

Avaliação do emprego de técnicas compensatórias na sub-bacia urbana Ribeirão do Santa Rita do município de Fernandópolis, São Paulo

Evaluation of the use of compensatory techniques in the Ribeirão do Santa Rita urban sub-basin in the municipality of Fernandópolis, São Paulo

Gisele Carvalho Rodrigues^{1*} , Mauricio Antonio Santini Junior² 

RESUMO

Com o crescimento da população urbana e consequente alteração do uso e da ocupação do solo nas bacias hidrográficas, as inundações têm ficado cada vez mais frequentes. O presente trabalho teve como objetivo verificar os efeitos do emprego de técnicas compensatórias na sub-bacia hidrográfica Ribeirão do Santa Rita, localizada no município de Fernandópolis, São Paulo, Brasil. Foram analisados a vazão de pico e o tempo de resposta de diversos cenários, com o intuito de verificar o potencial de atenuação das inundações. A metodologia utilizada empregou o Storm Water Management Model (SWMM) para propagar o escoamento, e o software de Sistema de Informação Geográfica (SIG) para obter as características da bacia em estudo e os locais de potencial emprego das técnicas. Foi simulada a instalação de diversas técnicas compensatórias, isoladamente e em conjunto, para a configuração urbana de 2017. Mediante os hidrogramas gerados por cada cenário, constatou-se que os melhores resultados ocorreram em eventos com tempo de retorno menor. A atenuação da vazão de pico chegou a 33,72% utilizando-se trincheiras de infiltração, 31,38% para pavimentos permeáveis, 31,08% empregando jardins de chuva e 12,20% com telhados verdes. O aumento no tempo de resposta foi de até 16 minutos. No cenário com todas as técnicas compensatórias, a redução foi de até 37,29% da vazão de pico e o aumento do tempo de resposta foi de 18 minutos. Portanto, as técnicas compensatórias podem reduzir a vazão de pico e aumentar o tempo de resposta da sub-bacia, mitigando as ocorrências de inundações.

Palavras-chave: hidrologia urbana; inundações; desenvolvimento de baixo impacto; modelo de gerenciamento de águas pluviais.

ABSTRACT

With the growth of the urban population and the consequent alteration of land use and occupation in the watersheds, floods have become more frequent. This paper aimed to verify the effects of the use of compensatory techniques in the watershed Ribeirão do Santa Rita, located in the city of Fernandópolis, São Paulo, Brazil. Peak flow and response time of various scenarios were analyzed in order to verify the potential for flood mitigation. The methodology used Storm Water Management Model (SWMM) to propagate the flow, with the support of the Geographic Information Systems (GIS) to obtain the characteristics of the studied watershed and the places of potential use of the techniques. The installation of several compensatory techniques was simulated, separately and together, for the 2017 urban configuration. Upon the hydrographs generated by each scenario, it was found that the best results occurred in events with shorter return time. Peak flow attenuation reached 33.72% using infiltration trenches, 31.38% for porous pavements, 31.08% using rain gardens, and 12.20% with green roofs. The increase in lag time was up to 16 minutes. In the scenario with all compensatory techniques, the reduction in peak flow was up to 37.29% and the response time increased by 18 minutes. Therefore, compensatory techniques can reduce peak flow and increase the response time of the sub-basin, consequently mitigating the occurrences of floods.

Keywords: urban hydrology; flood; low impact development; storm water management model.

¹Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - Ilha Solteira (SP), Brasil.

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia - Ilha Solteira (SP), Brasil.

***Autora correspondente:** gc.rodrigues@unesp.br

Conflitos de interesse: os autores declaram não haver conflito de interesses.

Financiamento: nenhum.

Recebido: 28/12/2018 - **Aceito:** 04/01/2020 - **Reg. ABES:** 20180251

INTRODUÇÃO

A urbanização tem efeitos notáveis no aumento do escoamento superficial, uma vez que aumenta a área impermeável e, conseqüentemente, reduz a infiltração de água no solo (MAHMOUD; GAN, 2018). Isso gera diversos problemas, entre eles a inundação, que pode afetar inúmeras pessoas. Jha, Bloch e Lamond (2012) relataram que o número de pessoas no mundo prejudicadas pelas inundações foi de 175 milhões em 2010.

A *pegada da inundação* atinge diversos setores, tanto de forma direta (provocando danos à construção e mortes) como de forma indireta (e.g., quebra da dinâmica microeconômica da região), tornando a quantificação monetária desses desastres muito complexa, porém sempre onerosa para os setores público e privado (SVETLANA; RADOVAN; JÁN, 2015). Atualmente, metodologias vêm sendo propostas para a realização dessa avaliação (ZENG *et al.*, 2019).

Quando se necessita da intervenção estrutural para diminuir a incidência desses desastres, a falta de planejamento urbano e a escolha errada das estruturas de contenção podem gerar a migração das áreas de riscos para outras localidades, como constatou Thanvisitthpon (2019). Nesse aspecto, as técnicas compensatórias podem ser boas alternativas, uma vez que não transferem o impacto a jusante. Quando bem empregadas, além de reduzir a vazão, geram melhorias na qualidade de vida, recuperam e preservam o meio ambiente por meio da redução da carga de poluição de origem pluvial (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2005). Essas técnicas consideraram a bacia hidrográfica como unidade de planejamento e buscam compensar os efeitos da urbanização (MARTINS, 2016).

No que tange à redução de eventos de alagamento e inundação, diversos estudos vêm constatando que a aplicação das técnicas compensatórias diminui a vazão e, por conseqüência, os desastres (SIN *et al.*, 2014; ZHU *et al.*, 2019a). Além disso, reduzem o aporte de resíduos sólidos, nutrientes e sedimentos aos corpos hídricos, melhorando a qualidade da água (SOUZA; CRUZ; TUCCI, 2012). Pavimentos permeáveis, telhados verdes, microrreservatórios individuais, poços de infiltração, bacias de retenção, trincheiras de infiltração, valas vegetadas e jardins de chuvas são alguns exemplos das técnicas compensatórias mais conhecidas.

O Storm Water Management Model (SWMM) é um *software*, desenvolvido pela Environmental Protection Agency (EPA) em 1971, utilizado no âmbito da hidrologia urbana para: avaliar o potencial de técnicas compensatórias (MARTINS, 2016); prever o escoamento de telhados verdes (JOHANNESSEN *et al.*, 2019); quantificar os benefícios de diferentes combinações de unidades *low impact development* (LID) (LI *et al.*, 2019); simular o efeito de diferentes estruturas de pavimento na redução do escoamento superficial e no controle de águas pluviais urbanas (ZHU *et al.*, 2019b); e também para simular o desempenho hidrológico do desenvolvimento de baixo impacto em águas subterrâneas rasas (ZHANG *et al.*, 2018).

Para a simulação do fluxo nas galerias, o SWMM utiliza a equação de Saint-Venant, podendo ela ser simplificada pelos métodos do fluxo constante, onda cinemática e onda dinâmica, ou ainda utilizada com todas as suas parcelas. Para o fluxo superficial, o *software* considera um modelo de reservatório não linear aliado ao modelo da onda cinemática, em que toda a entrada do sistema é feita pela precipitação (e degelo, quando ocorrer) e as saídas ocorrem por evaporação e infiltração.

Portanto, o presente trabalho pretendeu avaliar o desempenho das técnicas compensatórias, também denominadas de controles LID, aplicadas na sub-bacia urbana Ribeirão do Santa Rita, por meio de modelagem hidrológica do *software* SWMM, para verificar a compensação dos efeitos da urbanização.

METODOLOGIA

A área de estudo está localizada em Fernandópolis, estado de São Paulo, Brasil. O município fica na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) do Turvo Grande, que se divide em 14 sub-bacias, sendo três pertencentes à Fernandópolis: Ribeirão do Santa Rita, Água Vermelha e Ribeirão do Marinheiro.

Para este trabalho, foi escolhida a sub-bacia do Ribeirão do Santa Rita (Figura 1), cuja área total é de 641,88 ha. O exutório está localizado a latitude 575.744 m leste e longitude 7.756.457 m sul, e o solo de predominância é Argissolo Vermelho-Amarelo. A área é densamente urbanizada e sofreu forte aumento da parcela de solo impermeável; nos últimos 20 anos, devido à implementação de loteamentos, o córrego apresenta forte processo erosivo.

O sistema de drenagem natural e a delimitação da bacia Ribeirão do Santa Rita foram obtidos por intermédio de cartas cartográficas do TOPODATA aplicando-se o *software* ArcGis (pela sua extensão ArcHydro). Em seguida, dividiu-se a bacia em 34 sub-bacias, para gerar maior precisão espacial do trabalho utilizando o mesmo *software*.

Foram então aplicadas diversas rotinas, por meio do SIG, para determinar características físicas intervenientes para a elaboração do modelo, sendo elas: áreas, porcentagens de áreas impermeáveis e declividades de cada sub-bacia. Em particular, para as porcentagens de áreas impermeáveis, foi necessário realizar a reclassificação da imagem de satélite, processo que consiste em identificar semelhanças de espectros de ondas refletidas com amostras de treinamento.

Para determinar as larguras de cada sub-bacia (uma vez que o modelo as considera retangulares), utilizaram-se duas metodologias: a de Guo e Urbanas (2009), quando $X \leq K$, e o método tradicional, quando $X > K$.

Em que:

K = o fator de forma da bacia;

X = a área total da bacia dividido pelo comprimento do canal principal ao quadrado.



Figura 1 - Bacia Ribeirão do Santa Rita e suas sub-bacias adjacentes.

Na realização do método tradicional foram selecionadas cinco larguras em cada sub-bacia e calculada a média entre elas. Para desenvolver a metodologia de Guo e Urbonas (2009), utilizaram-se as Equações 1, 2 e 3. Considerou-se o canal principal como sendo o próprio canal de drenagem natural das sub-bacias, como guias ou córregos.

$$Z = \frac{Am}{A} \quad (1)$$

$$Y = (1,5 \cdot Z) \cdot \left(\frac{2}{1-2K} \cdot X^2 - \frac{4K}{1-2K} \cdot X \right) \quad (2)$$

$$L_w = CXY \quad (3)$$

Em que:

A = a área total;

Am = a maior área entre os dois lados do canal;

L_w = a largura da bacia;

C = o comprimento do canal principal;

Y = o fator de forma da bacia;

$K = 4$;

Z = a razão entre a maior área entre os dois lados do canal e a área total.

Para a modelagem do escoamento nas galerias, foi utilizado o método da onda cinemática, que transcorre o hidrograma considerando atrasos na propagação (MARTINS, 2016). Em relação à infiltração das sub-bacias, optou-se pelo método de Horton, uma vez que é uma técnica com ampla literatura e por meio da qual foi possível aproximar os parâmetros necessários. Conforme Collischon e Dornelles (2013), a equação de Horton é empírica e descreve o comportamento da capacidade de infiltração de maneira decrescente.

Em relação às características dos canais, adotaram-se para as galerias de drenagem e canais naturais os coeficientes de rugosidade Manning igual a 0,014 e 0,035, respectivamente, conforme as considerações realizadas por Porto (2006).

Nas áreas impermeáveis e permeáveis das sub-bacias, utilizaram-se 0,001 e 0,1, respectivamente, valores padrão do SWMM e que representam macrorrugosidades, pois esse parâmetro é função da superfície e tem faixa de abrangência grande, como mostra a literatura. McCuen, Johnson e Ragan (1996) verificaram que variam de 0,011 a 0,24 para a parcela impermeável e de 0,05 a 0,8 para a permeável. Conforme Rosa, Clausen e Dietz (2015), esses valores podem variar de 0,011 a 0,015 e de 0,15 a 0,24, para os coeficientes da parcela impermeável e da permeável, nesta ordem.

As técnicas compensatórias escolhidas para realização deste trabalho foram: telhados verdes, pavimentos permeáveis, trincheiras de infiltração e jardins de chuva. As características físicas dessas técnicas foram elaboradas com base em Martins (2016) e Prosab (2009).

Foi atribuída uma espessura de 150 mm para os pavimentos permeáveis, o que equivale a mínima espessura, em projetos semelhantes, aplicada por Araújo, Tucci e Goldenfum (2000). Também foi considerada espessura de solo de 150 mm para os telhados verdes.

Para determinar as potências áreas de aplicação dos telhados verdes, foi elaborada uma classificação de *pixels* da imagem de satélite e realizada a estatística por zona de cada sub-bacia. Para tornar o cenário de aplicação dos telhados verdes mais real, foi considerado que em 50% dessas áreas a técnica seria aplicada.

As áreas da trincheira de infiltração, dos pavimentos permeáveis e dos jardins de chuva foram demarcadas manualmente conforme metodologia a seguir. A implantação dessas técnicas seguiu limitações do padrão de urbanização da cidade, os pavimentos permeáveis foram instalados somente em estacionamentos comerciais e pavimentos de praças e escolas. As trincheiras de infiltração foram instaladas em forma de faixa junto às sarjetas, com dimensões padronizadas de 100 m de comprimento (valor próximo ao comprimento médio das quadras) por 0,8 m de largura, para não atrapalhar o tráfego de pedestres e automóveis, e 0,5 m de profundidade. As dimensões dos jardins de chuvas adotadas foram 0,4 m de largura, 25 m de comprimento e 1 m de profundidade, pois os espaços disponíveis para passeios não são grandes e é necessário que com a implantação o tráfego de pedestres não seja afetado.

Além dessas características foi necessário configurar as camadas de cada técnica implantada no SWMM, para isso, utilizou como base o manual do *software* (ROSSMAN; HUBER, 2016) e estudos de Martins (2016).

Conforme recomendado, após a implantação das técnicas compensatórias foram ajustados os valores das áreas impermeáveis e recalculado as larguras das sub-bacias, visto que, as áreas agora ocupadas pelas técnicas compensatórias, são áreas permeáveis.

Foram simulados o cenário real da bacia (sem emprego de LIDs), o emprego de LIDs em separado e um cenário hipotético considerando um emprego proporcional dessas técnicas. Conforme Prosab (2009), uma inovação no uso de técnicas compensatórias refere-se ao seu uso associado. Desse modo, foi desenvolvido outro cenário denominado “Cenário I”, em que 25% da área foi considerada passível de aplicação de cada técnica compensatória.

Para a determinação da chuva de projeto, foi utilizando o método dos Blocos Alternados e do Hietograma Triangular, com precipitação de 60 minutos, que foi o tempo de concentração estimado por meio da fórmula de Kirpich (1940), resolução temporal de 2 em 2 minutos e tempo de retorno de 5, 25, 50 e 100 anos. Para isso, utilizaram-se os dados do posto pluviométrico Votuporanga-B6-036R/DAEE, localizado geograficamente a latitude 20°26'23”S e longitude 49°58'49”W, com altitude de 513 m e distante cerca de 30 km da área de estudo. O uso desse posto foi necessário, pois o do município de Fernandópolis não tem dados suficientes, por ser recente. Por fim, foram comparados os hidrogramas resultantes de todos os cenários, com foco na vazão de pico e no tempo de resposta da bacia.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a imagem de satélite da região, foi realizada a classificação para identificação das áreas suscetíveis a implantação de telhados verdes. Essa classificação apresentou bons resultados, uma vez que a técnica delimitou bem as áreas onde existem telhados na sub-bacia. A Figura 2 mostra a imagem de satélite obtida, com seu uso e ocupação do solo bem como as áreas onde poderão ser instalados os telhados verdes e pavimentos permeáveis, esse último, realizado de maneira manual.

Foi desenvolvido um cenário real com as condições naturais da sub-bacia Ribeirão do Santa Rita e realizada a simulação utilizando dois tipos de chuva de projeto (Blocos alternados e Hietograma Triangular), para dois tempos de resposta (5 e 100 anos). Assim, foi constatado que o método do Hietograma Triangular resultou em uma vazão de pico superior ao método dos Blocos Alternados 1,24% superior para um tempo de retorno de 5 anos e 0,27% para

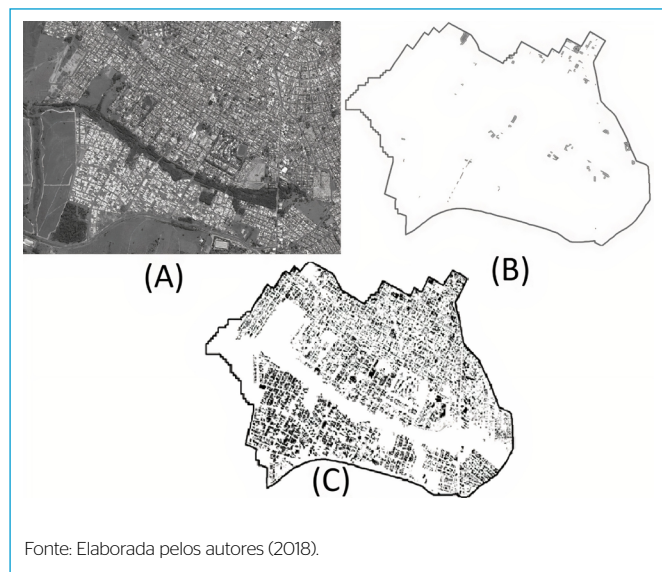


Figura 2 - (A) Imagem de satélite da bacia; (B) áreas susceptíveis à instalação de pavimentos permeáveis; (C) telhados verde.

100 anos. Então, utilizou-se para todas as simulações o método do Hietograma Triangular por gerar resultados mais críticos.

Após a determinação das áreas de potencial aplicação das técnicas compensatórias (telhado verde, pavimento permeável, jardim de chuva e trincheira de infiltração) foi simulado um evento de precipitação para os tempos de retorno de 5, 25, 50 e 100 anos. Os hidrogramas gerados estão apresentados na Figura 3. A Tabela 1 sumariza os tempos de pico, a vazão máxima, a redução do tempo de pico e o aumento do tempo de resposta obtidos em relação à bacia natural. É importante ressaltar que o caminho do escoamento para as simulações de trincheiras de infiltração, pavimento permeável e jardins de chuva foi modificado para que as áreas impermeáveis fossem desconectadas e descarregassem nas áreas permeáveis.

Nota-se que houve redução considerável da vazão de pico, de 34 a 10%, dependendo da técnica. Tal resultado é interessante, uma vez que não se trata de medidas estruturais que agem sobre a macrodrenagem, e sim técnicas que têm maior efeito nas estruturas de microdrenagem, como constado por Guan, Sillanpää e Koivusalo (2015), Hood, Clausen e Warner (2007) e Jackisch e Weiler (2017), migrando seus benefícios para os córregos e rios.

Por meio dos hidrogramas dos tempos de retornos de 50 e 100 anos e da Figura 4, verifica-se que o efeito das técnicas compensatórias sobre a redução da vazão máxima é semelhantes e não se diferencia muito umas das outras, de 4.000 a 6.000 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, dependendo da técnica, além de apresentar valores bem inferiores do que quando se simula eventos com tempos de retorno menores. Existe a tendência de estabilização da redução no patamar de redução de 10%. Esse resultado já era esperado, uma vez que essas técnicas usam a infiltração como principal artifício de redução de vazão e não o armazenamento, uma vez que a taxa de infiltração atinge o seu máximo o excedente é escoado, gerando menor retenção. Outros estudos, como Zahmatkesh *et al.* (2015) e Fassman e Blackburn (2010), também obtiveram o mesmo resultado.

Além da vazão de pico, outro parâmetro analisado foi o tempo de resposta da bacia perante o emprego das técnicas compensatórias, para todos os

eventos simulados (TR de 5, 25, 50 e 100 anos). Conforme pode ser observado na Figura 5, houve aumento no tempo de resposta em praticamente todos os casos, como confirma a literatura (HOOD; CLAUSEN; WARNER, 2007; JACKISCH; WEILER, 2017).

De acordo com os dados ilustrados na Figura 5, percebe-se que as técnicas resultaram em maior aumento no tempo de resposta para eventos de menor intensidade e maior frequência. Com o TR de 5 anos, tanto os pavimentos permeáveis quanto as trincheiras de infiltração e os jardins de chuva atingiram incremento de 16 minutos em relação à bacia natural; o telhado verde não se mostrou eficiente para retardar o tempo de resposta, apresentando aumento de 2 minutos para os eventos de 5 a 25 anos e nenhum para o TR de 100 anos.

A magnitude da chuva influencia significativamente a resposta da bacia, sendo mais rápida quando o evento tem maior magnitude, mesmo com as técnicas compensatórias. Isso está correlacionado à capacidade de saturação do solo (que é atingida rapidamente) e ao volume de chuva (que aumenta a velocidade do escoamento), tornando, também para esse parâmetro, as técnicas compensatórias mais efetivas quando ocorre precipitação de menor intensidade.

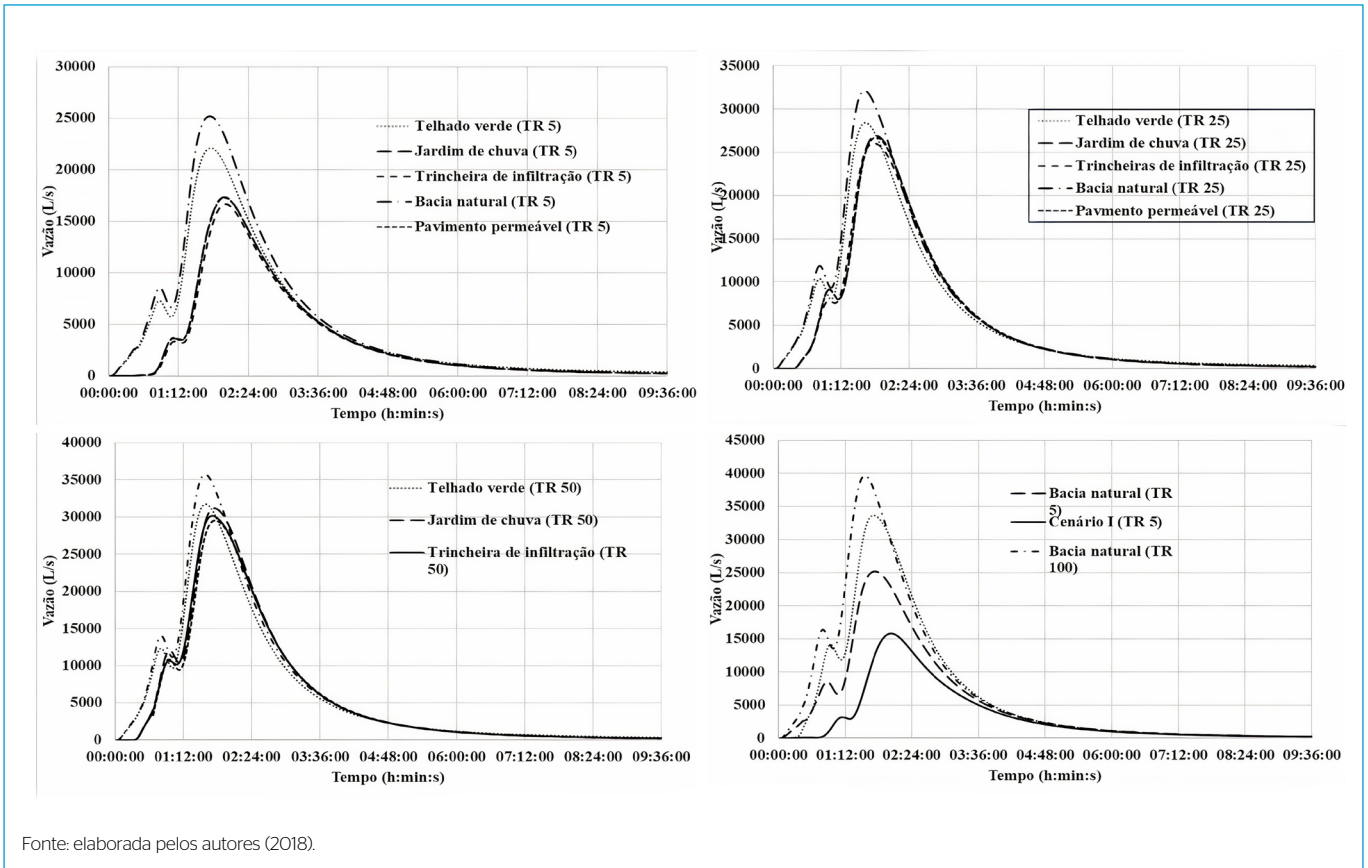
O gráfico ilustrado na Figura 6 mostra os hidrogramas da bacia natural e do Cenário I para eventos de 5 e 100 anos. Verifica-se que para o tempo de retorno de 5 anos o Cenário I apresenta redução da vazão de pico em relação à bacia natural de 9,39 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, equivalente a 37,29%.

O resultado com o tempo de retorno de 100 anos foi menor, 5,99 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, aproximadamente 15%. Apesar disso, a atenuação da vazão de pico com a associação das técnicas compensatórias foi maior, se comparada com todas as outras técnicas agindo isoladamente na bacia para o mesmo evento, o que indica que um desenvolvimento urbano mais sustentável se dá pela associação dessas técnicas.

Além disso, o tempo de resposta da bacia do Cenário I, em relação à bacia natural, aumentou 18 minutos com o TR de 5 anos e 8 minutos com o TR de 100 anos, também ficando superior se comparado a quando as técnicas foram aplicadas isoladamente.

Diversos trabalhos avaliaram o emprego de técnicas compensatórias para a redução da vazão de pico, tanto no âmbito de lote quanto de bacia hidrográfica. Vasconcelos, Miguez e Vazquez (2016), por meio da implantação de pavimento permeável, obtiveram redução da vazão de pico de 64 e 15% utilizando telhados verdes. Martins (2016), por meio de trincheiras de infiltração com precipitações de 2 anos e 100 anos, respectivamente, conseguiram reduzir em 35,50 e 3,81%. Com a aplicação de telhados verdes, pavimentos permeáveis e jardins de chuva, a redução da vazão de pico chegou a 16,37, 14,83 e de 1% (MARTINS, 2016). Tominaga (2013), por meio de jardins de chuva conseguiu um amortecimento da vazão de pico variando de 3 a 20%, já para os pavimentos permeáveis e precipitações menores (2 anos) chegou a reduzir 72% e de 3% para eventos de 100 anos. Aplicando LIDs em uma grande bacia, Zahmatkesh *et al.* (2015) conseguiu uma redução no pico de vazão de 8 a 13%, em média. Li, Li e Li (2016) implementaram jardins de chuva em uma bacia de médio porte na China e verificaram redução do pico de vazão de 12,7 a 44,6%.

Os resultados de outros trabalhos mostram que cada bacia tem um potencial de mitigação diferente, variando muito conforme o padrão de urbanização, o tamanho da bacia, o período de retorno e o tipo de técnica utilizada, porém a implantação dessas técnicas sempre gera bons percentuais de redução de vazão,



Fonte: elaborada pelos autores (2018).

Figura 3 - Hidrograma com os cenários individuais das técnicas compensatórias para o tempo de retorno de 5, 25, 50 e 100 anos.

Tabela 1 - Vazões de pico e tempo de resposta para as simulações realizadas.

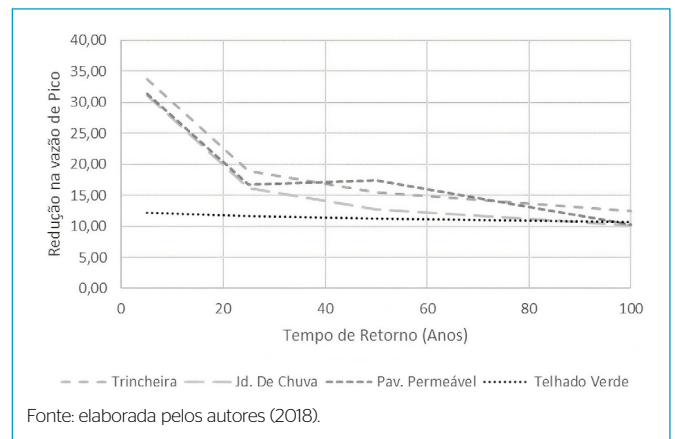
		TR-5	TR-25	TR-50	TR-100	Redução
Bacia Natural	T. de Resp.	1:44	1:36	1:34	1:34	
	Qmax (m³/s)	25,18	32,10	35,76	39,66	
Trincheira	T. de Resp.	2:00	1:46	1:42	1:42	16-8 min
	Qmax (m³/s)	16,69	26,04	30,20	34,71	33,7-12,5%
Jardim de Chuva	T. de Resp.	2:00	1:50	1:44	1:42	16-8 min
	Qmax (m³/s)	17,35	26,92	31,19	35,63	31,1-10,2%
Pavimento permeável	T. de Resp.	2:00	1:50	1:46	1:42	16-8 min
	Qmax (m³/s)	17,28	26,73	29,52	35,59	31,4-10,3%
Telhado Verde	Telhado Verde	1:46	1:38	1:36	1:34	2-0 min
	Qmax (m³/s)	22,11	28,38	31,75	35,44	12,2-10,6%

T. de Resp.: tempo de resposta; Qmax: vazão máxima.
 Fonte: Elaborada pelos autores (2018).

mostrando que o planejamento urbano sustentável é importante para o desenvolvimento dos conglomerados urbanos.

CONCLUSÕES

Ao avaliar os resultados obtidos pelas simulações, fica claro que as técnicas compensatórias aqui estudadas são melhores para tempos de retorno menores (cinco anos). A técnica que apresentou a maior atenuação na vazão de pico



Fonte: elaborada pelos autores (2018).

Figura 4 - Porcentagem de redução na vazão de pico em relação ao período de retorno.

do hidrograma foi a trincheira de infiltração, seguida dos pavimentos permeáveis, jardins de chuva e telhados verdes. Essa ordem muda, se avaliado o tempo de resposta da bacia: os pavimentos permeáveis resultaram em maior e mais uniforme acréscimo no tempo de resposta com os diferentes tempos de retorno, seguido dos jardins de chuva, das trincheiras de infiltração e dos telhados verdes.

Os telhados verdes, sozinhos, apresentam resultados inferiores às demais técnicas, tanto para a redução da vazão de pico quanto para o aumento do

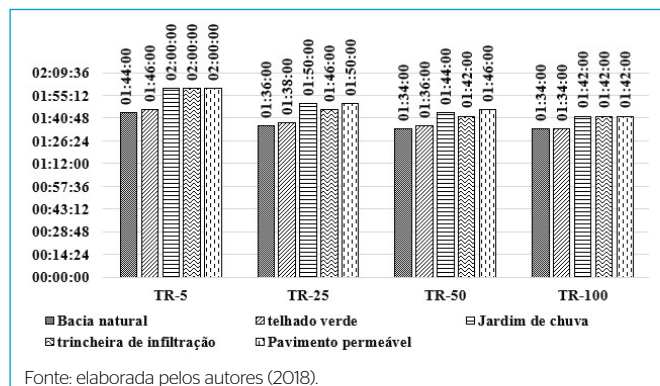


Figura 5 - Tempo de resposta para os cenários com técnicas compensatórias empregadas separadamente para os eventos de 5, 25, 50 e 100 anos.

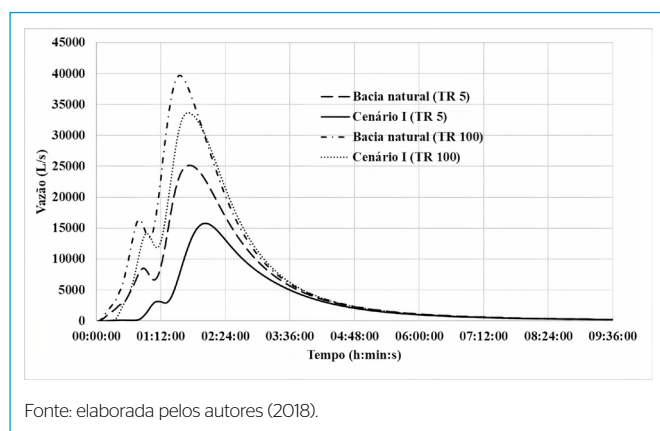


Figura 6 - Hidrogramas com a bacia natural, Cenário I, para os tempos de retorno de 5 e 100 anos.

tempo de resposta da bacia perante um evento chuvoso. Assim, Mentens, Raes e Hermy (2006) recomendam a utilização de telhados verdes com outras técnicas de redução do escoamento e/ou retenção de água, para melhorar a redução do escoamento superficial.

O Cenário I, com todas as técnicas agindo em conjunto na bacia, alcançou os melhores resultados para amortecimento do pico do hidrograma e aumento da resposta da bacia. Portanto, recomenda-se que essas técnicas sejam implantadas dessa forma.

As simulações dos cenários pelo SWMM e as técnicas utilizadas pelo SIG foram satisfatórias e podem ser utilizadas em outros trabalhos semelhantes, sempre considerando-se as particularidades de cada bacia. A metodologia aplicada neste trabalho pode ser usada para adquirir dados em outros estudos, entretanto os resultados apresentados aqui são exclusivos do estudo de caso da Bacia Ribeirão do Santa Rita.

Concluiu-se, por meio da análise dos dados apresentados neste trabalho, que as técnicas compensatórias contribuem significativamente para a compensação do processo de urbanização e para a redução da ocorrência de inundações urbanas. Apesar de essas técnicas terem surgido há um tempo considerável, elas são pouco empregadas e ainda necessitam de incentivos dos poderes público e privado, além da conscientização da população para se consolidar.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Rodrigues, G. C.: Curadoria de Dados, Análise Formal, Investigação, Software, Validação, Visualização, Escrita — Primeira Redação, Escrita — Revisão e Edição. Santini Junior, M. A.: Conceituação, Curadoria de Dados, Metodologia, Administração do Projeto, Recursos, Supervisão, Escrita — Revisão e Edição.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, P.; TUCCI, C.; GOLDENFUM, J. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 5, n. 3, p. 21-29, 2000.
- BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. *Técnicas compensatórias em drenagem urbana*. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2005. 266 p.
- COLLISCHON, W.; DORNELLES, F. *Hidrologia para engenharia e ciências ambientais*. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2013. 350 p.
- FASSMAN, E.A.; BLACKBOURN, S. Urban runoff mitigation by a permeable pavement system over impermeable soils. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 15, n. 6, p. 475-485, jun. 2010. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000238](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000238)
- GUAN, M.; SILLANPÄÄ, N.; KOIVUSALO, H. Assessment of LID practices for restoring pre-development runoff regime in an urbanized catchment in southern Finland. *Water Science and Technology*, v. 71, n. 10, p. 1485-1491, maio 2015. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.129>
- GUO, J.C.; URBONAS, B. Conversion of natural watershed to kinematic wave cascading plane. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 14, n. 8, p. 839-846, ago. 2009. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000045](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000045)
- HOOD, M.J.; CLAUSEN, J.C.; WARNER, G.S. Comparison of Stormwater Lag Times for Low Impact and Traditional Residential Development. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 43, n. 4, p. 1036-1046, ago. 2007. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2007.00085.x>
- JACKISCH, N.; WEILER, M. The hydrologic outcome of a Low Impact Development (LID) site including superposition with streamflow peaks. *Urban Water Journal*, v. 14, n. 2, p. 143-159, out. 2017. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2015.1080735>
- JHA, A.K.; BLOCH, R.; LAMOND, J. *Cities and Flooding: A Guide to Integrated Urban Flood Risk Management for the 21st Century*. Washington, DC.: International Bank for Reconstruction and Development /International Development Association, 2012. 618 p.
- JOHANNESSEN, B.G.; HAMOUZ, V.; GRAGNE, A.S.; MUTHANNA, T.M. The transferability of SWMM model parameters between green roofs with

- similar build-up. *Journal of Hydrology*, v. 569, p. 816-828, fev. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.004>
- KIRPICH, T.P. Time of Concentration of Small Agricultural Watersheds. *Journal of Civil Engineering*, v. 10, n. 6, p. 362, 1940.
- LI, J.; LI, Y.; LI, Y. SWMM-based evaluation of the effect of rain gardens on urbanized areas. *Environmental Earth Sciences*, v. 75, p. 17, 2016. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4807-7>
- LI, Q.; WANG, F.; YU, Y.; HUANG, Z.; LI, M.; GUAN, Y. Comprehensive performance evaluation of LID practices for the sponge city construction: A case study in Guangxi, China. *Journal of Environmental Management*, v. 231, p. 10-20, fev. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.024>
- MARTINS, L.G.B. *Avaliação do potencial de aplicação de técnicas compensatórias em áreas urbanas consolidadas*. 191f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.
- MCCUEN, R.; JOHNSON, P.A.; RAGAN, R.M. *Hydrology*: FHWA-SA-96-067. Washington, D.C.: Federal Highway Administration, 1996.
- MENTENS, J.; RAES, D.; HERMY, M. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning*, v. 77, n. 3, p. 217-226, ago. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.02.010>
- PORTO, R.M. *Hidráulica básica*. 4ª ed. São Carlos: EESC/USP, 2006.
- PROGRAMA DE PESQUISAS EM SANEAMENTO BÁSICO (PROSAB). *Manejo de Águas Pluviais Urbanas*. Rio de Janeiro: Abes, 2009. 396 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, 30 jan. 2015. <https://doi.org/10.1111/jawr.12272>
- ROSSMAN, L.A.; HUBER, W.C. *Storm water management model reference manual*: hydrology. Cincinnati: National Risk Management Laboratory Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency, 2016. v. 1.
- SIN, J.; JUN, C.; ZHU, J.H.; YOO, C. Evaluation of Flood Runoff Reduction Effect of LID (Low Impact Development) based on the Decrease in CN: Case Studies from Gimcheon Pyeonghwa District, Korea. *Procedia Engineering*, v. 70, p. 1531-1538, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.169>
- SOUZA, C.; CRUZ, M.; TUCCI, C. Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto: Planejamento e Tecnologias Verdes para a Sustentabilidade das Águas Urbanas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 17, n. 2, p. 9-18, 2012. <https://doi.org/10.21168/rbrhv17n2.p9-18>
- SVETLANA, D.; RADOVAN, D.; JÁN, D. The Economic Impact of Floods and their Importance in Different Regions of the World with Emphasis on Europe. *Procedia Economics and Finance*, v. 34, p. 649-655, 2015. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(15\)01681-0](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)01681-0)
- THANVISITTHPON, N. Impact of land use transformation and anti-flood infrastructure on flooding in world heritage site and peri-urban area: A case study of Thailand's Ayutthaya province. *Journal of Environmental Management*, v. 247, p. 518-524, out. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.094>
- TOMINAGA, E.N.S. *Urbanização e cheias: medidas de controle na fonte*. 128f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- VASCONCELOS, A.F.; MIGUEZ, M.G.; VAZQUEZ, E.G. Critérios de projeto e benefícios esperados da implantação de técnicas compensatórias em drenagem urbana para controle de escoamentos na fonte, com base em modelagem computacional aplicada a um estudo de caso na zona oeste do Rio de Janeiro. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 21, n. 4, p. 655-662, 13 out. 2016. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522016146469>
- ZAHMATKESH, Z.; BURIAN, S.J.; KARAMOUZ, M.; TAVAKOL-DAVANI, H.; GOHARIAN, E. Low-Impact Development Practices to Mitigate Climate Change Effects on Urban Stormwater Runoff: Case Study of New York City. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 141, n. 1, p. 1-13, jan. 2015. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000770](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000770)
- ZENG, Z.; GUAN, D.; STEENGE, A.E.; XIA, Y.; MENDOZA-TINOCO, D. Flood footprint assessment: a new approach for flood-induced indirect economic impact measurement and post-flood recovery. *Journal of Hydrology*, v. 579, 124204, dez. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124204>
- ZHANG, K.; CHUI, T.F.M.; YANG, Y. Simulating the hydrological performance of low impact development in shallow groundwater via a modified SWMM. *Journal of Hydrology*, v. 566, p. 313-331, nov. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.09.006>
- ZHU, H.; YU, M.; ZHU, J.; LU, H.; CAO, R. Simulation study on effect of permeable pavement on reducing flood risk of urban runoff. *International Journal of Transportation Science and Technology*, v. 8, n. 4, p. 373-382, dez. 2019b. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2018.12.001>
- ZHU, Z.; CHEN, Z.; CHEN, X.; YU, G. An assessment of the hydrologic effectiveness of low impact development (LID) practices for managing runoff with different objectives. *Journal of Environmental Management*, v. 231, p. 504-514, fev. 2019a. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.046>