

## XII ENCONTRO NACIONAL DE ÁGUAS URBANAS

### **AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DO SWMM EM REPRESENTAR O ESCOAMENTO SUPERFICIAL GERADO EM UM TELHADO**

Vitor Santos de Aguiar<sup>1</sup>; Pedro de Paula Drumond<sup>2</sup>; Márcia Maria Lara Pinto Coelho<sup>3</sup> &  
Priscilla Macedo Moura<sup>4</sup>

**RESUMO** – As modificações e impactos no ciclo hidrológico decorrentes da urbanização carecem de ser quantificados com intuito de melhorar a gestão dos recursos hídricos urbanos. Assim, avaliou-se o coeficiente de escoamento superficial gerado em um telhado em Belo Horizonte. Monitorou-se as chuvas e vazões ocorridas em um período do ano de 2017. Através do software Storm Water Management Model (SWMM), modelou-se o telhado monitorado e executou-se simulações a fim de se verificar a capacidade do software de reproduzir escoamento gerado por chuvas no telhado. O coeficiente de escoamento superficial medido está dentro da faixa de valores da literatura e o SWMM se mostrou capaz de simular o comportamento do telhado.

**ABSTRACT**– The changes and impacts on the hydrological cycle resulting from the urbanization must be quantified in order to improve the management of urban water resources. Thus, the runoff coefficient of a roof in Belo Horizonte was assessed. The rain depth and flow occurred in 2017 were monitored. Through the Storm Water Management Model (SWMM), the monitored roof was modeled to check the ability of the software to reproduce the runoff of the roof. The runoff coefficient measured is within the range of values found in literature and the SWMM proved to be to simulate the behavior of the roof.

**Palavras-Chave** – Monitoramento, Coeficiente de escoamento superficial, Modelagem matemática, SWMM.

### **INTRODUÇÃO**

Há anos o Brasil enfrenta graves problemas relacionados a enchentes e inundações nos ambientes urbanos durante os períodos de chuva. As consequências desses eventos são enormes

---

1. Graduado em Engenharia Civil na Universidade Federal de Minas Gerais, e-mail: vitor17aguiar@hotmail.com

2) Doutorando do curso de Pós-graduação na Universidade Federal de Minas Gerais, e-mail: pedrubh@yahoo.com.br

3) Professora Titular – Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos - Universidade Federal de Minas Gerais, e-mail: lara@ehr.ufmg.br

4) Professora Associado – Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos - Universidade Federal de Minas Gerais, e-mail: priscilla.moura@ehr.ufmg.br

prejuízos econômicos, materiais e perdas humanas. Ao mesmo tempo, verifica-se em determinadas localidades a ocorrência de crises hídricas e escassez de água, que culminam até mesmo em racionamento. Fato é que as ações antrópicas e o processo de urbanização evidenciaram graves falhas ligadas à gestão dos recursos hídricos e aos sistemas clássicos de drenagem urbana.

Referente a este último, tornou-se claro que as aglomerações urbanas ao, por exemplo, remover a vegetação existente e impermeabilizar os solos, causam alterações no ciclo hidrológico no sentido de aumentar e acelerar o escoamento superficial das águas de chuva. Quantificar os efeitos da urbanização e seus impactos no ciclo hidrológico são cada vez mais necessárias, visando a otimização de projetos por parte dos profissionais dos recursos hídricos que neles atuam.

O surgimento de softwares que agilizam os processos da engenharia e a elaboração de projetos são de suma importância para que as soluções práticas sejam viáveis, difundidas e de custo reduzido. No entanto, é igualmente essencial que o profissional que usufrui de softwares entenda o seu funcionamento e que se desenvolvam estudos reconhecendo eventuais limitações desses e, assim, aprimorar os projetos. O mau dimensionamento implica em soluções de funcionamento inadequado, inseguras e custosas, podendo agravar a urgência em restringir os já expressivos problemas.

Este estudo irá quantificar, através de monitoramento hidrológico em pequena escala e modelagem, o coeficiente de escoamento superficial de um telhado e avaliar a capacidade do software Stormwater Management Model (SWMM), um software de modelagem hidráulica e hidrológica livre, de replicar o funcionamento do telhado monitorado.

## **METODOLOGIA**

A base para este estudo foi o monitoramento de chuvas e vazões através de pluviógrafo e sensor de nível na tubulação de saída do telhado do Centro de Saúde Professor Amílcar Viana Martins, localizado no bairro Betânia, em Belo Horizonte. Por praticidade, este será citado como CS Amílcar Martins ao longo deste artigo. Os dados analisados são parte de um projeto mais amplo, que trata de estudo de microrreservatórios, cujos resultados ainda estão sendo tratados.

Medições *in-loco* definiram a área do telhado em 98 m<sup>2</sup>, em uma água, de inclinação de 10%. Foram adaptadas calhas e condutores verticais para que o escoamento se direcionasse a um único ponto. Um data logger é utilizado para armazenamento dos registros dos sensores de nível no canal de saída – da marca Global Water, modelo GL-500-7-2, que registra dados a cada 30 segundos. No

telhado, há instalado pluviógrafo do tipo cuba basculante, modelo Hidromec. A Figura 1, a seguir trazem planta e corte do local de experimentação.

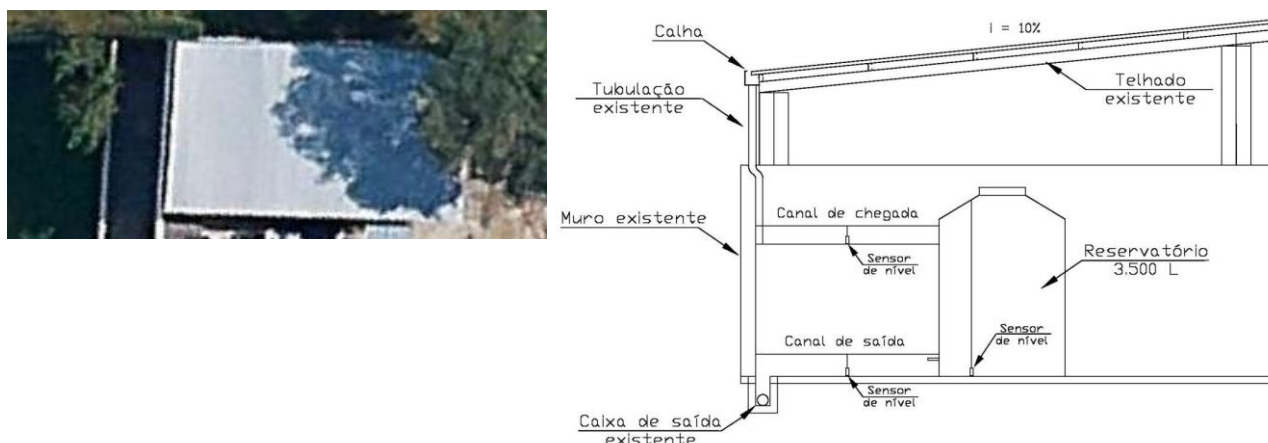


Figura 1 - Planta e corte localizando o telhado do experimento no CS Amílcar Martins

Coletou-se dados de chuva registrados entre fevereiro e junho de 2017 pelo pluviômetro localizado no Centro de Saúde Amílcar Martins. Através da avaliação dos dados, foram selecionados os 10 eventos chuvosos cujos dados estavam mais claramente representados e em melhor concordância com as vazões registradas pelo sensor de nível. As intensidades e durações registradas para os eventos em questão foram inseridas no modelo IDF de Pinheiro e Naghettini (1998) para a Região Metropolitana de Belo Horizonte, pelo qual se calculou o tempo de retorno das chuvas. Um resumo dos eventos chuvosos e de suas propriedades mencionadas encontra-se na Tabela 1, a seguir.

Tabela 1 - Eventos chuvosos registrados no CS Amílcar Martins

Evento	Data	Duração (h)	Intensidade média (mm/h)	Tempo de retorno (anos)
1	25/02/2017	1,42	23,86	~1,2
2	26/02/2017	0,40	11,50	<1,05
3	26/02/2017	0,20	14,00	<1,05
4	26/02/2017	0,65	8,31	<1,05
5	26/02/2017	0,12	12,00	<1,05
6	08/03/2017	1,15	55,48	~ 20
7	19/03/2017	1,88	42,69	~40
8	07/04/2017	0,25	17,60	<1,05
9	07/04/2017	0,42	9,60	<1,05
10	12/06/2017	0,32	37,89	<1,05

Os coeficientes de escoamento superficial foram estimados através de um balanço de volumes por evento, representados em altura. O volume que entra no sistema pode ser calculado multiplicando-se a área do telhado pela altura precipitada. O volume de saída, por sua vez, foi obtido com base na relação cota-descarga de um vertedor triangular instalado na calha da saída do telhado e o somatório dos produtos das vazões medidas a cada 30 segundos por este intervalo de tempo (intervalo de tempo de registro no sensor de nível).

Dispondo-se de medições dos dados reais das vazões geradas pelo escoamento das águas pluviais no telhado do Centro de Saúde Amílcar Martins, prosseguiu-se em avaliar a possibilidade de reproduzir os hidrogramas realizando-se simulações dos eventos chuvosos sobre a área de contribuição no SWMM.

Optou-se por se iniciar as simulações com uma condição de superfície 100% impermeável e sem perdas por acumulação, devido à imprecisão em tentativas de estabelecimento desses fatores. O coeficiente de Manning, também difícil de se definir com precisão, foi inicialmente adotado como 0,015, valor considerado de condição “regular” para algumas paredes metálicas por Porto (1998). A área da bacia, então, foi reproduzida como a própria área medida do telhado, de 98 m<sup>2</sup>, assim como a declividade observada de 10%. Ressalta-se que o SWMM ainda possibilita a entrada de dados referentes à infiltração, que foram desconsiderados, já que não há ocorrência no sistema experimental estudado.

Foi adotado inicialmente o valor da largura do retângulo equivalente ( $w$ ) de 8,9, calculado conforme as equações a seguir apresentadas por Garcia e Paiva (2006). Uma vez que o SWMM utiliza a declividade fornecida em um cálculo de duas direções, como um telhado de duas águas, por exemplo, e esta configuração difere da real do telhado monitorado, a declividade também foi um parâmetro a ser calibrado.

Os eventos de 1 a 5 foram utilizados para calibração e os de 6 a 10 para validação do modelo. A avaliação da eficácia do modelo será feita por meio do cálculo do coeficiente de Nash-Sutcliffe (E) (Nash e Sutcliffe, 1970), para cada evento.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação do coeficiente de escoamento superficial é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Estimativa do coeficiente de escoamento superficial por evento

Evento	Data	Volume escoado (L)	H escoada (mm)	H precipitada (mm)	H não escoada (mm)	CES
1	25/02/2017	3.184,22	32,49	33,8	1,3	0,96
2	26/02/2017	415,21	4,24	4,6	1,3	0,73
3	26/02/2017	180,64	1,84	2,8	1,0	0,66
4	26/02/2017	403,46	4,12	5,4	1,3	0,76
5	26/02/2017	94,92	0,97	1,4	0,4	0,69
6	08/03/2017	5.179,80	52,86	63,8	10,9	0,83
7	19/03/2017	11.416,77	116,50	80,4	-36,1	1,45
8	07/04/2017	416,75	4,25	4,4	0,1	0,97
9	07/04/2017	406,65	4,50	4,0	-0,1	1,04
10	12/06/2017	537,68	5,49	12,0	6,5	0,46

Nota: H = altura; CES = coeficiente de escoamento superficial

Como o telhado do Centro de Saúde Amílcar Martins é praticamente impermeável, as perdas (altura não escoada) se dão por retenção e por acumulação de água nas calhas. Espera-se, portanto, que o valor absoluto da perda tenha um máximo, que representa a saturação. O coeficiente médio de escoamento calculado foi de 0,76, excluindo-se do cálculo da média chuvas cujo escoamento superou a quantidade de chuva, que serão tratadas a seguir.

Primeiramente, nota-se, comparando os eventos de 1 a 5, que a perda aparenta ter um limite superior de por volta de 1,3 mm, sendo que as chuvas de menor volume sequer atingem este valor. A partir dos registros do mês de março, no entanto, o padrão observado se perde, havendo registros discrepantes e incoerentes com a quantidade de chuva em cada ocorrência.

Em alguns casos, como em 08/03 (Evento 6) e 12/06 (Evento 10), a altura não escoada superou os valores registrados para chuvas semelhantes, apresentando, então, dinâmica diferente da teoria apresentada de um valor máximo de acumulação. No caso do dia 12/06, durante o período seco, é plausível de se imaginar que haja um aumento na retenção da superfície devido à maior ocorrência de resíduos, como folhas, que são lavados do telhado com menos frequência e afetam o escoamento superficial. Ainda assim, é bastante questionável que isso explique um aumento da retenção na magnitude observada.

No caso do evento registrado em 19/03 (Evento 7), observou-se um déficit no volume, ou seja, os dados indicam que o volume escoado foi maior que o precipitado. As chuvas do dia 07/04 (Eventos 8 e 9) também não aparentam acompanhar o comportamento dos demais eventos de volumes semelhantes, registrando perdas pequenas. O evento 9 foi seguido ao evento 8, isso poderia explicar a perda quase nula.

Um fator evidente que pode ter causado alguma discrepância é o fato de se ter apenas um valor de vazão para cada intervalo de 30 segundos, podendo este, por vezes, não ser perfeitamente representativo de todo o período. No entanto, como não há grandes saltos de vazão verificados entre cada intervalo, a influência deste fator é considerada mínima. Além disso, os dados usados no cálculo das vazões são imprecisos nos extremos dos eventos chuvosos, podendo haver erro na determinação exata de início e fim dos eventos. Novamente, este fator pode ter acrescentado ou subtraído do volume de saída algumas pequenas parcelas, o que não justificaria a grande variabilidade.

Considera-se, então a probabilidade de haver ocorrido falhas nas medições do pluviômetro. As medições de chuva foram comparadas com as registradas em outro pluviômetro próximo e não foram identificadas discrepâncias significativas. No que se refere aos eventos de 08/03, esperaria-se uma possibilidade de falha no pluviômetro, tendo em vista a tamanha intensidade e duração do evento chuvoso. Como o registro é feito por tombamento da cuba quando esta enche, a força da chuva poderia provocá-lo sem que estivesse totalmente cheio, afetando para mais os registros de altura de chuva. No entanto, além das comparações entre pluviômetros, o evento de 19/03, semelhante ao do dia 08/03, registrou perda “negativa” bastante significativa, contrariando a hipótese. Suspeita-se, então, de alguma alteração no sensor da tubulação de saída do telhado que o tenha impedido de trabalhar da maneira que fora estipulada, causando medições discrepantes.

Levando em conta essas alterações e tendo como base as perdas dos primeiros eventos, aparentemente mais coordenadas, supõe-se que uma simulação computadorizada retorne picos de vazão maiores para os eventos cujas perdas foram demasiadamente elevadas, como os dos dias 08/03 e 12/06. Analogamente, deve-se identificar picos mais baixos que os medidos para os eventos chuvosos que apresentarem volumes deficitários, como o do dia 19/03.

Os hidrogramas gerados na simulação usando os parâmetros base adotados estiveram razoavelmente próximos aos hidrogramas medidos ou ao que era esperado, tendo em vista as considerações anteriores. Isso indica que os parâmetros de entrada, sobretudo os obtidos em literatura, como coeficiente de Manning e largura, foram bem estimados na consulta realizada.

Quanto ao procedimento de calibração, verificou-se que as modificações feitas em  $w$  são diretamente proporcionais à vazão, gerada, ou seja, o aumento de  $w$  produz um aumento de vazão, com um certo limite superior em que o aumento indiscriminado da variável já deixa de ter efeitos relevantes sobre as vazões. Além disso, observou-se que as alterações neste fator tinham efeitos significativamente maiores sobre as menores vazões que sobre as mais altas. Entende-se, portanto, que se o modelo retorna vazões inferiores às medidas, existem duas limitações sobre as alterações em  $w$ : primeiramente, o aumento na vazão atinge um máximo, ou seja, o aumento de  $w$  pode não trazer o aumento de vazão desejado; secundamente, o aumento não é uniforme entre vazões. Verificou-se que modificações na inclinação da área provocaram variações menores nos hidrogramas e nos picos relativamente a  $w$ , porém de uma forma ligeiramente mais uniforme.

Os eventos cujas perdas estiveram, aparentemente, fora de um padrão para a área de escoamento, conforme se destacou previamente, foram também os que apresentaram a maior variabilidade em relação à medição real e os valores simulados. Ressalta-se, ainda, que as variações dos resultados simulados foram coerentes com as perdas estimadas. Na Figura 3, a seguir um comparativo entre o hidrograma medido e simulado gerados pela chuva do dia 25/02/2017 é apresentado, a título de exemplo. Nota-se que foi possível gerar hidrograma relativamente semelhante ao real em termos de formato, vazão de pico e duração através do SWMM.

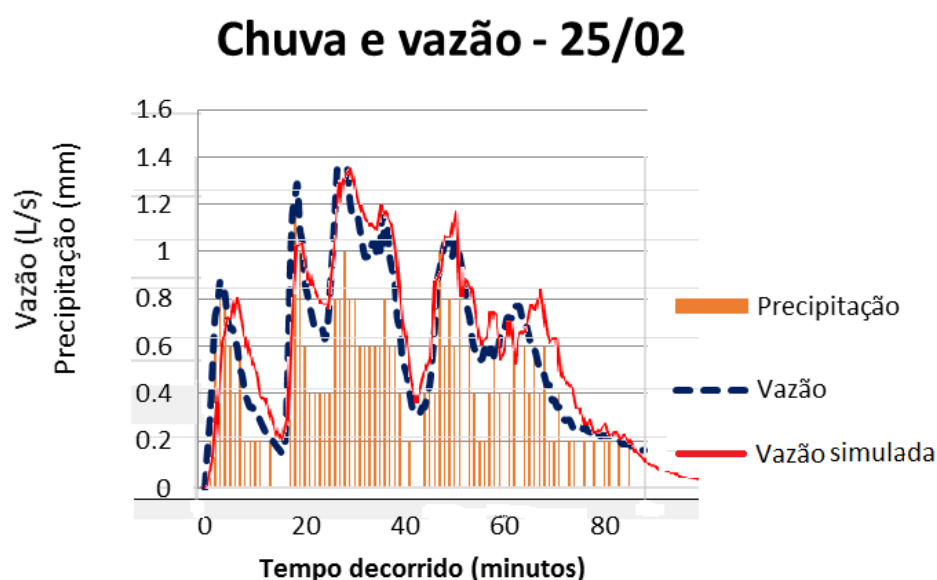


Figura 3 – Hidrograma simulado e monitorado para o Evento 1

A eficiência das calibrações foi verificada através do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe ( $E$ ). Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 3, a seguir.

Tabela 3 - Coeficiente de Nash-Sutcliffe para as simulações do escoamento no telhado

Evento	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Data	25/02/17	26/02/17	26/02/17	26/02/17	26/02/17	08/03/17	19/03/17	07/04/17	07/04/17	12/06/17
$E$	0,81	0,86	0,96	-0,13	0,72	0,48	0,69	0,81	-0,59	0,27

Nota-se que a eficiência medida foi variável. A média de  $E$  para os eventos de calibração foi 0,64, tendo-se valores inaceitáveis para o evento 4. Para os eventos de validação a média dos valores de  $E$  foi muito baixa, 0,33. As menores eficiências, em que o coeficiente esteve muito abaixo de 0,7, se deram, sobretudo, em eventos cujas perdas demonstraram inconsistências, como os eventos de índice 6, 9 e 10 (08/03 e 12/06) e ainda no evento número 4 da calibração.

Apesar de ser possível calibrar um grupo restrito de eventos dando à bacia propriedades arbitrárias, esta calibração não funciona para um evento pluvial genérico que venha a ocorrer no local.

## CONCLUSÕES

Os coeficientes de escoamento estimados estão dentro das faixas usuais encontradas na literatura para telhados metálicos. O SWMM apresenta resultados razoavelmente coerentes utilizando as características reais de uma área de escoamento de pequeno porte, como é o caso do telhado em análise. A simulação de um pequeno espaço como esse está sujeita a variações significativas devido a interferências físicas. Uma reavaliação do desempenho do SWMM em simular o escoamento de um telhado idealmente traria limpezas mais frequentes e um número maior de eventos chuvosos para verificar discrepâncias e possivelmente desconsiderar eventos distoantes da calibração.

## REFERÊNCIAS

GARCIA, J.I.B. & PAIVA, E.M.C.D. (2006) Monitoramento Hidrológico e Modelagem da Drenagem Urbana da Bacia do Arroio Cancela – RS. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 11, p. 99-108. 2006.



NASH, J. E. ; SUTCLIFFE, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models Part I- A discussion of principles. *Journal of Hydrology* **10** (1970) 282-290; North-Holland Publishing Co., Amsterdam.

PORTO, R.M. (1998). *Hidráulica Básica*. EESC/USP São Carlos- SP, 540 p.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à Agradecemos à Sudecap – Superintendência de Desenvolvimento da Capital, ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, à Capes - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e à Fapemig - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais pelos apoios financeiros concedidos para o desenvolvimento científico e tecnológico das pesquisas realizadas.