \quad (8)$$

Em que: i é a intensidade de chuva efetiva ($m \cdot s^{-1}$), W é a largura da sub-bacia (m), A é a área da sub-bacia (m^2), n é o coeficiente de rugosidade de Manning ($s \cdot m^{-1}$)

^{1/3}), d é a altura da lâmina d'água no reservatório (m), dp é a altura do armazenado de água no reservatório (m) e S é declividade da sub-bacia ($m.m^{-1}$).

No modelo SWMM o fluxo do escoamento superficial pode ocorrer entre sub-bacias ou para canais de drenagem interligados, nos quais a simulação da propagação do escoamento pode se dar através de fluxo uniforme (transferência do hidrograma de montante para a jusante), onda cinemática (translação de onda) ou onda dinâmica (translação e atenuação da onda, remanso e aceleração do fluxo). Há, ainda, a subdivisão das sub-bacias em áreas permeáveis ou impermeáveis, com ou sem armazenamento em depressões, podendo o processo de infiltração nas áreas permeáveis ser regido pelos modelos de Horton, Green-Ampt ou Curva Número do SCS – *Soil Conservation Service* (BELING, 2013; LENHS, 2012; SILVA, 2010; SILVA, 2016).

Conforme descrito por Shinma (2011) e LENHS (2012), o modelo hidrológico SWMM possibilita, ainda, a estimativa e a avaliação da redução das cargas poluentes presentes no escoamento superficial, o dimensionamento e o rearranjo da rede de drenagem urbana e de estruturas de controle de enchentes e inundações, a análise da eficiência de técnicas compensatórias no controle de cheias e a delimitação de zonas de inundação nos leitos dos cursos d'água.

2.6 ESTUDOS SOBRE MODELAGEM HIDROLÓGICA NO SWMM

São várias as aplicações do modelo hidrológico SWMM na drenagem urbana compreendendo a análise dos efeitos da urbanização em uma bacia hidrográfica, a disponibilidade hídrica e da qualidade das águas, a avaliação do emprego de técnicas compensatórias no amortecimento de cheias e restabelecimento do escoamento pré-urbanização, dentre outras. Neste contexto, buscou-se apresentar alguns estudos recentes sobre a modelagem hidrológica no SWMM demonstrando a potencialidade deste modelo.

Collodel (2009) aplicou o modelo SWMM na avaliação de diferentes níveis de detalhamento da bacia hidrográfica do córrego do Gregório, localizada no município de São Carlos – SP. Esta bacia possui 10,10 km² e foram realizadas discretizações desde 1 sub-bacia até 298 sub-bacias para estudo. Como parâmetros mais sensíveis do modelo obteve a área impermeável, a largura das sub-bacias, os parâmetros de infiltração de Horton e o coeficiente de rugosidade de Manning dos canais. O modelo

foi calibrado através de algoritmos genéticos, resultando em coeficientes de Nash-Stucliffe (NSE) entre 0,74 e 0,87 para os eventos analisados. Com a validação concluiu-se pela importância de se considerar a microdrenagem na representação da bacia, bem como a determinação criteriosa das áreas impermeáveis tendo em vista sua influência nos hidrogramas simulados.

Shinma (2011) desenvolveu um calibrador automático multiobjetivo para o SWMM, adotando o NSGA II como método de otimização, e o aplicou a uma bacia hipotética e a bacia do córrego do Gregório, localizada no município de São Carlos – SP. A bacia hipotética possui 8 sub-áreas, 13 trechos e nós, enquanto a bacia do córrego do Gregório possui 10,10 km², discretizada em 52 sub-áreas e 17 trechos naturais e nós. Realizou a análise de sensibilidade para ambas as bacias, sendo as áreas impermeáveis, os parâmetros de rugosidade das áreas permeáveis, impermeáveis e dos canais e os parâmetros de infiltração de Horton, os mais sensíveis do modelo. Para o programa desenvolvido obteve na calibração coeficientes de Nash-Stucliffe (NSE) de 0,99 e 0,87 para a bacia hipotética e para a bacia do córrego do Gregório, respectivamente. Concluiu que o processo de validação comprovou a eficiência do calibrador com NSE médio de 0,84.

Beling (2013) utilizou o algoritmo PEST acoplado ao modelo SWMM para calibração dos parâmetros mais sensíveis para uma bacia urbana do arroio Cancela em Santa Maria – RS, considerando na análise o escoamento superficial e de base, além da acumulação e lavagem dos sedimentos em suspensão totais (SST) e a matéria orgânica (DBO₅). Esta bacia possui 4,95 km² e foi discretizada em 23 sub-áreas e 12 trechos, não sendo considerada a microdrenagem. Os parâmetros mais sensíveis do modelo foram aqueles relacionados às áreas impermeáveis (porcentagem das áreas impermeáveis e profundidade de armazenamento das áreas impermeáveis). A calibração e a validação para o escoamento superficial apresentaram coeficientes de Nash-Stucliffe (NSE) médios de 0,92 e de 0,87, respectivamente. Já para os parâmetros SST e DBO₅ obteve na calibração NSE médios de 0,56 e -0,75, sendo a validação para esses parâmetros muito deficiente. Este estudo concluiu que o algoritmo PEST acoplado ao modelo SWMM gera bons resultados na simulação do escoamento superficial, entretanto um fraco desempenho para os processos de acumulação e lavagem de poluentes. Recomenda-se melhores estimativas nos parâmetros iniciais de acumulação e lavagem de SST e DBO₅, além do aperfeiçoamento do algoritmo do cálculo dos mesmos.

Méndez-Morales (2013) aplicou o modelo SWMM para as bacias dos rios Toyogres e Zopilote, em Cartago na Costa Rica, com o intuito de se avaliar a variabilidade espacial e temporal dos parâmetros do modelo. Ambas as bacias possuem 14,60 km². Como parâmetros mais sensíveis obteve àqueles relacionados à rugosidade das superfícies impermeáveis, dos trechos e das superfícies permeáveis. Os processos de calibração e validação do modelo foram realizados automaticamente através de algoritmos no programa PEST, sendo obtidos coeficientes de Nash-Sutcliffe (NSE) médios na calibração do modelo de 0,85 e 0,80 para as bacias dos rios Toyogres e Zopilote, enquanto na validação obteve-se resultados de 0,87 e 0,77, respectivamente. Os erros na vazão e no tempo de pico não ultrapassaram 15%. Concluiu que os dados espaciais empregados na construção do modelo foram adequados e que dada a flexibilidade do modelo de onda cinemática do SWMM este pode ser usado mesmo quando não há dados de monitoramento hidrológico observados.

Faria, Barbassa e Silveira (2014) realizaram a modelagem hidrológica da bacia do córrego do Barbado, localizada em Cuiabá – MT, para avaliação de diferentes cenários de impermeabilização desta bacia. Esta apresenta 10,71 km², sendo dividida em 9 sub-áreas. Como parâmetros mais sensíveis do modelo encontraram a área impermeável das sub-áreas e o coeficiente de Manning para condutos, seguidos pelo coeficiente de rugosidade relativo à parcelas das sub-áreas permeáveis e a largura das sub-áreas. Os processos de calibração manual e validação resultaram em coeficientes de Nash-Stucliffe (NSE) médios de 0,84 e 0,74 e coeficientes de determinação (R^2) de 0,91 e 0,86, respectivamente, ficando os erros na vazão de pico abaixo de 2%. Quanto aos efeitos da urbanização na bacia, observaram que a medida em que os lotes vagos são ocupados (taxa de impermeabilização semelhante aos lotes ocupados na bacia atual) e que a taxa de impermeabilização aumenta (características da área central) as vazões de pico são elevadas em 17% e 22%, respectivamente, para período de retorno de 2 anos. Observaram, ainda, que o aumento na vazão de pico entre os períodos de retorno de 2 e 100 anos relacionam-se em primeiro lugar com as precipitações intensas e em segundo lugar com o nível de impermeabilização da bacia, resultando em pontos de inundação.

Guan, Sillanpää e Koivusalo (2015) aplicaram o modelo SWMM na simulação dos efeitos da urbanização e na avaliação do emprego de LIDs - *Low Impact Development systems* (pavimento permeável e reservatório de água de chuva) no

restabelecimento da vazão natural em uma bacia da cidade de Espoo, na Finlândia. Esta bacia com área de 1,23 km² foi subdividida em 93 sub-áreas e 77 trechos. Foram calibrados manualmente os seguintes parâmetros do modelo: largura das sub-áreas, coeficiente de rugosidade de Manning das áreas impermeáveis, coeficiente de rugosidade de Manning dos trechos, profundidade de armazenamento das áreas permeáveis e impermeáveis e parâmetros de infiltração de Green-Ampt. A calibração resultou em coeficiente de Nash-Stucliffe (NSE) médio de 0,88 e a validação do modelo em 0,92, sendo o coeficiente de determinação (R^2) médio de para ambos os processos de 0,94. Concluíram que o escoamento superficial na bacia urbanizada produz resposta rápida à eventos de precipitação atingindo maiores picos de vazão e volumes escoados, quando comparada com a bacia pré-urbanizada; a adoção de LIDs no controle das águas pluviais pode mitigar os impactos negativos da urbanização através da redução na vazão e no volume do escoamento superficial, sendo seu emprego recomendado.

Rosa, Clausen e Dietz (2015) utilizaram o modelo SWMM na simulação do escoamento e da exportação de nutrientes (nitrogênio e fósforo) para duas bacias em Waterford na Irlanda, sendo uma bacia tradicional e a outra construída com LIDs - *Low Impact Development systems*. A bacia tradicional possui 0,02 km² e foi construída de acordo com o zoneamento tradicional, possui 34% de áreas desconectadas, cujo escoamento é encaminhado para áreas permeáveis. A bacia com LIDs possui 0,017 km² e vias ruas com pavimento mais permeável e valas de infiltração no meio-fio, se comparadas com a bacia tradicional, além de jardins de chuva nos lotes e uma área de biorretenção. Os parâmetros mais sensíveis para a bacia com LIDs foram: condutividade, coeficiente de rugosidade de Manning para as áreas permeáveis e parâmetros de infiltração de Green-Ampt. Já para a bacia tradicional os parâmetros que exercem maior influência no modelo foram: condutividade, parâmetros de infiltração de Green-Ampt e coeficiente de rugosidade de Manning para as áreas impermeáveis. Como resultados da calibração manual. A modelagem para ambas as bacias apresentou bons resultados para volume escoado e vazão de pico com coeficientes de Nash-Stucliffe (NSE) de 0,92 e 0,88 para a calibração e 0,87 e 0,74 para a validação da bacia com LID; e 0,90 e 0,68 para calibração e 0,94 e 0,88 para a bacia tradicional, além de coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,80 para os processos de calibração e validação de ambas. Em relação a exportação de nutrientes, a calibração e validação do modelo apresentaram coeficientes de

determinação (R^2) e coeficientes de Nash-Stucliffe (NSE) abaixo daqueles obtidos para o escoamento. O modelo calibrado foi utilizado para avaliar o escoamento superficial para períodos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos para as bacias tradicional e com LIDs, sendo verificado que o escoamento da bacia com LIDs se apresentou menor que a bacia tradicional para todos os períodos de retorno. Concluíram, assim, que a calibração dos parâmetros do modelo é necessária para o bom desempenho do modelo na representação da bacia; as LIDs atuam no controle de fluxo do escoamento frente à precipitações intensas.

Palla e Gnecco (2015) avaliaram a influência de LIDs – *Low Impact Development systems* (telhados verdes e pavimentos permeáveis) no restabelecimento da vazão natural em uma bacia urbana de Colle Ometti, localizada em Genoa na Itália, assumindo como referência a situação atual da bacia sem as técnicas implantadas. Esta bacia com área de 0,55 km² foi discretizada em 286 sub-bacias, 101 trechos e 102 nós. Calibraram manualmente os parâmetros CN (método de infiltração da Curva Número), profundidade de armazenamento em depressões e coeficientes de rugosidade de Manning, que resultaram em coeficientes de Nash-Stucliffe (NSE) superiores a 0,80 e erros médios da vazão de pico e do volume escoado abaixo de 5% para os processos de calibração e validação do modelo. Concluíram que a efetividade das LIDs requer uma redução mínima de 5% na área impermeável da bacia urbana; a redução das áreas impermeáveis resultam em decréscimo das vazões de pico, volumes escoados e aumento dos tempos de retardo da bacia. O estudo sinalizou a eficiência da implantação de LIDs e a redução das áreas impermeáveis como medidas de controle e gestão das águas pluviais na bacia.

Formiga *et al.* (2016) empregaram o algoritmo evolucionário multiobjetivo R-NSGA na calibração automática do modelo SWMM para a bacia do arroio Cancela, em Santa Maria - RS. Esta bacia possui 4,95 km² e foi representada no modelo de forma concentrada por apenas uma sub-bacia. Os parâmetros mais sensíveis do modelo encontrados foram: largura e declividade das sub-áreas, coeficiente de rugosidade de Manning para as superfícies impermeáveis e áreas impermeáveis. Os processos de calibração e validação resultaram em coeficientes de Nash-Stucliffe (NSE) superiores a 0,80. Concluíram que o algoritmo de otimização na calibração apresentou desempenho satisfatório, tendo em vista a obtenção de valores próximos aos teóricos para cada função objetivo. O modelo apresentou boa representatividade

da área em estudo, sendo seu emprego aceitável em bacias pequenas e eventos de precipitação intensos.

Silva (2016) avaliou a influência de microrreservatórios de retenção em um loteamento na bacia do córrego Mineirinho em São Carlos – SP, como medida de controle do escoamento na fonte. Esta bacia com área de 5,62 km² foi discretizada em 7 sub-áreas, 14 trechos e 10 nós. Apesar não realizar a calibração do modelo, concluiu que o microrreservatório de retenção é eficiente na redução da vazão de pico gerada no lote; que o uso desse dispositivo resultou em uma atenuação do pico de vazão em 44% no loteamento e que em escala de bacia diferentes posicionamentos do loteamento, com e sem os microrreservatórios de retenção, demonstraram a capacidade de redução das vazões de pico.

Rabori, Ghazavi e Reveshty (2017) buscaram avaliar os parâmetros mais sensíveis de transformação de chuva-vazão no modelo SWMM para a bacia de Zanjan, localizada no Irã, que apresenta 39,00 km², sendo discretizada em 16 sub-bacias. Estabeleceram parâmetros iniciais na análise de sensibilidade e realizaram a alteração individual destes em intervalos de valores de acordo com a literatura, enquanto os demais foram mantidos constantes. Como parâmetros mais sensíveis do modelo que afetam a vazão de pico e o volume escoado encontraram a profundidade de armazenamento das áreas impermeáveis, a área impermeável das sub-áreas e o coeficiente de rugosidade relativo à parcelas impermeáveis das sub-áreas. Obtiveram coeficientes de Nash-Stucliffe (NSE) superiores a 0,96 e função normalizada do erro quadrático médio (NOF) inferior a 1 para a calibração manual e a validação do modelo. Concluíram que o modelo possui bom desempenho na transformação de chuva-vazão em área semi-árida e que a escolha dos parâmetros de entrada do modelo é muito importante no desempenho do mesmo.

Girão *et al.* (2017) utilizaram o modelo SWMM na avaliação do comportamento do sistema de drenagem de águas pluviais da zona central da cidade de Coimbra, em Portugal, bem como na avaliação da concentração de sólidos suspensos totais (SST) no sistema. A bacia em estudo possui 1,50 km², sendo definidos 4 pontos de controle para avaliação do comportamento da rede de drenagem. Para a modelagem da qualidade da água foi considerada a contribuição das águas pluviais e águas residuárias com estimativa da concentração de poluente e as funções de acumulação e lixiviação no SWMM. Verificaram que o evento de precipitação com período de retorno de 100 anos resultou no acúmulo de água superficial em um dos pontos de

controle, devido a inclinação da área que dificulta que a água adentre nos coletores. Observaram a ocorrência do fenômeno *first flush* com o aumento da concentração de SST nos pontos de controle no início da simulação e posterior decaimento, resultante do arraste do poluente a jusante, bem como da diluição nas águas pluviais, e concluíram que, nas circunstâncias estudadas, haveria um impacto reduzido da concentração de SST no corpo receptor.

Zanandrea e Silveira (2018) avaliaram diferentes cenários de urbanização na sub-bacia do arroio Central, localizado em Viamão – RS, sendo estes: cenário atual (60% da área impermeável), cenário futuro (90% da área impermeável), cenário com a instalação de LIDs – *Low Impact Development systems* (valas de infiltração e pavimentos permeáveis) e medidas de zoneamento, e cenário com planejamento territorial. Esta sub-bacia possui 0,91 km² e foi discretizada em 26 sub-áreas, trechos e nós. Foi realizada a calibração manual do modelo para os parâmetros largura das sub-áreas, coeficiente de rugosidade de Manning e parâmetros de infiltração de Horton, sendo obtidos coeficiente de Nash-Stucliffe (NSE) de 0,75 e 0,70 e erros dos volumes escoados de -17,80% e 30,90%, para os processos de calibração e validação, respectivamente. Para um evento com período de retorno de 10 anos observaram um aumento de 27% no volume escoado com o cenário futuro de 90% da área impermeável e um aumento de 6% com a adoção do planejamento territorial, quando comparados com o cenário atual da sub-bacia; enquanto houve uma redução de 13,80% com a instalação de LIDs e medidas de zoneamento, quando comparado com o cenário futuro da sub-bacia. Concluíram que para um cenário futuro com apenas a adoção das taxas de permeabilidade das áreas estabelecidas no novo plano diretor, os problemas de drenagem urbana existentes serão agravados; a adoção de medidas de planejamento urbano, sobretudo com relação as áreas permeáveis, mostraram-se eficientes, entretanto não podem ser adotadas em áreas já consolidadas e com alta taxa de ocupação; a instalação de LIDs apresentou resultado satisfatório na redução dos volumes escoados superficialmente tanto para áreas consolidadas quanto para àquelas em consolidação; e que uma solução provável para os problemas de drenagem urbana é adoção conjunta de LIDs com o disciplinamento do uso do solo da bacia.

Souza, Costa e Koide (2019) empregaram o modelo SWMM na avaliação do comportamento do escoamento superficial e da qualidade da água com diferentes alternativas de localização de reservatórios de retenção na sub-bacia late Club, que

desagua no Lago Paranoá, em Brasília – DF. Como parâmetros mais sensíveis do modelo obtiveram os coeficientes de rugosidade de Manning das parcelas permeáveis e impermeáveis. A calibração resultou em coeficientes de determinação (R^2) e de Nash-Stucliffe (NSE) maiores que 0,90 e 0,94, respectivamente, enquanto no processo de validação foram obtidos pelo menos 0,60 e 0,50 para os coeficientes de determinação (R^2) e de Nash-Stucliffe (NSE). Observaram que o sistema de drenagem existente encontra-se subdimensionado e que os reservatórios de retenção localizados na região central apresentaram baixos resultados no amortecimento da vazão final, entretanto contribuíram para redução dos pontos de sobrecarga do sistema. A melhor alternativa encontrada na redução da vazão de pico, bem como na concentração de poluentes (sólidos suspensos totais, nitrogênio e fósforo) foi àquela implantada na galeria principal (alternativa 13). Concluíram que os reservatórios são medidas de controle eficientes em drenagem urbana.

Siqueira, Moura e Silva (2019) aplicaram o modelo SWMM na construção de gráfico de risco de inundação na bacia do córrego Cachoeirinha, em Belo Horizonte – MG. A bacia em estudo possui 15,79 km² e foi discretizada em 39 sub-áreas e 379 trechos e nós. Como parâmetros mais sensíveis do modelo obteve-se a profundidade de armazenamento das parcelas impermeáveis, o coeficiente de rugosidade de Manning para as parcelas impermeáveis e coeficiente de rugosidade de Manning dos canais, além da largura das sub-áreas que foi calibrada. O modelo foi calibrado manualmente e validado com dados de precipitação e nível d'água registrados em estações de monitoramento, resultando em coeficientes de Nash-Stucliffe (NSE) de 0,72 e 0,70 nos processos de calibração e de validação, respectivamente. Concluíram que o modelo é válido, tendo em vista que a maioria dos eventos se ajustaram aos níveis de risco definidos, e possibilitou a construção do gráfico de risco com a definição das faixas de risco ou níveis de alerta em função do volume e da duração da precipitação acumulada.

3 ARTIGO

O artigo intitulado “Calibração manual do modelo hidrológico SWMM para a sub-bacia do ribeirão Vai e Volta – Poços de Caldas/MG” foi submetido em 24/08/2020, sob ID ESA-2020-0300), à revista Engenharia Sanitária e Ambiental, classificada como B1 na área de Engenharias I da CAPES, tendo como autores Allana Abreu Cavalcanti, Alexandre Silveira, Frederico Carlos Martins de Menezes Filho e Matheus Franco Severino.

CALIBRAÇÃO MANUAL DO MODELO HIDROLÓGICO SWMM PARA A SUB-BACIA DO RIBEIRÃO VAI E VOLTA – POÇOS DE CALDAS/MG

RESUMO

A impermeabilização de áreas em centros urbanos, resultante do processo de ocupação desordenada do solo, contribui para o aumento e a aceleração do escoamento superficial e, conseqüentemente para ocorrência de enchentes e inundações em bacias urbanas. Neste contexto, atualmente vem sendo empregados modelos hidrológicos no desenvolvimento de políticas públicas de gestão das águas urbanas, com vistas à drenagem urbana sustentável. O presente trabalho tem como objetivo usar um modelo hidrológico para a sub-bacia do ribeirão Vai e Volta, localizada no município de Poços de Caldas-MG para simular o hidrograma de cheia em um canal urbano. Utilizou-se o *software Storm Water Management Model (SWMM)* calibrando o modelo a dados de chuva e vazão medidos. Realizou-se a calibração manual do modelo para dois eventos de precipitação com a obtenção de coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) médio de 0,73 e erros da vazão de pico e do volume escoado inferiores a 15%. O modelo foi validado para outros três eventos distintos e obteve-se ajuste NSE médio de 0,79 e erros da vazão de pico e do volume escoado inferiores a 5%.

Palavras-chave: SWMM, calibração manual, drenagem urbana.

MANUAL CALIBRATION OF SWMM'S HYDROLOGICAL MODEL FOR THE SUBWATERSHED VAI E VOLTA STREAM - POÇOS DE CALDAS / MG

ABSTRACT

he waterproofing of areas in urban centers, resulting from the disorderly occupation of the soil, contributes to increase and accelerate the runoff and, consequently, to the occurrence of flooding and inundation in urban watersheds. In this context, hydrological models are currently being used in the development of public policies for urban water management, related to sustainable urban drainage. The present work aims to use a hydrological model for the subwatershed of the Vai e Volta stream, located in the city of Poços de Caldas-MG to simulate the flood hydrograph in an urban channel. The Storm Water Management Model (SWMM) software was used, calibrating the model to measured rainfall and flow data. The model was manually calibrated for two precipitation events with an average Nash-Sutcliffe coefficient (NSE) of 0.73 and errors in peak flow and runoff volume below 15%. The model was validated for three other distinct events and an average NSE adjustment of 0.79 was obtained and errors in peak flow and runoff volume below 5%.

Keywords: SWMM, manual calibration, urban drainage

INTRODUÇÃO

Com o intuito de promover a gestão sustentável das águas urbanas através da adoção de políticas públicas que favoreçam a integração entre o espaço público e o manejo adequado das águas pluviais, com previsão e atenuação de enchentes e inundações, empregam-se na atualidade modelos de simulação na representação de processos hidrológicos em bacias urbanas (TUCCI, 2007).

Os efeitos da urbanização em bacias hidrográficas, o dimensionamento e o desempenho da rede de drenagem urbana, a previsão de pontos de alagamentos e inundações, a avaliação da disponibilidade e da qualidade hídrica, bem como o estudo da implantação de técnicas compensatórias na atenuação de cheias urbanas, são algumas das aplicações dos modelos hidrológicos (MELLER e PAIVA, 2007, COLLODEL, 2009, LENHS, 2012, BELING, 2013).

Existem inúmeros modelos desenvolvidos por órgãos públicos e privados capazes de simular a quantidade e a qualidade hídrica em ambientes urbanos. Zoppou (2001) revisou 12 modelos hidrológicos quanto ao tipo de modelagem realizada, componentes da água simulados, variáveis da qualidade da água modeladas, disponibilidade/acessibilidade do modelo e características adicionais. Elliott e Trowsdale (2007) revisaram 10 modelos de simulação quanto a implantação de medidas estruturais de drenagem urbana sustentável (LIDs, SUDs, BMPs) na transformação de chuva-vazão. Collodel (2009) comparou 5 modelos hidrológicos quanto suas potencialidades em simulações aplicadas à drenagem urbana, e conclui pela maior abrangência e flexibilização do modelo SWMM.

O SWMM – *Storm Water Management Model*, desenvolvido pela EPA – *Environmental Protection Agency*, é um modelo de simulação de transformação chuva-vazão muito empregado em estudos de drenagem urbana por se tratar de uma ferramenta computacional de domínio público livre com código de fonte aberto, capaz de simular quantitativamente e qualitativamente os processos hidrológicos em bacias urbanas através da geração de hidrogramas (ZOPPOU, 2001, ELLIOTT e TROWSDALE, 2007, COLLODEL, 2009, LENHS, 2012, FORMIGA, *et al.* 2016).

Segundo Tucci (2005), Beling (2013), Formiga *et. al.* (2016), Rabori, Ghazavi e Reveshty (2017), a calibração de modelos hidrológicos é necessária, tendo em vista o surgimento de novos parâmetros com o aprimoramento dos modelos, a adoção de parâmetros de difícil mensuração e medição em campo, bem como simplificações nos

modelos matemáticos. Busca-se, portanto, o ajuste dos resultados simulados aos resultados obtidos em campo, de forma a representar melhor o comportamento da bacia hidrográfica no modelo e reduzir erros eventuais em previsões.

Méndez-Morales (2013) realizou a calibração do modelo SWMM através do algoritmo PEST para as bacias dos rios Toyogres e Zopilote na Costa Rica, com a aplicação de 13 eventos de precipitação monitorados. Os resultados mostraram uma eficiência média na calibração do modelo de 0,85 e 0,80, enquanto na validação obteve-se resultados de 0,87 e 0,77, para as bacias dos rios Toyogres e Zopilote, respectivamente, com o emprego do coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE). Os erros na vazão e no tempo de pico e não ultrapassaram 15%.

Faria, Barbassa e Silveira (2014) realizaram a calibração manual do modelo SWMM para a bacia do córrego Barbado/MT com o intuito de simular diferentes cenários de impermeabilização da bacia. Obtiveram como resultados do processo de calibração e validação do modelo coeficientes de eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE) médios de 0,84 e 0,74 e coeficientes de determinação (R^2) de 0,91 e 0,86, valores geralmente obtidos em estudos semelhantes. Os erros na vazão de pico se apresentaram abaixo de 2%.

Guan, Sillanpää e Koivusalo (2015) utilizaram o método de tentativa e erro para calibrar o modelo SWMM e simular a urbanização e o emprego de técnicas compensatórias em uma bacia da cidade de Espoo na Finlândia. Os resultados mostraram uma eficiência média do coeficiente de Nash e Sutcliffe (NSE) na calibração do modelo de 0,88 e na validação de 0,92, sendo o coeficiente de determinação (R^2) médio de 0,94 para ambos os processos. Concluíram com os estudos que as técnicas compensatórias (pavimento permeável e reservatório de água de chuva) foram capazes de reduzir os impactos da urbanização na geração do escoamento superficial.

Rosa, Clausen e Dietz (2015) realizaram a comparação do modelo SWMM para duas bacias em Waterford na Irlanda, sendo uma bacia tradicional e a outra construída com técnicas compensatórias (LID). Avaliou-se o desempenho do modelo para volume escoado e vazão de pico com resultados de coeficiente de Nash e Sutcliffe (NSE) de 0,92 e 0,88 para a calibração e 0,87 e 0,74 para a validação da bacia com LID, e 0,90 e 0,68 para calibração e 0,94 e 0,88 para a bacia tradicional. Obtiveram coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,80 para os processos de calibração e validação de ambas as bacias. Concluíram que a calibração dos parâmetros do

modelo é necessária para obtenção de resultados simulados mais próximos dos observados.

Palla e Gnecco (2015) aplicaram o método de calibração manual no modelo SWMM para simulação de cenários de uso e ocupação do solo, incluindo a implantação de telhados verdes e pavimentos permeáveis, na bacia urbana de Colle Ometti na Itália. Os resultados do modelo mostraram uma eficiência na calibração e na validação obtida pelo coeficiente de Nash e Stuciliffe (NSE) superior a 0,80, enquanto os erros médios da vazão de pico e do volume escoado apresentaram-se abaixo de 5%. Concluíram pela efetividade das técnicas compensatórias na redução do volume de escoamento e no pico de vazão.

Formiga *et al.* (2016) realizaram a calibração automática do modelo SWMM para a bacia do arroio Cancela, localizada em Santa Maria/RS, com utilização do algoritmo evolucionário multiobjetivo R-NSGA. Obtiveram como resultados do processo de calibração e validação do modelo coeficientes de eficiência de Nash e Stuciliffe (NSE) superiores a 0,80, indicando que o comportamento do modelo foi satisfatório para representação da bacia.

Rabori, Ghazavi e Reveshty (2017) realizaram a construção de um modelo hidrológico SWMM para a bacia de Zanjan, localizada no Irã, a partir da calibração manual do modelo. Observaram ajustes elevados com coeficientes de Nash e Stuciliffe (NSE) de 0,96 a 0,99, e função normalizada do erro quadrático médio (NOF) inferior a 1, e concluíram que o modelo é satisfatório na representação da bacia em estudo.

Siqueira, Moura e Silva (2019) realizaram a calibração manual do modelo SWMM para a bacia do córrego Cachoeirinha, em Belo Horizonte/MG, visando a construção de gráfico de risco de inundação em bacias urbanas. Os resultados do modelo mostraram uma eficiência do coeficiente de Nash e Stuciliffe (NSE) de 0,72 na calibração e de 0,70 na validação, concluindo pelo desempenho satisfatório do modelo, ainda que o modelo não tenha representado bem os eventos de precipitação mais intensa que produziram alertas de emergência e extravasamento do canal.

Mediante o exposto, este trabalho tem como objetivo calibrar o SWMM para a sub-bacia do ribeirão Vai e Volta, localizada no município de Poços de Caldas – MG.

METODOLOGIA

Área de estudo

O presente trabalho foi realizado na sub-bacia do ribeirão Vai e Volta, uma bacia urbana do município de Poços de Caldas/MG, cujo vale encontra-se densamente ocupado e suas encostas em expansão urbana, agravando o quadro de inundações na região central do município, de acordo com o Diagnóstico Preliminar do Município de Poços de Caldas (2006).

A sub-bacia possui área total de 3,96 km² e 15,33 km de rede de drenagem constituída pelo curso d'água principal ribeirão Vai e Volta e seus tributários, apresentando trechos de canais naturais e um trecho canalizado, onde encontra-se instalada a estação fluvi-pluviométrica para monitoramento hidrológico utilizada no estudo e considerada como exutório da sub-bacia (Figura 9).

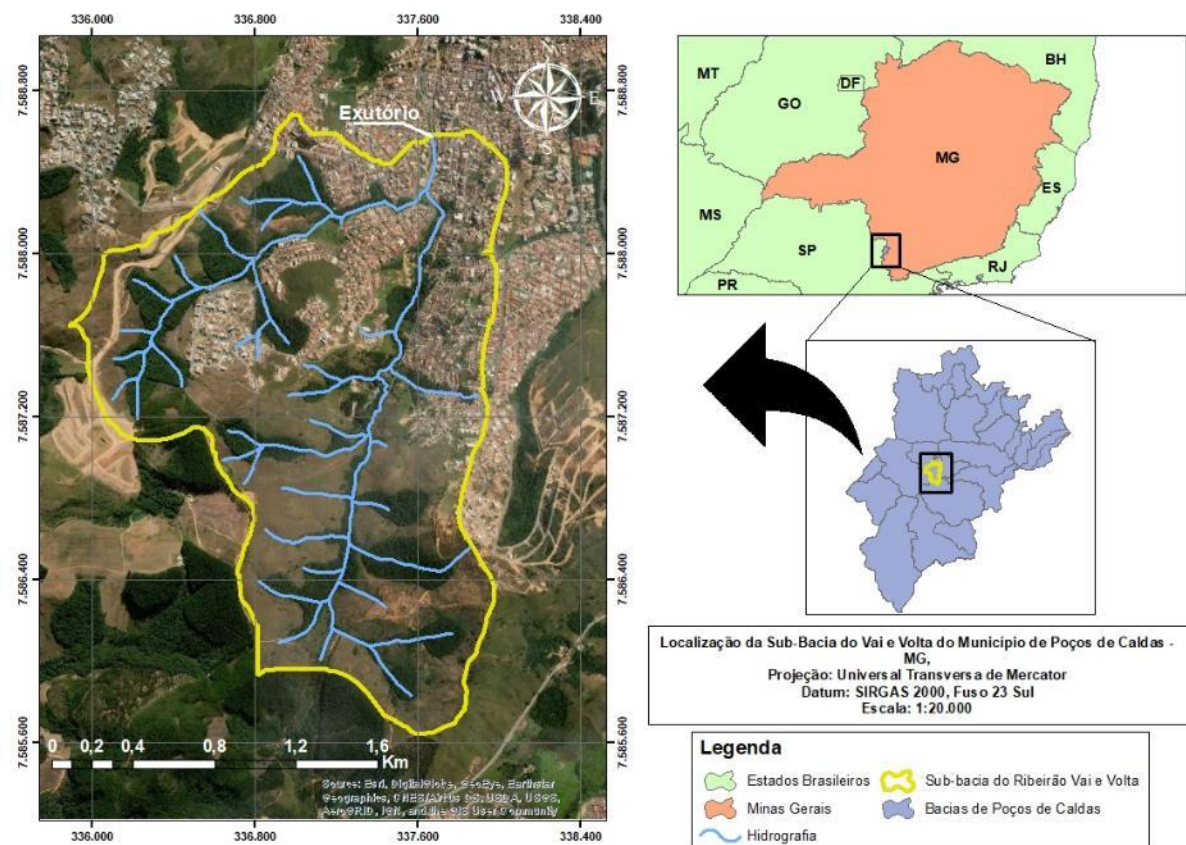


Figura 9 – Localização da sub-bacia do ribeirão Vai e Volta.

Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, o clima da região é do tipo Cwb mesotérmico (tropical de altitude), com estações secas e chuvosas bem

definidas: verão chuvoso (meses de outubro a março) com temperatura média de 20,3°C e precipitação total de 1.430 mm e inverno seco (meses de abril a setembro) com temperatura média de 15°C e índice pluviométrico de 315 mm (SARDINHA *et. al.*, 2016).

Geologicamente, a sub-bacia do ribeirão Vai e Volta localiza-se no Planalto Poços de Caldas, maciço alcalino com predominância de rochas plutônicas de granulação fina (foiaitos) e sub-vulcânicas (tinguaítos), além dos tipos litológicos: sienitos de granulação média, fonolitos, rochas piroclástica, lujaurito e chibinito (MORAES e JIMÉNEZ-RUEDA, 2008, ALBERTI, 2008, SARDINHA *et. al.*, 2016). A pedologia predominante é o cambissolo háplico distrófico (CXd), caracterizado por solo pouco profundo com presença de argila associada à matéria orgânica, susceptível a erosão (MORAES, 2007, ALBERTI, 2008). Segundo Silva *et. al.* (2018), este tipo de solo restringe a infiltração de água, estando associado ao grupo hidrológico C do modelo de infiltração de água no solo denominado Método do Número da Curva (*Curve Number*) do *Soil Conservation Service* – SCS.

De acordo com o IDE-SISEMA (2019), a sub-bacia do ribeirão Vai e Volta localiza-se no bioma Mata Atlântica em área de relevo acidentado com vegetação predominante de campos nativos nas áreas mais elevadas, fragmentos de Floresta Estacional Semidecidual – FES associados aos cursos d'água além de área urbanizada próxima ao exutório da sub-bacia. Corroborando com estas informações, realizou-se o levantamento do uso e ocupação do solo da área de estudo que é composta por 40,93% de campos de altitude, 27,48% de área urbana, 26,38% de FES, 2,42% de solo exposto, 1,76% de plantio de eucalipto e 1,03% de áreas verdes urbanas.

As características fisiográficas da sub-bacia do ribeirão Vai e Volta, obtidas através de técnicas de geoprocessamento e índices hidrológicos, são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Características físicas da sub-bacia do ribeirão Vai e Volta.

Parâmetro	Valores
Área de drenagem (A)	3,96 km ²
Perímetro (P)	9,43 km
Declividade média da sub-bacia (S _s)	10,60 %
Comprimento do curso d'água principal (L _p)	3,92 km
Declividade média do curso d'água principal (S _p)	2,94 %
Extensão média do escoamento superficial (C _m)	0,06 km
Índice de conformação (I _c)	0,40
Coeficiente de compacidade (K _c)	1,33
Fator de forma (K _f)	0,48
Densidade de drenagem (D _d)	3,87 km.km ⁻²
Tempo de concentração -Kirpich (T _c)	33,26 min
Elevação máxima da sub-bacia (El.máx.)	1.468 m
Elevação mínima da sub-bacia (El.mín.)	1.224 m

Materiais e Métodos

Monitoramento Hidrológico

Uma estação fluvio-pluviométrica para monitoramento hidrológico da sub-bacia do ribeirão Vai e Volta foi instalada na margem esquerda do referido curso d'água, nas coordenadas Lat. UTM 7.588.585,30 m S e Long. 337.678,20 m E.

O monitoramento pluviométrico e fluviográfico foi realizado no período de setembro de 2017 a outubro de 2018 através de um pluviógrafo automático acoplado a um línigrafo, programados para realizarem medições de intensidade de precipitações e níveis d'água, respetivamente, a cada 5 (cinco) minutos.

Para a determinação das vazões associadas aos eventos de precipitação registrados empregou-se a equação de Chézy-Manning (Equação 9), dispondo-se dos níveis d'água, da geometria retangular da seção transversal do canal de monitoramento, do coeficiente de rugosidade para canais de concreto (0,012 s.m^{-1/3}) e da declividade média longitudinal do canal (0,04 m.m⁻¹). Os hidrogramas

experimentais foram construídos a partir da combinação dos eventos de precipitação com as vazões determinadas através da equação de Chézy-Manning.

$$Q = \frac{1}{n} A R_h^{2/3} I_0^{1/2} \quad (9)$$

Em que: Q é a vazão observada ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), n é o coeficiente de rugosidade de Manning para o canal ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1/3}$), A é a área molhada do canal (m^2), R_h é o raio hidráulico (m), definido como a relação entre a área molhada e o perímetro molhado do canal, e I_0 é a declividade do canal (m/m).

Modelagem Hidrológica

Com o intuito de representar a sub-bacia do ribeirão Vai e Volta e seu sistema de drenagem através de um modelo hidrológico foram realizados levantamentos em campo e a utilização de programas computacionais de geoprocessamento para caracterização fisiográfica e dos parâmetros necessários para modelagem hidrológica.

Realizou-se a discretização da sub-bacia do ribeirão Vai e Volta em 5 sub-áreas homogêneas com saída da área de contribuição na seção de monitoramento hidrológico. Definiu-se 3 trechos principais que compõem a macrodrenagem, sendo 2 trechos irregulares de canais naturais revestidos por vegetação esparsa a densa (T1 e T3) e 1 trecho de canalização aberta de concreto com seção transversal de geometria retangular (T2), onde localiza-se a estação fluvi-pluviométrica.

Conforme se observa na Figura 10, a sub-bacia do ribeirão Vai e Volta foi representada no modelo SWMM por um conjunto de 5 sub-áreas conectado à 3 trechos de propagação do escoamento superficial.

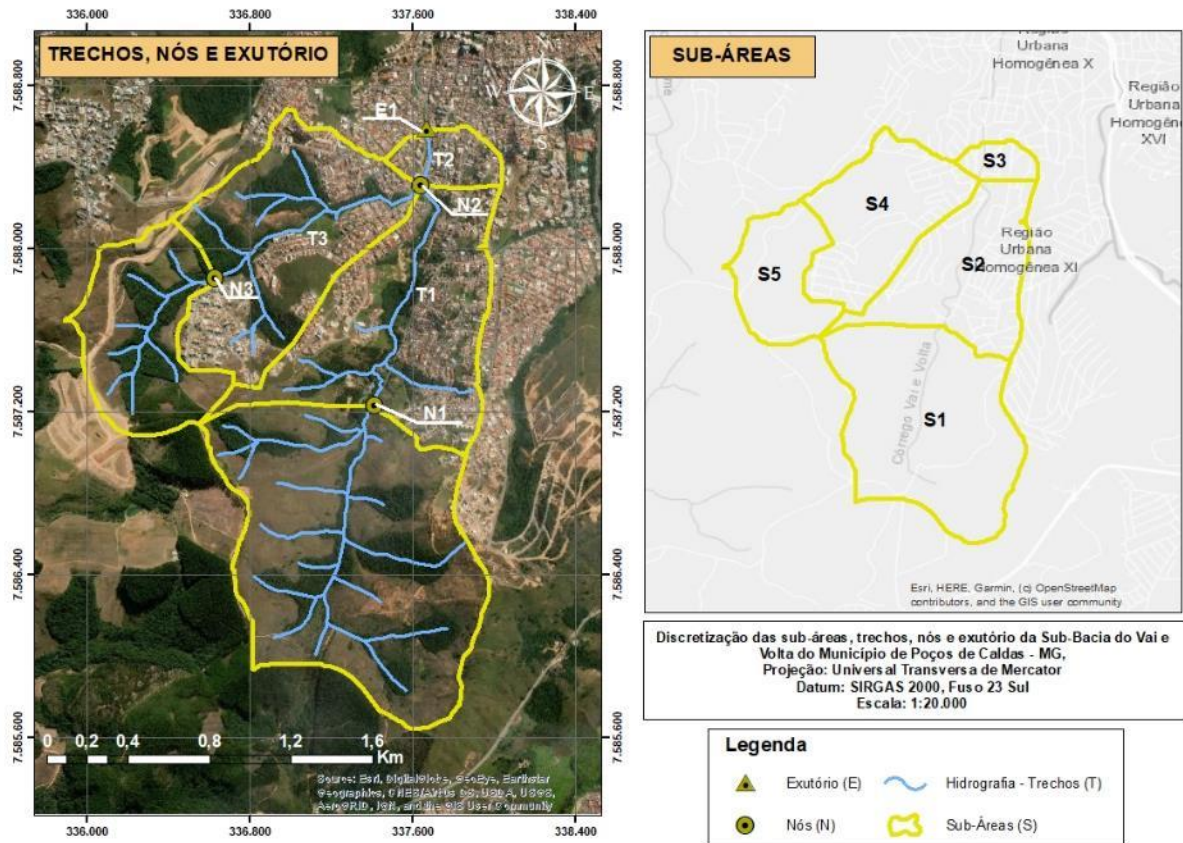


Figura 10 - Discretização da área de estudo em sub-áreas, trechos e nós.

Os parâmetros de entrada das sub-áreas, trechos e nós no modelo SWMM foram determinados através dos levantamentos realizados em campo e com a manipulação e incorporação de mapas cartográficos do IBGE, da imagem de satélite do *software Google Earth* e de arquivos *shapefile* da área de estudo.

Para o cálculo da largura das sub-áreas foi empregado o Método do Retângulo Equivalente (Equações 10 e 11), tendo em vista se tratar de uma estimativa da relação entre a área da sub-área e o valor médio do comprimento máximo do escoamento superficial (LENHS, 2012).

$$W = \frac{k_c \sqrt{A}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{k_c} \right)^2} \right] \quad (10)$$

$$k_c = 0,282 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (11)$$

Em que: W é a largura do retângulo equivalente (m), A é a área da sub-área (m^2), k_c é coeficiente de compacidade (adimensional), definido como a relação entre o perímetro da sub-área e a circunferência de um círculo de área igual a sub-área, P é o perímetro da sub-área (m).

O conhecimento da pedologia da área de estudo permitiu a adoção do Método do Número da Curva (*Curve Number*) do *Soil Conservation Service* – SCS-USDA como modelo de infiltração da água no solo. Este método também foi empregado na determinação da lâmina de água acumulada nas depressões das parcelas permeáveis e impermeáveis das sub-áreas. Os coeficientes de rugosidade relativos às parcelas das sub-áreas permeáveis e impermeáveis foram estabelecidos de acordo com o manual do usuário SWMM (LENHS, 2012). Enquanto os coeficientes de rugosidade para os canais abertos naturais e para o canal de concreto observaram os valores constantes em Porto (2006), uma vez que àqueles descritos no manual do usuário SWMM (LENHS, 2012) estão divergentes da literatura.

Análise de Sensibilidade

Para a construção do modelo da sub-bacia do ribeirão Vai e Volta fez-se necessário o ajuste de parâmetros de entrada das sub-áreas e trechos, com vistas a obtenção de hidrogramas simulados próximos aos hidrogramas determinados experimentalmente.

Desta forma, com o intuito de determinar os parâmetros que mais exercem influência nas vazões simuladas do modelo foi empregada a análise de sensibilidade. Esta consistiu na simulação dos hidrogramas de cheia para o evento de precipitação de 19/11/2017 com a variação de parâmetros de difícil mensuração em campo, a saber: coeficientes de rugosidade relativos à parcelas das sub-áreas permeáveis (n_{perv}) e impermeáveis (n_{imperv}) e coeficiente de rugosidade para os canais abertos naturais (n_n) e de concreto (n_c); bem como àqueles dos quais houve incerteza quanto aos seus valores. Destes: a largura das sub-áreas (W) por se tratar de um parâmetro que o próprio manual do usuário SWMM (LENHS, 2012) recomenda sua calibração; a área impermeável das sub-áreas (AI) levantada através de técnicas de geoprocessamento sem o estudo da conectividade hidráulica dos lotes; e a declividade das sub-áreas (S) obtida a partir da manipulação de mapas topográficos com altimetria de 10 m em 10 m.

Para tanto, admitiu-se um valor inicial para cada parâmetro, sendo realizada a variação em -30% e +30% do valor inicial para os parâmetros largura das sub-áreas (W), área impermeável das sub-áreas (AI), declividade das sub-áreas (S); a variação dos parâmetros coeficientes de rugosidade relativos à parcelas das sub-áreas permeáveis (n_{perv}) e impermeáveis (n_{imperv}) de acordo com os valores mínimo e

máximo destes estabelecidos no manual do usuário SWMM (LENHS, 2012) e para o parâmetro coeficiente de rugosidade para os canais abertos naturais (n_n) e de concreto (n_c), conforme Porto (2006).

Realizou-se no total 12 simulações para a análise de sensibilidade, alterando-se cada um dos seis parâmetros individualmente, considerando os valores máximo e mínimo dos intervalos de variação estabelecidos, e mantendo-se os demais parâmetros fixos nos valores iniciais. Apresentam-se na Tabela 4 os valores iniciais, mínimos e máximos adotados na análise de sensibilidade.

Tabela 4 – Parâmetros da análise de sensibilidade do modelo SWMM.

	Parâmetro	Intervalo de variação dos valores			Unidade de medida	
		Mínimo	Inicial	Máximo		
Sub-áreas	Largura para cada sub-área (W)	-30%	S1	862,01	+30%	m
			S2	450,13		
			S3	282,60		
			S4	551,39		
			S5	411,13		
	Área impermeável para cada sub-área (AI)	-30%	+30%	S1	0,93	%
				S2	60,30	
				S3	91,63	
				S4	46,49	
				S5	0,46	
	Declividade para cada sub-área (S)	-30%	+30%	S1	29,24	%
				S2	31,33	
				S3	25,89	
				S4	28,09	
				S5	22,41	
	Coeficiente de rugosidade de Manning das parcelas impermeáveis (n-imperv)	0,011	0,0175	0,024	$s.m^{-1/3}$	
	Coeficiente de rugosidade de Manning das parcelas permeáveis (n-perv)	0,05	0,425	0,80	$s.m^{-1/3}$	
Trechos	Coeficiente de rugosidade de Manning para o canal aberto de concreto (n_c)	0,012	0,015	0,018	$s.m^{-1/3}$	
	Coeficiente de rugosidade de Manning para os canais abertos naturais (n_n)	0,075	0,1125	0,15	$s.m^{-1/3}$	

As vazões simuladas no modelo SWMM foram avaliadas através do Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE), Equação 12, que consiste em uma análise estatística do ajuste de modelos hidrológicos.

$$NSE_{m\acute{a}x,m\acute{i}n} = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - \overline{Q^{obs}})^2} \right] \quad (12)$$

Em que: $NSE_{m\acute{a}x,m\acute{i}n}$ é o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe para o valor máximo e mínimo do intervalo de variação do parâmetro avaliado, n é o número de observações, Q_i^{obs} é a vazão observada no evento ($m^3.s^{-1}$), Q_i^{sim} é vazão simulada no evento ($m^3.s^{-1}$) e $\overline{Q^{obs}}$ é vazão média observada no evento ($m^3.s^{-1}$).

De posse dos $NSE_{m\acute{a}x,m\acute{i}n}$ para cada parâmetro avaliado, realizou-se a comparação destes com o NSE calculado para os valores iniciais estabelecidos para o modelo ($NSE_{inicial}$), considerado como NSE referência para avaliação da sensibilidade do parâmetro ao modelo.

Quanto maior a variação dos $NSE_{m\acute{a}x,m\acute{i}n}$ comparada ao $NSE_{inicial}$, mais sensível é o parâmetro e maior sua influência sobre os resultados nas simulações. Do contrário, quanto menor a variação, ou seja, mais próxima ao $NSE_{inicial}$, menor a influência do mesmo nos resultados.

Calibração e Validação do Modelo

A calibração do modelo hidrológico da sub-bacia do ribeirão Vai e Volta no SWMM foi realizada através do ajuste manual dos valores dos parâmetros de entrada identificados como mais sensíveis na análise de sensibilidade. Tratou-se, assim, de um processo iterativo de tentativa e erro com vistas a otimização dos parâmetros para obtenção de hidrogramas simulados mais próximos dos hidrogramas elaborados experimentalmente.

Calibrou-se o modelo de forma similar à análise de sensibilidade, para os eventos dos dias 19/11/2017 e 22/11/2017, adotando-se variações de 5% em 5% no intervalo de -30% a +30% sobre os valores iniciais dos parâmetros largura das sub-áreas (W), área impermeável das sub-áreas (AI), declividade das sub-áreas (S), bem como variações regulares de 0,001 no intervalo de 0,011 $s.m^{-1/3}$ a 0,024 $s.m^{-1/3}$ para o parâmetro coeficiente de rugosidade relativo à parcelas das sub-áreas impermeáveis ($n\text{-imperv}$).

O ajuste da calibração foi observado através da sobreposição dos hidrogramas simulados e experimentais para cada evento, bem como por meio do cálculo do

Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE) e dos erros da vazão de pico (E_p) e do volume escoado superficialmente (E_v), Equações 13 e 14, respectivamente.

$$E_p = \frac{Qp_{sim} - Qp_{obs}}{Qp_{obs}} \times 100 \quad (13)$$

Em que: E_p é o erro na vazão de pico (%), Qp_{sim} é a vazão de pico simulada no modelo para o evento ($m^3.s^{-1}$), Qp_{obs} é vazão de pico observada no evento ($m^3.s^{-1}$).

$$E_v = \frac{Ve_{sim} - Ve_{obs}}{Ve_{obs}} \times 100 \quad (14)$$

Em que: E_v é o erro no volume do escoamento superficial (%), Ve_{sim} é o volume escoado superficialmente simulado no modelo para o evento (m^3), Ve_{obs} é volume escoado superficialmente observado no evento (m^3).

Realizou-se a combinação dos melhores ajustes individuais dos parâmetros mais sensíveis de ambos os eventos de precipitação, procedendo-se a nova tentativa com a variação simultânea dos parâmetros e o cálculo do Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE) e dos erros da vazão de pico (E_p) e do volume escoado superficialmente (E_v).

Para avaliar a calibração e a validação do modelo utilizando o Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE) foi adotada a classificação desenvolvida por Moriasi *et al.* (2007) que resume para $NSE \geq 0,75$, desempenho do modelo muito bom; $0,75 > NSE \geq 0,65$, modelo bom; $0,65 > NSE \geq 0,50$, modelo satisfatório; e $0,50 > NSE$, modelo insatisfatório.

Em relação aos erros da vazão de pico (E_p) e do volume escoado superficialmente (E_v), àquelas simulações que apresentaram menores valores de diferença entre as vazões de pico e os volumes do escoamento superficial dos hidrogramas simulados e observados experimentalmente são consideradas mais satisfatórias.

A validação do modelo foi realizada com os eventos dos dias 26/11/2017, 07/12/2017 e 30/12/2017, distintos dos utilizados na calibração, com o objetivo de avaliar a eficiência do processo de calibração e verificar se os valores definidos para os parâmetros mais sensíveis do modelo retratam de maneira adequada o comportamento da bacia em estudo.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram registrados 10 eventos de precipitação através do monitoramento fluvio-pluviométrico na sub-bacia do ribeirão Vai e Volta, dos quais selecionaram-se 5 eventos com as maiores intensidades de precipitação para estudo, a saber: 19/11/2017, 22/11/2017, 26/11/2017, 07/12/2017 e 30/12/2017 (Tabela 5).

Tabela 5 – Eventos de precipitação selecionados neste estudo.

Evento	P_{total} (mm)	T (min.)	I (mm.h⁻¹)	Q_{obs} (m³.s⁻¹)	V_{es} (m³)
19/11/2017	35,0	180	11,66	7,00	28.337,51
22/11/2017	23,2	180	7,73	12,02	32.739,22
26/11/2017	15,4	90	10,27	5,12	10.680,84
07/12/2017	21,2	180	7,06	5,12	11.541,58
30/12/2017	25,4	120	12,70	5,73	15.672,36

Em que: P_{total} é a precipitação total acumulada medida pelo pluviógrafo (mm), T é a duração do evento de precipitação (min.), I é a intensidade média de precipitação do evento (mm.h⁻¹), Q_{obs} é a vazão de pico observada para o evento de precipitação (m³.s⁻¹), e V_{es} é o volume escoado superficialmente para o evento de precipitação (m³).

Para o evento de 19/11/2017 aplicou-se a análise de sensibilidade, sendo obtido NSE_{inicial} de 0,59 para os valores inicialmente adotados no modelo, que representa um modelo satisfatório.

Com a alteração dos parâmetros de entrada dentro dos intervalos de variação estabelecidos para a análise de sensibilidade, observou-se que as maiores amplitudes de variação dos NSE_{máx,mín,,} que resultam em parâmetros mais sensíveis do modelo, ocorreram para os parâmetros área impermeável das sub-áreas (NSE_{mín}: -0,12 e NSE_{máx}: 0,78), coeficiente de rugosidade relativo à parcelas das sub-áreas impermeáveis (NSE_{mín}: 0,42 e NSE_{máx}: 0,68), largura das sub-áreas (NSE_{mín}: 0,50 e NSE_{máx}: 0,69) e declividade das sub-áreas (NSE_{mín}: 0,55 e NSE_{máx}: 0,65). O coeficiente de rugosidade para os canais abertos naturais e de concreto (NSE_{mín}: 0,58 e NSE_{máx}: 0,60) e o coeficiente de rugosidade relativo à parcelas das sub-áreas permeáveis (NSE_{mín}: 0,59 e NSE_{máx}: 0,59) não apresentaram influência nos hidrogramas simulados, conforme se observa na Figura 11.

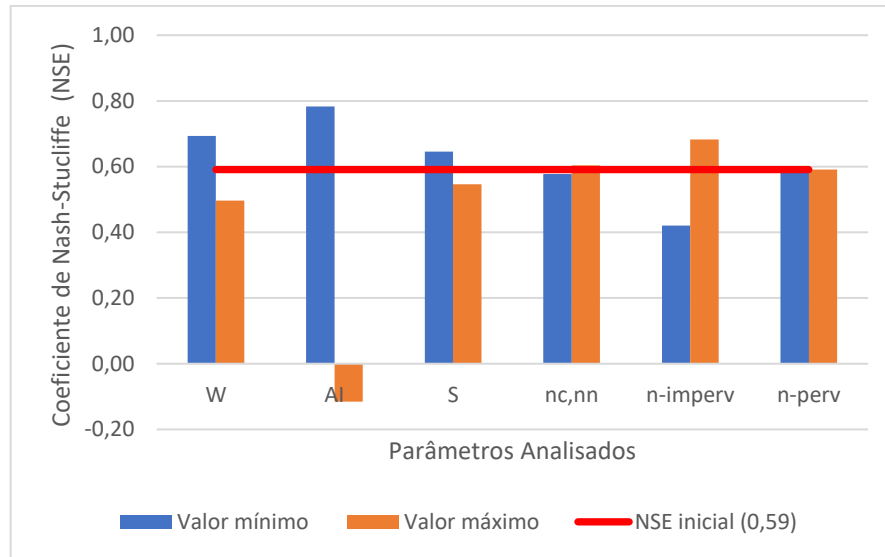


Figura 11 – Análise de sensibilidade do evento 19/11/17.

Os parâmetros largura (W) e declividade (S) das sub-áreas (S), juntamente com o coeficiente de rugosidade da parcela das sub-áreas impermeáveis (n-imperv) relacionam-se à velocidade da água e influenciam diretamente no tempo de concentração da bacia, conseqüentemente no pico de vazão. Já a área impermeável das sub-áreas (AI) está associada ao volume de água gerado na bacia capaz de produzir escoamento superficial.

Faria, Barbassa e Silveira (2014) obtiveram como parâmetros mais sensíveis do modelo da bacia do córrego Barbado a área impermeável das sub-áreas e o coeficiente de Manning para condutos, seguidos pelo coeficiente de rugosidade relativo à parcelas das sub-áreas permeáveis e a largura das sub-áreas, entre outros. Já Rabori, Ghazavi e Reveshty (2017) observaram que os parâmetros que mais exercem influência no modelo da bacia de Zanjan são àqueles relacionadas às parcelas impermeáveis da bacia como o armazenamento das áreas impermeáveis, a área impermeável das sub-áreas e o coeficiente de rugosidade relativo à parcelas das sub-áreas impermeáveis. Conclui-se, portanto, que os parâmetros mais sensíveis do modelo SWMM são diferentes para cada área de estudo tendo em vista que as características físicas, ecológicas e socioeconômicas desenvolvidas na bacia hidrográfica promovem respostas diferentes na drenagem frente à eventos hidrológicos.

Para a calibração do modelo foram realizadas no total 96 simulações para os eventos de precipitação 19/11/2017 e 22/11/2017, resultando em maiores NSE para

os parâmetros individuais com a adoção de -30% do valor inicial da largura das sub-áreas (W), -30% do valor inicial da declividade das sub-áreas (S) e $0,024 \text{ s.m}^{-1/3}$ do coeficiente de rugosidade relativo à parcelas das sub-áreas impermeáveis (n-imperv) para ambos os eventos, excetuando-se o parâmetro área impermeável das sub-áreas (AI) que apresentou NSE mais elevados com a adoção de -25% do valor inicial para o evento 19/11/2017 e +30% do valor inicial para o evento 22/11/2017, conforme se observa na Tabela 6.

Tabela 6 – Calibração individual para os eventos de 19/11/2017 e 22/11/2017 .

Eventos	Parâmetros Obtidos	NSE	E_p (%)	E_v (%)	
19/11/2017	AI (%)	-25%	0,80	4,07	-12,98
	W (m)	-30%	0,69	29,64	14,86
	S (m/m)	-30%	0,65	31,71	15,18
	n-imperv ($\text{s.m}^{-1/3}$)	0,024	0,68	30,17	14,94
22/11/2017	AI (%)	+30%	0,81	16,80	-23,12
	W (m)	-30%	0,74	-11,41	-39,91
	S (m/m)	-30%	0,73	-4,45	-39,67
	n-imperv ($\text{s.m}^{-1/3}$)	0,024	0,74	-9,82	-39,86

A calibração final do modelo consistiu na adoção simultânea dos seguintes valores dos parâmetros: +2,5% da área impermeável das sub-áreas (AI), -30% da largura das sub-áreas (W), -30% da declividade das sub-áreas (S) e $0,024 \text{ s.m}^{-1/3}$ do coeficiente de rugosidade relativo à parcelas das sub-áreas impermeáveis (n-imperv), resultantes da combinação dos melhores ajustes individuais para os eventos 19/11/2017 e 22/11/2017, na simulação dos hidrogramas de cheia e comparação com os hidrogramas observados experimentalmente.

Na Tabela 7 é apresentado o resultado final do processo de calibração do modelo da sub-bacia do ribeirão Vai e Volta. Observa-se NSE de 0,75 e 0,71 para os eventos 19/11/2017 e 22/11/2017, respectivamente, com valor médio de 0,73 representando, de acordo com a classificação de Moriasi *et al.* (2007), um bom desempenho do modelo. Os erros médios entre as vazões de pico simulada e

observada e os volumes escoados superficialmente simulado e observado foram -0,62% e -14,69%.

Tabela 7 – Resultado da etapa de calibração para os eventos de 19/11/2017 e 22/11/2017.

Eventos	Parâmetros Ajustados				NSE	E _p (%)	E _v (%)
	AI (%)	W (m)	S (m/m)	N-imperv (s.m ^{-1/3})			
19/11/2017	+2,5%	-30%	-30%	0,024	0,75	23,45	10,03
22/11/2017					0,71	-24,68	-39,41
Média					0,73	-0,62	-14,69

Faria, Barbassa e Silveira (2014) obtiveram NSE de 0,86 e 0,82 para os eventos de 11/12/2010 e 01/01/2011 durante processo de calibração manual do modelo da bacia do córrego Barbado, enquanto Rabori, Ghazavi e Reveshty (2017) observaram ajustes mais elevados (NSE de 0,96 a 0,99) para eventos distintos na bacia de Zanjan.

Nas Figuras 12 e 13 são apresentados os hidrogramas de cheia simulados e observados experimentalmente para os eventos de precipitação de 19/11/2017 e 22/11/2017 após processo de calibração dos parâmetros mais sensíveis do modelo, corroborando com os resultados expressos da Tabela 7. Nota-se que estes hidrogramas apresentam movimentos semelhantes de ascensão, estabilização e recessão, retratando o comportamento da sub-bacia frente à eventos de precipitação.

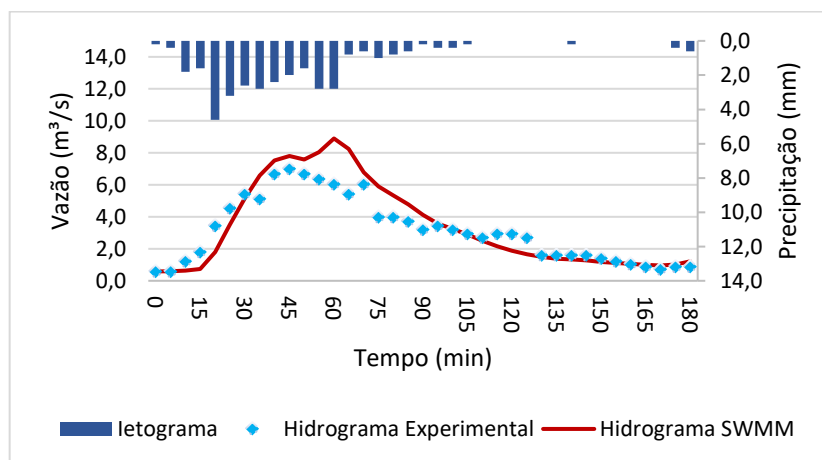


Figura 12 – Hidrogramas do evento 19/11/2017.

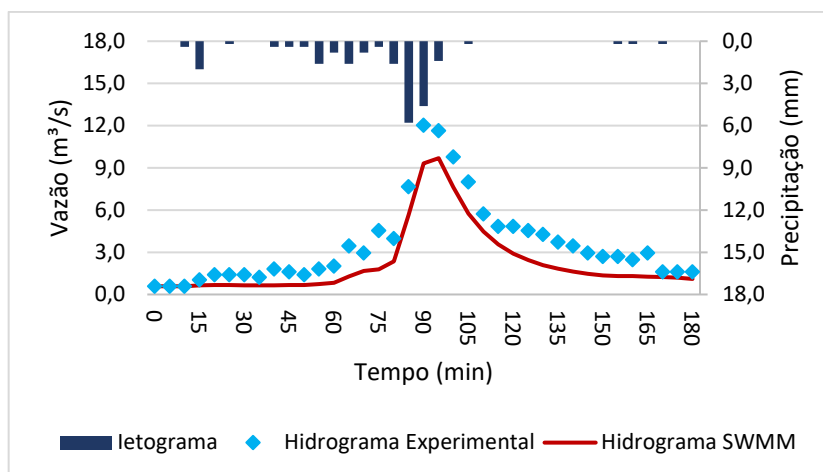


Figura 13 – Hidrogramas do evento 22/11/2017.

A eficiência dos ajustes dos parâmetros mais sensíveis, realizados no processo de calibração, foi avaliada através da validação do modelo para os eventos de precipitação 26/11/2017, 07/12/2017 e 30/12/2017, sendo os resultados desta etapa apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados da validação para os eventos 26/11/2017, 07/12/2017 e 30/12/2017.

Eventos	Parâmetros Ajustados				NSE	E_p (%)	E_v (%)
	AI (%)	W (m)	S (m/m)	N-imperv ($s \cdot m^{-1/3}$)			
26/11/2017					0,65	-21,07	-16,24
07/12/2017	+2,5%	-30%	-30%	0,024	0,89	0,18	-11,03
30/12/2017					0,84	10,78	13,49
	Média				0,79	-3,37	-4,59

No processo de validação do modelo obteve-se NSE de 0,65, 0,89 e 0,84, para os eventos 26/11/2017, 07/12/2017 e 30/12/2017, respectivamente, e NSE médio de 0,79. Esses resultados retratam um desempenho muito bom do modelo construído, conforme Moriasi *et al.* (2007), corroborando também com resultados obtidos por Faria, Barbassa e Silveira (2014), cuja validação apresentou NSE de 0,74 e 0,73, e constataram resultados semelhantes em outros estudos. Rabori, Ghazavi e Reveshty (2017) realizaram a validação do modelo para um único evento e obtiveram NSE de 0,99 na bacia de Zanjan.

Os erros médios entre as vazões de pico simulada e observada e os volumes escoados superficialmente simulado e observado este estudo foram -3,37% e -4,59%, correspondendo a erros baixos em resposta à eventos de precipitação com comportamentos distintos.

Os hidrogramas simulados e observados experimentalmente para os eventos de 26/11/2017, 07/12/2017 e 30/12/2017 são apresentados nas Figuras 14, 15 e 16 e demonstram a relação entre estes hidrogramas com comportamentos de ascensão, pico e recessão semelhantes, retratando de maneira adequada o comportamento da bacia em estudo. Em especial para o evento de 07/12/2017, confirmando o elevado ajuste do modelo hidrológico avaliado no processo de validação através do Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE).

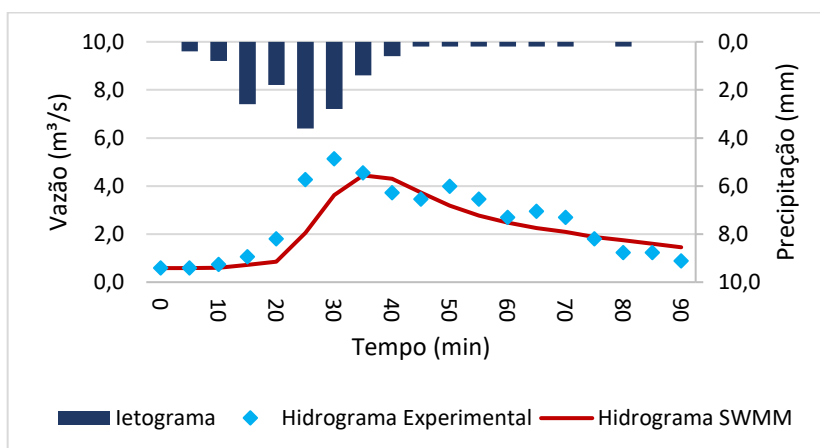


Figura 14 – Hidrogramas do evento 26/11/2017.

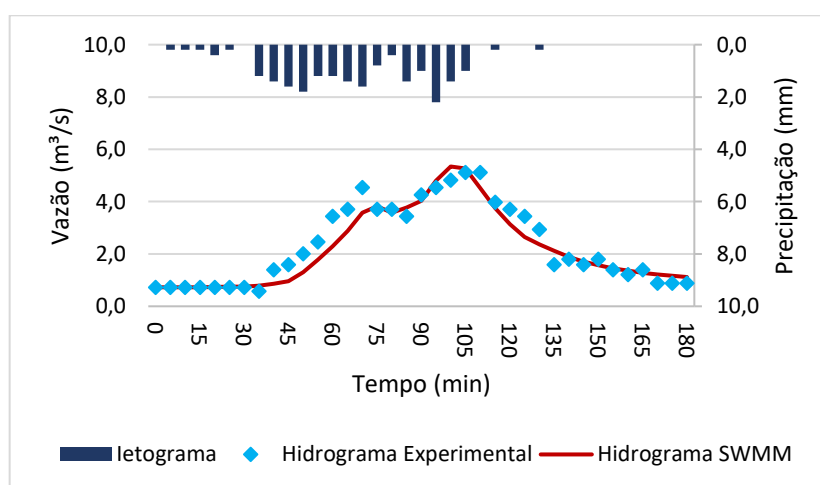


Figura 15 – Hidrogramas do evento 07/12/2017.

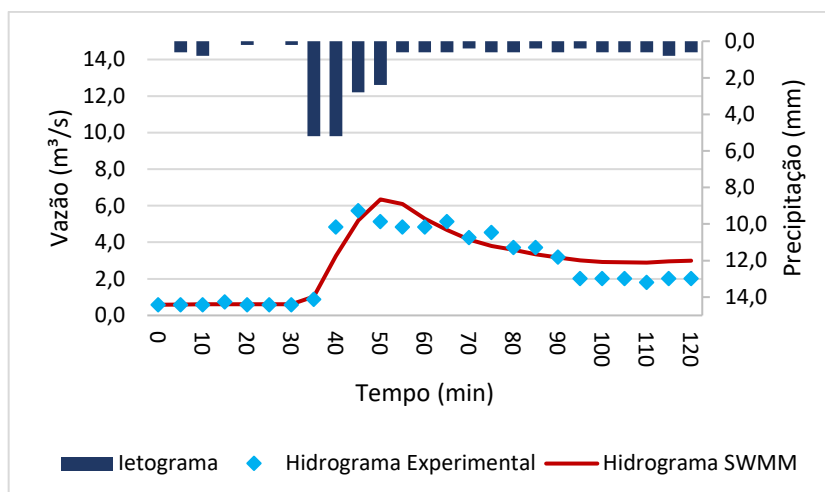


Figura 16 – Hidrogramas do evento 30/12/2017.

O modelo SWMM apresentou desempenho satisfatório com a adoção dos seguintes conjuntos de valores calibrados para as sub-áreas: S1 com 0,95% de área impermeável, 603,41 m de largura e 20,47% de declividade; S2 com 61,81% de área impermeável, 315,09 m de largura e 21,93% de declividade; S3 com 93,92% de área impermeável, 197,82 m de largura e 18,12% de declividade; S4 com 47,65% de área impermeável, 385,97 m de largura e 19,66% de declividade; e S5 com 0,47% de área impermeável, 287,79 m de largura e 15,69% de declividade. O coeficiente de rugosidade relativo à parcelas das sub-áreas impermeáveis calibrado adotado foi $0,024 \text{ s.m}^{-1/3}$.

Esses valores de parâmetros calibrados adotados na construção dos hidrogramas de cheia resultaram em NSE de 0,65, 0,89 e 0,84, para os eventos 26/11/2017, 07/12/2017 e 30/12/2017, respectivamente, validando o modelo SWMM para a sub-bacia do ribeirão Vai e Volta.

CONCLUSÃO

O presente trabalho teve por objetivo apresentar a modelagem hidrológica da sub-bacia do ribeirão Vai e Volta, em Poços de Caldas – MG como ferramenta aplicável ao planejamento de políticas públicas com vistas à gestão das águas urbanas e a minimização de impactos socioambientais na área em estudo. Para tanto, realizou-se a caracterização fisiográfica da bacia e do uso e ocupação do solo através de levantamentos em campo e emprego de técnicas de geoprocessamento, bem como o monitoramento hidrológico na seção em estudo.

Observou-se que apesar da sub-bacia do ribeirão Vai e Volta apresentar menor tendência à enchentes, caso ocorram, estas poderão ser de média propensão agravadas com a expansão urbana nas encostas da bacia, bem como com obras de intervenções no leito do curso d'água (canalizações, retificações, entre outros).

Constatou-se na análise de sensibilidade que os parâmetros do modelo que exercem maior influência nos hidrogramas simulados são a área impermeável das sub-áreas (AI), o coeficiente de rugosidade relativo à parcelas das sub-áreas impermeáveis (n -imperv), a largura das sub-áreas (W) e, em menor grau, a declividade das sub-áreas (S), estando em consonância com outros trabalhos apresentados. O coeficiente de rugosidade para os canais abertos (n) e o coeficiente de rugosidade relativo à parcelas das sub-áreas permeáveis (n -perv) não exerceram influência no modelo.

Os resultados obtidos nos processos de calibração e validação do modelo, tomando-se como referência as vazões simuladas e observadas experimentalmente, resultaram em NSE médio de 0,73 e 0,79, respectivamente, e erros na vazão de pico e volume escoado inferiores a 15%, demonstrando um desempenho muito bom do modelo na representação do comportamento da bacia em estudo, conforme Moriasi *et al.* (2006).

Desta forma, conclui-se que a modelagem hidrológica apresentada é satisfatória na avaliação dos processos hidrológicos que ocorrem na sub-bacia do ribeirão Vai e Volta, sendo uma importante ferramenta na tomada de decisões sobre o manejo das águas pluviais. Recomenda-se a continuidade do monitoramento hidrológico, a realização de um estudo de conectividade hidráulica de lotes que retrate o fluxo das águas entre áreas permeáveis e impermeáveis, a análise da influência do aumento da discretização espacial da bacia no desempenho do modelo e a implantação de técnicas compensatórias para amortecimento de cheias na sub-bacia do ribeirão Vai e Volta no município de Poços de Caldas-MG.

AGRADECIMENTOS

A FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (APQ-01982-14) e a CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-Brasil (88881.030412/2013-01) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- ALBERTI, H.L.C.; *Caracterização fisiográfica e avaliação hidrológica na bacia do Ribeirão das Antas, Planalto de Poços de Caldas, MG*. 91 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – IGE - UNICAMP, Campinas, 2008.
- BELING, F. A.; *Análise do desempenho do modelo SWMM5 acoplado ao calibrador PEST na bacia do Arroio Cancela/RS*. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UFSM, Santa Maria, 2013.
- CÂMARA MUNICIPAL DE POÇOS DE CALDAS. *Diagnóstico 2006*. Disponível em: < <https://www.pocosdecaldas.mg.leg.br/legislacao/plano-diretor-1>>. Acesso em: 13 ago. 2019.
- 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*. 225 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – EESC - USP, São Carlos, 2009.
- ELLIOTT, A.H.; TROWSDALE, S.A. A review of models for low impact urban stormwater drainage. *Environmental Modelling & Software*, v. 22, 2007, p. 394-405.
- FARIA, N. de O.; BARBASSA, A. P.; SILVEIRA, A. Monitoramento, modelagem e simulação de cenários para a bacia do córrego Barbado – Cuiabá/MT. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 1, 2014, p. 165-176.
- FORMIGA, K. T. M.; CARVALHO, M.; SILVA, K. A.; SOARES, A.K. Calibração do Storm Water Management Model (SWMM) utilizando algoritmos evolucionários multiobjetivo. *Engenharia Sanitária Ambiental*, v. 21, n. 4, 2016, p. 697-707.
- GUAN, M.; SILLANPÄÄ, N.; KOIVUSALO, H. Modelling and assessment of hydrological changes in a developing urban catchment. *Hydrological Processes*, v. 29, 2015, p. 2880-2894.
- IDE-SISEMA (INFRAESTRUTURA DE DADOS ESPACIAIS DO SISTEMA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS). Disponível em: < <http://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/> >. Acesso em: 11 fev. 2019.
- LENHS – Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (Tradução). *Manual do Usuário EPA SWMM 5.0.: modelo de gestão de drenagem urbana*. Ed. UFPB, 2012, 279 p.
- MELLER, A.; PAIVA, E.M.C.D. Simulação hidrodinâmica 1D de inundações em sistemas de drenagem urbana. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. v. 12, n.2, 2007, p. 81-97.

- MÉNDEZ-MORALEZ, M. Calibración y validación del modelo hidrológico SWMM em cuencas hidrográficas de alta pendiente em Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, v. 26, n. 2, 2013, p. 21-32.
- MORAES, F. T.; *Zoneamento geoambiental do planalto de Poços de Caldas, MG/SP a partir de análise fisiográfica e pedoestratigráfica*. 173 f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – IGCE, UNESP, Rio Claro, 2007.
- MORAES, F. T.; JIMÉNEZ-RUEDA, J. R. Fisiografia da região do planalto de Poços de Caldas, MG/SP. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 38, n. 1, 2008, p. 196-208.
- MORIASI, D.N.; ARNALD, J.G.; VAN LIEW, M.W.; BINGNER, R.L.; HARMEL, T.L.; VEITH, T.L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineering*, v. 50, n. 3, 2007, p. 885-900.
- PALLA, A.; GNECCO, I. Hydrologic modeling of low impact development systems at urban catchment scale. *Journal of Hydrology*, v. 528, 2015, p. 361-368.
- PORTO, R. M.; *Hidráulica básica*. 4 ed. São Carlos. Ed. EESC – USP, 2006, 540 p.
- RABORI, A.M.; REZA, G.; REVESHTY, M.A. Sensitivity analysis of SWMM model parameters for urban runoff estimation in semi-arid area. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, v. 10, n. 5, 2017, p. 284-294.
- ROSA, D. J.; CLAUSEN, J. C.; DIETZ, M. E. Calibration and verification of SWMM for low impact development. *Journal of the American Water Resources Association*, v.51, n. 3, 2015, p. 746-757.
- SARDINHA, D.S.; PENA, Y.T.L.; TIEZZI, R.O.; ALMEIDA, M.C.J. Base de dados de desastres naturais no município de Poços de Caldas/MG: ferramenta para o planejamento e a gestão territorial. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 8, n. 3, 2016, p. 318-331.
- SILVA, L.A.; SILVA, A.M.; COELHO, G.; PINTO, L.C. Soil map units of Minas Gerais State from the perspective of Hydrologic Groups. *Revista Ambiente & Água*, v. 13, n.1, 2018, p. 1980-1993.
- SIQUEIRA, R. C.; MOURA, P. M.; SILVA, T. F. G. Methodology for the construction of an urban hazard chart. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 24, e. 23, 2019, p. 1-16.
- TUCCI, C. E. M. *Gestão das águas pluviais urbanas*. Ministério das Cidades/Global Water Partnership. Brasília. UNESCO, 2005, 269 p.

TUCCI, C. E. M. *Inundações urbanas*. 1 ed. Porto Alegre. Ed. ABRH-RHAMA, 2007, 393 p.

ZOPPOU, C. Review of urban storm water models. *Environmental Modelling & Software*, v. 16, 2001, p. 195-231.

4 CONCLUSÃO

A ocupação desordenada das planícies de inundação e encostas de bacias hidrográficas em meio urbano ocasiona alterações no ciclo hidrológico através da redução dos processos de infiltração de água no solo e evapotranspiração e aumento do escoamento superficial, resultando no agravamento de enchentes e inundações e na deterioração da qualidade das águas urbanas.

Neste contexto aplicou-se o modelo hidrológico de transformação chuva-vazão SWMM na representação do comportamento da sub-bacia do ribeirão Vai e Volta, no município de Poços de Caldas - MG, que sofre com episódios de alagamentos e inundações na região central, como ferramenta na tomada de decisões em planejamento da drenagem urbana.

Para a construção do modelo SWMM fez-se necessária a caracterização fisiográfica da bacia e do uso e ocupação do solo através do emprego de técnicas de geoprocessamento e levantamentos de campo, e o monitoramento hidrológico na seção em estudo. As principais dificuldades encontradas nestas etapas foram: a obtenção de dados topográficos de maior precisão, o detalhamento do sistema urbano de drenagem de águas pluviais, o acesso a pontos da bacia localizados em bairros que apresentam risco a segurança da equipe e o registro de apenas 10 eventos de precipitação válidos devido a perda do linígrafo e a problemas no *software* de registro de dados fluvio-pluviométricos.

Com vistas a modelagem hidrológica satisfatória da bacia, resultando em hidrogramas simulados próximos aos hidrogramas determinados experimentalmente, realizou-se o ajuste dos parâmetros de entrada das sub-áreas e trechos discretizados, que representam a bacia no modelo, com o emprego da análise de sensibilidade e dos processos de calibração manual e validação do SWMM, sendo possível concluir:

- a) Os parâmetros que exercem maior influência no modelo são a área impermeável das sub-áreas (AI), o coeficiente de rugosidade relativo à parcelas das sub-áreas impermeáveis (n -imperv), a largura das sub-áreas (W) e, em menor grau, a declividade das sub-áreas (S). O coeficiente de rugosidade para os canais abertos (n) e o coeficiente de rugosidade relativo à parcelas das sub-áreas permeáveis (n -perv) não exercem influência no modelo;

- b) A sensibilidade dos parâmetros do modelo SWMM estão relacionados as características físicas, ecológicas e socioeconômicas de uma bacia hidrográfica, diferindo, portanto, de uma bacia para outra;
- c) O modelo proposto apresentou um desempenho muito bom na representação do comportamento hidrológico da bacia. Obteve-se NSE médio de 0,73 e 0,79 nos processos de calibração e validação, respectivamente, e erros na vazão de pico e volume escoado inferiores a 15%.

Assim, os resultados deste trabalho sinalizam que o modelo SWMM é satisfatório para representar o comportamento hidrológico da sub-bacia do ribeirão Vai e Volta, podendo ser empregado na compreensão dos efeitos da urbanização e na proposição de medidas compensatórias para amortecimento de cheias, constituindo em uma importante ferramenta na tomada de decisões sobre o manejo das águas pluviais urbanas.

Para trabalhos futuros recomenda-se a continuidade do monitoramento hidrológico e a realização de um estudo de conectividade hidráulica de lotes que retrate o fluxo das águas entre áreas permeáveis e impermeáveis. Sugere-se, ainda, o desenvolvimento de estudos sobre a evolução e os efeitos da urbanização nos hidrogramas de cheia, a avaliação da influência de diferentes níveis de discretização espacial da bacia no desempenho do modelo e a implantação de técnicas compensatórias para atenuação dos picos de cheia na sub-bacia do ribeirão Vai e Volta no município de Poços de Caldas-MG.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS (ANA). **Planejamento, manejo e gestão de bacias**. 2012. Disponível em: <https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/handle/ana/82>. Acesso em: 07 out. 2018.

ATLAS DIGITAL DAS ÁGUAS DE MINAS. **Exemplos aplicativos: predição da vazão máxima em pequenas bacias na região do semiárido mineiro**. 2011. Disponível em: http://www.atlasdasaguas.ufv.br/exemplos_aplicativos/predicao_de_vazao_em_pequenas_bacias_hidrograficas_nas_regioes_norte_e_nordeste_do_estado_de_minas_gerais.html. Acesso em: 12 dez. 2018.

BELING, F. A. **Análise do desempenho do modelo SWMM5 acoplado ao calibrador PEST na bacia do Arroio Cancela/RS**. 2013. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2013.

BRASIL. Lei nº 9.433 de 08 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989 dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 9 jan. 1997. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm. Acesso em: 23 ago. 2018.

CALIJURI, M. C.; CUNHA, D. G. F. **Engenharia ambiental: conceitos, tecnologia e gestão**. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda., 2013. 789 p.

CHISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Blucher, 1999. 236 p.

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. 225 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2009.

ELLIOTT, A.; TROWSDALE, S. A review of models for low impact urban stormwater drainage. **Environmental Modelling & Software**, v. 22, n. 3, p. 394-405, mar. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.12.005>

FARIA, N. de O.; BARBASSA, A. P.; SILVEIRA, A. Monitoramento, modelagem e simulação de cenários para a bacia do córrego Barbado – Cuiabá/MT. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 1, p. 165-176, jan/mar. 2014.

FORMIGA, K. T. M.; CARVALHO, M.; SILVA, K. A.; SOARES, A. K. Calibração do Storm Water Management Model (SWMM) utilizando algoritmos evolucionários multiobjetivo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 4, p. 697-707, dez. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522016131862>

GIRÃO, L. F. O.; SIMÕES, N. E. C.; MARQUES, J. A. A. S.; LEITÃO, J. P. C.; PINA, R. D. Modelação hidráulica e de qualidade da água dos sistemas de drenagem em meios urbanos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 2, p. 351-360, 19 jan. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522016161318>

GUAN, M.; SILLANPÄÄ, N.; KOIVUSALO, H. Modelling and assessment of hydrological changes in a developing urban catchment. **Hydrological Processes**, v. 29, n. 13, p. 2880-2894, 6 jan. 2015. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.10410>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Panorama da cidade de Poços de Caldas - MG**. 2010. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/pocos-de-caldas/panorama>. Acesso em: 15 mar. 2019.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E HIDRÁULICA EM SANEAMENTO (LENHS). **Manual do Usuário EPA SWMM 5.0 (Tradução)**. UFPB: 2012.

LIMA, J. P.; MARQUES, A. S.; SOUZA, J.; SIMÕES, N. E. **Hidrologia urbana – Sistemas de drenagem de águas pluviais**. Lisboa: ERSAR – Universidade de Coimbra, 2013. 147 p.

MELLO, C. R.; SILVA, A. M. da. **Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas**. Lavras: Editora UFLA, 2013. 455 p.

MÉNDEZ-MORALEZ, M. Calibración y validación del modelo hidrológico SWMM em cuencas hidrográficas de alta pendiente em Costa Rica. **Tecnología en Marcha**, v.26, n. 2, p. 20-32, abr/jun. 2013.

PALLA, A.; GNECCO, I. Hydrologic modeling of Low Impact Development systems at urban catchment scale. **Journal Of Hydrology**, p. 361-368. jun. 2015.

PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; KOETZ, M. **Caderno didático de estudo de vazão em cursos d'água**. Viçosa: UFV-DEA/GPRH, 2006. 151 p.

RABORI, A.M.; REZA, G.; REVESHTY, M.A. Sensitivity analysis of SWMM model parameters for urban runoff estimation in semi-arid area. **Journal of Biodiversity and Environmental Sciences**, v. 10, n. 5, p. 284-294, 30 mai. 2017.

RIGHETTO, A.M. **Hidrologia e recursos hídricos**. São Carlos: EESC – USP, 1998. 840 p.

ROSA, D. J.; CLAUSEN, J. C.; DIETZ, M. E. Calibration and verification of SWMM for low impact development. **Journal Of The American Water Resources Association**, v. 51, n. 3, p. 746-757, jun. 2015.

SCHUELER, T.R. **Controlling Urban Runoff: A Practical Manual for Planning and Design Urban BMPs**. Washington: Metropolitan Council of Government. 1987.

SHINMA, T. A. **Calibração multiobjetivo do SWMM aplicada à transformação chuva-vazão**. 2011. 112 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2011.

SILVA, D. F. **Análise da influência de microrreservatórios em um loteamento e seus efeitos em escala de bacia**. 2016. 146 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2016.

SILVA, P. O. da. **Análise de técnicas compensatórias de drenagem urbana para atenuação de inundações em uma sub-bacia do rio Jiquiá no Recife**. 2010. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2010.

SIQUEIRA, R. C.; MOURA, P. M.; SILVA, T. F. G. **Methodology for the construction of an urban hazard chart**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 24, n. 23, p. 1-16, 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.241920180125>

SOUZA, F. P.; COSTA, M. E. L.; KOIDE, S. Hydrological modelling and evaluation of detention ponds to improve urban drainage system and water quality. **Water**, v. 11, n. 8, p. 1-17, 26 jul. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w11081547>

TUCCI, C. E. M. **Águas Urbanas. Estudos Avançados**. v. 22. p. 97 - 112, 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40142008000200007>. Acesso em: 10 nov. 2019.

TUCCI, C. E. M. **Gestão das águas pluviais urbanas**. Ministério das Cidades/Global Water Partnership – Brasília: UNESCO, 2005. 269 p.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3. ed. Porto Alegre: ABRH, 2004. 943 p.

TUCCI, C. E. M. **Inundações urbanas**. Porto Alegre: ABRH-RHAMA, 2007. 393 p.

ZANANDREA, F.; SILVEIRA, A. L. L. Effects of LID implementation on hydrological processes in an urban catchment under consolidation in Brazil. **Journal of Environmental Engineering**, v. 144, n. 9, p. 04018072-1-04018072-9, set. 2018. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)ee.1943-7870.0001417](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)ee.1943-7870.0001417)

ZOPPOU, C. Review of urban storm water models. **Environmental Modelling & Software**, v. 16, p. 195-231, 2001.

APÊNDICES

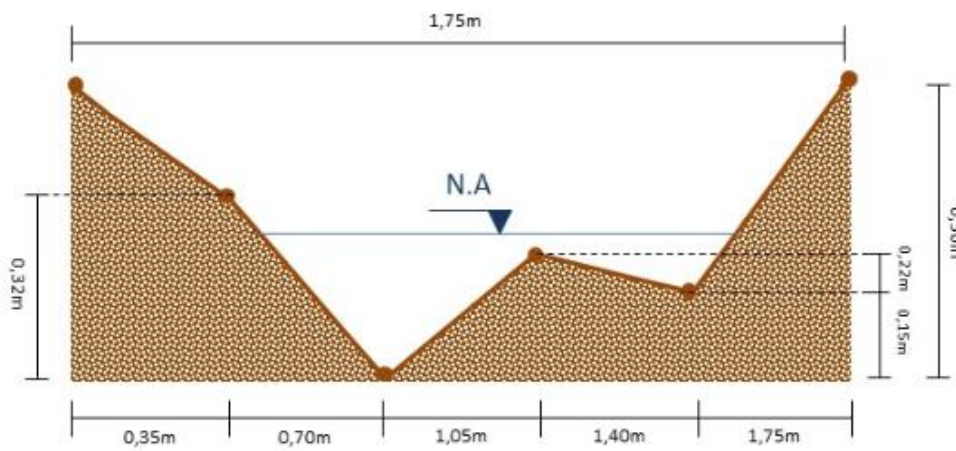
APÊNDICE A – Seções transversais dos trechos modelados no SWMM

Figura 1 – Canal natural (T1)



Fonte: Autora.

Figura 2 – Seção transversal do canal natural (T1)



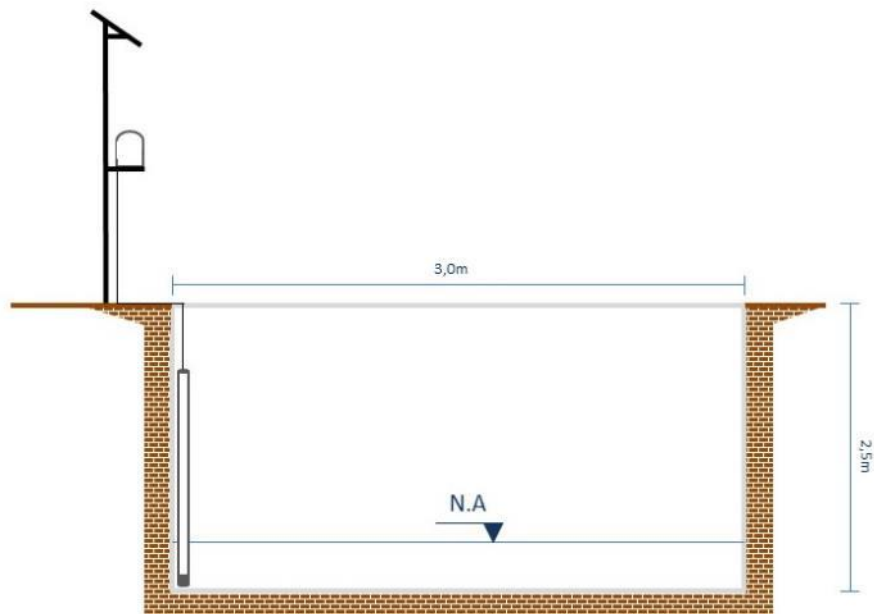
Fonte: Autora.

Figura 3 – Canal de concreto (T2)



Fonte: Autora.

Figura 4 – Seção transversal do canal de concreto (T2)



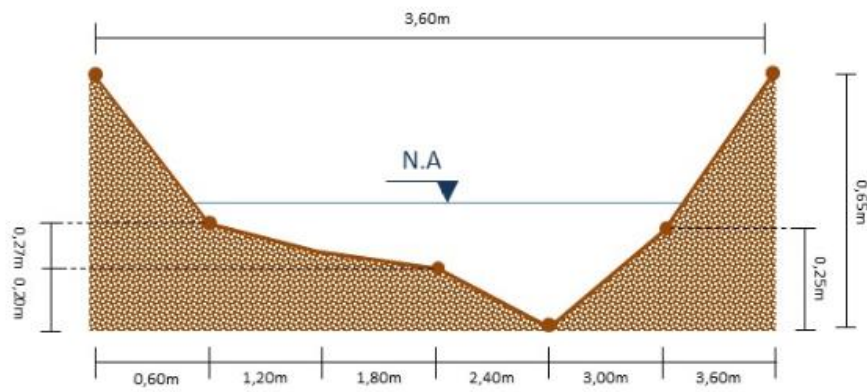
Fonte: Autora.

Figura 5 – Canal natural (T3)



Fonte: Autora.

Figura 6 – Seção transversal do canal natural (T3)



Fonte: Autora.

APÊNDICE B – Monitoramento hidrológico dos eventos selecionados

Tabela 1 – Monitoramento fluvio-pluviométrico dos eventos selecionados

Evento	19/11/2017		22/11/2017		26/11/2017		07/12/2017		30/12/2017	
	Tempo (min.)	Prec. (mm)	Nível d'água (m)	Prec. (mm)	Nível d'água (m)	Prec. (mm)	Nível d'água (m)	Prec. (mm)	Nível d'água (m)	Prec. (mm)
0	0,0	0,07	0,0	0,07	0,0	0,07	0,0	0,08	0,0	0,07
5	0,4	0,07	0,0	0,07	0,4	0,07	0,2	0,08	0,6	0,07
10	1,8	0,11	0,4	0,07	0,8	0,08	0,2	0,08	0,8	0,07
15	1,6	0,14	2,0	0,1	2,6	0,10	0,2	0,08	0,0	0,08
20	4,6	0,21	0,0	0,12	1,8	0,14	0,4	0,08	0,2	0,07
25	3,2	0,25	0,2	0,12	3,6	0,24	0,2	0,08	0,0	0,07
30	2,6	0,28	0,0	0,12	2,8	0,27	0,0	0,08	0,2	0,07
35	2,8	0,27	0,0	0,11	1,4	0,25	1,2	0,07	5,2	0,09
40	2,4	0,32	0,4	0,14	0,6	0,22	1,4	0,12	5,2	0,26
45	2,0	0,33	0,4	0,13	0,2	0,21	1,6	0,13	2,8	0,29
50	1,6	0,32	0,4	0,12	0,2	0,23	1,8	0,15	2,4	0,27
55	2,8	0,31	1,6	0,14	0,2	0,21	1,2	0,17	0,6	0,26
60	2,8	0,30	0,8	0,15	0,2	0,18	1,2	0,21	0,6	0,26
65	0,8	0,28	1,6	0,21	0,2	0,19	1,4	0,22	0,6	0,27
70	0,6	0,30	0,8	0,19	0,2	0,18	1,6	0,25	0,4	0,24
75	1,0	0,23	0,4	0,25	0,0	0,14	0,8	0,22	0,6	0,25
80	0,8	0,23	1,6	0,23	0,2	0,11	0,4	0,22	0,6	0,22
85	0,6	0,22	5,8	0,35	0,0	0,11	1,4	0,21	0,4	0,22
90	0,2	0,20	4,6	0,47	0,0	0,09	1,0	0,24	0,6	0,20
95	0,4	0,21	1,4	0,46	-	-	2,2	0,25	0,4	0,15
100	0,4	0,20	0,0	0,41	-	-	1,4	0,26	0,6	0,15
105	0,2	0,19	0,2	0,36	-	-	1,0	0,27	0,6	0,15
110	0,0	0,18	0,0	0,29	-	-	0,0	0,27	0,6	0,14
115	0,0	0,19	0,0	0,26	-	-	0,2	0,23	0,8	0,15
120	0,0	0,19	0,0	0,26	-	-	0,0	0,22	0,6	0,15
125	0,0	0,18	0,0	0,25	-	-	0,0	0,21	-	-
130	0,0	0,13	0,0	0,24	-	-	0,2	0,19	-	-
135	0,0	0,13	0,0	0,22	-	-	0,0	0,13	-	-
140	0,2	0,13	0,0	0,21	-	-	0,0	0,14	-	-
145	0,0	0,13	0,0	0,19	-	-	0,0	0,13	-	-
150	0,0	0,12	0,0	0,18	-	-	0,0	0,14	-	-
155	0,0	0,11	0,2	0,18	-	-	0,0	0,12	-	-
160	0,0	0,10	0,2	0,17	-	-	0,0	0,11	-	-
165	0,0	0,09	0,0	0,19	-	-	0,0	0,12	-	-
170	0,2	0,08	0,2	0,13	-	-	0,0	0,09	-	-
175	0,4	0,09	0,0	0,13	-	-	0,0	0,09	-	-
180	0,6	0,09	0,0	0,07	-	-	0,0	0,09	-	-

Fonte: Autora

APÊNDICE C – Vazões associadas aos eventos selecionados

Tabela 2 – Vazões associadas aos eventos de precipitação selecionados

Evento	19/11/2017		22/11/2017		26/11/2017		07/12/2017		30/12/2017	
Tempo (min.)	Prec. (mm)	Vazão (m ³ .s ⁻¹)	Prec. (mm)	Vazão (m ³ .s ⁻¹)	Prec. (mm)	Vazão (m ³ .s ⁻¹)	Prec. (mm)	Vazão (m ³ .s ⁻¹)	Prec. (mm)	Vazão (m ³ .s ⁻¹)
0	0,0	0,58	0,0	0,58	0,0	0,58	0,0	0,73	0,0	0,58
5	0,4	0,58	0,0	0,58	0,4	0,58	0,2	0,73	0,6	0,58
10	1,8	1,22	0,4	0,58	0,8	0,73	0,2	0,73	0,8	0,58
15	1,6	1,80	2,0	1,05	2,6	1,05	0,2	0,73	0,0	0,73
20	4,6	3,45	0,0	1,41	1,8	1,80	0,4	0,73	0,2	0,58
25	3,2	4,54	0,2	1,41	3,6	4,26	0,2	0,73	0,0	0,58
30	2,6	5,42	0,0	1,41	2,8	5,12	0,0	0,73	0,2	0,58
35	2,8	5,12	0,0	1,22	1,4	4,54	1,2	0,58	5,2	0,88
40	2,4	6,68	0,4	1,80	0,6	3,71	1,4	1,41	5,2	4,83
45	2,0	7,00	0,4	1,60	0,2	3,45	1,6	1,60	2,8	5,73
50	1,6	6,68	0,4	1,41	0,2	3,98	1,8	2,01	2,4	5,12
55	2,8	6,35	1,6	1,80	0,2	3,45	1,2	2,46	0,6	4,83
60	2,8	6,04	0,8	2,01	0,2	2,70	1,2	3,45	0,6	4,83
65	0,8	5,42	1,6	3,45	0,2	2,94	1,4	3,71	0,6	5,12
70	0,6	6,04	0,8	2,94	0,2	2,70	1,6	4,54	0,4	4,26
75	1,0	3,98	0,4	4,54	0,0	1,80	0,8	3,71	0,6	4,54
80	0,8	3,98	1,6	3,98	0,2	1,22	0,4	3,71	0,6	3,71
85	0,6	3,71	5,8	7,67	0,0	1,22	1,4	3,45	0,4	3,71
90	0,2	3,19	4,6	12,02	0,0	0,88	1,0	4,26	0,6	3,19
95	0,4	3,45	1,4	11,64	-	-	2,2	4,54	0,4	2,01
100	0,4	3,19	0,0	9,77	-	-	1,4	4,83	0,6	2,01
105	0,2	2,94	0,2	8,01	-	-	1,0	5,12	0,6	2,01
110	0,0	2,70	0,0	5,73	-	-	0,0	5,12	0,6	1,80
115	0,0	2,94	0,0	4,83	-	-	0,2	3,98	0,8	2,01
120	0,0	2,94	0,0	4,83	-	-	0,0	3,71	0,6	2,01
125	0,0	2,70	0,0	4,54	-	-	0,0	3,45	-	-
130	0,0	1,60	0,0	4,26	-	-	0,2	2,94	-	-
135	0,0	1,60	0,0	3,71	-	-	0,0	1,60	-	-
140	0,2	1,60	0,0	3,45	-	-	0,0	1,80	-	-
145	0,0	1,60	0,0	2,94	-	-	0,0	1,60	-	-
150	0,0	1,41	0,0	2,70	-	-	0,0	1,80	-	-
155	0,0	1,22	0,2	2,70	-	-	0,0	1,41	-	-
160	0,0	1,05	0,2	2,46	-	-	0,0	1,22	-	-
165	0,0	0,88	0,0	2,94	-	-	0,0	1,41	-	-
170	0,2	0,73	0,2	1,60	-	-	0,0	0,88	-	-
175	0,4	0,88	0,0	1,60	-	-	0,0	0,88	-	-
180	0,6	0,88	0,0	1,60	-	-	0,0	0,88	-	-

Fonte: Autora.

APÊNDICE D – Vazões simuladas na análise de sensibilidade

Tabela 3 – Vazões simuladas na análise de sensibilidade do evento 19/11/2017

Parâmetro	Largura		Área impermeável		Declividade	
	-30%	+30%	-30%	+30%	-30%	+30%
Varição	Vazão (m ³ .s ⁻¹)	Vazão (m ³ .s ⁻¹)	Vazão (m ³ .s ⁻¹)	Vazão (m ³ .s ⁻¹)	Vazão (m ³ .s ⁻¹)	Vazão (m ³ .s ⁻¹)
0	0,58	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59
5	0,59	0,60	0,59	0,59	0,59	0,59
10	0,66	0,72	0,68	0,70	0,68	0,71
15	0,78	0,89	0,81	0,86	0,81	0,87
20	2,15	3,04	2,48	2,70	2,38	2,83
25	4,22	5,91	4,54	5,48	4,67	5,53
30	6,02	7,87	5,88	7,85	6,56	7,48
35	7,43	9,01	6,63	9,62	7,93	8,72
40	8,23	9,39	6,82	10,61	8,62	9,20
45	8,27	8,91	6,43	10,58	8,54	8,84
50	7,80	8,01	5,75	9,90	7,93	8,01
55	8,21	8,44	6,11	10,38	8,30	8,41
60	9,08	9,50	6,86	11,55	9,22	9,42
65	8,18	8,14	5,80	10,29	8,20	8,12
70	6,48	5,94	4,23	8,03	6,34	6,04
75	5,52	4,95	3,56	6,80	5,37	5,07
80	4,98	4,48	3,25	6,11	4,83	4,58
85	4,42	3,96	2,88	5,40	4,28	4,04
90	3,73	3,24	2,37	4,52	3,58	3,32
95	3,20	2,73	2,03	3,85	3,06	2,82
100	2,90	2,50	1,89	3,47	2,77	2,57
105	2,59	2,23	1,70	3,08	2,48	2,29
110	2,21	1,84	1,43	2,59	2,09	1,90
115	1,86	1,51	1,20	2,15	1,75	1,57
120	1,61	1,30	1,05	1,83	1,51	1,35
125	1,43	1,14	0,95	1,60	1,34	1,19
130	1,29	1,03	0,88	1,43	1,21	1,08
135	1,18	0,95	0,83	1,29	1,10	0,99
140	1,16	0,97	0,84	1,27	1,10	1,00
145	1,12	0,95	0,83	1,22	1,06	0,98
150	1,04	0,89	0,79	1,13	0,99	0,92
155	0,98	0,84	0,76	1,06	0,93	0,87
160	0,93	0,80	0,73	1,00	0,89	0,83
165	0,89	0,77	0,71	0,95	0,85	0,79
170	0,86	0,75	0,69	0,91	0,82	0,77
175	0,94	0,86	0,78	1,01	0,91	0,88
180	1,16	1,19	1,02	1,32	1,16	1,18

Fonte: Autora.

Tabela 3 – Vazões simuladas na análise de sensibilidade do evento 19/11/2017 (continuação)

Parâmetro	Rugosidade dos trechos		Rugosidade das áreas permeáveis		Rugosidade das áreas impermeáveis	
	0,075 s.m ^{-1/2} (naturais) 0,012 s.m ^{-1/2} (concreto)	0,15 s.m ^{-1/2} (naturais) 0,018 s.m ^{-1/2} (concreto)	0,05 s.m ^{-1/2}	0,08 s.m ^{-1/2}	0,011 s.m ^{-1/2}	0,024 s.m ^{-1/2}
Tempo (min.)	Vazão (m ³ .s ⁻¹)	Vazão (m ³ .s ⁻¹)	Vazão (m ³ .s ⁻¹)	Vazão (m ³ .s ⁻¹)	Vazão (m ³ .s ⁻¹)	Vazão (m ³ .s ⁻¹)
0	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,58
5	0,59	0,59	0,59	0,59	0,60	0,59
10	0,70	0,69	0,69	0,69	0,75	0,67
15	0,85	0,84	0,84	0,84	0,93	0,79
20	2,76	2,52	2,63	2,63	3,39	2,20
25	5,37	4,96	5,15	5,15	6,52	4,32
30	7,27	6,92	7,09	7,09	8,43	6,15
35	8,54	8,27	8,40	8,40	9,41	7,55
40	9,04	8,90	8,98	8,98	9,61	8,32
45	8,72	8,72	8,73	8,73	8,98	8,33
50	7,94	8,02	8,00	8,00	7,98	7,83
55	8,45	8,35	8,37	8,37	8,45	8,24
60	9,44	9,28	9,34	9,34	9,58	9,11
65	8,04	8,22	8,17	8,17	8,06	8,19
70	6,02	6,31	6,18	6,18	5,72	6,45
75	5,13	5,28	5,20	5,20	4,76	5,49
80	4,64	4,73	4,68	4,68	4,33	4,94
85	4,09	4,18	4,14	4,14	3,82	4,39
90	3,36	3,49	3,43	3,43	3,10	3,70
95	2,87	2,96	2,92	2,91	2,60	3,17
100	2,63	2,68	2,66	2,65	2,40	2,87
105	2,33	2,39	2,37	2,36	2,14	2,57
110	1,94	2,01	1,98	1,98	1,75	2,18
115	1,62	1,67	1,64	1,64	1,42	1,84
120	1,40	1,43	1,41	1,41	1,21	1,59
125	1,24	1,26	1,25	1,25	1,07	1,41
130	1,12	1,14	1,13	1,13	0,97	1,27
135	1,03	1,04	1,04	1,04	0,90	1,16
140	1,04	1,04	1,04	1,04	0,93	1,15
145	1,00	1,01	1,01	1,01	0,91	1,10
150	0,94	0,95	0,94	0,94	0,86	1,03
155	0,89	0,90	0,89	0,89	0,81	0,97
160	0,85	0,85	0,85	0,85	0,78	0,92
165	0,81	0,82	0,82	0,82	0,75	0,88
170	0,78	0,79	0,79	0,79	0,72	0,85
175	0,89	0,88	0,89	0,89	0,86	0,93
180	1,18	1,15	1,18	1,17	1,22	1,16

Fonte: Autora.

APÊNDICE E – Vazões simuladas resultantes da calibração

Tabela 4 – Vazões simuladas na calibração para os eventos 19/11/2017 e 22/11/2017

Evento	19/11/2017		22/11/2017	
	Tempo (min.)	Precipitação (mm)	Vazão (m ³ .s ⁻¹)	Precipitação (mm)
0	0,0	0,58	0,0	0,58
5	0,4	0,59	0,0	0,58
10	1,8	0,63	0,4	0,59
15	1,6	0,72	2,0	0,63
20	4,6	1,61	0,0	0,65
25	3,2	3,17	0,2	0,65
30	2,6	4,65	0,0	0,65
35	2,8	6,04	0,0	0,64
40	2,4	7,01	0,4	0,65
45	2,0	7,40	0,4	0,66
50	1,6	7,31	0,4	0,67
55	2,8	7,80	1,6	0,73
60	2,8	8,64	0,8	0,81
65	0,8	8,10	1,6	1,20
70	0,6	6,81	0,8	1,54
75	1,0	5,98	0,4	1,66
80	0,8	5,45	1,6	2,18
85	0,6	4,91	5,8	5,13
90	0,2	4,26	4,6	8,51
95	0,4	3,73	1,4	9,06
100	0,4	3,39	0,0	7,37
105	0,2	3,05	0,2	5,72
110	0,0	2,65	0,0	4,56
115	0,0	2,29	0,0	3,69
120	0,0	2,01	0,0	3,06
125	0,0	1,79	0,0	2,59
130	0,0	1,62	0,0	2,24
135	0,0	1,48	0,0	1,97
140	0,2	1,42	0,0	1,76
145	0,0	1,35	0,0	1,59
150	0,0	1,26	0,0	1,46
155	0,0	1,18	0,2	1,41
160	0,0	1,12	0,2	1,40
165	0,0	1,06	0,0	1,33
170	0,2	1,02	0,2	1,30
175	0,4	1,07	0,0	1,25
180	0,6	1,24	0,0	1,17

Fonte: Autora.

APÊNDICE F – Vazões simuladas resultantes da validação

Tabela 5 – Vazões simuladas na validação para os eventos 26/11/2017, 07/12/2017 e 30/12/2017

Evento	26/11/2017		07/12/2017		30/12/2017	
	Precipitação (mm)	Vazão (m ³ .s ⁻¹)	Precipitação (mm)	Vazão (m ³ .s ⁻¹)	Precipitação (mm)	Vazão (m ³ .s ⁻¹)
0	0,0	0,58	0,0	0,73	0,0	0,58
5	0,4	0,59	0,2	0,73	0,6	0,59
10	0,8	0,60	0,2	0,73	0,8	0,60
15	2,6	0,70	0,2	0,73	0,0	0,61
20	1,8	0,82	0,4	0,74	0,2	0,62
25	3,6	1,85	0,2	0,75	0,0	0,62
30	2,8	3,26	0,0	0,75	0,2	0,62
35	1,4	4,04	1,2	0,78	5,2	1,04
40	0,6	4,00	1,4	0,84	5,2	3,26
45	0,2	3,55	1,6	0,93	2,8	5,21
50	0,2	3,08	1,8	1,23	2,4	6,35
55	0,2	2,74	1,2	1,65	0,6	6,09
60	0,2	2,47	1,2	2,12	0,6	5,29
65	0,2	2,27	1,4	2,66	0,6	4,68
70	0,2	2,11	1,6	3,31	0,4	4,16
75	0,0	1,91	0,8	3,57	0,6	3,80
80	0,2	1,78	0,4	3,41	0,6	3,58
85	0,0	1,65	1,4	3,61	0,4	3,34
90	0,0	1,50	1,0	3,88	0,6	3,18
95	-	-	2,2	4,59	0,4	3,02
100	-	-	1,4	5,13	0,6	2,93
105	-	-	1,0	5,11	0,6	2,90
110	-	-	0,0	4,47	0,6	2,89
115	-	-	0,2	3,77	0,8	2,96
120	-	-	0,0	3,21	0,6	2,99
125	-	-	0,0	2,74	-	-
130	-	-	0,2	2,46	-	-
135	-	-	0,0	2,22	-	-
140	-	-	0,0	1,99	-	-
145	-	-	0,0	1,80	-	-
150	-	-	0,0	1,66	-	-
155	-	-	0,0	1,54	-	-
160	-	-	0,0	1,44	-	-
165	-	-	0,0	1,35	-	-
170	-	-	0,0	1,28	-	-
175	-	-	0,0	1,23	-	-
180	-	-	0,0	1,17	-	-

Fonte: Autora.