

## XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

### ESTRUTURAS SUSTENTÁVEIS DE DESENVOLVIMENTO DE BAIXO IMPACTO E MODELOS HIDROLÓGICOS

*Regina Cera Cadore*<sup>1</sup>; *Daniela Santini Adamatti*<sup>2</sup>; *Juan Martin Bravo*<sup>3</sup>

**RESUMO** – O aumento da urbanização vem acompanhada de uma série de consequências na drenagem urbana, como o aumento da frequência e magnitude das inundações que todos os anos causam prejuízos à população e aos órgãos públicos. Com o objetivo de minimizar os impactos da urbanização, pesquisadores vem buscando soluções com uma visão mais abrangente da drenagem urbana, resultando no surgimento de várias abordagens ao redor do mundo. Entre elas pode ser citado o Desenvolvimento de Baixo Impacto (BDI), no qual é utilizado o layout do local e medidas estruturais integradas para manter ciclo hidrológico o mais próximo possível da condição de pré-urbanização. Assim, o presente trabalho buscou revisar alguns aspectos relacionados à modelagem de LIDs bem como apresentar quatro modelos hidrológicos que podem ser utilizados na simulação dessas estruturas: o Hydrologic Engineering Centre-Hydrologic Modelling System (HEC-HMS), o Long-Term Hydrologic Impact Assessment Model (L-THIA-LID), Green Infrastructure Flexible Model (GIF-Mod) e Storm Water Management Model (SWMM). Os modelos são ferramentas essenciais para auxiliar os gestores na processo de tomada de decisão. No entanto, a definição do modelo a ser utilizado deve ser feita com parcimônia, uma vez que cada um deles apresenta características distintas, sendo mais indicados para diferentes fases de concepção de projetos.

**ABSTRACT**– Urbanization is accompanied by a series of consequences, of which we can highlight those that affect the urban drainage, such as the increase in the frequency and magnitude of floods, that every year cause damages to the population and to public agencies. In order to minimize the impacts of urbanization, researchers have been looking for a more comprehensive vision to deal with urban drainage issues, resulting in several different approaches around the world. Among these approaches, we can mention the Low Impact Development (LID), that consists in using the site layout and structural measures to maintain the hydrological cycle as close as possible to the pre-urbanization conditions. Thus, the present work sought to review some aspects related to LID modelling as well as presenting four hydrologic models that can be used to simulate these kind of structures: the Hydrologic Engineering Centre-Hydrologic Modelling System (HEC-HMS), the Long-Term Hydrologic Impact Assessment Model (L-THIA-LID), the Green Infrastructure Flexible Model (GIF-Mod) and the Storm Water Management Model (SWMM). Models are essential tools to assist managers in the decision-making process. However, the definition of the most suitable model should be made with parsimony, because each of them has different characteristics, and are consequently more useful in different project phases.

**Palavras-Chave** – Palavras-chave: LID, modelagem, SWMM

1) IPH/UFRGS: Av. Bento Gonçalves, 9500 – Porto Alegre/RS, [cadore.regina@gmail.com](mailto:cadore.regina@gmail.com)

2) IPH/UFRGS: Av. Bento Gonçalves, 9500 – Porto Alegre/RS, [dani.adamatti@gmail.com](mailto:dani.adamatti@gmail.com)

3) IPH/UFRGS: Av. Bento Gonçalves, 9500 – Porto Alegre/RS, [jumarbra@iph.ufrgs.br](mailto:jumarbra@iph.ufrgs.br)

## INTRODUÇÃO

Dado o aumento da urbanização em todo mundo nos últimos anos, fica evidente o impacto causado nas águas pluviais urbanas e nos ecossistemas humanos e aquáticos (Fletcher *et al.*, 2015; Tucci, 2002). A urbanização é caracteristicamente acompanhada por aumentos das superfícies impermeáveis, como telhados, calçadas, estradas, compactação de solos e modificações na vegetação (Elliot e Trowsdale, 2007). As consequências no ciclo hidrológico causadas pelas tradicionais técnicas de drenagem - método higienista (Baptista *et al.*, 2005) - foram bem evidenciadas por diversos pesquisadores. A impermeabilização do solo resulta num aumento das vazões de escoamento, no aumento da velocidade de escoamento, na diminuição do tempo de concentração, na erosão de riachos, e no potencial de diminuição do escoamento de base (Leopold, 1968; Hammer, 1972; Schueler, 1994; Jennings e Jarnagin, 2002; Paul e Meyer, 2001).

A gestão da drenagem urbana e do ciclo hidrológico urbano vivenciou significativas mudanças no decorrer das últimas décadas, passando de abordagens estritamente localizadas, por exemplo, quando o projeto tinha um único objetivo, o de reduzir as inundações, para uma abordagem mais holística onde múltiplos objetivos direcionam o projeto e a tomada de decisão (Chocat *et al.*, 2001; Wong, 2007). Com esse novo enfoque, novas técnicas e estruturas surgiram, como: valas e bacias de infiltração, sistemas de biorretenção, telhados verdes, pavimentos permeáveis, jardins de chuva etc. Consequentemente, novas terminologias foram desenvolvidas com a finalidade de transmitir os objetivos e concepções dessas abordagens mais integradas. Fletcher *et al.* (2015) apresentam uma revisão sobre as principais técnicas e terminologias em várias regiões do mundo, no entanto, esse desenvolvimento foi impulsionado por perspectivas, entendimentos e contexto locais e regionais, resultando em diferentes termos que são usados para definir conceitos similares.

Além das pesquisas relacionadas à construção e monitoramento das estruturas, faz-se necessário o aperfeiçoamento dos modelos hidrológicos que servirão de auxílio para gestores e projetistas no momento da definição de quais técnicas são mais adequadas. Pretende-se expor, neste trabalho, uma breve revisão sobre alguns tipos de estruturas e apresentar alguns dos atuais modelos de simulação.

## ESTRUTURAS DE DESENVOLVIMENTO DE BAIXO IMPACTO

O objetivo principal das estruturas de desenvolvimento de baixo impacto é tentar manter a água o máximo possível na/ou próximo da fonte geradora e, aproveitando o layout natural do local para promover a filtragem, a fim de preservar a qualidade da água. O uso dessas estruturas busca manter o volume de escoamento de pré-desenvolvimento (Shafique e Kim, 2015) através do armazenamento no solo e a subsequente infiltração e evapotranspiração. Isso também contribui para reduzir os picos de vazão (Green, 2010).

Fletcher *et al.* (2013) categorizaram as tecnologias de gerenciamento de águas pluviais em duas categorias, estruturas baseadas em infiltração e estruturas baseadas em retenção. Na primeira, podem ser inseridas técnicas que auxiliam na restauração da vazão de base através de recarga de fluxos

subterrâneos e águas subterrâneas, e incluem valas de infiltração, bacias de infiltração, sistemas de biorretenção sem revestimento (jardins de chuva), filtros de areia e pavimentos permeáveis. Já na segunda categoria, estão as técnicas que retêm águas pluviais para redução da vazão, que compreendem as áreas úmidas, lagoas, telhados verdes e captação de água da chuva (tanques, bacias de armazenamento). Existem diversos trabalhos na área, dos quais pode-se citar o de Claytor e Schueler (1996) que desenvolveram um manual com orientações sobre dez sistemas de filtragem, e o de Fletcher *et al.* (2007) que realizaram um estudo para testar se os cenários típicos de captação de águas pluviais poderiam atender ao duplo objetivo de (i) suprir as necessidades de água urbana e (ii) restaurar o regime de vazão o mais próximo possível do natural (pré-desenvolvimento).

Fassman e Blackbourn (2010) investigaram o comportamento de um pavimento permeável de 200m<sup>2</sup> como medida de controle na fonte. Fach *et al.* (2011) avaliaram o desempenho de valas de infiltração em relação à operação no inverno na região dos Alpes. Rowe (2011) realizou uma revisão abrangente sobre telhados verdes evidenciando como tais estruturas podem ajudar na diminuição da poluição e como os materiais empregados influenciam na magnitude desses benefícios. Burns *et al.* (2012) analisaram os efeitos hidrológicos de duas abordagens convencionais para o manejo de águas pluviais urbanas, identificando as desvantagens e comparando os resultados hidrológicos com os de uma abordagem alternativa voltada para a restauração de elementos importantes do regime de vazão natural. Ahiablame *et al.* (2013) avaliaram o desempenho do barril de chuva/cisterna e do pavimento poroso como tecnologias de retrofit em duas bacias urbanizadas perto de Indianapolis, Estados Unidos.

Essas soluções para gestão da drenagem urbana podem ser muito dependentes da localização. Uma vez que as estruturas geralmente dependem da infiltração e evapotranspiração, sua eficácia é afetada por fatores como: tipo/condição do solo, espécie de vegetação, quantidade de luz solar, manejo do solo e outras propriedades meteorológicas e hidrológicas (Eckart *et al.* 2017). Zahmatkesh *et al.* (2015) observaram como a localização geofísica de estruturas de biorretenção e do pavimento permeável pode afetar significativamente a sua capacidade de reduzir o escoamento.

Para a determinação da eficiência dessas estruturas pode-se utilizar a avaliação da função hidrológica e da capacidade de remoção de poluentes (USEPA, 2000). Bergman *et al.* (2010) monitoraram e avaliaram duas trincheiras de infiltração em Copenhague, Dinamarca, durante 15 anos. Verificaram uma diminuição significativa na taxa de infiltração, provavelmente causada pela colmatção do fundo das estruturas. A partir desses dados desenvolveram um modelo para simular a colmatção e infiltração, prevendo que as taxas de infiltração decairiam a uma taxa inversamente proporcional ao tempo.

## MODELAGEM COMPUTACIONAL

O progresso em direção a um desenvolvimento urbano mais sustentável é gradual e lento (Elliot e Trowsdale, 2007). Um dos principais motivos para essa tendência é a falta de modelos e/ou ferramentas abrangentes que possam: modelar o complexo processo natural que ocorre nessas

estruturas sustentáveis; incorporá-las dentro da hidrologia mais ampla da bacia hidrográfica; e simular o feedback e o relacionamento com as redes coletoras de águas pluviais existentes (Elliot e Trowsdale, 2007; Ahiablame *et al.*, 2013). A literatura fornece uma ampla variedade de informações de monitoramento que abrangem os usos benéficos dessas práticas. Os dados de monitoramento, no entanto, estão limitados a certos períodos e condições específicas devido aos altos custos atrelados. Desta forma, a modelagem por simulação surge como um método valioso para determinar as informações espaciais e temporais para uma variedade de escalas (Ahiablame *et al.*, 2012).

Uma das primeiras revisões focadas na modelagem de estruturas de desenvolvimento de baixo impacto foi conduzida por Elliott e Trowsdale (2007). Os autores verificaram que os modelos disponíveis na época não incorporavam um número suficiente de variáveis relacionadas à qualidade da água. Também expuseram a dificuldade de vincular modelos hidrológicos a processos externos, como toxicidade e modelos de habitat. Ahiablame *et al.* (2013) revisaram três modelos com capacidade de utilização na modelagem de estruturas de baixo impacto: o L-THIA-LID (Long-Term Hydrologic Impact Assessment- Low Impact Development), o SWMM (Storm Water Management Model) e o SUSTAIN (System for Urban Stormwater Treatment and Analysis IntegratioN), apresentando uma breve descrição individual de cada modelo.

Em 2014, a cidade de Edmonton no Canadá, elaborou um guia de design utilizando uma tabela de triagem com dezessete modelos hidrológicos disponíveis para simular as técnicas sustentáveis e então selecionou o modelo SWMM para seus objetivos de modelagem (City of Edmont, 2014). Recentemente, Kaykhosravi *et al.* (2018) avaliaram onze modelos com base em: (1) características gerais do modelo, incluindo a aplicação do modelo, a resolução temporal, a visualização de dados espaciais, o método de representação das estruturas dentro das bacias; (2) aspectos de modelagem hidrológica, incluindo: o tipo de estrutura, modelo de balanço hídrico, geração de escoamento e infiltração; e (3) métodos de modelagem hidráulica com foco nos métodos de propagação de vazão. Os resultados mostram que, apesar das atualizações recentes dos modelos existentes, vários recursos importantes ainda faltam e precisam ser melhorados.

Para representar essas estruturas em modelos hidrológicos e de qualidade da água há duas abordagens abrangentes. A primeira consiste na representação dos processos que ocorrem dentro das estruturas, por exemplo a infiltração, a sedimentação, a adsorção, a evapotranspiração, a sedimentação. O processo de interesse pode ser explicitamente avaliado em uma estrutura ou em um grupo (para examinar os impactos coletivos de várias estruturas com relação a esse processo), ou uma série de processos pode ser avaliada na prática (Huber *et al.*, 2006). A segunda abordagem agrega todos os processos representando a estrutura como um todo. Essa metodologia mede os efeitos da estrutura no escoamento superficial e na qualidade da água, combinando todos os processos complexos em um parâmetro. A desvantagem dessa abordagem está relacionada à simplificação das suposições realizadas durante a modelagem, o que dificulta a quantificação do desempenho da estrutura de interesse. Geralmente esta abordagem é utilizada na comparação dos impactos hidrológicos dos cenários de desenvolvimento com ou sem calibração, a fim de destacar os usos

benéficos dessas práticas para o planejamento e tomada de decisão (antes de estudos mais detalhados para implementação das estruturas) (Ahiablame *et al.*, 2012).

O principal objetivo da modelagem é prever o comportamento da bacia ou estrutura sob diferentes condições conforme a necessidade de cada projeto. Sua elaboração passa por uma série de processos, que inclui as fases de pesquisa, conceitual, preliminar e por fim o projeto detalhado, assim, definir qual o modelo hidrológico mais adequado para cada etapa é determinante para o sucesso do projeto. A seguir buscou-se apresentar alguns modelos que podem ser utilizados em diversas fases de um projeto. Os modelos HEC-HMS (Hydrologic Engineering Centre-Hydrologic Modelling System) e SWMM (Storm Water Management Model) são mais adequados para estudos mais avançados, dentro de um projeto preliminar e detalhado, enquanto que o GIF-Mod (Green Infrastructure Flexible Model) é mais indicado para a fase de pesquisa, pois permite simular o comportamento de um estrutura internamente. Por fim, o L-THIA-LID (Long-Term Hydrologic Impact Assessment Model) tem características mais adequadas para utilização na fase conceitual do projeto, possuindo a facilidade de estar no formato de formulário online.

### **Hydrologic Engineering Centre-Hydrologic Modelling System (HEC-HMS)**

O modelo HEC-HMS foi desenvolvido com o objetivo de modelar a resposta hidrológica de sistemas de bacias dendríticas (USACE, 2000). Sua primeira versão, HEC-1, foi lançada em 1998 sendo que atualmente, encontra-se disponível gratuitamente na versão 4.3, porém não possui o código aberto. Tem sido largamente utilizado por hidrólogos e engenheiros em trabalhos técnicos e de pesquisa (Kaykhosravi *et al.*, 2018). Apesar de sua aplicação em modelagem de estruturas sustentáveis ainda ser pouco significativa, pode-se destacar o trabalho de Khaniya (2017), que utilizou o HEC-HMS 4.1 para simular o desempenho hidrológico e o impacto de uma trincheira de infiltração no escoamento superficial.

Na estrutura do modelo, os elementos hidrológicos e hidráulicos são classificados em três categorias: componentes da bacia, meteorológicos e de séries temporais. Além disso, alguns elementos hidráulicos, como condutos ou reservatórios, estão disponíveis para conectar as sub-bacias. As equações governantes usadas no modelo são diversas, havendo por exemplo, várias opções para modelar a infiltração, tais como Horton, Green-Ampt, entre outras. Para modelar o fluxo em condutos a opção disponível é a equação da onda cinemática (Kaykhosravi *et al.*, 2018).

Foram incorporadas algumas características adicionais nas últimas versões, tais como análise de incertezas, transporte de sedimentos, modelagem de erosão e da qualidade da água associada a nutrientes (USACE, 2016). Para a modelagem de estruturas sustentáveis no HEC-HMS é necessário defini-las implicitamente, através da utilização de uma sub-bacia que será considerada como uma estrutura específica. Segundo Kaykhosravi *et al.* (2018), essa abordagem aumenta a complexidade do modelo devido ao aumento significativo do número de bacias hidrográficas. No entanto, aumenta a flexibilidade do modelo em termos de projetar uma rede dendrítica para simular com precisão a

realidade e permite o propagação da vazão dentro de cada estrutura como uma bacia hidrográfica independente.

### **Long-Term Hydrologic Impact Assessment Model (L-THIA-LID)**

O L-THIA-LID é um modelo chuva-vazão projetado com a finalidade de auxiliar planejadores e gestores de recursos naturais na tomada de decisões para a proteção da qualidade da água e dos recursos hídricos (Hunter *et al.*, 2010). Segundo Ahiablame *et al.* (2012), o L-THIA-LID é uma versão melhorada do modelo L-THIA de Engel (2001).

O modelo foi lançado em 2000 e sua última versão, de 2015, encontra-se disponível abertamente online, porém com código fonte fechado. A interface gráfica está no formato de um formulário, no qual pode-se selecionar e inserir dados. O L-THIA-LID realiza uma estimativa baseada no volume de redução de escoamento para LIDs (*Low Impact Development*). Esses cálculos baseiam-se na determinação da combinação de uso do solo, estruturas selecionadas e do CN (Curve Number), este último utilizado para o cálculo de redução de volume de escoamento. No entanto, os elementos hidráulicos, como condutos, não estão incluídos no L-THIA-LID (Kaykhosravi *et al.*, 2018).

O efeito das estruturas é determinado através de cálculos simplificados de volume de escoamento, sendo consequentemente indicado para fins de projetos conceituais. Diferentemente do modelo HEC-HMS, o modelo L-THIA-LID possui os recursos embutidos para modelar as estruturas como: telhado verde, barril de chuva, biorretenção, pavimento permeável e valas de infiltração. Conforme Liu *et al.* (2016), o CN tem sido apontado como uma das variáveis mais sensíveis, tendo um efeito significativo sobre os resultados do modelo L-THIA-LID. Dessa forma, Kaykhosravi *et al.* (2018) sugerem que o cálculo de infiltração seja melhorado.

### **Green Infrastructure Flexible Model (GIF-Mod)**

O GIF-Mod é um modelo recentemente desenvolvido por Massoudieh *et al.* (2016), e por consequência, não tem sido amplamente utilizado em outros estudos. A última versão foi disponibilizada em abril de 2018, com código livre. Seu objetivo principal é a modelagem de processos hidrológicos e de qualidade da água dentro das estruturas de desenvolvimento de baixo impacto.

Os elementos hidrológicos e hidráulicos no GIF-Mod são representados na forma de “blocos” e “conectores”. Existem seis tipos de blocos que são usados para representar diferentes meios, incluindo solo, armazenamento superficial, propagação de vazão, lençol freático, captação, armazenamento e conectores que são elementos de condutos (canal aberto ou sob-pressão) (Massoudieh *et al.*, 2016)

Em termos de modelagem hidrológica e hidráulica, as equações governantes usadas nos blocos e conectores são equações analíticas simplificadas (por exemplo, a equação de van Genuchten-Mualem para vazão no bloco de solo ou a equação de Manning nos conectores). Assim, o GIF-Mod não usa métodos numéricos em qualquer um dos seus blocos. O GIF-Mod inclui um recurso de

modelagem inversa, que é usado para fins de projeto ou calibração de modelo (Kaykhosravi *et al.*, 2018).

Kaykhosravi *et al.* (2018) indicam que para a fase de pesquisa, isto é, projeto e otimização, são necessárias ferramentas com a capacidade de modelar mecanismos que ocorrem dentro das estruturas selecionadas. Assim, um modelo deverá poder modelar: múltiplas camadas subsuperficiais, incluindo diferentes materiais para cada camada (como solo ou qualquer outro material poroso); armazenamento na superfície; drenagem da camada mais baixa; movimento da água nas zonas vadosa e saturada; um modelo completo de balanço hídrico para considerar interceptação, absorção de água pelas raízes, evaporação, transpiração e derretimento da neve. Os autores sinalizam que um dos modelos adequados para tal objetivo seria o GIF-Mod.

Da mesma maneira que o HEC-HMS, o GIF-Mod não possui as estruturas sustentáveis pré-definidas no modelo, sendo necessário defini-las implicitamente. Modela o armazenamento superficial como um bloco de armazenamento e permite adicionar tubos a qualquer camada do solo, e a saída pode ser conectada a outros blocos (por exemplo, blocos de captação). Também aceita uma ampla gama de resoluções temporais (Massoudieh *et al.*, 2016; Kaykhosravi *et al.*, 2018).

### **Storm Water Management Model (SWMM)**

O SWMM foi desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA (USEPA) em 1971, como um software de domínio público para atender a necessidade de simulações de quantidade e qualidade de escoamento de chuva em ambientes urbanos (Metcalf e Eddy, 1971). Desde o lançamento da sua versão 5.0, o SWMM (Rossman, 2004), é um dos modelos hidrológicos e de qualidade de água de bacias urbanas mais utilizados no mundo (Obropta e Kardos 2007). O SWMM é moderadamente complexo, amplamente utilizado para planejamento, pesquisa e projetos relacionados ao escoamento de águas pluviais, podendo-se citar os trabalhos de Park *et al.* (2008); Abi *et al.* (2010) e Zanandrea e Silveira (2018).

O modelo estima o escoamento com base num grupo de sub-bacias que recebem a precipitação e geram o escoamento, influenciados pelas perdas por evaporação e infiltração. O escoamento é então encaminhado através de um sistema de transporte que pode incluir condutos, canais, dispositivos de armazenamento/tratamento, bombas, orifícios, açudes e reguladores (Ahiablame *et al.*, 2012). Conforme Niazi *et al.* (2017), um projeto de modelagem pode ser construído usando seis componentes ambientais primários: (1) forçantes externas, incluindo precipitação, temperatura e evaporação; (2) geração de escoamento superficial; (3) escoamento subsuperficial; (4) um sistema de transporte; (5) acúmulo, lavagem e tratamento de contaminantes; e (6) controles de *Low Impact Development* (LID).

Novos módulos/algoritmos foram adicionados recentemente ao modelo para suportar exclusivamente a simulação de estruturas LID. O PCSWMM é uma das versões comerciais do SWMM e uma das mais populares entre os cientistas. O PCSWMM adicionou vários recursos ao SWMM para facilitar o processo de modelagem. Um deles é uma ferramenta de visualização de dados

para auxiliar a criação de mapas. Também apresenta recursos extras como um ambiente integrado de modelagem 1D-2D, análise de sensibilidade e análise de erro de calibração (Kaykhosravi *et al.*, 2018).

Como o SWMM e PCSWMM fornecem cálculos mais detalhados de modelagem de águas pluviais, como vazão de pico, quantidade de escoamento, métodos de propagação de vazões e profundidade e volume de escoamento no interior de condutos, tornam-se indicados para fases de modelagem mais avançadas. O PCSWMM, permite a modelagem de uma estrutura LID indiretamente, ou seja, considerando a estrutura como uma nova sub-bacia, ou como uma estrutura LID, dando flexibilidade ao projetista.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de uma abordagem mais holística em relação à drenagem urbana e aos processos urbanos é uma tendência crescente. Os modelos hidrológicos são e serão ferramentas que permitem verificar a eficiência dessa abordagem. Então, é necessário um cuidado (parcimônia) maior com o (escolha) manuseio dessas metodologias devido à grande variedade de nomenclaturas que podem vir afetar a concepção do modelo nas simulações hidrológicas, por isso, é indicado a leitura do trabalho de Fletcher *et al.* (2015) que apresenta uma revisão sobre a evolução das inúmeras terminologias existentes na drenagem urbana.

No presente trabalho pode-se verificar a existência de modelos com características mais adequadas para as diferentes fases de um projeto. Cabe ressaltar que a experiência do projetista deve ser levada em consideração no momento da escolha do modelo, bem como a capacidade de cada modelo de representar explicitamente e implicitamente os diferentes tipos de estrutura de desenvolvimento de baixo impacto.

Kaykhosravi *et al.* (2018) realizaram uma ampla revisão onde compararam diversos modelos aplicados ao Low Impact Development – LID. Além dos modelos de simulação já citados, existem diversos outros com propostas e complexidades distintas. Pode-se citar o RECARGA, Green Values, Water Balance Model (WBM), Soil and Water Assessment Tool (SWAT), Model for Urban Sewers (MOUSE), entre outros. Apesar dos significativos avanços dos modelos na representação de estruturas de desenvolvimento de baixo impacto, ainda é necessário aprimorar alguns pontos, tais como o balanço hídrico interno da estrutura, os métodos de geração de escoamento, os métodos de cálculo de infiltração e o uso de técnicas de otimização.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho recebeu o apoio financeiro parcial do CNPq – Brasil.

## REFERÊNCIAS

ABI A., M. P., SUIDAN, M. T., & SHUSTER, W. D. (2010). “Modeling techniques of best management practices: rain barrels and rain gardens using EPA SWMM-5”. *Journal of Hydrologic Engineering*, 15, 434–443.

- AHIABLAME, L.M., ENGEL, B.A., CHAUBEY, I. (2012). “Effectiveness of low impact development practices: literature review and suggestions for future research”. *Water Air Soil Pollut.* 223 (7):4253–4273.
- AHIABLAME, L.M., ENGEL, B.A., CHAUBEY, I. (2013). “Effectiveness of low impact development practices in two urbanized watersheds: retrofitting with rain Barrel/cistern and porous pavement”. *J. Environ. Manag.* 119:151–161 (April).
- BAPTISTA, M., NASCIMENTO, N., AND BARRAUD, S., (2005). *Técnicas compensatorias em drenagem urbana*. Porto Alegre, Brazil: ARBH.
- BERGMAN, M., HEDEGAARD, M.R., PETERSON, M.F., BINNING, P., OLE, M., MIKKELSEN, P.S., (2010). “Evaluation of two stormwater infiltration trenches in central copenhagen after 15 years of operation”. *Novatech 2010*. IWA Publishing, Lyon, France.
- BURNS, M., FLETCHER, T.D., HATT, B.E., LADSON, A., WALSH, C.J., (2012). “Hydrologic shortcomings of conventional urban stormwater management and opportunities for reform”. *Landsc. Urban Plan.* 105, 230–240.
- CHOCAT, B., KREBS, P., MARSALEK, J., RAUCH, W., AND SCHILLING, W., (2001). “Urban drainage redefined; from stormwater removal to integrated management”. *Water Science and Technology*, 43(5), 61–68.
- CLAYTOR, R.A., SCHUELER, T.R., (1996). “Design of stormwater filtering systems”. Chesapeake Research Consortium.
- ECKART, K., MCPHEE, Z., BOLISSETTI, T., (2017). “Performance and implementation of low impact development—A review”. *Science of the Total Environment* 607–608 (2017) 413–432.
- ELLIOTT, A.H., TROWSDALE, S.A., (2007). “A review of models for low impact urban stormwater drainage”. *Environmental Modelling & Software*, Special section: Advanced Technology for Environmental Modelling. 22 (3):pp. 394–405.
- ENGEL, B. (2001). “L-THIA NPS Long-Term Hydrologic Impact Assessment and Non Point Source Pollutant Model”, version 2.1. Purdue University and USEPA.
- FACH, S., ENGELHARD, C., WITTKER, N., RAUCH, W., (2011). “Performance of infiltration swales with regard to operation in winter times in an alpine region”. *Water Sci. Technol.* 63 (11).
- FASSMAN, E.A., BLACKBOURN, S., (2010). “Urban runoff mitigation by a permeable pavement system over impermeable soils”. *J. Hydrol. Eng.* 15 (6):475–485.
- FLETCHER, T.D., MITCHELL, G., DELETIC, A., LADSON, A., SÉVEN, A., (2007). “Is stormwater harvesting beneficial to urban waterway environmental flows?”. *Water Sci. Technol.* 55 (2), 65–72.
- FLETCHER, T.D., ANDRIEU, H., HAMEL, P., (2013). “Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: a state of the art”. *Adv. Water Resour.* 51 (January):261–279. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.09.001>.
- FLETCHER, T.D., SHUSTER, W., HUNT, W.F., ASHLEY, R., BUTLER, D., ARTHUR, S., TROWSDALE, S., BARRAUD, S., SEMADENI-DAVIES, A., BERTRAND-KRAJEWSKI, J.L., MIKKELSEN, P.S., RIVARD, G., UHL, M., DAGENAIS, D., VIKLANDER, M., (2015). “SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – the evolution and application of terminology surrounding urban drainage”. *Urban Water J.*:1–18 July.
- GREEN, C., (2010). “Towards sustainable flood risk management”. *Int. J. Disaster Risk Sci.* 1 (1), 33–43.
- HAMMER, T.R., (1972). “Stream channel enlargement due to urbanization”. *Water Resources Research* 8, 1530e1540.
- HUBER, W.C. (2006). “BMP modeling concepts and simulation”. EPA Contract No. 68-C-01-020. Water Supply and Water Resources Division National Risk Management Research Laboratory.
- HUNTER, J.G., ENGEL, B.A., & QUANSAH, J.E. (2010). “Web-based low impact development decision support tool for watershed planning”. *Proceedings of Low Impact Development 2010: Redefining Water in the City*. April 11–14. San Francisco, CA, USA.
- JENNINGS, D. B., & JARNAGIN, S. T. (2002). “Changes in anthropogenic impervious surfaces, precipitation and daily streamflow discharge: A historical perspective in a mid-Atlantic subwatershed”. *Landscape Ecology*, 17, 471–489.

- KAYKHOSRAVI, S., USMAN K.T., JADIDI A., (2018). “A Comprehensive Review of Low Impact Development Models for Research, Conceptual, Preliminary and Detailed Design Applications”. *Water*, 10, 1541.
- KHANIYA, B.; WANNIARACHCHI, S.; RATHNAYAKE, U., (2017). “Importance of Hydrologic Simulation for Lids and BMPs Design Using HEC-HMS: A Case Demonstration”. *Int. J. Hydrol. Import.*, 1, 1–10.
- LEOPOLD, L.B., (1968). “Hydrology for urban land planning e a guidebook on the hydrologic effects of urban land use”. In: Geological Survey Circular 554. U.S. Geological Survey, Washington, DC.
- LIU, Y.; CHAUBEY, I.; BOWLING, L.C.; BRALTS, V.F.; ENGEL, B.A., (2016) “Sensitivity and Uncertainty Analysis of the L-THIA-LID 2.1 Model”. *Water Resour. Manag.*, 30, 4927–4949.
- MASSOUDIEH, A., M. MAGHREBI, B. KAMRANI, C. NIETCH, M. TRYBY, S. AFLAKI, S. PANGULURI, (2016). “A flexible modeling framework for hydraulic and water quality performance assessment of stormwater green infrastructure”, *Environmental Modeling and Software*, 92, pp 57–73.
- METCALF AND EDDY. (1971). “Storm water management model”. Univ. of Florida, Water Resources Engineers, U.S. EPA, U.S. Government Printing Office, Washington, DC.
- OBROPTA, C. C., AND KARDOS, J. S. (2007). “Review of urban stormwater quality models: Deterministic, stochastic, and hybrid approaches.” *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 43(6), 1508–1523.
- PARK, J., YOO, Y., PARK, Y., YOON, H., KIM, J., PARK, Y., JEON, J., & LIM, K. J. (2008). “Analysis of runoff reduction with LID adoption using the SWMM”. *Journal of Korean Society of Water Quality*, 24(6), 805–815.
- PAUL, M.J., MEYER, J.L., (2001). “Streams in the Urban Landscape”. *Annual Review of Ecology and Systematics* 32, 333e365.
- ROSSMAN, L.A., (2004). “Storm Water Management Model. Version 5.0”. National Risk Management Research Laboratory, United States Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.
- ROWE, D.B., (2011). “Green roofs as a means of pollution abatement”. *Environ. Pollut.* 159 (8–9):2100–2110.
- SCHUELER, T., (1994). “The importance of imperviousness”. *Watershed Protection Techniques* 1, 100e111.
- SHAFIQUE, M., KIM, R., (2015). “Low impact development practices: a review of current research and recommendations for future directions”. *Ecol. Chem. Eng. S* 22 (4).
- THE CITY OF EDMONTON., (2014) “Low Impact Development Best Management Practices Design Guide Edition 1.1”; The City of Edmonton: Edmonton, AB, Canada; pp. 1–269.
- TUCCI, C. E. M., (2002). “Impactos da variabilidade climática e uso do solo sobre os recursos hídricos”. Realizado para a Agência Nacional de Águas. 2002.
- U.S ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA), (2000). “Low Impact Development (LID) A Literature Review”. U.S Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE), (2000). Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) Technical Reference Manual; USACE: Washington, DC, USA.
- US ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE), (2016). “Hydrologic Modeling System (HEC\_HMS) User’s Manual”; USACE: Washington, DC, USA.
- WONG, T.H.F., (2007). “Water sensitive urban design; the journey thus far”. *Australian Journal of Water Resources*, 110 (3), 213–222.
- ZAHMATKESH, Z., BURIAN, S.J., KARAMOUZ, M., TAVAKOL-DAVANI, H., GOHARIAN, E., (2015). “Low impact development practices to mitigate climate change effects on urban stormwater runoff: case study of new York City”. *J. Irrig. Drain. Eng.* 141 (1):4014043.
- ZANANDREA, F., SILVEIRA, A. L. L., (2018). “Effects of LID Implementation on Hydrological Processes in an Urban Catchment under Consolidation in Brazil”. *J. Environ. Eng.*, 2018, 144(9): 04018072
- NIAZI, M., NIETCH, C., MAGHREBI, M., JACKSON, N., BENNETT, B. R., TRYBY, M., MASSOUDIEH, A. (2017). “Storm Water Management Model: Performance Review and Gap Analysis”. *J. Sustainable Water Built Environ.*, 2017, 3(2): 04017002.