

Uso de técnicas de *low impact development* no controle de impactos hidrológicos

Use of low impact development techniques to control hydrological impacts

Franciele Zanandrea^{1*} , André Luiz Lopes da Silveira¹ 

RESUMO

O crescimento desordenado traz diversas implicações na drenagem das bacias urbanas, principalmente no referente a alterações no escoamento pluvial. A bacia Mãe d'Água em Viamão (RS), no Brasil, retrata esse problema. Assim, levanta-se a seguinte questão: existem soluções de *Low Impact Development* (LID) compatíveis com a mitigação de impactos hidrológicos em situações de ocupação urbana em consolidação? Para isso, foram realizadas simulações de três cenários de urbanização: o atual, o futuro e o possível. O cenário atual representa o sistema atual; o futuro é representado pela concretização do Plano Diretor de Viamão, com taxa de permeabilidade de 10% nos lotes; e o possível foi apresentado por meio da inserção das medidas de LID (*vegetative swales* e pavimentos permeáveis) e taxas de permeabilidade de lote do cenário futuro. As simulações foram realizadas no modelo *Storm Water Management Model* (SWMM) para chuvas de projeto com tempo de retorno de 2, 5, 10 e 20 anos. O cenário que se apresentou mais crítico quanto a problemas de drenagem foi o futuro. No possível, mesmo com medidas mitigadoras, ainda existem volumes extravasados em alguns pontos, porém as LID reduziram o volume escoado na bacia em até 14% para o tempo de retorno de 2 anos. As medidas de LID apresentaram melhor desempenho para chuvas com menores tempos de retorno. A melhor eficiência na redução dos volumes escoados foi através da manutenção de taxas de permeabilidade do solo. Porém, as LID auxiliam na redução do escoamento superficial, sendo uma alternativa viável para áreas que já estão consolidadas.

Palavras-chave: drenagem urbana; modelagem hidrológica; infraestruturas sustentáveis.

ABSTRACT

The disordered urban growth has several implications for the drainage of urban watersheds, especially regarding changes in runoff. The Mãe d'água watershed in Viamão/RS in Brazil portrays well this problem. Therefore, the following issue arises: are there LID solutions compatible with the mitigation of hydrological impacts in situations of urbanization under consolidation? In this respect, simulations were performed for three different urbanization scenarios, being: the current, the future, and the possible scenarios. The current scenario represents the current system. The future scenario is represented by the implementation of the current Master Plan of Viamão, with permeability rate of 10% in the lots. The possible scenario was presented through the insertion of LID measurements (*vegetative swales* and permeable pavements) and with the lot permeability rates of the future scenario. The scenario simulations were performed in the SWMM model for design rainfalls with a return period of 2, 5, 10 and 20 years. The most critical scenario regarding drainage problems was the future scenario. In the possible scenario, even with mitigating measures, there are still flood volumes in some points, but the LIDs reduced the volume flowed in the watershed by up to 14% for the RP of 2 years. The LID measurements showed best performance for rainfalls with lower return period. The best efficiency in the reduction of runoff volumes was through the maintenance of soil permeability rates. However, LIDs help to reduce surface runoff, being a viable alternative for areas that are already consolidated.

Keywords: urban drainage; hydrologic model; sustainable infrastructures.

INTRODUÇÃO

O crescimento urbano desordenado traz diversas implicações na drenagem das bacias urbanas, principalmente no que se refere a alterações no escoamento. Esses problemas são gerados principalmente pela forma como a ocupação se desenvolve — muitas vezes sem planejamento, sem controle do uso do solo, com ocupação de áreas de risco de inundações e escorregamentos — e pelo

sistema de saneamento inadequado, tanto em termos de projeto como de conceitos.

O ciclo hidrológico, em condições naturais, pode ser considerado um sistema em equilíbrio dinâmico. Contudo, o processo de urbanização, pautado na intervenção antrópica sem planejamento, trouxe grandes complicações para a questão de águas urbanas, trazendo consequências à população e ao meio. A questão da drenagem urbana tornou-se bastante complexa no atual contexto da demanda ambiental crescente,

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Porto Alegre (RS), Brasil.

*Autor correspondente: franciele.zanan@gmail.com

Recebido: 05/12/2017 - Aceito: 17/09/2018 - Reg. ABES: 188729

pois envolve, além dos ambientais, aspectos sanitários, paisagísticos, sociais e técnicos (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2005; MARSALEK *et al.*, 2007).

As alternativas para minimização do problema devem considerar medidas institucionais (não estruturais) e também estruturais, sendo possível a prevenção em áreas não ocupadas por meio de um planejamento adequado. Porém, atualmente existem muitos locais de ocupação densificada, resultando em diversos problemas hidrológicos que devem ser mitigados.

De acordo com Tucci (2008), o planejamento urbano acontece prioritariamente para a região ocupada pela população de rendas média e alta. Nas áreas de ocupação ilegal, observam-se processos de invasão, com construções frequentemente ocorrendo sobre áreas de risco, como de inundações e de escorregamentos, com mortes durante o período chuvoso. Assim, trata-se do conceito de cidades formal e informal, e a gestão urbana geralmente atinge somente a primeira.

No entanto, muitas vezes, na tentativa de formalização dessas áreas, mesmo com a instituição de ferramentas de planejamento, os conceitos de urbanização ainda visam à ocupação densificada, não priorizando conceitos sustentáveis para a gestão adequada das cidades. Essa linha de pensamento é ainda muito comum em alguns países, incluindo o Brasil.

A bacia hidrográfica Mãe d'Água, localizada no município de Viamão, no Rio Grande do Sul, retrata bem essa realidade. Essa bacia já vem sofrendo com problemas de assoreamento da rede de drenagem e consequentes alagamentos. Além de sua ocupação ocorrer em áreas de risco por populações de baixa renda, o município permite a impermeabilização urbana por meio do estabelecimento de baixas taxas de permeabilidade dos lotes, em uma tentativa de ordenação da região pelo plano diretor municipal.

Uma eficiente ferramenta que vem sendo utilizada para aproximar a drenagem urbana ao desenvolvimento sustentável é o conceito de *low impact development* (LID). O LID apresenta o planejamento de espaços urbanos por meio da conservação de processos hidrológicos, redirecionando as águas pluviais para seu aproveitamento, sua infiltração e sua evaporação (USDOD, 2004), mitigando os impactos provenientes da urbanização desordenada.

Modelos especializados, como o *storm water management model* (SWMM), vêm sendo utilizados para avaliar o efeito integrado de LID em bacias urbanas, apresentando bons resultados (BOSLEY, 2008; LEE *et al.*, 2012; QIN; LI; FU, 2013; SUN *et al.*, 2014; ROSA; CLAUSEN; DIETZ, 2015; VINAGRE; LIMA; LIMA JUNIOR, 2015). De acordo com Bosley (2008), a modelagem hidrológica espacialmente distribuída é o melhor método para comparar a resposta da inserção dos LID e da drenagem convencional. Porém, segundo o autor, ainda existem muitas dificuldades nas simulações dos LID, pois requer-se conhecimento detalhado e avaliação dos efeitos hidrológicos em microescala distribuída, e os modelos não representam de forma

otimizada todos os processos hidrológicos considerados importantes na avaliação de LID.

Lee *et al.* (2012) avaliaram o efeito das LID (*vegetative swales*, trincheiras de infiltração, *wetlands* etc.) na redução do escoamento superficial no distrito de AsanTanjung na Coreia do Sul, que possui precipitação total anual similar à do Rio Grande do Sul. Os resultados mostraram uma redução de 7 a 15% da vazão de pico, para 50 e 100 anos de tempo de retorno, respectivamente. Qin, Li e Fu (2013) alcançaram resultados satisfatórios na calibração do modelo hidrológico SWMM, encontrando um erro relativo de 6,7% na vazão de pico e obtendo maiores desempenhos dos pavimentos permeáveis sobre outras LID nas simulações. O erro relativo dos resultados de vazões de pico obtidos por Lee *et al.* (2012) foi inferior a 14%. Rosa, Clausen e Dietz (2015) encontraram valores de coeficiente de Nash-Sutcliffe maiores que 0,8 na calibração de bacias com LID na calibração do volume escoado superficialmente e das vazões de pico.

Essa questão ainda é pouco explorada no Brasil, porém alguns trabalhos vêm apresentando o uso de medidas de baixo impacto, como LID, na resolução de problemas de ordem hidrológicas em áreas urbanas em outros países (LEE *et al.*, 2012; QIN; LI; FU, 2013; SUN *et al.*, 2014). Com isso, avaliou-se, neste trabalho, a aplicabilidade de medidas estruturais de LID (*vegetative swales* e pavimentos permeáveis) no controle de impactos hidrológicos da expansão urbana em uma bacia urbana, por meio do uso do modelo especializado SWMM.

METODOLOGIA

A área de estudo compreende a sub-bacia do Arroio Central, pertencente à bacia hidrográfica Mãe d'Água, localizada na região metropolitana de Porto Alegre, no estado do Rio Grande do Sul, entre os municípios de Porto Alegre e Viamão (Figura 1). Essa área constitui uma das nascentes da bacia do Arroio Dilúvio, que corta grande parte do perímetro urbano do município de Porto Alegre.

A bacia Mãe d'Água possui topografia levemente ondulada, cuja formação geológica é composta de granito. A área encontra-se na região de clima subtropical úmido, de acordo com a classificação de Köppen, com temperatura média anual entre 14 e 20°C, e precipitação total anual variando de 1.200 a 2.000 mm bem distribuídos ao longo do ano (POLETO; MERTEN, 2007).

O tipo de solo predominante na área da bacia é areno-argiloso, tipo Podzólico vermelho amarelo de substrato granodiorito e gnaiss, formado por solos minerais rasos com muito material de rocha em decomposição, ocorrendo em encostas de alto declive associado a afloramentos rochosos (RANGEL, 2008). Solos argilosos e em regiões de alta declividade favorecem o aumento do volume e da velocidade do escoamento superficial, sendo potencializado, nesse local, pelas altas precipitações que ocorrem na região.

A bacia é composta de quatro afluentes principais, abrangendo uma área de 3,34 km². As altitudes variam de 290 metros nos altos do morro Santana a 40 metros nas regiões mais baixas.

A sub-bacia do Arroio Central possui 0,91 km² e apresenta grande concentração de problemas quanto à ocupação urbana, com crescimento em direção às nascentes. A declividade média do rio principal é de 5,97%, e o tempo de concentração é de aproximadamente 30 minutos, estimados a partir de geoprocessamento. A bacia central possui aproximadamente 60% de sua área impermeabilizada, de acordo com imagens de satélite. Essa sub-bacia apresenta as mesmas características da bacia Mãe d'Água, em que está contida.

A bacia Mãe d'água possui estimativa de 18.246 habitantes e 5.907 domicílios, sendo a renda média dos responsáveis pelos domicílios de R\$ 997, de acordo com o Censo de 2010 (IBGE, 2010). O processo de urbanização na área da bacia remonta à década de 1950, com a formação dos primeiros loteamentos, acentuando-se a partir dos anos 1970, sendo a região habitada por pessoas que não tinham condições de ocupar os lotes urbanizados na cidade. A ocupação da área, onde

o traçado das vias não seguiu nenhum tipo de planejamento, ocorreu de maneira desordenada. A ocupação ocorreu até mesmo em áreas de risco, como nas encostas do morro Santana e às margens dos cursos de água, desmatando a vegetação natural (HÜFFNER; MENDES, 2013), o que potencializa os problemas de inundações e alagamentos na bacia. Os bairros nela contidos não apresentam sistemas públicos de drenagem urbana e saneamento.

A área pertence ao perímetro urbano de Viamão, localizado na Macrozona Urbana de Consolidação, segundo o Plano Diretor do município. A taxa de permeabilidade exigida por lote nessa macrozona é de 10% do terreno, definido como o percentual expresso pela relação entre as áreas do lote sem pavimentação impermeável e sem construção no subsolo e total do terreno (VIAMÃO, 2013), o que permite o aumento da impermeabilização da bacia.

Definição dos cenários de urbanização

As simulações foram realizadas para três cenários de urbanização: o atual, o futuro e o possível. O cenário atual é representado pelo sistema



Figura 1 - Localização da sub-bacia do Arroio Central da bacia hidrográfica Mãe d'Água.

atual de acordo com levantamento realizado na bacia, o mapa de uso do solo gerado a partir da imagem de satélite Quickbird para o ano de 2014, com resolução de 0,5 metros, sem nenhuma intervenção e com as taxas de permeabilidade atuais, totalizando 60% de área impermeável na bacia.

O cenário futuro é representado pela concretização do Plano Diretor de Viamão (VIAMÃO, 2013), considerando a taxa de permeabilidade de 10% dos lotes, totalizando uma área impermeável na bacia de aproximadamente 85%. Nele, estimou-se a expansão urbana, considerando-se critérios do plano diretor do município de Viamão, no qual é estabelecido que a região se encontra na Macrozona Urbana de Consolidação. Essa região, segundo a Lei Municipal nº 4.154/2013 (VIAMÃO, 2013), é uma zona prioritária para investimentos em infraestrutura urbana, como pavimentação de ruas, a fim de consolidar essas áreas. Com base nesses critérios, foi considerada a pavimentação de todas as vias, 10% de permeabilidade de todos os lotes e o avanço da ocupação nas áreas de vegetação, totalizando 90% de área impermeável na bacia.

Já o cenário possível é apresentado pela inserção das intervenções propostas, sendo elas pavimentos permeáveis e *vegetative swale*, que é aqui entendida como uma vala de infiltração de grande largura — na prática, uma depressão vegetada no terreno natural ou escavada, capaz de acumular, em sua superfície, aproximadamente 1 m de lâmina da água temporariamente. As vias dos pavimentos permeáveis foram definidas de acordo com a declividade e por não serem rotas de tráfego intenso e de veículos pesados. Propôs-se a localização das *vegetative swales* nos locais onde atualmente existem espaços vegetados na bacia. Foram escolhidas essas infraestruturas considerando-se as características urbanísticas da área de estudo, como a falta de espaço para estruturas de manejo pluvial, população de baixa renda e áreas públicas ainda disponíveis. Nesse cenário, foram propostas intervenções de LID supondo a ocupação do cenário futuro, referente à implantação do Plano Diretor de Viamão. No entanto, as sub-bacias 1 e 2 (Figura 2) não foram ocupadas, mantendo a área permeável de seu cenário atual, totalizando 80% de área impermeável na bacia. Essas sub-bacias apresentam maiores declividades e são onde se encontram as nascentes do rio principal, por isso, deve-se evitar a ocupação nessas áreas, mantendo a preservação do local.

Na simulação atual, pode ser verificado se o sistema existente garante o adequado escoamento das águas pluviais. Os resultados obtidos para os cenários simulados permitiram uma evolução comparativa, verificando os efeitos obtidos com as medidas propostas.

Calibração e validação

Os dados de chuva utilizados na calibração e validação são provenientes de uma estação pluviométrica localizada no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) (Figura 3). Essa é a estação mais próxima à área de estudo,

com uma série de 5 anos, de dezembro de 2003 a abril de 2008, com dados de 15 em 15 minutos.

Para calibração, foram utilizados quatro eventos de dados de cota medidos próximos à foz do Arroio Central antes da confluência (Figura 3), onde existe um estreitamento da seção do canal. Os dados são referentes ao ano de 2005, e a seção possui uma curva-chave já pré-estabelecida. Cada evento foi utilizado independentemente para ajustar os parâmetros da calibração.

Foi utilizado o método de tentativa e erro na calibração, a fim de minimizar a diferença entre as vazões calculadas e as medidas em campo. Buscou-se a calibração dos parâmetros dos quais havia maior incerteza quanto aos seus valores. Assim, o modelo foi calibrado com as seguintes variáveis: largura das sub-bacias, coeficiente de rugosidade de Manning (n) e parâmetros de infiltração. No estudo realizado por Rosa, Clausen e Dietz (2015), o modelo SWMM demonstrou maior sensibilidade aos últimos, principalmente pelo déficit de umidade do solo inicial, e ao segundo tanto para bacias sem infraestruturas de LID como para aquelas com inserções dessas infraestruturas.

Supôs-se que os parâmetros de infiltração do modelo de Horton não variam espacialmente, nesse caso considerando as características da bacia, então se podem definir valores iguais para todas as sub-bacias. Já a largura e o n de Manning para áreas permeáveis, impermeáveis e para os trechos são variáveis espacialmente, sendo diferentes para cada sub-bacia ou trecho. Dessa forma, para a calibração manual desses parâmetros, foram utilizados coeficientes ponderadores, definidos a partir dos resultados da primeira tentativa de calibração, pelos quais seus valores iniciais foram multiplicados. Os resultados obtidos para esses coeficientes são iguais para todas as sub-bacias.

Para avaliar o ajuste dos hidrogramas na calibração do modelo, optou-se pelo erro dos volumes (ΔV) por meio da relação entre os

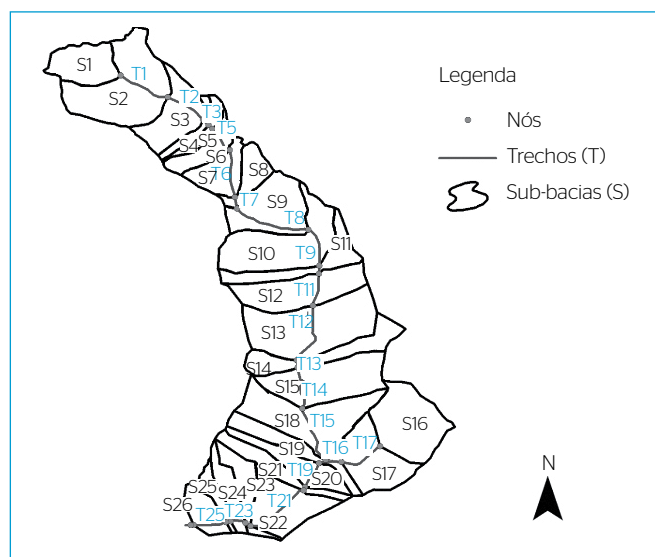


Figura 2 – Discretização da sub-bacia do Arroio Central Mãe d'água.

volumes calculados e observados dada pela Equação 1 e também pela raiz do erro quadrático médio (RMSE) dada pela Equação 2:

$$\Delta V(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{cal(i)} - \sum_{i=1}^n Q_{obs(i)}}{\sum_{i=1}^n Q_{obs(i)}} * 100 \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{cal(i)} - Q_{obs(i)})^2}{n}} \quad (2)$$

Avaliou-se também o coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (COE), calculado por meio da Equação 3:

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs(i)} - Q_{cal(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs(i)} - \overline{Q_{med}})^2} \quad (3)$$

Em que:

- Q_{obs} = vazão observada no fim do intervalo de tempo i ($m^3 \cdot s^{-1}$);
- Q_{cal} = vazão calculada no fim do intervalo de tempo i ($m^3 \cdot s^{-1}$);
- Q_{med} = vazão média do evento observado no período de simulação;
- n = número de intervalos de tempo do evento analisado.

O RMSE e o COE procuram avaliar a qualidade do ajuste, sendo mais sensíveis aos erros nas vazões máximas (TUCCI, 1998).

A validação do modelo avaliou a eficiência do SWMM em simular hidrogramas reais para a bacia de estudo. Para validação, foram selecionados três eventos da série de vazões, excluídos da calibração.

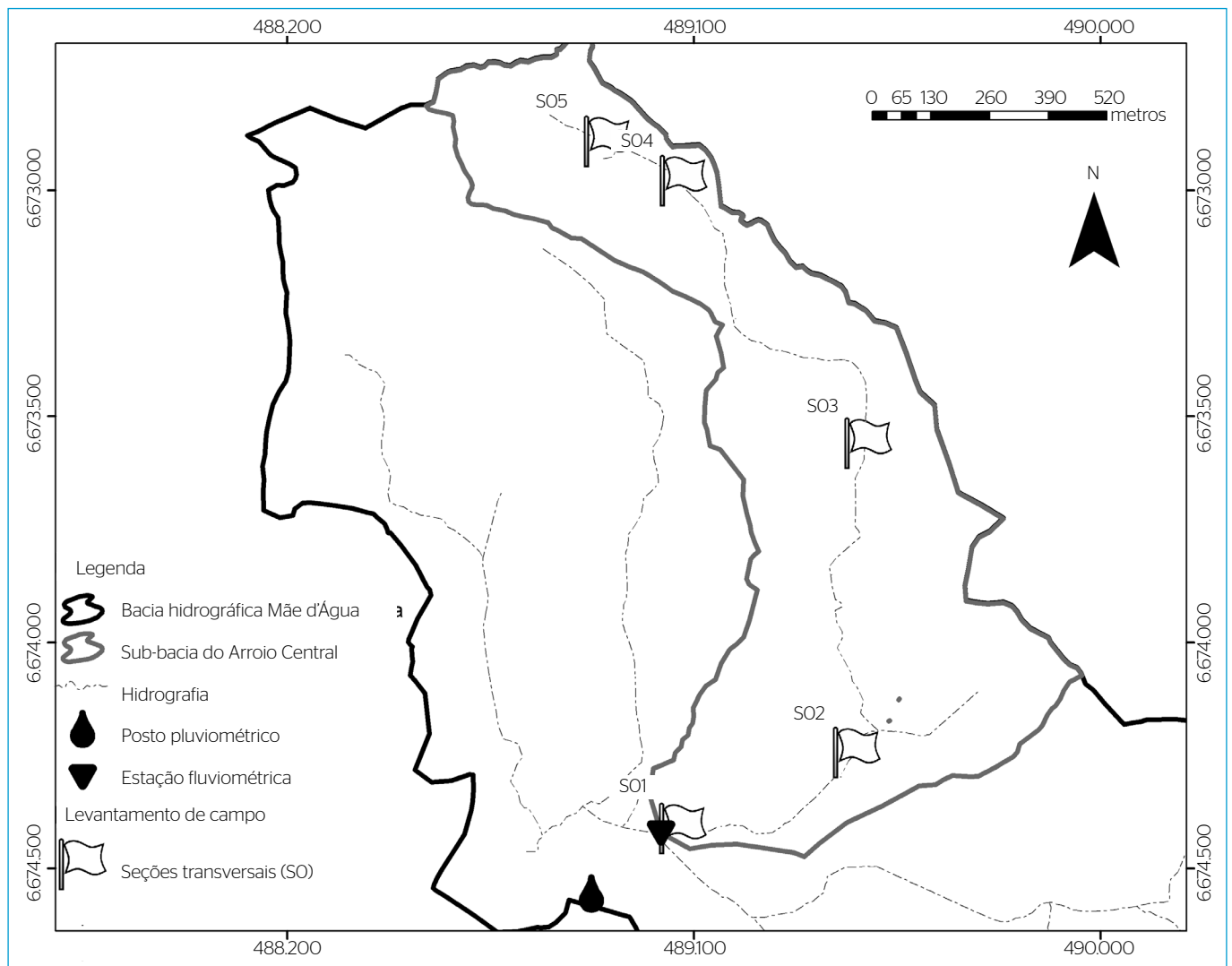


Figura 3 - Localização das estações de medições na sub-bacia do Arroio Central.

Utilizou-se a mediana dos valores dos parâmetros definidos durante a calibração, pois esta se demonstrou mais adequada que a média.

Simulações dos cenários de urbanização

Neste trabalho, as simulações hidrológicas e hidráulicas foram realizadas por meio do modelo SWMM. Na simulação da transformação chuva-vazão, o modelo trata cada sub-bacia como um reservatório não linear, incluindo evaporação, armazenamento em depressão, infiltração e escoamento superficial. As perdas por infiltração, nesta pesquisa, foram estimadas pela equação de Horton, a qual vem sendo demonstrada como preferênci na literatura no uso do SWMM (LEE *et al.*, 2012; QIN; LI; FU, 2013).

O processo de transformação chuva-vazão é representado pela combinação das equações de continuidade e de Manning, como demonstrado na Equação 4.

$$\frac{dh}{dt} = i_{ef} - \frac{W}{A.n} (h - d_p)^{\frac{5}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Em que:

A = área da superfície da bacia;

S = declividade da bacia;

i_{ef} = precipitação efetiva;

n = coeficiente de Manning;

d_p = altura correspondente ao armazenamento por depressão;

h = profundidade da água no reservatório;

t = tempo;

W = largura representativa.

O transporte de água em um trecho está regido pelas equações de conservação de massa e da quantidade de movimento. O SWMM permite a escolha do nível de sofisticação para a resolução dessas equações, por intermédio de diferentes modelos hidráulicos. Para este trabalho, utilizou-se o Modelo da Onda Dinâmica (hidrodinâmico), que resolve as equações de Saint Venant completas unidimensionais.

Foram utilizadas 4 chuvas de projeto na simulação dos cenários, com tempos de retorno (TR) de 2, 5, 10 e 20 anos, estimadas a partir da relação intensidade-duração-frequência (IDF) estabelecida para o posto pluviométrico localizado próximo à bacia, nas áreas adjacentes ao IPH/UFRGS (GOLDENFUM; CAMAÑO; SILVESTRINI, 1990).

A duração da precipitação adotada foi estimada por meio de simulações realizadas com hietogramas de projeto de duração de 1, 3, 5, 6 e 10 horas, com tempo de retorno de 20 anos. A intensidade média de cada um desses hietogramas foi testada como uma chuva constante no modelo calibrado. Com isso, calculou-se o tempo da curva S, ou seja, o tempo desde o início da chuva até a estabilização da vazão. Então, definiu-se o tempo de duração mais apropriado para a bacia quando o tempo de duração do hietograma fosse aproximadamente igual ao da curva S representativo de todas as durações.

Encontrou-se, assim, o valor de cinco horas, que foi utilizado como a duração de todas as chuvas de projeto, permitindo que toda a precipitação contribuísse no hidrograma do exutório da bacia. Metodologia similar, para estimar a duração da chuva de projeto, foi utilizada por Kang *et al.* (2013) com resultados análogos, ou seja, foi obtida duração crítica bastante superior ao tempo de concentração da bacia. A discretização temporal foi de cinco minutos, sendo desagregada pelo método dos blocos alternados. O total precipitado para cada tempo de retorno (2, 5, 10 e 20 anos) foi de 46,9; 56,2; 64,4; e 73,7 mm respectivamente.

Para discretização da bacia, foram consideradas as variações da topografia, as linhas de fluxo e a homogeneidade das características urbanas e de uso e ocupação do solo. Na Figura 2, estão apresentadas as 26 sub-bacias discretizadas, os 26 nós definidos como as junções que ligam os trechos e recebem a contribuição das sub-bacias e os 26 trechos de drenagem. Dados referentes à discretização da bacia, à declividade, às áreas de contribuição e aos perímetros das sub-bacias foram calculados pela manipulação de imagens e do modelo digital de terreno (MDT) gerado a partir das curvas de nível de 1 em 1 m do município (HASENACK; WEBER; LUCATELLI, 2010) com o uso do *software* de sistema de informações geográficas ArcGIS®.

Uma estimativa inicial usada para as larguras das sub-bacias foi pela largura do retângulo equivalente, que relaciona o perímetro e a área da bacia. Posteriormente, esse parâmetro foi calibrado. A altura do armazenamento em depressões e o coeficiente de rugosidade foram definidos de acordo com faixas de valores sugeridas na literatura (AKAN, 1993; ROSSMAN, 2008), observadas as características de campo. As características definidas para cada componente do modelo seguem apresentadas na Tabela 1.

Foram realizados levantamentos em campo para averiguação e georreferenciamento das estruturas de drenagem urbana existentes. Nesses levantamentos, determinaram-se o comprimento e a largura ou o diâmetro de pontes e canalizações. Também foi realizado o detalhamento de cinco seções transversais do curso d'água principal (Figura 3), tendo sua localização definida com base nas mudanças da morfologia do canal. O levantamento topográfico foi realizado com o uso de uma estação total. O comprimento e a declividade dos canais foram calculados a partir do MDT. O coeficiente de rugosidade de Manning foi definido conforme as características de campo.

Os nós foram representados pelos encontros entre canais, locais de mudança de seção ou início e fim de canalização e pontes. As cotas e coordenadas desses nós foram obtidas de acordo com MDT e levantamento em campo.

A versão atual do SWMM 5.1.77 fornece um módulo de controle de LID fundamentada em processos fisicamente embasados e pode simular explicitamente o desempenho hidrológico dessas técnicas. As componentes desse módulo variam de acordo com cada tipo de LID. A modelagem é simplificada em escala de lote ou sub-bacia para um evento único e contínuo com degradação do desempenho ao longo

do tempo. Um esquema do balanço utilizado pelo modelo é apresentado de maneira geral na Figura 4.

Ressalta-se que as *vegetative swales* apresentam apenas a zona denominada “superfície” e os pavimentos permeáveis às zonas “superfície” e “armazenamento”. O escoamento superficial de saída da LID é função da profundidade da água na superfície e é calculado por meio da fórmula de Manning. A infiltração nas LID é calculada por meio do modelo de Green-Ampt com base nos parâmetros de entrada (Tabela 2). O valor de profundidade usado na equação de infiltração de Green-Ampt é a distância média entre a superfície da água e a do solo sobre a seção transversal trapezoidal da *swale*.

As infraestruturas de controle foram alocadas nas sub-bacias selecionadas na quantidade definida de acordo com o espaço disponível observado em campo e em imagem de satélite. A localização e o dimensionamento das infraestruturas de LID seguem apresentados na Tabela 2. As LID recebem a contribuição do total da área impermeável

da sub-bacia em que está localizada, funcionando em paralelo, como estabelecido pelo modelo SWMM (ROSSMAN, 2008).

Os parâmetros do pavimento permeável inseridos no modelo foram retirados de Korkealaakso *et al.* (2014), Urbonas e Stahre (1993), Araújo, Tucci e Goldenfum (2000) e Acioli *et al.* (2003), e os dois últimos

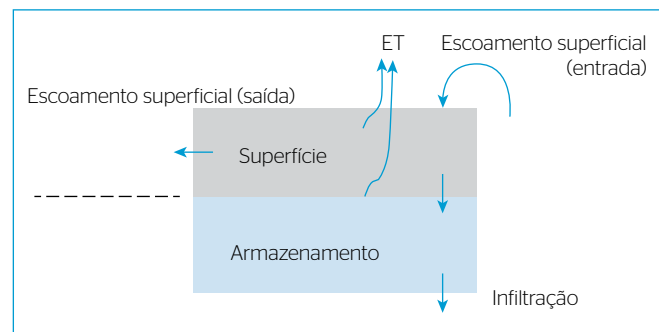


Figura 4 - Esquema do balanço do *low impact development* utilizado no *storm water management model*.

Tabela 1 - Dados do *storm water management model* para cada sub-bacia e trecho do modelo.

Sub-bacia	Área (ha)	Largura inicial (m)	Declividade (%)	Área impermeável (%)	Trecho	Comprimento do trecho (m)
S1	2,96	122,0	36,5	0,0	T1	187
S2	7,48	128,1	36,4	0,1	T2	148
S3	3,52	65,9	36,0	25,9	T3	30
S4	0,78	22,8	42,5	35,8	T4	20
S5	0,92	25,2	37,6	46,1	T5	100
S6	1,86	55,5	29,7	37,1	T6	168
S7	2,35	82,9	23,6	52,6	T7	40
S8	1,71	56,0	9,6	79,6	T8	270
S9	4,49	150,2	15,1	80,5	T9	140
S10	6,21	107,9	11,4	86,9	T10	30
S11	2,67	41,1	9,8	89,7	T11	115
S12	4,66	93,0	13,8	72,5	T12	230
S13	7,64	159,1	18,0	67,7	T13	20
S14	3,18	50,5	11,3	87,5	T14	165
S15	5,48	117,4	13,8	80,0	T15	210
S16	5,42	188,9	11,5	84,8	T16	60
S17	4,09	121,3	17,0	72,3	T17	160
S18	6,19	97,8	13,0	79,0	T18	25
S19	2,51	39,2	8,7	80,1	T19	100
S20	2,53	52,0	12,4	77,5	T20	12
S21	2,06	38,9	10,8	86,1	T21	235
S22	4,01	104,4	15,3	52,0	T22	20
S23	1,95	41,8	12,4	71,6	T23	60
S24	1,62	47,8	13,4	72,6	T24	10
S25	0,91	32,2	14,9	72,1	T25	120
S26	1,75	86,3	6,2	44,2	T26	20

trabalhos instalaram pavimentos permeáveis próximos à área de estudo, onde realizaram medições em campo, demonstrando eficiência para o tipo de solo e a profundidade do lençol freático do local.

O volume do reservatório do pavimento permeável e a profundidade média de armazenamento da *vegetative swale* foram estimados por meio da metodologia apresentada por Silveira e Goldenfum (2007). Utilizaram-se os parâmetros da mesma IDF do posto pluviométrico localizado próximo à bacia, com tempo de retorno de 10 anos, alcançando o valor de 350 mm para altura do reservatório e 1.000 mm para profundidade da área vegetada, que é escavada e apresenta declividade das paredes de 5%.

As declividades das LID foram definidas de acordo com a do terreno. Estudos tratam da eficiência de LID, como pavimento permeável em declividade de até 10% (HASELBACH; VALAVALA; MONTES, 2006) e de até 20% para faixas vegetadas (SCHUELER, 1987). Os parâmetros utilizados no modelo SWMM para as infraestruturas de LID encontram-se na Tabela 3.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observa-se que os valores de infiltração que se adaptaram melhor à maior parte dos eventos são referentes ao tipo de solo arenoargiloso, conforme

Tabela 2 - Localização e tamanho das infraestruturas de low impact development (LID).

Sub-bacia	LID	Área de LID (m ²)	Quantidade	% área de LID
S7	<i>Vegetative swale</i>	2.550	2	10,9
S8	<i>Vegetative swale</i>	2.510	1	14,7
S9	<i>Vegetative swale</i>	2.740	1	10,9
	Pavimento permeável	2.145	1	
S10	<i>Vegetative swale</i>	1.960	2	4,8
	Pavimento permeável	1.000	1	
S12	<i>Vegetative swale</i>	2.470	2	6,8
	Pavimento permeável	720	1	
S13	<i>Vegetative swale</i>	3.890	2	7,1
	Pavimento permeável	1.530	1	
S15	Pavimento permeável	1.220	1	2,2
S18	<i>Vegetative swale</i>	2.080	2	5,5
	Pavimento permeável	1.300	1	
S19	Pavimento permeável	633	1	2,5
S17	<i>Vegetative swale</i>	1.460	2	3,6
S20	<i>Vegetative swale</i>	1.015	2	6,1
	Pavimento permeável	520	1	
S21	<i>Vegetative swale</i>	635	2	5,0
	Pavimento permeável	400	1	
S22	<i>Vegetative swale</i>	5.070	2	17,1
	Pavimento permeável	1.800	1	
S26	<i>Vegetative swale</i>	1.070	2	6,1

estabelecido por Terstriep e Stall (1974), condizente com o tipo de solo da região. A mediana dos parâmetros de infiltração de Horton definidos na calibração foram: taxa de infiltração máxima de 130 mm.h⁻¹; taxa de infiltração mínima de 7 mm.h⁻¹; constante de decaimento de 2 (1.h⁻¹).

Os valores de largura que melhor se adaptaram ao modelo para os eventos foram os estabelecidos inicialmente. Esse fato demonstrou eficiência do método utilizado na estimativa das larguras das sub-bacias. Quanto aos valores de Manning, os eventos comportaram-se de maneira diferenciada entre eles, porém todos os valores encontrados foram iguais ou maiores aos estabelecidos inicialmente de acordo com o tipo de material ou fundo. A mediana do coeficiente, usado no estabelecimento dos valores de Manning, definido na calibração foi de 2 vezes o valor inicial estabelecido de acordo com o tipo de material.

Graficamente, na Figura 5, pode-se observar que a calibração apresentou comportamento similar ao observado no evento 1. Os maiores

Tabela 3 - Parâmetros do storm water management model para as infraestruturas de low impact development.

Parâmetros	Pavimentos permeáveis	Vegetative swales
Camada de superfície		
Profundidade de armazenamento (mm)	3	200
Cobertura vegetal (fração)	n.a.	0,2
n Manning	0,05	0,80 (McCuen,1998)
Declividade (%)	8	8
Declividade das paredes laterais (ba ^{1*})	n.a.	5
Revestimento		
Espessura (mm)	100	n.a.
Índice de vazios (vazios.sólidos ¹)	0,2	n.a.
Superfície impermeável (fração)	0	n.a.
Permeabilidade (mm.h ⁻¹)	540	n.a.
Fator de colmatação	180	n.a.
Solo		
Espessura (mm)	25	n.a.
Porosidade (fração de volume)	0,46	n.a.
Capacidade de campo (fração de volume)	0,2	n.a.
Ponto de murcha (fração de volume)	0,1	n.a.
Condutividade hidráulica (mm.h ⁻¹)	25	n.a.
Sucção matricial (mm)	3,5	n.a.
Armazenamento da camada reservatório		
Altura (mm)	350	n.a.
Índice de vazios (vazios.sólidos ¹)	0,6	n.a.
Taxa de infiltração (mm.h ⁻¹)	7	n.a.
Fator de colmatação	180	n.a.

n.a.: não se aplica; *ba¹=base.altura¹.

erros de volume e de COE encontrados foram no evento 3. Já os outros eventos apresentaram erros de volume aceitáveis. Apenas os eventos 1 e 4 apresentaram valores de COE dentro do limite considerado bom, próximos aos encontrados por Rosa, Clausen e Dietz (2015) (Tabela 4).

Os maiores problemas da simulação apresentaram-se na estimativa dos valores reais de vazão: visto que a bacia possui vazões baixas, os RMSE encontrados para os eventos representam dificuldade em relação a essa estimativa (Tabela 3). Porém, considerando os objetivos do presente trabalho, os volumes dos hidrogramas são de maior interesse, tornando a calibração, a qual foi realizada para poucos eventos por conta da escassez de dados medidos nessa bacia, satisfatória. Bacias urbanas pequenas são pouco monitoradas no Brasil.

Os erros encontrados na validação foram maiores que na calibração, em que os eventos 2 e 7 apresentaram seus volumes superestimados pelo modelo, enquanto o 6 teve seu volume subestimado (Tabela 5). No evento 2, observa-se translação temporal de 45 minutos

nos hidrogramas calculado e observado (Figura 5), podendo atribuir essa diferença a um erro nas chuvas. Considerando que o objetivo do trabalho está fundamentado na diferença do volume escoado nos diferentes cenários, os erros encontrados na validação não se demonstram como impeditivos para a aplicação do modelo, visto que as falhas são sistemáticas nos resultados dos cenários.

Nos cenários atual e futuro, escolheram-se, para avaliação, os hidrogramas do trecho 5, em que não existem medidas LID a montante (Figura 6), e do trecho 25 na foz de toda a sub-bacia (Figura 7). O trecho 5 representa a porção a montante da bacia, onde atualmente possui baixa ocupação, e o 25, a porção mais a jusante da bacia, onde se tem a representação do escoamento total da área de estudo.

O trecho 5 apresentou o maior aumento no volume do hidrograma, em torno de 500%, no cenário futuro para todos os TR, já que as bacias que drenam para esse trecho possuem baixa taxa de ocupação atualmente e seriam totalmente ocupadas no cenário futuro.

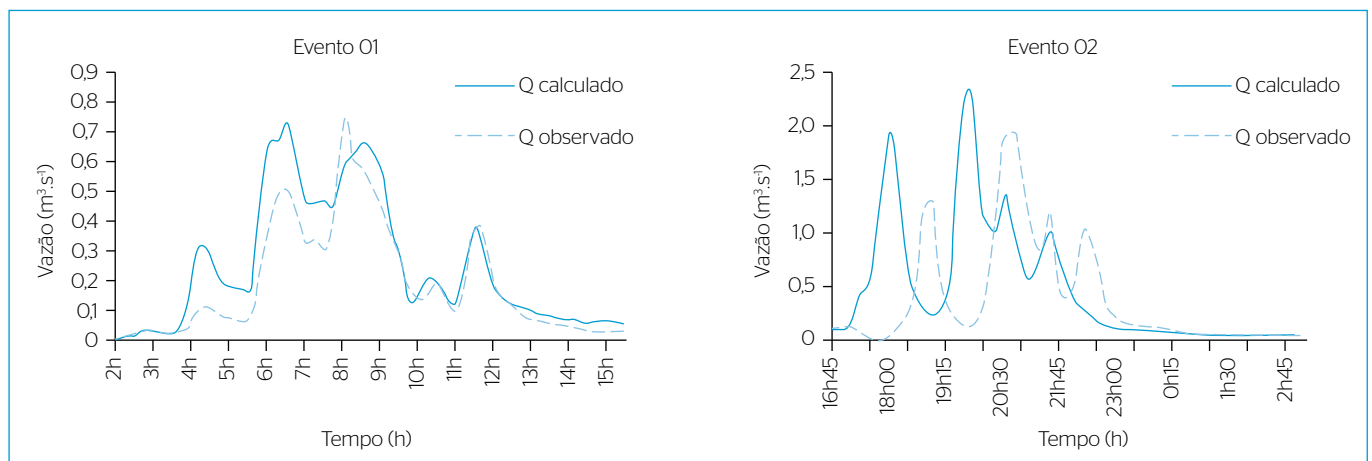


Figura 5 - Hidrograma da calibração do evento 1 e validação do 2, respectivamente.

Tabela 4 - Erros e características dos eventos calibrados.

Evento	Data	Qobs _{pico} (m ³ .s ⁻¹)	P _{total} (mm)	ΔV (%)	RMSE (m ³ .s ⁻¹)	COE
01	23/03/05	0,76	38	30,9	0,10	0,70
03	01/04/05	3,58	35	-6,5	0,79	-0,19
04	13/06/05	0,33	11,4	-17,8	0,003	0,75
08	05/07/05	0,08	1	0,97	0,02	-0,25

Qobs_{pico}: vazão observada no fim do intervalo de tempo; P_{total}: precipitação total do evento; ΔV: erros do volume (volume calculado - volume observado); RMSE: raiz do erro quadrático médio; COE: coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe.

Tabela 5 - Erros e características dos eventos validados.

Evento	Data	Qobs _{pico} (m ³ .s ⁻¹)	P _{total} (mm)	ΔV (%)	RMSE (m ³ /s)	COE
02	31/03/05	1,93	57	23,7	0,69	-0,90
06	17/07/05	0,69	25	-52,5	0,02	-0,06
07	21/07/05	0,13	10	52,7	0,05	-1,47

Qobs_{pico}: vazão observada no fim do intervalo de tempo; P_{total}: precipitação total do evento; ΔV: erros do volume (volume calculado - volume observado); RMSE: raiz do erro quadrático médio; COE: coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe.

Já no trecho 25, observa-se aumento de 16% nos volumes dos hidrogramas no cenário futuro comparado ao atual. Isso representa o aumento do volume do hidrograma de toda a bacia.

Todos os trechos apresentaram aumento dos volumes dos hidrogramas no cenário futuro, como esperado, em razão do aumento da impermeabilização do solo, o que ocasionou também aumento dos alagamentos nos nós, considerando que a região é um local de investimento na expansão urbana do município. Isso demonstra um problema em relação às metas de expansão para a área se não forem adotadas medidas de controle, o que acabará por ocasionar aumento dos problemas com drenagem urbana da bacia.

Os mesmos trechos foram escolhidos para apresentar os resultados simulados no cenário possível (Figura 8) com a inserção das LID. Na área que drena até o trecho 5, não foram inseridas infraestruturas em função das altas declividades, apenas medidas de controle da ocupação.

Todos os hidrogramas apresentaram uma vazão de pico e volume menores comparados ao cenário futuro, utilizando também o cenário de ocupação máxima de acordo com o plano diretor. O trecho 5

apresentou maiores volumes no cenário possível comparado ao atual (190%), considerando que, nas sub-bacias que drenam para esse canal, não foram colocadas infraestruturas de LID por causa das maiores declividades. O trecho 25 teve seus picos reduzidos e também adiantados comparados aos cenários atuais e futuros para os tempos de retorno de 5 e 10 anos.

O volume infiltrado variou de acordo com o TR, apresentando maiores volumes nas sub-bacias com maior área de infraestruturas de LID combinadas. O volume infiltrado pelas LID em cada sub-bacia encontra-se na Figura 9. As bacias que possuíam apenas *vegetative swales* tiveram um volume menor infiltrado. O mesmo aconteceu para o armazenamento, que foi maior para as áreas com pavimento permeável. Porém, os armazenamentos não tiveram alta variação com o tempo de retorno, por conta da capacidade limitada de armazenamento pelos reservatórios dos pavimentos e do armazenamento temporário das *vegetative swales*.

As áreas que apresentaram maior armazenamento foram as que possuíam pavimento permeável. De acordo com Qin, Li e Fu (2013),

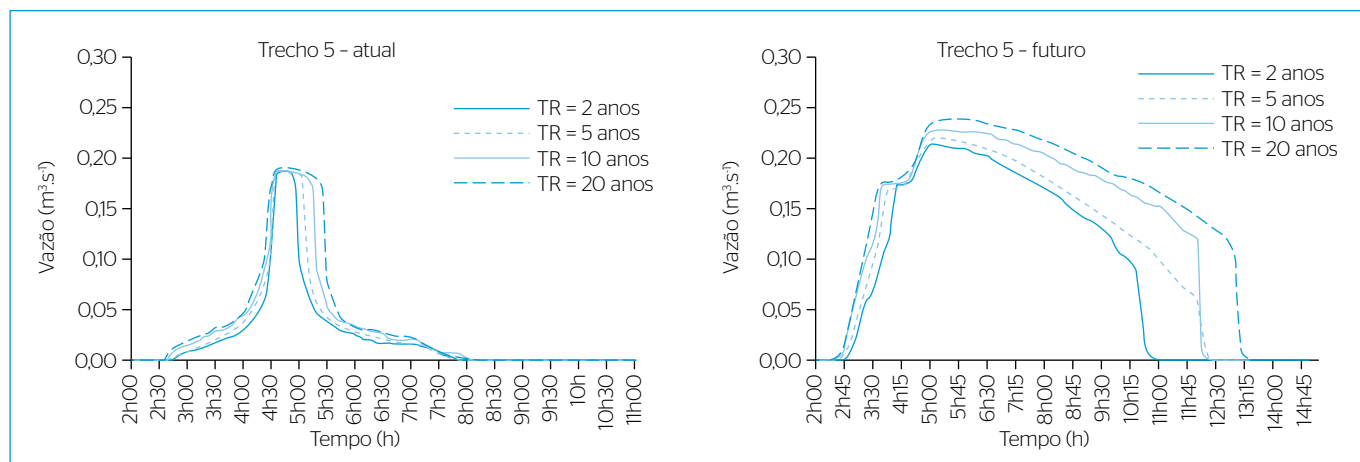


Figura 6 - Hidrogramas de tempos de retorno de 2, 5, 10 e 20 anos para o trecho 5 dos cenários atual e futuro, respectivamente.

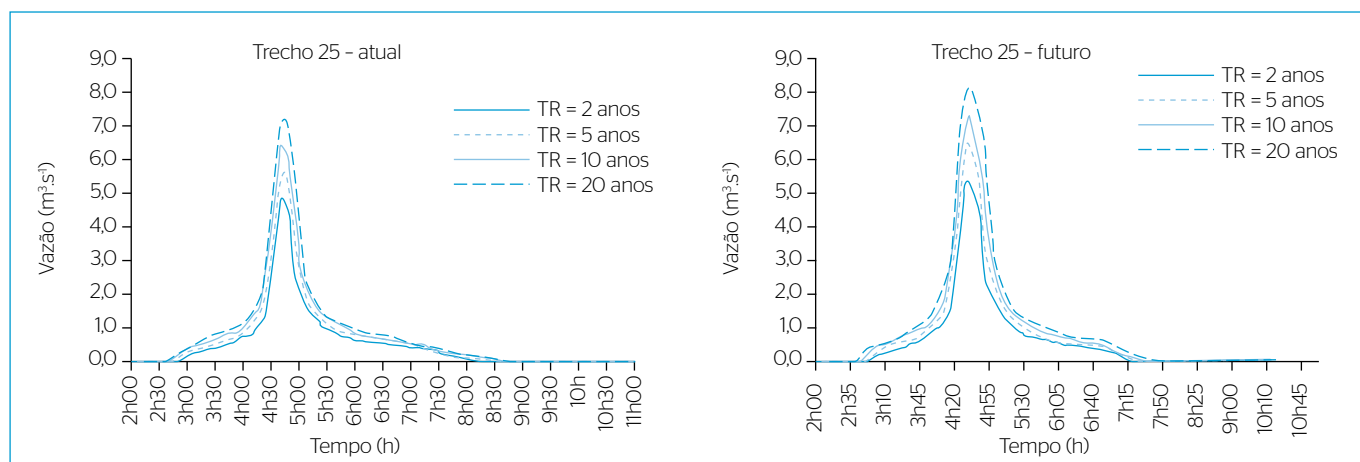


Figura 7 - Hidrogramas de tempos de retorno de 2, 5, 10 e 20 anos para o trecho 25 dos cenários atual e futuro, respectivamente.

os pavimentos permeáveis apresentaram maior desempenho com a localização do pico da chuva no meio da duração, como utilizado neste trabalho. Já as *vegetative swales* apresentaram melhor desempenho quando o pico da chuva era no início da duração, segundo o estudo. Os mesmos autores também identificaram que o pavimento permeável tem maior efeito sobre a redução do escoamento superficial do que as *vegetative swales*, como também encontrado neste trabalho.

Lee *et al.* (2012) encontraram efeitos de 7 a 15% na redução do escoamento superficial com a instalação de equipamentos de LID, incluindo *vegetative swales*, para chuvas de grande intensidade, porém os mesmos autores relatam que a eficiência das LID demonstrou-se maior em séries de chuvas reais e de menor intensidade. Neste trabalho,

observou-se maior eficiência das LID para TR menores, corroborando os resultados de Lee *et al.* (2012).

Na Tabela 6, estão apresentadas as porcentagens dos volumes reduzidos nos dois trechos para cada tempo de retorno. O trecho 25, que é controlado por LID, teve redução de volume do cenário futuro para o possível menor que o trecho 5. Essas porcentagens de redução diminuíram conforme o aumento do TR, demonstrando maior eficiência das infraestruturas de LID para chuvas menos intensas.

Os volumes dos hidrogramas do trecho 5 apresentaram redução de 53% do cenário futuro para o possível em todos os TR, em função da medida de manter a permeabilidade atual das sub-bacias 1 e 2. Essa invariância na redução do volume nos diferentes TR demonstra, nesse caso,

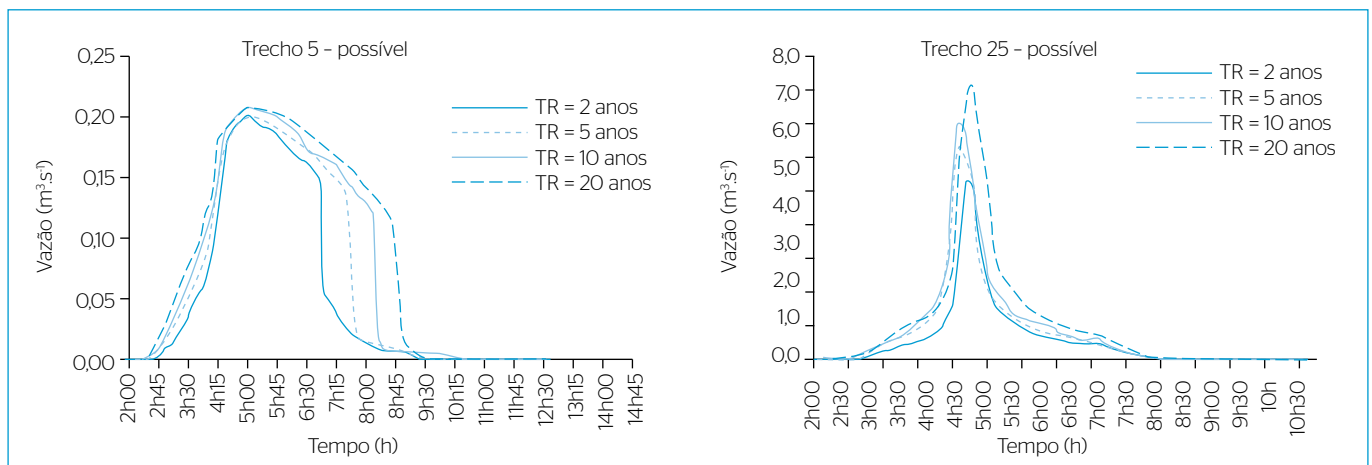


Figura 8 - Hidrogramas de tempos de retorno de 2, 5, 10 e 20 anos para os trechos 5 e 25 do cenário possível, respectivamente.

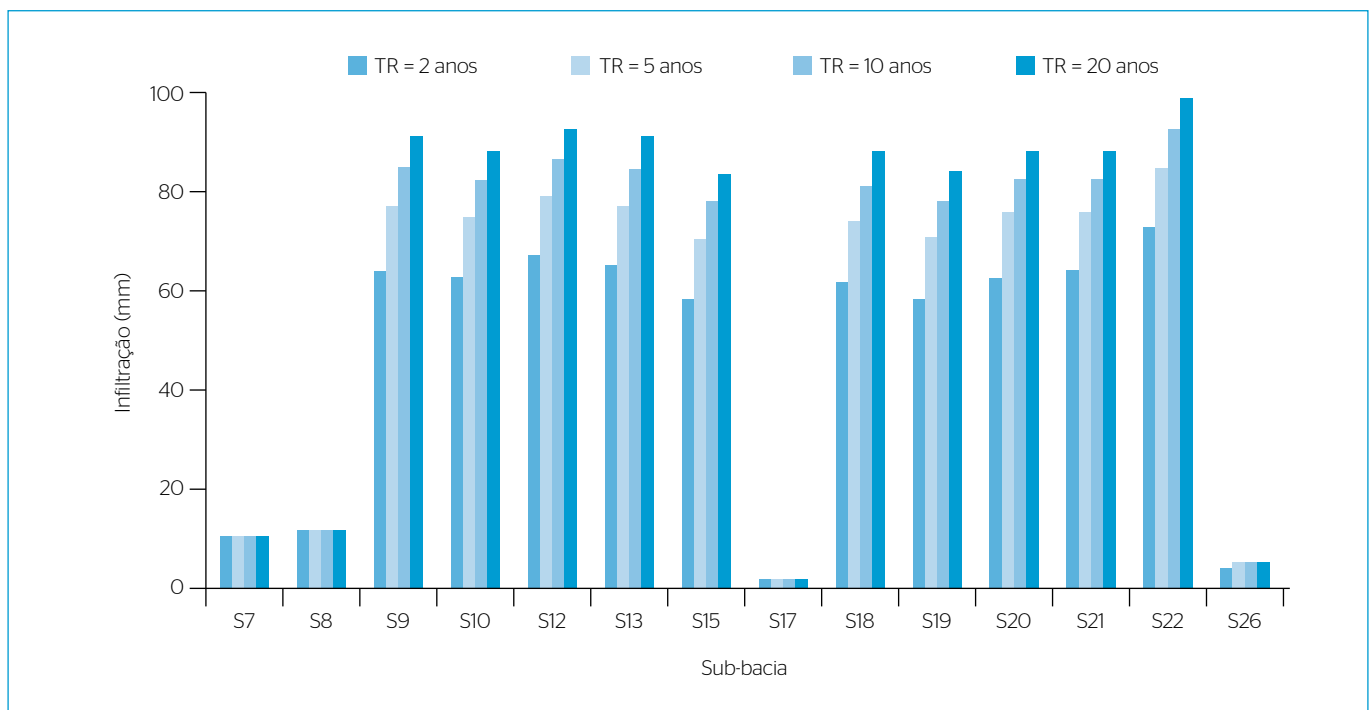


Figura 9 - Volume infiltrado pelas infraestruturas de *low impact development* por sub-bacia.

maior eficiência de uma medida não estrutural (manutenção da permeabilidade) no controle pluvial, a qual não reduz para chuvas maiores.

Do cenário atual para o futuro, houve aumento de 16% no volume do hidrograma do trecho 25 em todos os TR. As infraestruturas de LID combinadas representam redução considerável nos volumes escoados, alcançando 14% de redução do volume para chuvas de TR de dois anos do cenário futuro para o possível no mesmo trecho. Esse valor é próximo ao aumento gerado pela expansão urbana consolidada com baixas taxas de permeabilidade do lote. Esse desempenho diminui para chuvas mais intensas, o que também foi constatado por Sun *et al.* (2014) e Hood, Clausen e Warner (2007).

Na Figura 10, apresenta-se uma comparação entre os cenários para o tempo de retorno de 10 anos, considerando o volume extravasado no nó por hectare de área drenada até ele.

Observa-se que o cenário mais crítico quanto a problemas de drenagem é o futuro, visto que a impermeabilização do solo é maior

Tabela 6 - Redução do volume (%) por tempo de retorno e por trecho dos cenários futuro para o possível.

Tempo de retorno (anos)	Redução de volumes (%)	
	T5	T25
2	53%	14%
5	53%	11%
10	53%	10%
20	53%	9%

e não existem medidas preventivas ou corretivas para mitigação dos impactos hidrológicos.

A Figura 10 mostra que, no cenário possível, ainda com medidas mitigadoras, restariam consideráveis volumes de extravasamento em alguns nós. O cenário atual foi o que apresentou os menores volumes, o que demonstra que, se houvesse manutenção das taxas permeáveis atuais da bacia, associada à inserção de infraestruturas de LID, poderiam se diminuir ainda mais os volumes extravasados. Com os resultados, pode-se observar melhor eficiência na redução dos volumes escoados em medidas não estruturais, como manejo do uso e ocupação do solo, do que nas estruturais, como as LID para esse caso. No entanto, as LID auxiliam na redução do escoamento superficial, sendo uma alternativa viável para áreas já consolidadas.

CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou, por meio de simulação, os impactos de infraestruturas de LID sobre o escoamento superficial em uma sub-bacia urbana em consolidação, em que duas propostas de LID foram consideradas: pavimento permeável e *vegetative swales*, em combinação com um sistema de drenagem convencional para gestão de águas pluviais. Os resultados obtidos para o cenário futuro demonstraram a ineficiência hidrológica das taxas de permeabilidade adotadas para a área de estudo no novo Plano Diretor do município de Viamão, o que irá potencializar os problemas com drenagem urbana existente. Esse fato ainda é

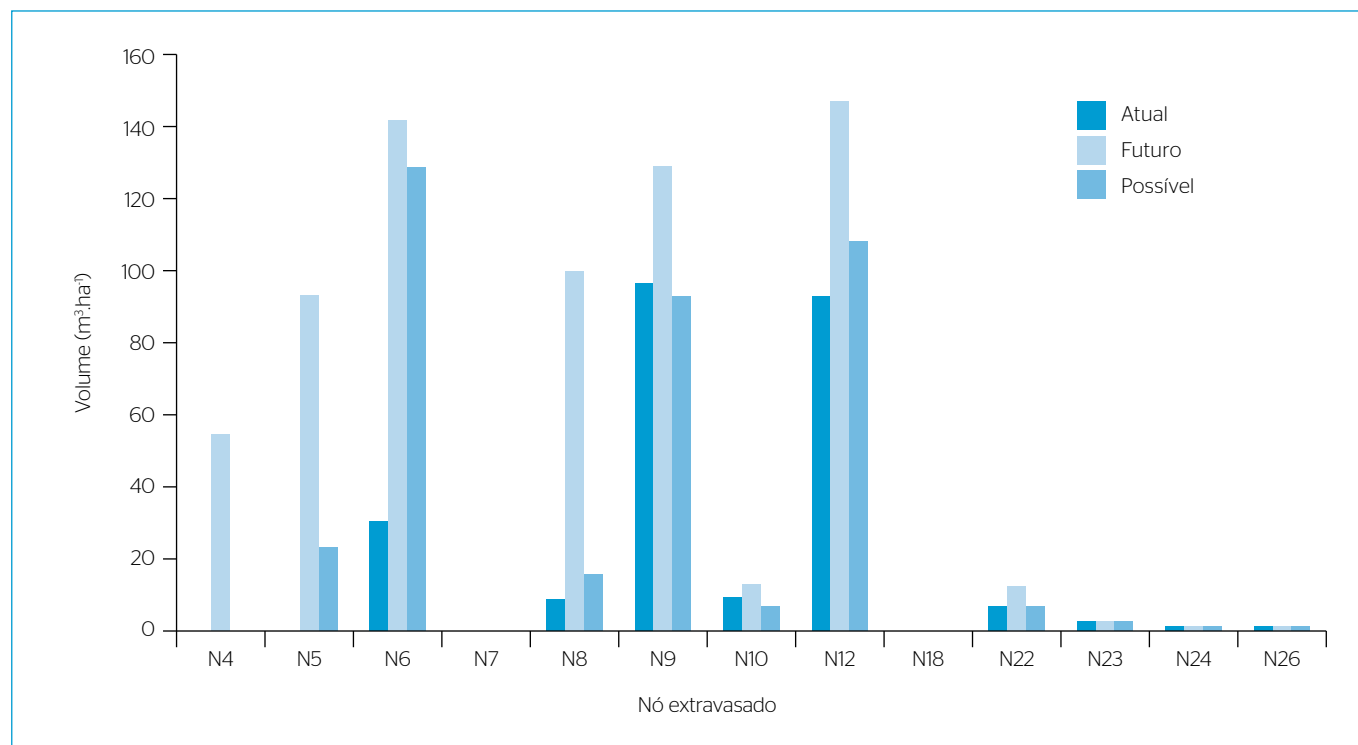


Figura 10 - Volume extravasado por hectare de área drenada até o nó para o tempo de retorno de 10 anos.

agravado por não haver um plano de drenagem urbana para o município, no qual se oriente a expansão da urbanização compatibilizada com a drenagem urbana.

Entendeu-se que apenas o uso das medidas estruturais propostas não é capaz de minimizar todos os impactos hidrológicos da eventual má gestão do uso do solo. Os efeitos sobre os volumes dos hidrogramas foram maiores quando se reduziu a ocupação, aumentando a permeabilidade do solo, como no caso das sub-bacias de montante, em relação às que mantiveram altas taxas de impermeabilização compatibilizadas com infraestruturas de LID.

Entretanto, o desempenho das infraestruturas de LID foi satisfatório, auxiliando na redução dos volumes, principalmente em chuvas de menor intensidade. As LID combinadas reduziram grande parte do volume (14%) gerado pelo efeito da urbanização consolidada (aumento de 16%) para tempo de retorno de dois anos.

O desempenho das LID diminuiu para chuvas maiores, sendo mais eficiente para chuvas com menores TR, para as quais se propõem as estruturas de drenagem. Uma alternativa para diminuir ainda mais o volume escoado é a inserção de medidas de controle nos lotes, que diminuirá a vazão de lançamento na rede pluvial. Essa alternativa não foi considerada para este trabalho por causa da renda da população

local da área de estudo. Por isso, optou-se por medidas em áreas públicas. A eficiência das LID é substancialmente afetada por suas dimensões e propriedades. No caso deste trabalho, os pavimentos permeáveis demonstraram maior eficiência na redução dos volumes escoados sobre as *vegetative swales*. No entanto, as LID têm sua eficiência afetada pelo tempo se não houver correta manutenção delas. É necessário o comprometimento do órgão público responsável pela drenagem da cidade com a correta e periódica manutenção das infraestruturas de drenagem, principalmente as de LID.

De acordo com o que vem sendo desenvolvido nos processos de urbanização de assentamentos informais com urbanização consolidada, observa-se que não existe uma solução global para a resolução dos problemas de drenagem desses locais. Isso ocorre principalmente em função das peculiaridades de cada área e das diversas problemáticas encontradas. O que se demonstrou apropriado foi a adoção de um conjunto de soluções que seja adaptável a cada local. Os resultados deste estudo sugerem que as infraestruturas de LID devem ser discutidas como um novo método de controle de alagamentos urbanos, juntamente com o manejo do uso do solo, buscando soluções integradas para o correto manejo das águas pluviais.

REFERÊNCIAS

- ACIOLI, L.A.; AGRA, S. G.; GOLDENFUM, J. A.; SILVEIRA, A. L. L. (2003) Implantação de um módulo experimental para a análise da eficiência de pavimentos permeáveis no controle do escoamento superficial na fonte. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 15., 2003, Curitiba. *Anais...* Curitiba: ABRH. 18 p.
- AKAN, A.O. (1993) *Urban Stormwater Hydrology: A Guide to Engineering Calculations*. Lancaster: Technomic Publishing Co.
- ARAÚJO, P.R. de; TUCCI, C.E.M.; GOLDENFUM, J.A. (2000) 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. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v5n3.p21-29>
- BAPTISTA, M.B.; NASCIMENTO, N.O.; BARRAUD, S. (2005) *Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana*. Porto Alegre: ABRH. 318 p.
- BOSLEY, E.K. (2008) *Hydrologic evaluation of low impact development using a continuous, spatially-distributed model*. 348 f. Dissertação (Mestrado) - Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg.
- GOLDENFUM, J.A.; CAMAÑO, B.; SILVESTRINI, J. (1990) *Chuvas Intensas em Porto Alegre: Determinação de Curvas I-D-F*. Porto Alegre: IPH-UFRGS. 26 p.
- HASELBACH, L.M.; VALAVALA, S.; MONTES, F. (2006) Permeability predictions for sand-clogged Portland cement pervious concrete pavement systems. *Journal of Environmental Management*, v. 81, n. 1, p. 42-49. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.09.019>
- HASENACK, H.; WEBER, E.J.; LUCATELLI, L.M.L. (2010) *Base Altimétrica Vetorial Contínua do município de Porto Alegre na escala 1:1.000 para uso em sistemas de informação geográfica*. Porto Alegre: UFRGS-IB/Centro de Ecologia. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/labgeo/index.php/50-dados-espaciais/256-base-altimetrica-vetorial-continua-de-porto-alegre-na-escala-1-1-000>>. Acesso em: 15 jun. 2015.
- HOOD, M.; CLAUSEN, J.C.; WARNER, G. (2007) 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. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2007.00085.x>
- HÜFFNER, A.; MENDES, C.A.B. (2013) Impactos Hidrológicos Decorrentes da Expansão Urbana na Bacia Barragem Mãe d'água, Viamão - RS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013, Bento Gonçalves. *Anais...* Bento Gonçalves: ABRH.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). (2010) *Censo Demográfico 2010*. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <<http://censo2010.ibge.gov.br/resultados.html>>. Acesso em: 15 jan. 2016.

- KANG, M.S.; GOO, J.H.; SONG, I.; CHUN, J.A.; HER, Y.G.; HWANG, S.W.; PARK, S.W. (2013) Estimating design floods based on the critical storm duration for small watersheds. *Journal of Hydro-Environment Research*, v. 7, n. 3, p. 209-218. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2013.01.003>
- KORKEALAAKSO, J.; KUOSA, H.; NIEMELÄINEN, E.; TIKANMÄKI, M. (2014) *Review of pervious pavement dimensioning, hydrological models and their parameter needs. State-of-the-Art*. Finlândia: VTT Technical Research.
- LEE, J.; HYUN, K.; CHOI, J.; YOON, Y.; GERONIMO, F.K.F. (2012) Flood Reduction Analysis on Watershed of LID Design Demonstration District Using SWMM5. *Desalination and Water Treatment*, Hopkinton, v. 38, n.1-3, p. 255-261. <http://dx.doi.org/10.1080/19443994.2012.664377>
- MARSALEK, J.; JIMÉNEZ-CISNEROS, B.E.; MALMQUIST, P.-A.; KARAMOUZ, M.; GOLDENFUM, J.; CHOCAT, B. (2007) Urban Water Cycle Processes and Interactions. *Urban Water Series*. UNESCO. v. 2.
- MCCUEN, R.H. (1998) *Hydrologic Analysis and Design*. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall. 814 p.
- POLETO, C.; MERTEN, G.H. (2007) Urban Watershed Studies in Southern Brazil. *Journal of Urban and Environmental*, v. 1, n. 2, p. 70-78. <http://dx.doi.org/10.4090/juee.2007.v1n2.070078>
- QIN, H.; LI, Z.; FU, G. (2013) The Effects of Low Impact Development on Urban Flooding Under Different Rainfall Characteristics. *Journal of Environmental Management*, v. 129, p. 577-585. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.08.026>
- RANGEL, M.L. (2008) *A Percepção sobre a Água na Paisagem Urbana: Bacia Hidrográfica da Barragem Mãe D'Água - Região Metropolitana de Porto Alegre/RS*. 164f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- ROSA, D.J.; CLAUSEN, J.C.; DIETZ, M.E. (2015) Calibration and Verification of SWMM for Low Impact Development. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 51, n. 3, p. 746-757, p. 1-12. <https://doi.org/10.1111/jawr.12272>
- ROSSMAN, L.A. (2008) *Storm Water Management Model: User's Manual V.5*. Nova York: USEPA. 261 p.
- SCHUELER, T.R. (1987) *Controlling Urban Runoff: A Practical Manual for Planning and Designing Urban BMPs*. Washington, D.C.: Department of Environmental Programs, Metropolitan Washington Council of Governments.
- SILVEIRA, A.L.L. da; GOLDENFUM, J.A. (2007) Metodologia generalizada para pré-dimensionamento de dispositivos de controle pluvial na fonte. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 12, n. 2, p. 157-168. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v12n2.p157-168>
- SUN, Y.; LI, Q.; LIU, L.; XU, C.; LIU, Z. (2014) Hydrological simulation approaches for BMPs and LID practices in highly urbanized area and development of hydrological performance indicator system. *Water Science and Engineering*, v. 7, n. 2, p. 143-154. <https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2014.02.003>
- TERSTRIEP, M.L.; STALL, J.B. (1974) *The Illinois Urban Drainage Area Simulator*. Urbana: ILLUDAS, ISWS-74-Bul 58, Illinois State Water Survey.
- TUCCI, C.E.M. (1998) *Modelos Hidrológicos*. Porto Alegre: ABRH- Editora da UFRGS. 669 p.
- _____. (2008) Águas Urbanas. *Estudos Avançados*, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 97-112.
- URBONAS, B.; STAHR, P. (1993) *Stormwater Best Management Practices and Detention*. Englewood Cliffs: Prentice Hall. 450 p.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF DEFENSE (USDoD). (2004) *Unified Facilities Criteria (UFC) Design: Low Impact Development Manual*. 96 p. 2004.
- VIAMÃO. (2013) Lei Municipal nº 4.154, de 25 de novembro de 2013. Institui o Plano Diretor, define princípio, políticas, estratégias e instrumentos para o desenvolvimento municipal e para o cumprimento da função social da propriedade no município de Viamão e dá outras providências. *Diário Oficial de Viamão*.
- VINAGRE, M.V. de A.; LIMA, A.C. de M.; LIMA JUNIOR, D.L. de (2015) Estudo do comportamento hidráulico da Bacia do Paracuri em Belém (PA) utilizando o programa Storm Water Management Model. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 20, n. 3, p. 361-368. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522015020000106515>