

Calibração do modelo hidrológico SWMM para a bacia do ribeirão vai e volta – Poços de Caldas, Minas Gerais

Calibration of SWMM's hydrological model for the watershed vai e volta stream – Poços de Caldas, Minas Gerais

Alexandre Silveira^{1*} , Allana Abreu Cavalcanti¹ , Frederico Carlos Martins de Menezes Filho² ,
Matheus Franco Severino¹ 

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 a ocorrência de enchentes e inundações em bacias urbanas. Nesse contexto, atualmente, modelos hidrológicos vêm sendo empregados no desenvolvimento de políticas públicas de gestão das águas urbanas, com vistas à drenagem urbana sustentável. O presente trabalho teve como objetivo usar um modelo hidrológico para a bacia do ribeirão Vai e Volta, localizada no município de Poços de Caldas, Minas Gerais, 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 do coeficiente de eficiência 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: modelagem hidrológica; vazão de pico; drenagem urbana.

ABSTRACT

The 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 floods 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 aimed to use a hydrological model for the watershed of the Vai e Volta stream, located in the city of Poços de Caldas, Minas Gerais, to simulate the flood hydrograph in an urban open 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 rainfall 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: hydrologic modelling; peak flow; urban drainage.

INTRODUÇÃO

Com o intuito de promover a gestão sustentável das águas urbanas por meio 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; 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, variáveis da qualidade da água modeladas, disponibilidade/acessibilidade

¹Universidade Federal de Alfenas – Poços de Caldas (MG), Brasil.

²Universidade Federal de Viçosa – Rio Paranaíba (MG), Brasil.

*Autor correspondente: alesilveira72@gmail.com

Conflitos de interesse: os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Financiamento: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), processo APQ-01982-14, e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-Brasil (CAPES), processo 88881.030412/2013-01.

Recebido: 24/08/2020 - **Aceito:** 04/02/2021 - **Reg. ABES:** 20200300

do modelo e características adicionais. Elliott e Trowsdale (2007) revisaram dez modelos de simulação quanto à implantação de medidas estruturais de drenagem urbana sustentável (*Low Impact Development* — LIDs, *Sustainable Urban Drainage Systems* — SUDs e *Best Management Practices* — BMPs) na transformação de chuva-vazão. Collodel (2009) comparou cinco modelos hidrológicos quanto as suas potencialidades em simulações aplicadas à drenagem urbana, e concluiu pela maior abrangência e flexibilização do modelo SWMM.

Nesse contexto, o *Storm Water Management Model* (SWMM), desenvolvido pela *Environmental Protection Agency* (EPA), 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 por meio da geração de hidrogramas (ZOPPOU, 2001; ELLIOTT; TROWSDALE, 2007; COLLODEL, 2009; LENHS, 2012; FORMIGA et al., 2016).

Segundo Tucci (2005), Beling (2013), Formiga et al. (2016) e Rabori et al. (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 por meio 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 obtidos pelo referido autor apresentaram eficiência média na calibração do modelo entre 0,85 e 0,80, enquanto na validação os valores foram de 0,87 e 0,77, para as bacias dos rios Toyogres e Zopilote, respectivamente, com o emprego do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE). Os erros na vazão e no tempo de pico não ultrapassaram 15%.

Faria et al. (2014) realizaram a calibração manual do modelo SWMM para a bacia do córrego Barbado, Mato Grosso, com o intuito de simular diferentes cenários de impermeabilização da bacia. Obtiveram como resultados do processo de calibração e validação do modelo NSE de 0,84 e 0,74, respectivamente. Os erros na vazão de pico se apresentaram abaixo de 2%.

Guan et al. (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 eficiência média do NSE na calibração do modelo de 0,88 e na validação de 0,92. Concluíram com os estudos que o emprego de pavimento permeável e reservatório de água de chuva reduziu o escoamento superficial próximo ao nível de pré-urbanização.

Rosa et al. (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 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 a calibração e 0,94 e 0,88 para a validação da bacia tradicional. Concluíram que a calibração dos parâmetros do modelo é necessária para a 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 eficiência na calibração e na validação obtida pelo NSE superior a 0,80, enquanto os erros médios da vazão de pico e do volume escoado apresentaram-se abaixo de 5%.

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

Rabori et al. (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 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 et al. (2019) realizaram a calibração manual do modelo SWMM para a bacia do córrego Cachoeirinha, em Belo Horizonte, Minas Gerais, visando à construção de um gráfico de risco de inundação em bacias urbanas. Os resultados do modelo mostraram NSE de 0,72 na calibração e de 0,70 na validação, concluindo, assim, um desempenho satisfatório do modelo, ainda que este não tenha representado bem os eventos de precipitação mais intensa que produziram alertas de emergência e extravasamento do canal.

Mediante o exposto, este trabalho teve como objetivo calibrar o SWMM para a bacia do ribeirão Vai e Volta, localizada no município de Poços de Caldas, Minas Gerais.

METODOLOGIA

Área de estudo

O presente trabalho foi realizado na bacia do ribeirão Vai e Volta, uma bacia urbana do município de Poços de Caldas, Minas Gerais, cujo vale encontra-se densamente ocupado e suas encostas em franca expansão urbana, agravando o quadro de inundações na região central do município, de acordo com o *Diagnóstico 2006* do município de Poços de Caldas (CÂMARA MUNICIPAL DE POÇOS DE CALDAS, 2018).

A bacia possui área total de 3,96 km² e 15,33 km de rede de drenagem constituída do curso d'água principal ribeirão Vai e Volta e seus tributários, apresentando trechos de canais naturais e um trecho canalizado, onde está instalada a estação fluvio-pluviométrica para monitoramento hidrológico, utilizada no estudo e considerada como exutório da bacia (Figura 1).

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 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 subvulcânicas (tinguaítos), além dos tipos litológicos: sienitos de granulação média, fonolitos, rochas piroclástica, laujaurito

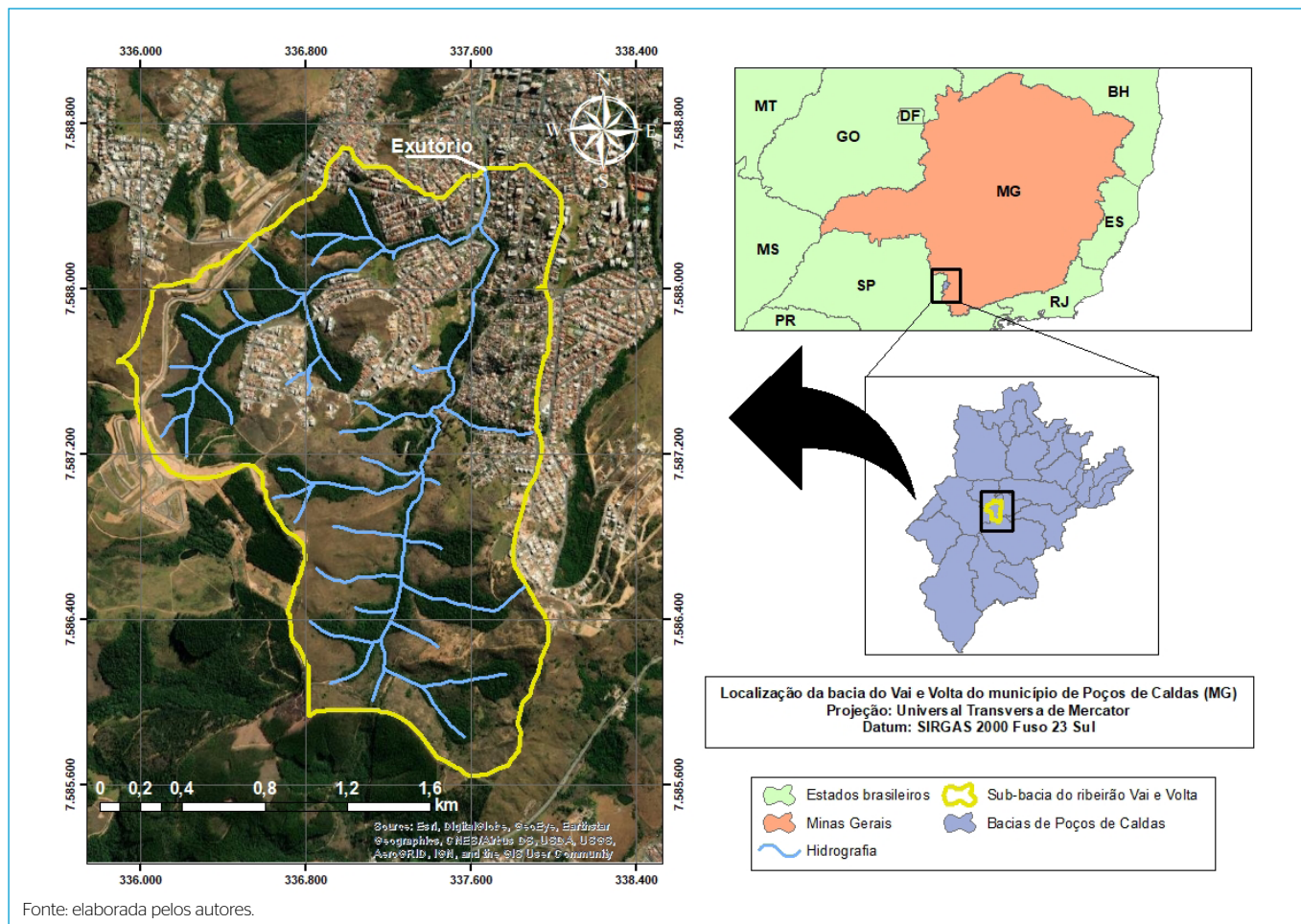


Figura 1 - Localização da bacia do ribeirão Vai e Volta.

e chibinito (ALBERTI, 2008; MORAES *et al.*, 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 à erosão (MORAES, 2007; ALBERTI, 2008). Segundo Silva *et al.* (2018), esse 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 a Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE-SISEMA, 2019), a 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 bacia. Corroborando com essas informações, realizou-se o levantamento do uso e ocupação do solo da área de estudo, que é composta de campos de altitude (40,93%), área urbana (27,48%), FES (26,38%), solo exposto (2,42%), plantio de eucalipto (1,76%) e áreas verdes urbanas (1,03%).

As características fisiográficas da bacia do ribeirão Vai e Volta, obtidas por meio de técnicas de geoprocessamento e índices hidrológicos, são apresentadas na Tabela 1.

MATERIAIS E MÉTODOS

Monitoramento hidrológico

Uma estação fluvio-pluviométrica (Hidromech® PCD-CP 057/15) para monitoramento hidrológico da bacia do ribeirão Vai e Volta foi instalada na margem direita do referido curso d'água, nas coordenadas UTM 337678,20 m E e 7.588.585,30 m N. A estação é composta de um pluviógrafo e um sensor de nível instalado no fundo do canal dentro de um tubo de 2" de PVC perfurado. A estação é alimentada por um painel solar e a coleta de dados é feita manualmente. A Figura 2 apresenta detalhes da estação utilizada.

O monitoramento pluviométrico e fluviográfico foi realizado no período de setembro de 2017 a outubro de 2018 por meio de um pluviógrafo automático acoplado a um linígrafo, programados para realizarem medições de intensidade de precipitações e níveis d'água, respectivamente, a cada cinco minutos.

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

Tabela 1 - Características físicas da bacia do ribeirão Vai e Volta.

Parâmetro	Valores
Área de drenagem (A)	3,96 km ²
Perímetro (P)	9,43 km
Declividade média da bacia (S _b)	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
Coefficiente 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 (El _{max})	1.468 m
Elevação mínima (El _{min})	1.224 m

eventos de precipitação com as vazões determinadas por meio da equação de Chézy-Manning.

$$Q = \frac{1}{n} A R_h^{2/3} I_0^{1/2} \tag{1}$$

Em que:

Q = vazão observada (m³.s⁻¹);

n = coeficiente de rugosidade de Manning para o canal (s.m^{-1/3});

A = área molhada do canal (m²);

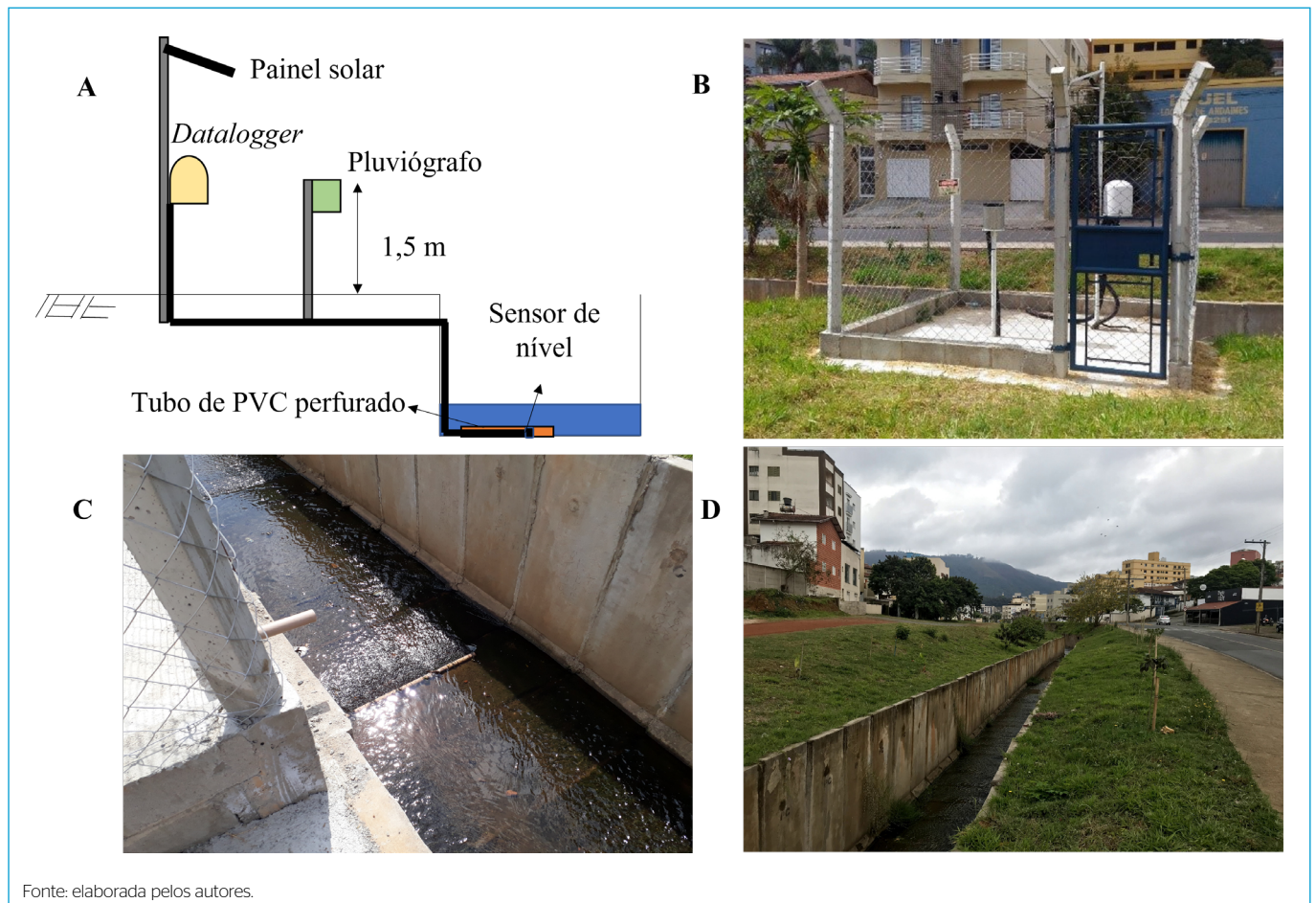
R_h = raio hidráulico (m), definido como a relação entre a área molhada e o perímetro molhado do canal;

I₀ = declividade do canal (m/m).

Modelagem hidrológica

Com o intuito de representar a bacia do ribeirão Vai e Volta e seu sistema de drenagem por meio de um modelo hidrológico, foram realizados levantamentos em campo e utilizados programas computacionais de geoprocessamento para caracterização fisiográfica e obtenção dos parâmetros necessários para modelagem hidrológica.

Realizou-se a discretização da bacia do ribeirão Vai e Volta em cinco subáreas homogêneas com o exutório da bacia representado na seção de monitoramento



Fonte: elaborada pelos autores.

Figura 2 - (A) Esquema de instalação; (B) vista da estação; (C) vista do sensor de nível no fundo do canal; (D) vista do trecho retilíneo do canal a montante da estação.

hidrológico. Definiram-se três trechos principais que compõem a macrodrenagem, sendo dois irregulares de canais naturais revestidos por vegetação esparsa a densa (T1 e T3) e um de canalização aberta em concreto com seção transversal de geometria retangular (T2), onde localiza-se a estação fluvio-pluviométrica.

Conforme se observa na Figura 3, a bacia do ribeirão Vai e Volta foi representada no modelo SWMM por um conjunto de cinco áreas conectada a três trechos de propagação do escoamento superficial.

Os parâmetros de entrada das subáreas, dos trechos e dos nós no modelo SWMM foram determinados por meio dos levantamentos realizados em campo e com a manipulação e incorporação de mapas cartográficos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), da imagem de satélite do *software* Google Earth e de arquivos *shapefile* da área de estudo.

Para o cálculo da largura das subáreas foi empregado o Método do Retângulo Equivalente (Equações 2 e 3), tendo em vista se tratar de uma estimativa da relação entre a área da subárea e o valor médio do comprimento máximo do escoamento superficial (LENHS, 2012).

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

$$k_c = 0,282 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (3)$$

Em que:

W = largura do retângulo equivalente (m);

A = área da subárea (m²);

K_c = coeficiente de compacidade (adimensional), definido como a relação entre o perímetro da subárea e a circunferência de um círculo de área igual à subárea;

P = perímetro da subárea (m).

O conhecimento da pedologia da área de estudo permitiu a adoção do Método da Curva Número (CN) do SCS-USDA como modelo de infiltração da água no solo. Esse método também foi empregado na determinação da lâmina de água acumulada nas depressões das parcelas permeáveis e impermeáveis das subáreas.

Os valores de CN utilizados para cada uso e ocupação do solo foram baseados em Lenhs (2012), considerando-se condições de umidade antecedente II e o grupo hidrológico C. Para a determinação do valor de CN para cada subárea, calculou-se a média ponderada dos respectivos CNs em função dos usos dos solos presentes, tomando-se como peso suas áreas respectivas.

Os valores utilizados de CN para cada uso do solo e obtidos para cada subárea são apresentados na Tabela 2.

Os coeficientes de rugosidade relativos às parcelas das subáreas permeáveis e impermeáveis foram estabelecidos de acordo com o manual do usuário

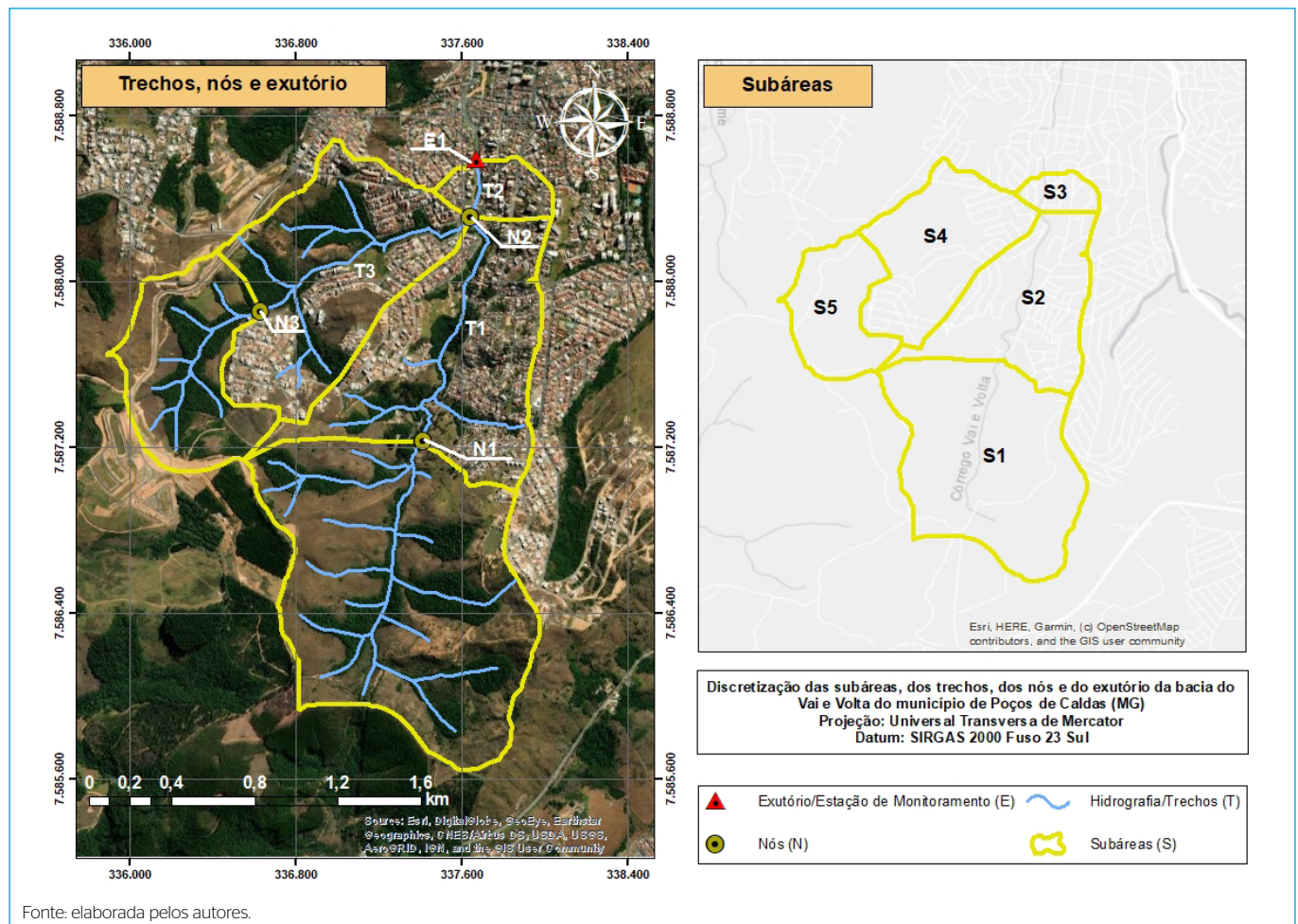


Figura 3 - Discretização da bacia do ribeirão Vai e Volta.

Tabela 2 – Valores de Curva Número para cada uso do solo e para cada subárea.

Uso e ocupação do solo	CN	Subárea	CN
Campo de altitude	71		
Eucalipto	88	S1	70,9
Floresta Estacional Semidecidual	70	S2	82,5
Áreas verdes urbanas	79	S3	88,8
Solo exposto	87	S4	79,8
Área urbana	90	S5	75,3

CN: Curva Número.

SWMM (LENHS, 2012). Já os coeficientes de rugosidade para os canais abertos naturais e para o canal de concreto foram obtidos consoante aos valores tabelados em Porto (2006), uma vez que aqueles descritos no manual do usuário SWMM (LENHS, 2012) estão divergentes da literatura.

Análise de sensibilidade

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

Dessa forma, com o intuito de determinar os parâmetros que mais exercem influência nas vazões simuladas do modelo, foi empregada a análise de sensibilidade, que consistiu na simulação dos hidrogramas de cheia para o evento de precipitação de 19 de novembro de 2017. Considerou-se para a análise de sensibilidade a variação de parâmetros de difícil mensuração em campo, a saber: coeficientes de rugosidade relativos às parcelas das subáreas 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 subáreas (W), por se tratar de um parâmetro que o próprio manual do usuário SWMM (LENHS, 2012) recomenda sua calibração; a área impermeável das subáreas (AI), levantada por meio de técnicas de geoprocessamento sem o estudo da conectividade hidráulica dos lotes; e a declividade das subáreas (S), obtida a partir da manipulação de mapas topográficos com altimetria de 10 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 W, AI, S, n_{perv} e n_{imperv} — de acordo com os valores mínimo e máximo destes estabelecidos no manual do usuário SWMM (LENHS, 2012) — e n_n e n_c , conforme Porto (2006).

Realizaram-se, no total, 12 simulações para a análise de sensibilidade, alterando-se cada um dos seis parâmetros individualmente, considerando-se os valores máximo e mínimo dos intervalos de variação estabelecidos e mantendo-se os demais parâmetros fixos nos valores iniciais. Na Tabela 3 são apresentados os valores iniciais, mínimos e máximos adotados na análise de sensibilidade.

As vazões simuladas no modelo SWMM foram avaliadas por meio do NSE (Equação 4), que consiste em uma análise estatística do ajuste de modelos hidrológicos.

$$NSE_{\text{máx,mín}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{obs})^2} \tag{4}$$

Em que:

$NSE_{\text{máx,mín}}$ = coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe para os valores máximo e mínimo do intervalo de variação do parâmetro avaliado;

n = número de observações;

Q_i^{obs} = vazão observada no evento ($m^3 \cdot s^{-1}$);

Q_i^{sim} = vazão simulada no evento ($m^3 \cdot s^{-1}$);

$\overline{Q^{obs}}$ = vazão média observada no evento ($m^3 \cdot s^{-1}$).

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

Quanto maior a variação dos $NSE_{\text{máx,mín}}$ 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 dele nos resultados.

Calibração e validação do modelo

A calibração do modelo hidrológico da bacia do ribeirão Vai e Volta no SWMM foi realizada por meio 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 à otimização dos parâmetros para obtenção de hidrogramas simulados mais próximos dos hidrogramas elaborados experimentalmente.

Para os eventos dos dias 19 de novembro de 2017 e 22 de novembro de 2017, calibrou-se o modelo de forma similar à análise de sensibilidade, adotando-se variações de 5 em 5% no intervalo de -30 a +30% sobre os valores iniciais dos parâmetros mais sensíveis: W, AI e S, bem como variações regulares de 0,001 no intervalo de 0,011 $s \cdot m^{-1/3}$ a 0,024 $s \cdot m^{-1/3}$ para o parâmetro n_{imperv} .

O ajuste da calibração foi observado por meio da sobreposição dos hidrogramas simulados e experimentais para cada evento, bem como por meio do cálculo do NSE e dos erros da vazão de pico (E_p) e do volume escoado superficialmente (E_v), Equações 5 e 6, respectivamente.

$$E_p = \frac{QP_{sim} - QP_{obs}}{QP_{obs}} \times 100 \tag{5}$$

Em que:

E_p = erro na vazão de pico (%);

QP_{sim} = vazão de pico simulada no modelo para o evento ($m^3 \cdot s^{-1}$);

QP_{obs} = vazão de pico observada no evento ($m^3 \cdot s^{-1}$).

$$E_v = \frac{Ve_{sim} - Ve_{obs}}{Ve_{obs}} \times 100 \tag{6}$$

Em que:

E_v = erro no volume do escoamento superficial (%);

Ve_{sim} = volume escoado superficialmente simulado no modelo para o evento (m^3);

Ve_{obs} = 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 NSE do E_p e do E_v .

Tabela 3 - Parâmetros da análise de sensibilidade do modelo *Storm Water Management Model*.

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

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

Em relação ao Ep e ao Ev, as 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 de novembro de 2017, 07 de dezembro de 2017 e 30 de dezembro de 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 DISCUSSÃO

Neste trabalho, foram registrados dez eventos de precipitação por meio do monitoramento fluvio-pluviométrico na bacia do ribeirão Vai e Volta, dos quais foram selecionados cinco eventos com as maiores intensidades de precipitação para estudo, a saber: 19 de novembro de 2017, 22 de novembro de 2017, 26 de novembro de 2017, 07 de dezembro de 2017 e 30 de dezembro de 2017 (Tabela 4).

A vazão de pico observada (Q_{obs}), conforme descrito na metodologia, foi calculada pela equação de Manning a partir da medida da altura hidráulica do canal. Apesar de a equação de Manning ser válida somente para o escoamento permanente e uniforme, foi utilizada para o cálculo da vazão de pico. Durante a passagem da onda de cheia, após a precipitação, o escoamento do canal é não permanente e variado. No entanto, essa simplificação foi adotada para cálculo somente da vazão de pico, considerando que no instante da vazão máxima, o escoamento, instantaneamente, é permanente e uniforme.

Para o evento de 19 de novembro de 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 $NSE_{\text{máx.,mín.}}$, que resultam em parâmetros mais sensíveis do modelo, ocorreram para os parâmetros AI ($NSE_{\text{mín.}}$: -0,12 e $NSE_{\text{máx.}}$: 0,78), n_{imperv} ($NSE_{\text{mín.}}$: 0,42 e $NSE_{\text{máx.}}$: 0,68), W ($NSE_{\text{mín.}}$: 0,50 e $NSE_{\text{máx.}}$: 0,69) e S ($NSE_{\text{mín.}}$: 0,55 e $NSE_{\text{máx.}}$: 0,65). O n_n e o n_c ($NSE_{\text{mín.}}$: 0,58 e $NSE_{\text{máx.}}$: 0,60) e o n_{perv} ($NSE_{\text{mín.}}$: 0,59 e $NSE_{\text{máx.}}$: 0,59) não apresentaram influência nos hidrogramas simulados, conforme se observa na Figura 4.

Os parâmetros W e S, junto ao n_{imperv} , relacionam-se à velocidade da água e influenciam diretamente no tempo de concentração da bacia e, consequentemente, no pico de vazão. Já a AI está associada ao volume de água gerado na bacia capaz de produzir escoamento superficial.

Em uma análise inicial de sensibilidade considerando o parâmetro CN, verificou-se reduzida influência dele quanto às vazões na seção de interesse (exutório da bacia, onde se encontra a estação). Desse modo, decidiu-se não utilizá-lo no processo de calibração. Ressalta-se ainda alguns trabalhos que verificaram a baixa sensibilidade desse parâmetro ou que não o utilizaram durante a calibração (RABORI *et al.*, 2017; SIQUEIRA *et al.* 2019).

Faria *et al.* (2014) obtiveram como parâmetros mais sensíveis do modelo da bacia do córrego Barbado a AI e o coeficiente de Manning para condutos, seguidos pelo n-perv e pela W, entre outros. Já Rabori *et al.* (2017) observaram que os parâmetros que mais exercem influência no modelo da bacia de Zanjan são aqueles relacionados às parcelas impermeáveis da bacia, como o armazenamento das áreas impermeáveis, a AI e o n-imperv. 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 a eventos hidrológicos.

Para a calibração do modelo, foram realizadas 96 simulações para os eventos pluviométricos de 19 de novembro de 2017 e 22 de novembro de 2017, resultando em maiores NSE para os parâmetros individuais, com a adoção de -30% do valor inicial da W, -30% do valor inicial da S e 0,024 s.m^{-1/3} do n-imperv em ambos os eventos, excetuando-se o parâmetro AI, que apresentou valores de NSE mais elevados para a adoção de -25% do valor inicial no evento de 19 de novembro de 2017 e +30% do valor inicial para o evento de 22 de novembro de 2017, conforme se observa na Tabela 5.

A calibração final do modelo consistiu na adoção simultânea dos seguintes valores dos parâmetros: +2,5% da AI, -30% da W, -30% da S e o valor de 0,024 s.m^{-1/3} para o n-imperv, resultantes da combinação dos melhores ajustes individuais para os eventos de 19 de novembro de 2017 e 22 de novembro de 2017, na simulação dos hidrogramas de cheia e na comparação com os hidrogramas observados experimentalmente.

Na Tabela 6 é apresentado o resultado final do processo de calibração do modelo da bacia do ribeirão Vai e Volta. Observa-se NSE de 0,75 e 0,71 para os eventos de 19 de novembro de 2017 e 22 de novembro de 2017, respectivamente, com valor médio de 0,73 representando, de acordo com a classificação de Moriasi *et al.* (2007), 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%.

Faria *et al.* (2014) obtiveram NSE de 0,86 e 0,82 para os eventos de 11 de dezembro de 2010 e 1º janeiro de 2011, respectivamente, durante o processo de calibração manual do modelo da bacia do córrego Barbado, enquanto Rabori *et al.* (2017) observaram ajustes mais elevados (NSE de 0,96 a 0,99) para eventos distintos na bacia de Zanjan.

Nas Figuras 5 e 6 são apresentados os hidrogramas de cheia simulados e observados experimentalmente para os eventos de precipitação de 19 de novembro de 2017 e 22 de novembro de 2017 após o processo de calibração dos parâmetros mais sensíveis do modelo, corroborando com os resultados expressos na Tabela 6. Nota-se que esses hidrogramas apresentam movimentos semelhantes de ascensão, estabilização e recessão, retratando o comportamento da bacia frente aos eventos de precipitação.

A eficiência dos ajustes dos parâmetros mais sensíveis, realizados no processo de calibração, foi avaliada por meio da validação do modelo para os eventos de precipitação de 26 de novembro de 2017, 07 de dezembro de 2017 e 30 de dezembro de 2017, sendo os resultados dessa etapa apresentados na Tabela 7.

No processo de validação do modelo, obteve-se NSE de 0,65, 0,89 e 0,84 para os eventos de 26 de novembro de 2017, 07 de dezembro de 2017 e 30 de dezembro de 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 *et al.* (2014), cuja validação apresentou NSE de 0,74 e 0,73, e constataram resultados semelhantes em outros

Tabela 4 - Eventos de precipitação selecionados neste estudo.

Evento	P _{total} (mm)	T (min.)	i (mm.h ⁻¹)	Q _{obs} (m ³ .s ⁻¹)	V _{es} (m ³)
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

P_{total}: precipitação total acumulada medida pelo pluviômetro (mm); t: duração do evento de precipitação (min); i: intensidade média de precipitação do evento (mm.h⁻¹); Q_{obs}: vazão de pico observada para o evento de precipitação (m³.s⁻¹); V_{es}: volume escoado superficialmente para o evento de precipitação (m³).

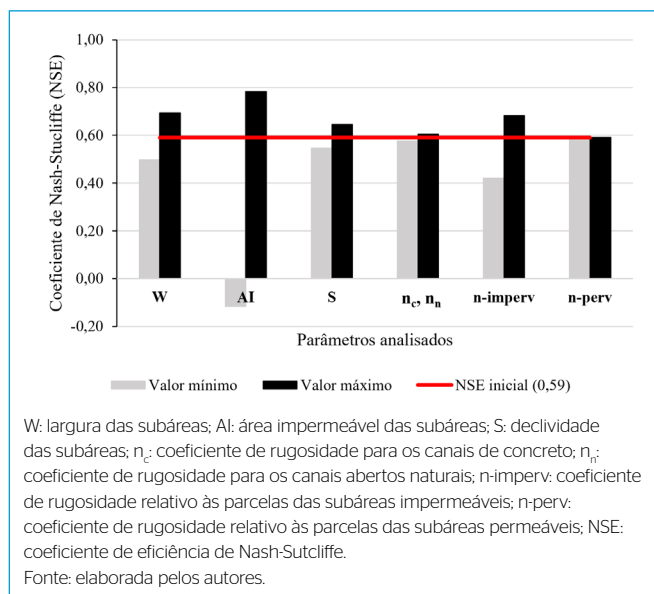


Figura 4 - Análise de sensibilidade do evento do dia 19 de novembro de 2017.

Tabela 5 - Calibração individual para os eventos de 19 de novembro de 2017 e 22 de novembro de 2017.

Eventos	Parâmetros*	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 (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 (s.m ^{-1/3})	0,024	0,74	-9,82	-39,86

NSE: coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe; E_p: erro da vazão de pico; E_v: erro do volume escoado superficialmente; AI: área impermeável das subáreas; W: largura das subáreas; S: declividade das subáreas; n-imperv: coeficiente de rugosidade relativo às parcelas das subáreas impermeáveis; *variação.

Tabela 6 – Resultado final da etapa de calibração para os eventos de 19 de novembro de 2017 e 22 de novembro de 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

AI: área impermeável das subáreas; W: largura das subáreas; S: declividade das subáreas; n-imperv: coeficiente de rugosidade relativo às parcelas das subáreas impermeáveis; NSE: coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe; E_p: erro da vazão de pico; E_v: erro do volume escoado superficialmente.

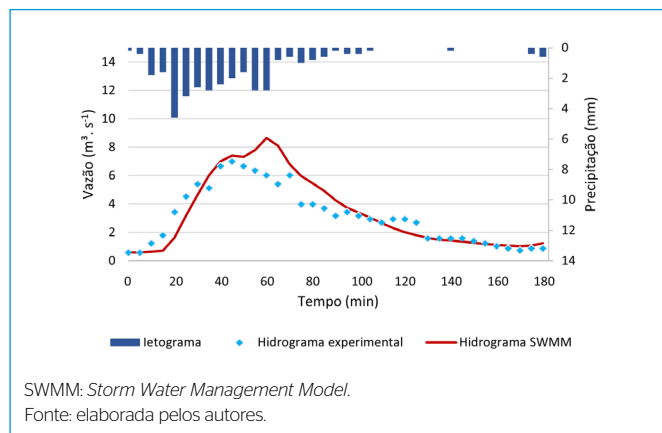


Figura 5 – Hidrogramas resultantes para o evento de 19 de novembro de 2017.

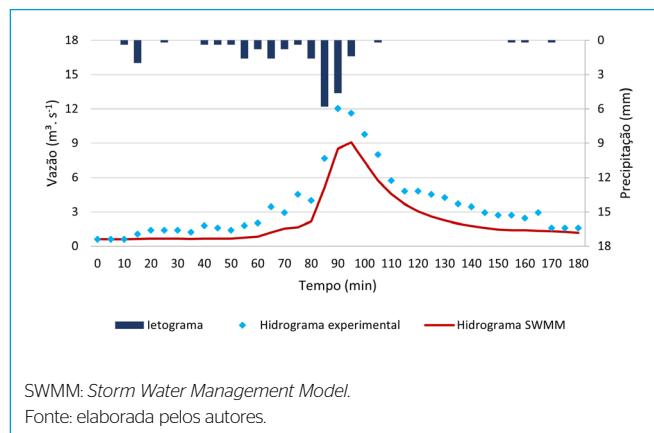


Figura 6 – Hidrogramas resultantes para o evento de 22 de novembro de 2017.

Tabela 7 – Resultados da validação para os eventos de 26 de novembro de 2017, 07 de dezembro de 2017 e 30 de dezembro de 2017.

Eventos	Parâmetros ajustados				NSE	E _p (%)	E _v (%)
	AI (%)	W (m)	S (m/m)	n-imperv (s.m ^{-1/3})			
26/11/2017	+2,5%	-30%	-30%	0,024	0,65	-21,07	-16,24
07/12/2017					0,89	0,18	-11,03
30/12/2017					0,84	10,78	13,49
Média					0,79	-3,37	-4,59

AI: área impermeável das subáreas; W: largura das subáreas; S: declividade das subáreas; n-imperv: coeficiente de rugosidade relativo às parcelas das subáreas impermeáveis; NSE: coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe; E_p: erro da vazão de pico; E_v: erro do volume escoado superficialmente.

estudos, como o de Siqueira *et al.* (2019). Rabori *et al.* (2017) realizaram a validação do modelo para um único evento e obtiveram NSE de 0,99 na bacia de Zanjan.

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

Os hidrogramas simulados e observados experimentalmente para os eventos de 26 de novembro de 2017, 07 de dezembro de 2017 e 30 de dezembro de 2017 são apresentados nas Figuras 7, 8 e 9, e demonstram a relação entre esses hidrogramas com comportamentos de ascensão, pico e recessão semelhantes, retratando de maneira adequada o comportamento da bacia em estudo. Especialmente para o evento de 07 de dezembro de 2017, confirmando o elevado ajuste do modelo hidrológico avaliado no processo de validação por meio do NSE.

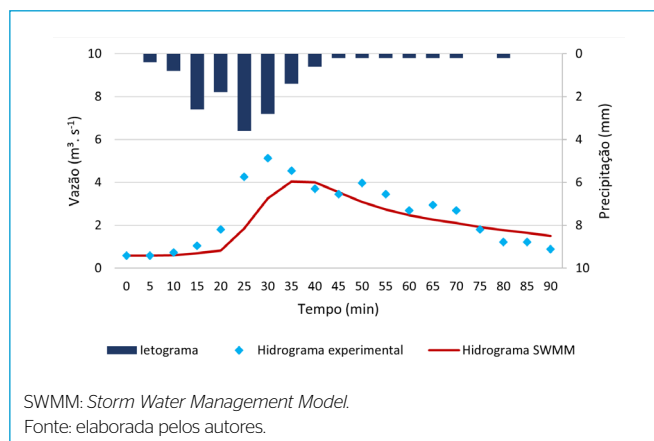


Figura 7 – Hidrogramas resultantes para o evento de 26 de novembro de 2017.

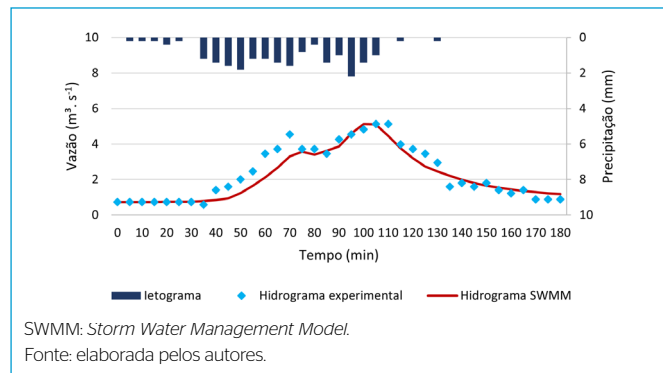


Figura 8 - Hidrogramas resultantes para o evento de 07 de dezembro de 2017.

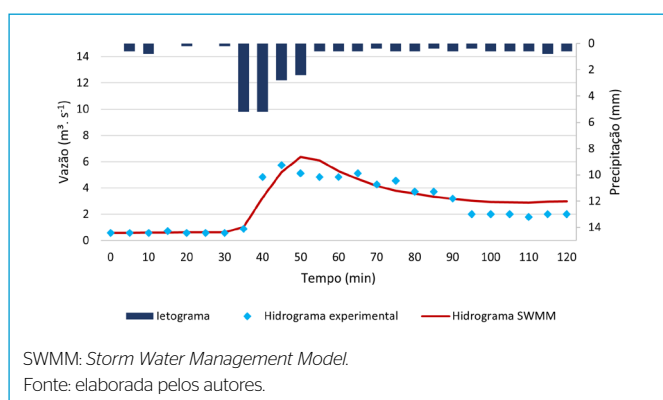


Figura 9 - Hidrogramas resultantes para o evento de 30 de dezembro de 2017.

O modelo SWMM apresentou desempenho satisfatório com a adoção dos seguintes conjuntos de valores calibrados para as subáreas:

- S1: 0,95% de AI, 603,41 m de W e 20,47% de S;
- S2: 61,81% de AI, 315,09 m de W e 21,93% de S;
- S3: 93,92% de AI, 197,82 m de W e 18,12% de S;
- S4: 47,65% de AI, 385,97 m de W e 19,66% de S;
- S5: 0,47% de AI, 287,79 m de W e 15,69% de S.

O n-imperv calibrado adotado foi 0,024 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 de 26 de novembro de 2017, 07 de dezembro de 2017 e 30 de dezembro de 2017, respectivamente, validando o modelo SWMM para a bacia do ribeirão Vai e Volta.

CONCLUSÃO

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

Observou-se que, apesar de a bacia do ribeirão Vai e Volta apresentar menor tendência a enchentes, caso estas ocorram, 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 outras).

Na análise de sensibilidade, constataram-se que os parâmetros do modelo que exercem maior influência nos hidrogramas simulados são a AI, o n-imperv, a W e, em menor grau, a S, estando em consonância com outros trabalhos apresentados. O n_n e o 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 no volume escoado inferiores a 15%, demonstrando desempenho muito bom do modelo na representação do comportamento da bacia em estudo, conforme Moriasi et al. (2007).

Dessa forma, conclui-se que a modelagem hidrológica apresentada é satisfatória na avaliação dos processos hidrológicos que ocorrem na 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 avaliação da implantação de técnicas compensatórias para amortecimento de cheias na bacia do ribeirão Vai e Volta.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Silveira, A.: conceituação, obtenção de financiamento, metodologia, escrita – primeira redação, escrita – revisão e edição. Cavalcanti, A. A.: investigação, metodologia, escrita – primeira redação, escrita – revisão e edição. Menezes Filho, F. C. M.: conceituação, metodologia, escrita – primeira redação, escrita – revisão e edição. Severino, M. M.: investigação, metodologia, escrita – primeira redação, escrita – revisão e edição.

REFERÊNCIAS

ALBERTI, H. L. C. *Caracterização fisiográfica e avaliação hidrológica na bacia do Ribeirão das Antas, Planalto de Poços de Caldas, MG*. 91f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

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

- CÂMARA MUNICIPAL DE POÇOS DE CALDAS. *Diagnóstico 2006*. Poços de Caldas: Câmara Municipal, 2018. 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*. 225f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009. <https://doi.org/10.11606/D18.2009.tde-14102009-182636>
- ELLIOTT, A. H.; TROWSDALE, S. A. A review of models for low impact urban stormwater drainage. *Environmental Modelling & Software*, v. 22, p. 394-405, 2007. <https://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, 2014. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v19n1.p165-176>
- 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, p. 697-707, 2016. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016131862>
- 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, 2015. <http://doi.org/10.1002/hyp.10410>
- INFRAESTRUTURA DE DADOS ESPACIAIS DO SISTEMA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS (IDE-SISEMA). *Portal*. Minas Gerais: IDE-SISEMA. Disponível em: <http://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/>. Acesso em: 11 fev. 2019.
- LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E HIDRÁULICA EM SANEAMENTO (LENHS). *Manual do Usuário EPA SWMM 5.0: modelo de gestão de drenagem urbana*. Paraíba: Editora 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, p. 81-92, 2007. <http://doi.org/10.21168/rbrh.v12n2.p81-92>
- MÉNDEZ-MORALES, 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. 21-32, 2013. <http://doi.org/10.18845/tmv.26i2.1400>
- MORAES, F. T. *Zoneamento geoambiental do planalto de Poços de Caldas, MG/SP a partir de análise fisiográfica e pedoestratigráfica*. 173f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 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, p. 196-208, 2008. <http://doi.org/10.25249/O375-7536.2008381196208>
- MORIASI, D. N.; ARNALD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, T. L.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineering*, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007. <http://doi.org/10.13031/2013.23153>
- PALLA, A.; GNECCO, I. Hydrologic modeling of low impact development systems at urban catchment scale. *Journal of Hydrology*, v. 528, p. 361-368, 2015. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.050>
- PORTO, R. M. *Hidráulica básica*. 4. ed. São Carlos: Ed. EESC-USP, 2006. 540 p.
- RABORI, A. M.; GHAZAVI, R.; 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, 2017.
- 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, 2015. <http://doi.org/10.1111/jawr.12272>
- 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, p. 318-331, 2016. <http://doi.org/10.1590/2175-3369.008.003.A003>
- 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, p. 1980-1993, 2018. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2118>
- 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, e23, p. 1-16, 2019. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920180125>
- TUCCI, C. E. M. *Gestão das águas pluviais urbanas*. Brasília: Ministério das Cidades/Global Water Partnership/UNESCO, 2005. 269 p.
- TUCCI, C. E. M. *Inundações urbanas*. Porto Alegre: Ed. ABRH-RHAMA, 2007. 393 p.
- ZOPPOU, C. Review of urban storm water models. *Environmental Modelling & Software*, v. 16, n. 3, p. 195-231, 2001. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(00\)00084-0](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(00)00084-0)