**Caderno de Geografia (2023) v.33, n.73**
ISSN 2318-2962
DOI 10.5752/p.2318-2962.2023v33n73p336

ORIGINAL ARTICLE

# TENDÊNCIAS RECENTES NA APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE DESENVOLVIMENTOS DE BAIXO IMPACTO (LID) PARA O CONTROLE DA DRENAGEM URBANA

*Recent trends in the application of low impact development techniques (LID) for the control of urban drainage*

**Léo Davidovitsch**
Mestre em Engenharia Hídrica pela Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Recursos Naturais, Brasil
leodvdv@gmail.com

**Benedito Claudio da Silva**
Professor Dr. Adjunto da Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Recursos Naturais, Brasil
silvabenedito@unifei.edu.br

**Alexandre Germano Marciano**
Técnico em Meteorologia da Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Recursos Naturais, Brasil
agermano@unifei.edu.br

**Mellinda Gabrielle Nogueira Santos**
Graduanda em Engenharia Hídrica pela Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Recursos Naturais, Brasil
mellindagnogueira@gmail.com

Recebido: 31.03.2022
Aceito: 21.01.2023

## Resumo

Nesse estudo foram coletadas e sistematizadas informações sobre publicações em diversas técnicas LID urbana aplicadas no controle de enchentes, armazenamento e tratamento do escoamento pluvial. Foi realizada uma pesquisa bibliográfica quantitativa e qualitativa, por meio de levantamento e análise de publicações na última década e indexadas pela base de dados Web of Science, sobre diversas técnicas LID. A análise quantitativa avaliou o número de publicações sobre técnicas LID de drenagem urbana entre 2010-2019, assim como os países que publicaram mais artigos neste período. Para a análise qualitativa, foram avaliadas e caraterizadas as publicações na última década, principalmente as mais recentes e dentro dos países com mais publicações, pesquisas com aplicação em meso e macroescala, assim como modelos matemáticos. Os resultados demonstraram um aumento crescente e significante de publicações em técnicas LID de drenagem urbana mundialmente. Os países com maior número de publicações foram os Estados Unidos, a Austrália e a China, respectivamente. Em conclusão, foi possível verificar por meio deste estudo que existe uma tendência mundial na pesquisa e implantação de técnicas LID de drenagem urbana.

**Palavras–chave:** Drenagem urbana; escoamento; técnicas LID; Inundações urbanas.

**Caderno de Geografia (2023) v.33, n.73**
ISSN 2318-2962
DOI 10.5752/p.2318-2962.2023v33n73p336

**Abstract**
This study collected and systematized global scale information on publications of several urban drainage LID techniques for flood control, stormwater storage and treatment. The quantitative and qualitative bibliographic study was carried out, sourcing and analyzing publications within the last decade and indexed in the Web of Science database. The quantitative analysis evaluated the number of publications on urban drainage LID techniques between 2010-2019 and the countries with the highest number of publications for the same period. The qualitative analysis evaluated and characterized the publications within the last decade, mainly more recent and of countries with the highest number of publications, research at meso and macroscale, and mathematical models. The results showed a significant increase in global publications on urban drainage LID techniques. The countries with the highest publications were the United States, Australia and China. In conclusion, through this study, it was possible to verify a global tendency to research and implement urban drainage LID techniques globally.

**Keywords:** Drainage urban; treatment; LID techniques; urban flooding.

## 1. INTRODUÇÃO

As consequências de um gerenciamento inadequado das águas pluviais variam de acordo com a quantidade e a qualidade das águas descarregadas e podem acarretar diversos problemas, como degradação de habitats naturais, através de inundações, poluições de corpos d'água e erosão dos canais naturais (CÁRDENAS; FHAISULY, 2017). Fatores como características climáticas, intensidade de urbanização, história e política são fatores que determinam a extensão e a natureza dos sistemas de drenagem de água. Países como Alemanha e Reino Unido têm mais de 90% de sua população conectada a sistemas de esgotos, enquanto países como a Indonésia, devido à sua distribuição demográfica e histórica, geralmente carecem de sistemas de drenagem adequados. (LÓPEZ, 2018).

Os grandes desafios são as mudanças climáticas e a ineficiente gestão dos recursos hídricos. Mudanças no clima ameaçam reduzir a disponibilidade de água e impor custos econômicos significativos para as autoridades nacionais e globais. Eventos extremos causados por mudanças climáticas, como secas, enchentes, furacões e tempestades, ondas de calor e de frio, aumento no nível do mar e os impactos na saúde, na geração de energia hidrelétrica e na agricultura, além da formação de ilhas de calor em grandes cidades, podem gerar enormes perdas econômicas e de vidas (CÁRDENAS; FHAISULY, 2017; DRUMONT *et al.,* 2020). Portanto, é preciso reduzir tanto o desperdício quanto a poluição da água.

Assim, a implementação de modelos de gestão da água eficientes e sustentáveis são imprescindíveis para minimizar os efeitos negativos que as mudanças climáticas

ISSN 2318-2962
DOI 10.5752/p.2318-2962.2023v33n73p336

representam para os recursos hídricos. Esses modelos devem reduzir o estresse hídrico causado pelo aumento da temperatura, pelas mudanças nos padrões de precipitação e pela vulnerabilidade das cidades a essas mudanças. Novas abordagens na gestão de recursos hídricos surgiram, fornecendo métodos e técnicas alternativas de escoamento superficial da água em zonas urbanas (WOODS-BALLARD *et al.,* 2015; GONÇALVES *et al.,* 2018; LIU *et al.,* 2019).

Essas novas abordagens de drenagem urbana combinam aspectos hidrológicos, ambientais e sociais, como: Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentável (Sustainable Drainage System - SUDS), Melhores Práticas de Gestão (Best Management Practices - BMP), Desenho Urbano Sensível à Água (Water Sensitive Urban Design - WSUD), entre outros (CÁRDENAS; FHAISULY, 2017; GIMENEZ-MARANGES *et al.,* 2021). Os objetivos dessas abordagens são a restauração do ciclo natural da água nas áreas urbanas e manutenção da hidrologia local, minimizando os impactos do desenvolvimento urbano em termos de quantidade e qualidade do escoamento (durante sua coleta, transporte e destino), maximizando a integração da paisagem e o valor social.

Essas abordagens alternativas incentivam a implementação de sistemas de drenagem que reduzam o volume de escoamento a jusante, facilitando a recarga natural de aquíferos, impedindo que águas pluviais com alta concentrações de contaminantes sejam descarregadas em corpos de água receptores protegendo, assim, a qualidade da água (WOODS-BALLARD *et al.,* 2015; CHEN *et al.,* 2021).

A redução da impermeabilidade do solo usando as características de drenagem natural é uma importante estratégia para manter ou melhorar as características hidrológicas de uma bacia hidrográfica (FLETCHER *et al.,* 2015; CHEN *et al.,* 2021). As técnicas de Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto (Low Impact Development - LID) oferecem uma maneira inovadora de integrar o gerenciamento de águas pluviais em paisagens naturais, minimizando alterações no regime hidrológico natural e reduzindo o volume de escoamento superficial (XU *et al.,* 2019).

As técnicas LID são uma abordagem que visa minimizar os impactos adversos de escoamento de águas pluviais e urbanas por meio do planejamento e implementação de medidas não-estruturais e estruturais conhecidas como Melhores Práticas de Gerenciamento ou BMPs que preservem ou mimetizem a resposta hidrológica natural (SHAFIQUE; KIM, 2017; XU *et al.,* 2019).

As gestões convencionais das águas frequentemente usam instalações estruturais centralizadas para o escoamento de águas pluviais para fora das cidades, direcionando-as

ISSN 2318-2962
DOI 10.5752/p.2318-2962.2023v33n73p336

a jusante das bacias hidrográficas. Já no LID, as condições hidrológicas naturais são reproduzidas facilitando o processo de infiltração, evaporação e escoamento de águas pluviais na fonte, através do uso de solos nativos ou melhorados, vegetação e bioengenharia. Portanto, técnicas LID interagem com o processo natural de escoamento de águas pluviais, controlando o alastramento de poluentes para corpos d'água receptores e tratando as águas pluviais como um recurso no local. Como tal, o LID promove o conceito de projetar com a natureza (SHAFIQUE; KIM, 2017; GU *et al.;* 2019).

A implantação de técnicas LID pode melhorar o tratamento da qualidade da água, facilitar a recarga de água subterrânea, e reduzir a erosão do solo e o transporte de sedimentos e de poluentes. Entre os benefícios adicionais do uso de LID são: a melhoria estética das vias verdes e parques em ambientes urbanos e a redução da necessidade de instalação e manutenção de novas infraestruturas de drenagem convencional (CLAR *et al.,* 2004).

Nos últimos anos, as técnicas de drenagem LID foram testadas e demonstraram sua eficácia numa variedade de cenários, tanto a nível nacional como internacional, e está na vanguarda das abordagens de gestão de águas pluviais.

O objetivo principal desse trabalho é apresentar uma abordagem quantitativa e qualitativa sobre o estado da arte de diversas tecnologias sustentáveis desenvolvidas para controle de drenagem urbana, com foco nas técnicas estruturais LID. É realizado uma sistematização da literatura com o intuito de tornar essas informações acessíveis e permitir uma visão ampla sobre as técnicas consolidadas na última década.

## 2. DESENVOLVIMENTO

Este estudo é caracterizado como bibliográfico, bem como do tipo quantitativo e qualitativo, realizado por meio de levantamento e análise de publicações da última década e indexadas pela *Web of Science*, sobre técnicas LID em drenagem urbana. Delimitamos nossos objetos de pesquisa nesse contexto por entender que essas bases representam a produção mais atual com referência as pesquisas na área da Engenharia Ambiental relevantes para esse estudo. Foram, portanto, quantificados e analisados artigos e outras fontes científicas de acordo com os principais aspectos relacionados ao panorama geral e aplicações sobre as técnicas LID em drenagem urbana.

Entre as perguntas e parâmetros que foram determinados no design do estudo estavam: Quantos foram publicados na última década? Em quais países estes estudos estão localizados? (Quantitativo). Estudos recentes em mesoescala e macroescala, estudos que

ISSN 2318-2962
DOI 10.5752/p.2318-2962.2023v33n73p336

utilizam modelagem matemática e quais modelos são utilizados? Quais as características dos sistemas de LID de drenagem urbana mais utilizados atualmente? (Qualitativo).

A análise bibliométrica foi conduzida por métodos quantitativos e qualitativos, utilizando-se fontes primárias de publicações como artigos científicos revisados por pares, artigos de conferência e livros, relatórios de pesquisa, manuais institucionais e governamentais, além de dissertações de mestrado e teses de doutorado. As buscas e a compilação dos dados foram realizadas entre setembro e outubro de 2019, cobrindo todos os tipos de publicações sobre técnicas LID de drenagem urbana na última década (2010 – 2019) e indexados na base de dados *Web of Science*.

Os descritores utilizados para as buscas foram determinados da seguinte forma: nome da técnica LID em inglês (*bioremediation, bioswales, permeable pavements, green roofs, sand filters, rainwater, wetlands*) em conjunto com o termo *stormwater*, que foi um dos termos mais prevalentes em publicações sobre as técnicas LID de drenagem urbana (ROSA *et al.,* 2019).

A análise quantitativa avaliou, por meio das ferramentas de estatística descritiva da base de dados *Web of Science*, o número de publicações sobre técnicas LID de drenagem urbana entre 2010-2019, assim como os países que publicaram mais artigos neste mesmo período. Os dados foram extraídos das buscas realizadas para cada descritor individualmente, e foram apresentados os 10 países com o maior número de publicações no período estudado.

A análise qualitativa foi organizada em diversas etapas como a localização dos acervos, critérios para a seleção do material que compõe o corpus, coleta do material de pesquisa, leitura das publicações para elaboração da síntese (considerando o tema, objetivos, a metodologia e conclusões), organização do relatório do estudo, análise e elaboração das conclusões. Primeiramente, a análise qualitativa foi realizada identificando estudos dentro dos países com mais publicações e com prioridade para estudos mais recentes (análise quantitativa) e/ou com aplicação em mesoescala e macroescala, assim como designs inovativos e modelos matemáticos. A escolha das publicações na busca inicial foi realizada pela leitura dos títulos e das palavras chave. As publicações que continham ambos os termos (técnica LID + *stormwater*) no título, nas palavras chave e no resumo foram selecionados para a leitura.

Subsequentemente, as publicações selecionadas foram avaliadas e classificadas de acordo com o alinhamento ao tópico e a disponibilidade de *download*. Finalmente, na análise qualitativa foram adicionados, sempre que necessário, artigos científicos de literatura cinza (do inglês *grey literature*) com alta relevância para o tópico.

ISSN 2318-2962
DOI 10.5752/p.2318-2962.2023v33n73p336

## 2.1. Biorretenção

Áreas de biorretenção captam e armazenam temporariamente o escoamento de águas pluviais. Esses sistemas promovem a evaporação e a infiltração das águas pluviais no solo, restaurando as condições hidrológicas naturais e melhorando assim a qualidade da água, e a qualidade de vida da população. Outros benefícios das áreas de biorretenção incluem a melhora estética, aumento da biodiversidade, redução na erosão do solo, aumento do fluxo de água para o solo e rios locais. A biorretenção é o sistema de drenagem urbana que promove uma maior sustentabilidade para áreas urbanas pois, por meio dessa técnica é possível coletar, armazenar, infiltrar e tratar o escoamento de águas pluviais urbanas. Portanto, a biorretenção é considerada entre as melhores técnicas LID na restauração da hidrologia e do meio ambiente local (DELETIC; FLETCHER, 2006; DAVIS, 2007; DAVIS *et al.,* 2009; DEBUSK *et al.,* 2012).

As áreas de biorretenção são geralmente pequenas e com menos de 2 ha, no entanto, apesar da área reduzida, são sistemas complexos onde ocorrem diversas interações físicas, químicas e biológicas. A Figura 1 esquematiza o sistema de biorretenção, que consiste em diferentes camadas contendo filtro, vegetação, mistura de solo, solo natural e opcionalmente um sistema de extravasamento conectado a um dreno. O escoamento pluvial afluente passa pela camada de filtração, infiltra no solo ou é armazenado internamente. Este processo, além de recarregar o solo e o lençol freático, diminui fluxo de pico e escoamento superficial evitando enchentes e alagamentos. O efluente tratado pode ser também reutilizado ou descarregado em rios e riachos sem prejuízo ambiental.

Outros processos naturais que ocorrem em sistemas de biorretenção são a percolação do solo e a evapotranspiração pela camada vegetal superficial. As raízes das plantas absorvem água e nutrientes do afluente e os incorpora na biomassa, em um processo chamado de bioacumulação ou biorremediação. Portanto, os aspectos principais investigados na implantação de áreas de biorretenção são a recuperação da hidrologia natural e o tratamento do escoamento pluvial (MACEDO; LAGO; MENDIONDO, 2019).

**Caderno de Geografia (2023) v.33, n.73**
ISSN 2318-2962
DOI 10.5752/p.2318-2962.2023v33n73p336

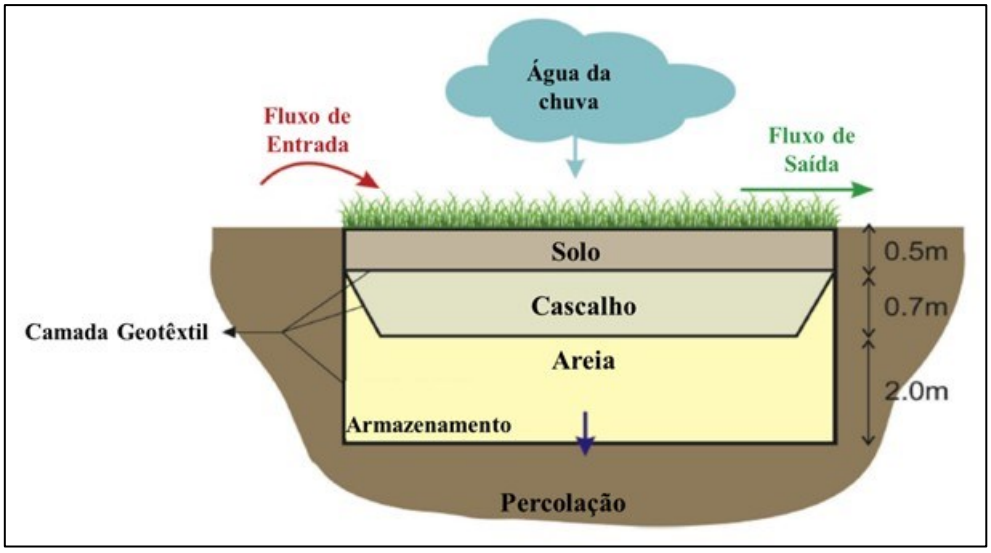


**Figura 1** – Representação esquemática de um sistema clássico de biorretenção.
**Fonte:** Adaptado de Macedo, Lago e Mendiondo (2019).

Diversos trabalhos de campo, em mesoescala e macroescala, foram desenvolvidos para o monitoramento de áreas de biorretenção nos Estados Unidos. Davis (2008) monitorou duas instalações de biorretenção de 28 m² que receberam escoamento pluvial de um estacionamento com 0,24 ha por quase dois anos. Nesse sistema de biorretenção, foram reduzidos tanto o fluxo de pico como o volume total de descarga em média 49 e 58%, respectivamente. Outro estudo, com seis unidades de biorretenção, demostrou que esses sistemas promovem benefícios hidrológicos substanciais pela redução e atraso do pico de fluxo e também na diminuição do volume de escoamento (LI *et al.,* 2009). Dessa diminuição, foi determinado que 19% ocorreu por evapotranspiração da vegetação de cobertura e 8% pelo processo de percolação.

O estudo de Chapman e Horner (2010) também demonstrou que a evapotranspiração e percolação ocorrem, no entanto, observaram taxas bem mais elevadas destes processos, 48% e 74%, respectivamente. Os sistemas de biorretenção pode também ser adaptados para áreas já urbanizadas, e como demostrado por DeBusk e Wynn (2011) podem reduzir os volumes e taxas de fluxo de escoamento pluvial em 97% e 99%, respectivamente. James e Dymond (2011) investigaram o papel que a biorretenção desempenha quando distribuída ao longo de uma bacia urbanizada e concluíram que o sistema foi capaz de reduzir significativamente o escoamento da área de captação.

Os sistemas de biorretenção também tem a capacidade de remover sólidos suspensos, nutrientes dissolvido, metais pesados e microrganismo do escoamento pluvial. Li e Davis (2008) monitoraram duas unidades de biorretenção por 15 meses e observaram uma redução significativa dos sólidos suspensos totais, chumbo e zinco. Além disso, diversos estudos

ISSN 2318-2962
DOI 10.5752/p.2318-2962.2023v33n73p336

apresentaram taxas de remoção de nutrientes que variam entre 32 e 64% e taxas de remoção de metais pesados entre 57 e 83%. (DAVIS, 2007; WINSTON *et al.,* 2011; BROWN; HUNT, 2012). Lloyd e Wong (2008) detectaram uma redução de sedimentos de 68% e uma redução de nitrogênio e fósforo de 60 e 57%, respectivamente.

O Brasil aparece em 12º lugar na lista de países com mais publicações da *Web of Science*, demonstrando que as áreas de biorretenção estão ganhando notoriedade no país. O desempenho dessa técnica vem sendo avaliada tanto em microescala (em condições laboratoriais) quanto em macroescala (em condições de campo) com resultados positivos, indicando um alto potencial de implementação desses sistemas em diversas regiões do Brasil.

Outra forma de avaliação da implantação de sistemas de biorretenção se dá por meio da aplicação de modelos matemáticos computacionais. Esses modelos estendem a capacidade de simular processos complexos de biorretenção baseados em equações matemáticas. As técnicas de modelagem simplificam os sistemas de biorretenção, ajudam a caracterizar o fluxo interno de água, o fluxo de poluentes e a hidrologia, assim como auxiliar na eficiência de redução de volume e remoção de poluentes (ROSSMAN, 2015).

O modelo DRAINMOD pode ser utilizado para prever a resposta hidrológica de biorretenções a partir da vazão de entrada contínua e de longo prazo. Suas equações são baseadas no balanço hídrico do perfil do solo e no balanço hídrico na superfície do solo. Ele também usa a equação de Green e Ampt para calcular a taxa de infiltração (BROWN *et al.,* 2013). As entradas para o modelo incluem propriedades do solo (condutividade hidráulica das camadas, por exemplo), dados meteorológicos, variáveis de cultura e parâmetros do local.

O Modelo de Gestão de Drenagem Urbana (*Storm Water Management Model* - SWMM) descreve as áreas de biorretenção como depressões artificiais vegetados, cuja camada de solo é preparada com o intuito de remover sedimentos e poluentes do escoamento superficial. Sob esse solo, instala-se uma vala de drenagem com cascalhos possuindo a função de armazenar, infiltrar e evapotranspirar a água da chuva (ROSSMAN, 2015). Wang *et al.* (2016) e Li, Li e Li (2016) utilizaram o SWMM para simular sistemas de biorretenção. Seus principais parâmetros são a distribuição da chuva, condições de cada camada, fator de colmatação e existência de dreno profundo. No Quadro 1 podemos ver alguns outros modelos e suas capacidades.

Recentemente, a modelagem de técnicas de drenagem LID também tem sido estudada no Brasil. Gonçalves *et al.* (2018) utilizaram o software SWMM, criado para modelação da hidrodinâmica de esgotos e análise de eficiência das técnicas de drenagem LID. Os resultados demostraram que a performance dos sistemas de biorretenção são dependentes do evento de

chuva, mas que é possível obter uma redução de volume entre 30 e 75% em determinados cenários.

**Quadro 1 –** Modelos matemáticos de biorretenção.

| Modelo | Breve Descrição | Capacidades |
|---|---|---|
| SWMM | Modelo hidrológico, hidráulico e de qualidade da água com opção de simulação contínua. | Análise detalhada de bacias hidrográficas com foco em LID de armazenamento. |
| Hydro-CAD | Modelo hidrológico que usa uma metodologia de tempestade projetada para calcular o roteamento de escoamento e lago de detenção com opção de exfiltração. | Análise de LID de armazenamento e infiltração dentro de uma bacia hidrográfica. |
| HEC-HMS | Modelo que desenvolve padrões hidrográficos baseados em dados de precipitação. | Obtenção de hidrogramas padrão, não-ajustados. Não é recomendado para modelar práticas integradas. |
| RECARGA | Modelo hidráulico para evento opcional e simulação contínua ou desenho de projeto. | Análise detalhada de hidráulica de bioretenção e retenção de escoamento. |
| DRAINMOD | Modelo hidrológico baseado na drenagem agrícola e tratamento, processo semelhante ao da biorretenção. | Simula lençol freático e perfil de umidade do solo. |
| WinSLAMM | Modelo hidrológico que usa uma distribuição derivada baseada em hidrologia de pequenas tempestades para simular controles de desempenho. | Transporte de poluentes na superfície da bacia calculada com base nas características da terra. Modelo rastreia poluentes de fontes e prevê efeitos de controles. |
| IDEAL | Modelo hidrológico que usa uma distribuição derivada para simular o desempenho dos controles, tanto para qualidade quanto para quantidade. | O modelo de carregamento e tratamento de poluentes com base no processo; inclui deterioração, sedimentação e infiltração, com foco na avaliação de um local antes e depois do desenvolvimento. |
| WWHM | Modelo hidrológico baseado em HSPF adaptado para o planejamento de práticas de controle usando simulação contínua. | Os parâmetros regionais calibrados para os 19 municípios do oeste de Washington, Versão 2012, incluem elementos de modelagem para modelar com mais precisão a bioretenção e outras práticas de LID. |

**Fontes:** LIU *et al.,* 2014.

**Caderno de Geografia (2023) v.33, n.73**
ISSN 2318-2962
DOI 10.5752/p.2318-2962.2023v33n73p336

## 2.2. Biovaletas

As biovaletas (bioswales ou valas de infiltração) são estruturas paisagísticas que se encaixam nas técnicas LID pois favorecem a desaceleração, limpeza e infiltração de águas pluviais no subsolo. Os principais objetivos das biovaletas são a minimização e retardamento do escoamento de águas pluviais e melhoria da qualidade da água (BEDAN e CLAUSEN, 2009). A configuração dos projetos de biovaletas variam significativamente e podem ser construídas com ou sem barragens de retenção e mídia de armazenamento de subterrânea. Atualmente, diferentes tipos de sistemas de biovaletas estão sendo usados, como valas de grama, filtros biológicos e tiras de filtro (SHAFIQUE; KIM, 2017).

Entretanto, conforme a Figura 2, eles são basicamente formados por canais de declive rasos, estreitos e vegetados, muitas vezes referidas como biorretenção linear. A inclinação rasa das biovaletas contribui para a redução da velocidade do fluxo de água, aumentando assim a infiltração e o aprimorando a qualidade da água infiltrada. Nas últimas três décadas, biovaletas foram amplamente implementadas para gerenciar as águas pluviais em locais como estacionamentos, estradas e rodovias (SHAFIQUE; KIM, 2017). As biovaletas também podem ser instaladas em áreas relativamente pequenas, substituindo meios-fios e sarjetas (FREEBORN; SAMPLE; FOX, 2012). Essas estruturas possuem custos relativamente baixos de construção e manutenção, podendo ser adaptados de acordo com os requisitos e condições locais (SHAFIQUE; KIM, 2017).

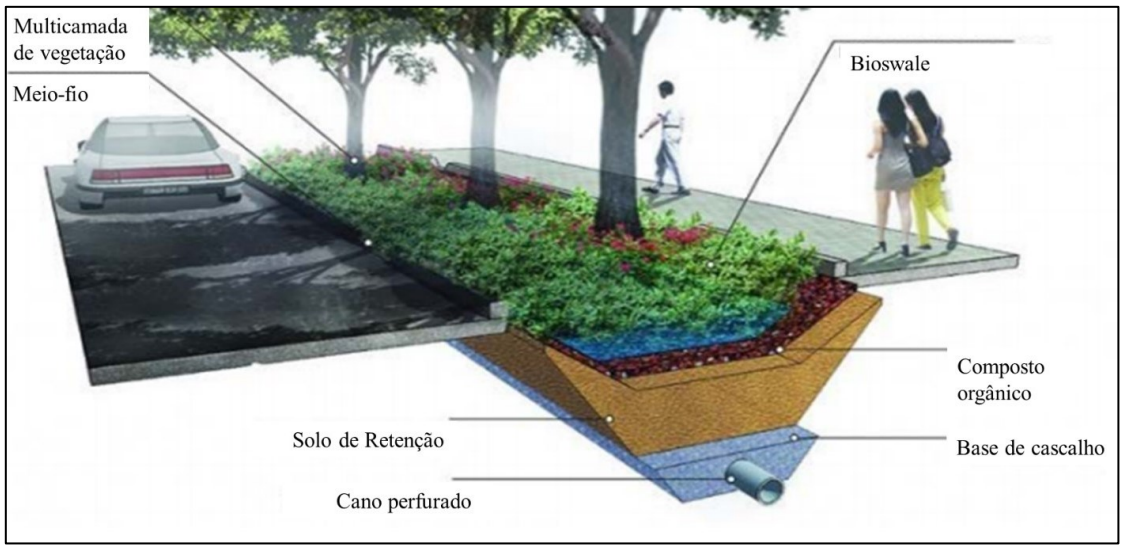


**Figura 2** – Diagrama conceitual de uma biovaleta.
**Fonte**: Adaptado de Dinic-Brankovic *et al.* (2019).

A capacidade de infiltração das biovaletas também já foi amplamente avaliada, e os resultados dependem de diversos fatores como o tipo de solo, especificações do projeto,

ISSN 2318-2962
DOI 10.5752/p.2318-2962.2023v33n73p336

volume de precipitações, métodos de construção e tempo de implementação (SHAFIQUE; KIM, 2017). Em regiões onde o solo possui baixas taxas de infiltração, as biovaletas podem se saturar rapidamente, comprometendo a capacidade de retenção do escoamento.

Modelos matemáticos são fundamentais para a optimização de projeto, a relação custo-benefício e a manutenção dos biovaletas. Um modelo denominado dinâmica de fluidos computacional (CFD) está atraindo cada vez mais atenção pois tem o potencial de avaliar biovaletas em escala microscópica. O CFD pode ser utilizado para prever fenômenos hidráulicos e de transporte em estágios pré-instalação de biovaletas (HEANEY; SANSALONE, 2012).

### 2.3. Pavimentos permeáveis

Pavimentos permeáveis são técnicas LID de drenagem urbana que promovem a infiltração e retenção temporária das águas da chuva no subsolo (ALESSI *et al.,* 2006; BRUNO; AMORIM; SILVEIRA, 2013). Parte da água precipitada infiltra o solo através de uma superfície de revestimento permeável, podendo ser retida em um reservatório de pedras ou se infiltrar no sole até atingir o lençol freático. Portanto, esse tipo de pavimento tem um maior potencial de reduzir o volume de escoamento superficial na fonte, retardar o fluxo de pico, melhorar a qualidade da água escoada e aumentar a recarga de água no subsolo do que os pavimentos convencionais (ARAÚJO; TUCCI; GOLDENFUM, 2000).

Além da redução dos volumes de água escoados, os pavimentos permeáveis possuem outras vantagens, como a redução da formação de lâminas d´água em estacionamentos e calçadas, possibilidade de redução do sistema de drenagem pluvial local e melhoramento do visual da paisagem local (DAVIS *et al.,* 2009; DEBUSK *et al.,* 2012). Tudo isso sem ocupar áreas adicionais. Eles também são eficientes na remoção de diversos poluentes, melhorando a qualidade da água escoada. Entretanto, eles precisam de manutenção periódica para evitar a colmatação e não são recomendados para locais com tráfego pesado de veículos. Portanto, eles podem ser utilizados em estacionamentos de veículos leves, calçadas e passeios públicos que, em grandes cidades, podem representar uma área de consideração da bacia hidrográfica (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2011).

Existem basicamente três tipos de pavimentos permeáveis: asfalto poroso, concreto poroso e blocos de concreto vazados preenchidos com areia ou vegetação rasteira, como gramíneas. A construção dos revestimentos permeáveis é feita sem a fração de areia fina que compõe os pavimentos convencionais.

**Caderno de Geografia (2023) v.33, n.73**
ISSN 2318-2962
DOI 10.5752/p.2318-2962.2023v33n73p336

No Brasil os pavimentos permeáveis de concreto devem ser instalados de acordo com as normas ABNT 16416:2015 e os tipos de revestimentos do pavimento são classificados em: intertravados permeáveis; placas de concreto permeável; e concreto permeável. No primeiro tipo de revestimento, a percolação da água ocorre entre as juntas, áreas vazadas ou através dos próprios blocos de concretos, enquanto nos dois últimos a percolação da água se dá através do próprio concreto.

A Figura 3 demonstra como água flui através do pavimento, sendo filtrada gradualmente pelas camadas de assentamento, composta por areia, base e sub-base, compostos por brita ou pedras, antes de se infiltrar no solo. Portanto, a camada superior de revestimento permeável serve para facilitar a condução rápida das águas das chuvas para as camadas abaixo, que funcionam como um reservatório. Neste reservatório a água pode infiltrar no subsolo ou ser coletada e transportada por tubos de drenagem para uma saída (SILVA *et al.,* 2009).

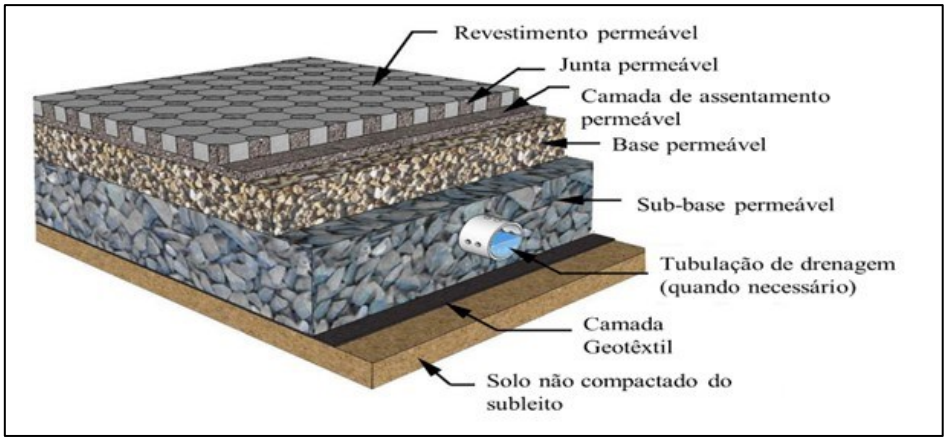


**Figura 3** – Perfil típico dos pavimentos permeáveis.
**Fonte**: Adaptado de Freeborn, Sample e Fox (2012).

Pavimentos permeáveis são amplamente utilizados em diversos países em todo o mundo. Pesquisas recentes desenvolvidas nesses países e no Brasil avaliaram o desempenho e a eficiência hidrológica e ambiental dos pavimentos permeáveis em diferentes condições.

No Brasil, a maioria dos estudos que avaliam a eficiência de pavimentos permeáveis ainda são experimentais, analisando principalmente a capacidade de retenção do escoamento superficial. Os estudos demonstram que o desempenho dos pavimentos permeáveis está diretamente ligado a qualidade do projeto, a construção, a profundidade e a capacidade de armazenamento, a configuração do pavimento, as características dos materiais utilizados e uma manutenção periódica (SCHOLZ; GRABOWIECKI, 2007). A

**Caderno de Geografia (2023) v.33, n.73**
ISSN 2318-2962
DOI 10.5752/p.2318-2962.2023v33n73p336

eficiência hidrológica desses pavimentos é também influenciada por outros fatores como o tipo de solo e sua capacidade de infiltração, topografia, condições climáticas, qualidade da água drenada (SILVA *et al.,* 2009).

## 2.4. Telhados verdes

Os telhados verdes, ou coberturas verdes, são áreas de vegetação instaladas no topo de edifícios. A Figura 4 representa esquematicamente um sistema de telhado verde que, normalmente, consiste em várias camadas, incluindo vegetação, substrato, camada de filtro, material de drenagem, isolamento, barreira radicular e membranas à prova de água. Existem duas categorias principais de telhados verdes: os sistemas extensivos e intensivos (WOODS-BALLARD *et al.,* 2015).

**Figura 4** – Camadas presentes em um sistema de telhados verdes.
**Fonte:** Adaptado de Vijayaraghavan (2016).

Os sistemas extensivos possuem uma camada de substrato pouco profunda (20-150 mm), o que reduz a carga de peso na estrutura do edifício, comportando plantas simples, tolerantes a situações climáticas e de baixa manutenção (WOODS-BALLARD *et al.,* 2015).

Os sistemas extensivos apresentam boa capacidade de redução do escoamento superficial da água, de redução de temperaturas em ilhas de calor urbanas e aumento da umidade no ambiente (TASSI *et al.,* 2014). A água é geralmente armazenada no substrato e a camada de drenagem ou retenção é suficiente para suprir a demanda hídrica das plantas. Entretanto, em condições climáticas extremas, um sistema de irrigação pode ser necessário para garantir a sobrevivência da vegetação durante períodos de seca. Eles

ISSN 2318-2962
DOI 10.5752/p.2318-2962.2023v33n73p336

geralmente são adequados para implementação em edifícios já existentes devido ao seu peso leve (WOODS-BALLARD *et al.,* 2015). Os telhados extensos são os mais comuns em todo o mundo devido ao menor peso, baixa exigência de irrigação e menor custos de capital inicial e manutenção (SHAFIQUE *et al.,* 2018).

Os sistemas intensivos, também conhecidos como jardins de cobertura, possuem uma camada de substrato (>150 mm) e de drenagem ou retenção mais profunda, aumentando a carga de peso na estrutura do edifício (WOODS-BALLARD *et al.,* 2015). Esses sistemas comportam uma variedade maior de plantas incluindo arbustos e árvores, mas a manutenção também é mais intensiva e sistemas de irrigação são geralmente necessários (TASSI *et al.,* 2014). Entretanto, a água retida na camada de drenagem e aquela coletada na condensação do ar-condicionado podem ser utilizadas na irrigação. Sistemas intensivos apresentam boa capacidade de escoamento superficial da água, de redução de temperaturas e de aumento da umidade no ambiente, podendo funcionar ainda como atrativos para fins recreativos ou de lazer, já que muitos projetos aparentam jardins naturais.

Mentens *et al.* (2006) verificaram que na Alemanha os telhados verdes com uma espessura média de 10 cm têm capacidade para reter 45% das águas pluviais e telhados com espessura média de 15 cm podem reter 75% do escoamento de águas pluviais, enquanto telhados tradicionais ou com cascalho retêm apenas 15% e 25%, respectivamente.

Nos Estados Unidos, (SCHULTZ *et al.,* 2018) compararam a performance de duas áreas de 1200 m² de um mesmo telhado verde instalado com duas espessuras diferentes (75 e 125 mm), em diversos cenários de tempestade típicos da cidade de Portland, Oregon. Eles concluíram que, dependendo do nível de precipitação das tempestades, o telhado mais espesso reteve até 96,6% enquanto o telhado menos espesso reteve até 48,8% das águas das chuvas. Portanto, a espessura do substrato pode melhorar o desempenho de sistemas de telhados verdes, principalmente em regiões de clima mais seco.

Em Porto Alegre, um estudo comparou um terraço plano e um telhado com uma inclinação de 15º e a taxa de retenção do escoamento após 12 horas do início da chuva foi de 63 e 25%, respectivamente, demonstrando que a inclinação da superfície pode afetar diretamente a capacidade de retenção das águas da chuva. Além da redução do volume de escoamento de águas superficiais, a instalação desses telhados pode trazer múltiplos benefícios sociais, econômicos e ambientais, como controle da temperatura, da qualidade de vida, do ar e da água e dos custos de energia do edifício (CASTRO; GOLDENFUM, 2010).

ISSN 2318-2962
DOI 10.5752/p.2318-2962.2023v33n73p336

Devido aos diversos benefícios, telhados verdes estão sendo implementados em diversos países e até prêmios de Excelência são distribuídos para os melhores projetos. A Alemanha foi um dos primeiros países a implementar os telhados verdes modernos, para reduzir o consumo de energia no início dos anos 60, e hoje mais de 10% dos edifícios possuem telhados verdes instalados (SHAFIQUE; KIM; RAFIQ, 2018).

Atualmente, países como Austrália, Canadá, Cingapura, Estados Unidos e Japão estão promovendo fortemente a instalação de telhados verdes em novos edifícios e incentivando a reforma de edifícios antigos para uma futura instalação de telhados verdes. Apesar de o Brasil não ter uma política nacional que incentive essa medida, diversas iniciativas municipais estão sendo criadas para incentivar, direta ou indiretamente, a implementação de telhados verdes no Brasil.

## 2.5. Filtros de areia

Os filtros de areia são técnicas LID que filtram águas pluviais, comumente utilizados para remover poluentes antes de entrar no sistema de drenagem urbano. Eles podem ser de superfície ou subterrâneos. Eles formam bacias de sedimentação e filtração que atenuam a poluição na fonte, melhorando a qualidade da água antes de ser lançada em corpos d´água (JEONG *et al.,* 2012). Eles também controlam a quantidade de água escoada, reduzindo o fluxo de pico devido ao armazenamento local do volume escoado. A água filtrada é coletada em tubulações subterrâneas e devolvida ao fluxo ou canal (JIA; YAO; SHAW, 2013).

Os filtros de areia podem ser utilizados em locais pequenos, como estacionamentos e empreendimentos; áreas com alto potencial de poluição, como áreas industriais; áreas altamente urbanizadas, onde a disponibilidade ou os custos da terra impedem o uso de outros tipos de BMP; e em estradas para escoar e tratar águas pluviais poluídas (JIA; YAO; SHAW, 2013). Jeong *et al.* (2012) usaram uma Ferramenta de Avaliação de Solo e Água (Soil and Water Assessment Tool - SWAT) para modelar o fluxo através de um sistema de filtro de areia amplamente implementado na cidade de Austin, Texas.

Nesses sistemas, a água escoada é direcionada à uma bacia de sedimentação, na qual os poluentes particulados são sedimentados por gravidade e, em seguida, são tratados por meio de filtro. O filtro de areia, cuja área era de 250 m² e profundidade de 0,5 m, demonstrou uma alta eficiência retendo de 96,5% do sedimento (JEONG *et al.,* 2012).

Em Sydney, Austrália, Kandasamy *et al.* (2008) realizaram um estudo de campo de 18 meses para investigar a eficácia e a eficiência de remoção de poluentes de um filtro de

ISSN 2318-2962
DOI 10.5752/p.2318-2962.2023v33n73p336

areia, com área de 155 m³ e área de captação de 6 ha. O leito do filtro de areia foi dividido em dois compartimentos para testar a eficiência de remoção de poluentes de dois tipos de areia, fina e grossa, para o tratamento de águas pluviais para fins de reutilização não potável. Os dois tipos de areia foram igualmente eficientes na redução de nutrientes, como fósforo total (39-41%) e nitrogênio (53-70%), e de metais pesados, como o zinco (79-83%). Entretanto o filtro com leito de areia mais grossa foi mais eficiente na remoção de coliformes fecais e sólidos suspensos totais (SST - 79 e 76%, respectivamente) do que o leito com areia mais fina (65 e 32%, respectivamente).

Biochar é o nome que tem o carvão vegetal quando é empregado como correção para o solo. O biochar têm um excelente potencial de filtragem, devido à sua grande área de superfície e estrutura microporosa. Reddy *et al.* (2014) demonstraram que, em condições laboratoriais, o biochar reduz 86% do SST e 86 e 47% das concentrações de nitrato e fosfato na água escoada, respectivamente.

Além disso, o filtro de biochar removeu de 8-58% dos metais pesados (Cd, Cr, Cu, Pb, Ni e Zn). Assmuth *et al.* (2018) confirmaram que, em condições de campo, filtros de areia são eficientes na retenção de poluentes como metais, SST e fósforo total e que a adição de biochar ao filtro de areia melhora ainda mais a capacidade de remoção de nitrogênio da água escoada.

O modelo SWMM foi utilizado na Espanha para projetar um filtro de areia com capacidade de filtração de aproximadamente 90% da média anual do escoamento de águas pluviais de uma rodovia em Fene (SUÁREZ *et al.,* 2013). A rede de drenagem da rodovia, construída com tubos de concreto com diâmetro médio de 400 mm, tem cerca de 128 km de extensão. A área total de captação é de 3,9 ha, com 71% da superfície impermeável, enquanto a área de drenagem para a unidade de filtragem é de apenas 0,9 ha e é quase impermeável (91%). Os autores combinaram dados coletados no campo e modelagem numérica para executar uma simulação de longo prazo (10 anos) testando a eficiência hidráulica de diferentes configurações de filtro, variando o volume da unidade e o tempo de drenagem.

Assim, eles desenvolveram um programa de gerenciamento e monitoramento para caracterizar a poluição do escoamento superficial da bacia piloto, que contém principalmente SST, hidrocarbonetos, fósforo total, cobre e zinco. Modelos matemáticos como o SWMM, demonstram que filtros de areia possuem melhor desempenho hidráulico e capacidade de tratamento de água do que outras técnicas LID, como telhados verdes e

ISSN 2318-2962
DOI 10.5752/p.2318-2962.2023v33n73p336

pavimentos permeáveis, devido a sua maior capacidade de armazenamento (FAIRBAIRN *et al.,* 2018).

## 2.6. Armazenamento de Água da Chuva

Cisternas ou suas contrapartes menores, barris e tanques de chuva, são recipientes que captam o escoamento e o armazenam para uso futuro. Com o controle do tempo e do volume, as águas pluviais capturadas e armazenadas podem ser liberadas com mais eficácia para irrigação ou uso alternativo de águas cinzentas entre eventos de tempestades (BARRETT, 2008). Os barris e tanques de chuva tendem a ser sistemas menores, com menos de 400 L. Cisternas são sistemas maiores que podem ser autossuficientes, acima do solo ou abaixo do solo, geralmente maiores que os tanques (DAVIS, 2007; DAVIS *et al.,* 2009).

Cisternas e barris de armazenamento de água fornecem principalmente controle do volume de águas pluviais; entretanto, melhorias na qualidade da água podem ser alcançadas quando cisternas e barris de chuva são usados em sistemas sequenciais de tratamento com técnicas LID, como por exemplo áreas de biorretenção. A água em cisternas ou barris de chuva pode ser controlada por saídas permanentemente abertas ou válvulas operáveis, dependendo das especificações do projeto. Cisternas e barris de chuva podem ser um método útil para reduzir os volumes de escoamento de águas pluviais em áreas urbanas, onde as restrições do local limitam o uso de outras BMP (BERNDTSSON, 2010).

A Austrália possui uma das mais altas taxas de implementação de sistemas de coleta de água pluvial. De acordo com o Departamento de Estatística da Austrália, 1,7 milhões de residências possuíam tanques de coleta de água da chuva em 2013, representando 34% das residências australianas, comparado a 32% em 2010 e 24% em 2007. Este aumento no número de residências com tanques de coleta de água da chuva foi atribuído as restrições impostas pelo governo, os incentivos governamentais e os aumentos nas tarifas de água (CAMPISANO *et al.,* 2017).

No entanto, apesar da grande quantidade de tanques de coleta de chuva na Austrália, foram encontrados poucos estudos de campo recentes em meso e macroescala. O foco das publicações mais recentes está no desenvolvimento de modelos matemáticos para melhorar os sistemas de coleta, aumentar a redução no consumo de água potável e a restauração dos fluxos e volumes de escoamento pluvial. Xu *et al.* (2018), desenvolveram um modelo matemático utilizando o software R para simular e comparar três tipos de coleta

ISSN 2318-2962
DOI 10.5752/p.2318-2962.2023v33n73p336

de água pluvial, sistema convencional, sistemas de fluxo passivo e sistemas de fluxo ativo, em relação ao suprimento de água e retenção de escoamento pluvial. Os resultados das simulações demostraram que a tecnologia de fluxo ativo foi superior em comparação aos outros modelos em ambos redução de uso de água potável e volume do escoamento.

O Brasil também é um dos países do mundo que mais utilizam sistemas de coleta de água da chuva para suprir a necessidade de água. O Programa Nacional de Apoio à Captação de Água de Chuva e outras Tecnologias Sociais (Programa Cisternas) se concentra na implementação de tecnologias simples e de baixo custo que promovem o acesso à água para o consumo humano e produção de alimentos. O público do programa são famílias rurais de baixa renda que sofrem com a seca ou falta regular de água (DE MORAES e ROCHA, 2013). O programa foi instituído com o objetivo de instalar 1 milhão de cisternas de coleta de água da chuva, objetivo que foi alcançado em 2014, e ampliado para 1,2 milhões de cisterna em 2016. No entanto, a maioria destas cisternas foi instalada na região do semiárido, beneficiando mais de 4,5 milhões de pessoas.

## 2.7. Zonas úmidas artificiais

As Zonas Úmidas Artificiais (ZUA), também conhecidas como *wetlands* e terras úmidas construídas, são sistemas que armazenam temporariamente o escoamento das águas pluviais, promovendo assim, oportunidades para regular a quantidade e qualidade do escoamento pluvial. Elas são geralmente corpos d'água rasos completamente ou parcialmente cobertos por vegetação. As ZUA fazem parte das técnicas de drenagem urbana LID, pois elas promovem uma redução no volume e fluxo de pico do escoamento pluvial, evaporação, infiltração a remoção dos poluentes (HALE *et al.,* 2019).

Além disso, em resposta à escassez de água em escala global, as ZUA oferecem excelente potencial de armazenamento de águas pluviais para subsequente reutilização (MANGANGKA, 2017). Muitos países, como por exemplo a Austrália, reconheceram que o armazenamento de águas pluviais é o último recurso aquático não explorado, representando uma oportunidade de assegurar os recursos hídricos em áreas urbanas (ALLINSON *et al.,* 2015).

A crescente popularidade por essa técnica LID de drenagem urbana ocorreu principalmente pelas vantagens socioeconômicas e ambientais, pois estes sistemas oferecem um funcionamento passivo, de baixa manutenção e operacionalmente simples com potencial aumento de habitat para espécies nativas, atividades recreativas, além da

valorização estética e econômica de áreas urbanas (HEADLEY; TANNER, 2012; AHN e SCHMIDT, 2019). Além disso, as ZUA são ecossistemas artificiais em que o escoamento pluvial é tratado por meio de processos controlados principalmente por fontes naturais de energia, como por exemplo a energia solar e nutrientes reciclados presentes no escoamento. Portanto, em contraposição aos sistemas de drenagem urbana convencionais, as ZUA oferecem equalização do fluxo pluvial, melhorias na qualidade do escoamento, potencializando a sua reutilização, assim como serviços ecossistêmicos essenciais para a sustentabilidade ambiental de áreas urbanas (TAO *et al.,* 2017). Uma ZUA bem planejada é capaz de realizar diversos serviços ecossistêmicos (MERRIMAN *et al.,* 2016).

Nos Estados Unidos, Merriman, Hunt e Bass (2016) avaliaram uma ZUA compartimentalizada com uma área total de 6,8 ha e capacidade de armazenamento total de 10.935 m³, para tratar as águas de uma bacia de 621 ha (48% de superfícies impermeáveis) na Carolina do Norte. Imediatamente após a instalação, o sistema já reduziu 54% do volume escoamento, através do armazenamento de água e sua subsequente evapotranspiração e infiltração, e foi eficiente na remoção de SST e nitrito e nitrato. Após um ano de instalação a vegetação já estava estabelecida, melhorando ainda qualidade da água através da remoção de nutrientes e poluentes, aumento intrínseco evapotranspiração.

Na Filadélfia, pesquisadores examinaram uma ZUA de fluxo superficial de 0,3 ha coberto por vegetação, que trata as águas de uma área suburbana de 18,2 ha com 9,7 ha de superfícies impermeáveis (KOMLOS *et al.,* 2017). A comparação do fluxo de entrada e saída demonstrou que a ZUA reduz de 37-47% o volume escoado, removendo 37-47% do fósforo que entra no sistema.

Outro tipo principal são as chamadas ZUA flutuantes (ZUAF), onde a vegetação desenvolve-se em um dispositivo hidropônico, ou seja, a vegetação não está enraizada no fundo da área de retenção, conforme demonstrado na Figura 5 (HEADLEY; TANNER, 2012). Esse dispositivo hidropônico move-se verticalmente adaptando-se ao fluxo de escoamento de entrada. Assim, apesar de serem relativamente recentes, os sistemas ZUAF ganharam popularidade na última década devido a sua eficiência e praticidade (LUCKE *et al.,* 2019).

Lynch *et al.* (2015) avaliou dois sistemas ZUAF comercialmente disponíveis e comparou a performance dos sistemas em termos de remoção de nitrogênio e fosforo, assim como o crescimento da biomassa de plantas durante 5 meses. Os sistemas comerciais utilizados foram o Beemats e o BioHaven, ambos plantados com Juncus effusus.

**Caderno de Geografia (2023) v.33, n.73**
ISSN 2318-2962
DOI 10.5752/p.2318-2962.2023v33n73p336

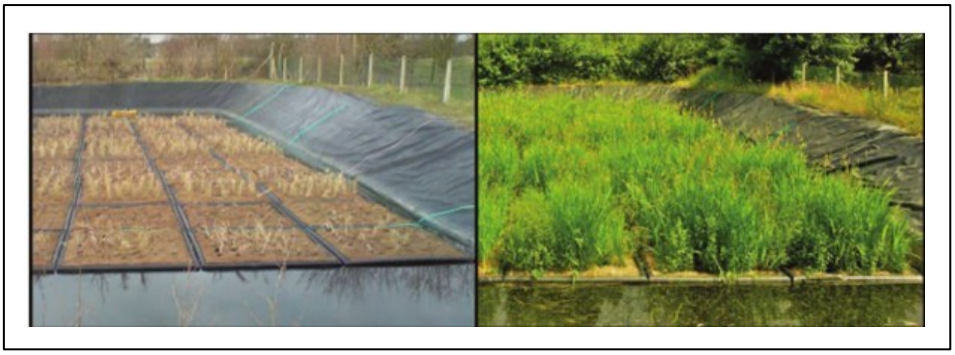

**Figura 5** – Zona úmida de tratamento flutuante.
**Fonte**: Adaptado de Headley e Tanner (2012).

O sistema ZUAF BioHaven removeu 25% e 4%, enquanto o sistema Beemats removeu 40% e 48% do nitrogênio e do fosforo, respectivamente. No entanto, o tanque controle sem os sistemas ZUAF removeu 28% do nitrogênio e 30% fosforo e, portanto, somente o sistema Beemat apresentou uma taxa real e significante de remoção dos nutrientes. Em contraste, apesar das menores taxas de remoção de nutrientes, a biomassa do sistema BioHaven foi maior, comparada ao Beemat. A espécie de macrófita utilizada também pode influenciar nas taxas de remoção de nutrientes em águas pluviais tratadas por meio de sistemas ZUAF.

Gee *et al.* (2016) testou a eficiência de três macrófitas aquáticas, e entre elas a espécie Thalia dealbata apresentou uma melhor remoção de poluentes entre as espécies testadas. Estes resultados foram posteriormente confirmados por Xu *et al.* (2017), onde a espécie Thalia dealbata demostrou uma melhor performance entre diversas espécies de macrofitas aquáticas. Também em mesoescala, McAndrewet *et al.* (2016) testou a eficiência de uma ZUAF, instalada em um lago na universidade de Washington nos Estados Unidos, com uma área total de 50 m². Neste estudo, por meio do sistema ZUAF foram produzidas 2,7 kg de biomassa, 3,1 kg de sedimentos retidos e 0,2 kg de nitrogênio removido das águas pluviais captadas.

Borne *et al.* (2013) investigaram a eficiência de um ZUAF na remoção de poluentes de águas pluviais na Nova Zelândia. Dois tanques em larga escala e geometricamente idênticos foram construídos lado a lado, para a instalação das ZUAF e um tanque controle. Os módulos do sistema ZUAF cobriram 50% da área superficial do tanque em que foram instalados. Os resultados demostraram que o tanque com o sistema ZUAF teve uma maior eficiência, apresentando um efluente significativamente mais limpo comparado ao tanque sem as unidades ZUAF. As taxas de remoção do sistema ZUAF foram de 41% para SST, 40% para ZN e 30% para Cu.

ISSN 2318-2962
DOI 10.5752/p.2318-2962.2023v33n73p336

No mesmo ano, Winston *et al.* (2013) nos Estados Unidos, avaliaram dois sistemas ZUAF distintos onde a concentração de sete dos nove poluentes avaliados foi reduzida significativamente, incluindo nitrogênio, fósforo e SST.

Walker *et al.* (2017) desenvolveram um estudo em macroescala para avaliar a performance de um sistema ZUAF no tratamento de escoamento pluvial na Austrália. A área de captação consistia de total de 7,5 ha com uma área residencial de aproximadamente de 2,2 ha. A lagoa de retenção de água pluvial tinha uma área superficial de 5.048 m², onde foi instalado um sistema ZUAF com 101 m². O sistema ZUAF representava 0,1% em proporção a captação e, apesar do sistema ZUAF não ter um tamanho recomendado de 1 a 2% da área de captação, demonstrou taxas significantes de remoção de nutrientes.

Para os SST e fósforo as taxas de remoção foram de 81% e 52%, respectivamente. As taxas para nitrogênio foram significativamente mais baixas (17%), no entanto a remoção de nitrato chegou a 47%. Uma das recomendações deste estudo para aumentar a remoção de poluentes consiste na implantação de áreas de aeração constante na lagoa de retenção, no entanto o custo-benefício associado deve ser analisado.

## 2.8. Análise quantitativa

O total de publicações encontradas sobre o uso da biorretenção como técnica LID de drenagem urbana foi de 627. A quantidade de publicações no cenário global aumentou significativamente, crescendo seis vezes entre 2010 e 2019, passando de 15 para 118 publicações, respectivamente. A biorretenção é uma técnica de drenagem urbana LID bastante aplicada em vários países, como Estados Unidos, Canadá, Austrália, Inglaterra, entre outros. Os Estados Unidos é atualmente o país com maior número de publicações com aproximadamente 59% da produção científica em biorretenção na última década, seguido pela China, Austrália e Canadá.

As biovaletas são reconhecidas mundialmente como sistemas de tratamento de escoamento pluvial e sua utilização aumentou na última década. O total de publicações encontradas para esta técnica LID foi de 76. O número de publicações aumentou significativamente no período entre 2010 e 2019. Os Estados Unidos produziram aproximadamente 79% das publicações, seguido pela China e Canadá.

O total de documentos indexados pela *Web of Science*, de acordo com os descritores utilizados para pavimentos permeáveis, foi de 296 para a técnica LID pavimentos permeáveis. O número de publicações aumentou significativamente no período entre 2010

ISSN 2318-2962
DOI 10.5752/p.2318-2962.2023v33n73p336

e 2019. O número de publicações teve um aumento de mais de 800% comparando-se os anos de 2010 e 2019. Os países que mais publicaram neste tópico novamente, os Estados Unidos produziram o maior número de publicações, seguido pela China, Austrália e Canadá.

O total de documentos encontrados para a técnica LID telhados verdes foi de 448. O número de publicações aumentou significativamente no período entre 2010 e 2018, e teve uma leve queda em 2019. Assim como as técnicas acima, os Estados Unidos foram o país com o maior número de publicações seguido pela China e Austrália.

O total de publicações para a técnica LID filtros de areia foi de 149 documentos. O número de publicações aumentou significativamente no período entre 2010 e 2015, mas caiu gradativamente nos anos seguintes com exceção de 2018 que foi o ano com maior número de publicações na última década. Os Estados Unidos publicaram o maior número de documentos em filtro de areia para drenagem urbana, segundo pela Austrália, Dinamarca e China.

O total de documentos indexados pela *Web of Science*, de acordo com os descritores utilizados, para coleta de água pluvial foi de 595. O número de publicações aumentou gradativamente período entre 2010 e 2017, e sofreu uma leve queda nos anos seguintes. Os países que mais publicaram neste tópico, estão em primeiro lugar a Austrália, e em seguida os Estados Unidos e o Brasil, respectivamente.

As Zonas Úmidas Artificiais (ZUA) são reconhecidas mundialmente como sistemas de tratamento de escoamento pluvial e sua utilização aumentou na última década. O total de documentos indexados pela *Web of Science*, de acordo com os descritores utilizados, foi de 683. O número de publicações aumentou significativamente no período entre 2010 e 2017, e sofreu uma queda, também significante, nos anos seguintes. Os países que mais publicaram neste tópico foram os Estados Unidos, Austrália e China, respectivamente.

## 2.9. Comparação da análise quantitativa entre as técnicas LID de drenagem urbana

Considerando o conjunto de todas as técnicas LID, um total de 2844 documentos sobre o uso das técnicas LID de drenagem urbana foram publicados e indexados pela *Web of Science* entre 2010 e 2019. A Figura 6a mostra que o número total de publicações de técnicas LID triplicou de 2010 para 2019. A Figura 6b mostra que, durante esse período, as técnicas mais exploradas foram zonas úmidas artificiais (ZUA), biorretenção, coleta de água da chuva e telhados verdes. Entretanto, a biorretenção foi a técnica que mais cresceu em termos de publicação, de 15 em 2010 para 118 em 2019.

**Caderno de Geografia (2023) v.33, n.73**
ISSN 2318-2962
DOI 10.5752/p.2318-2962.2023v33n73p336

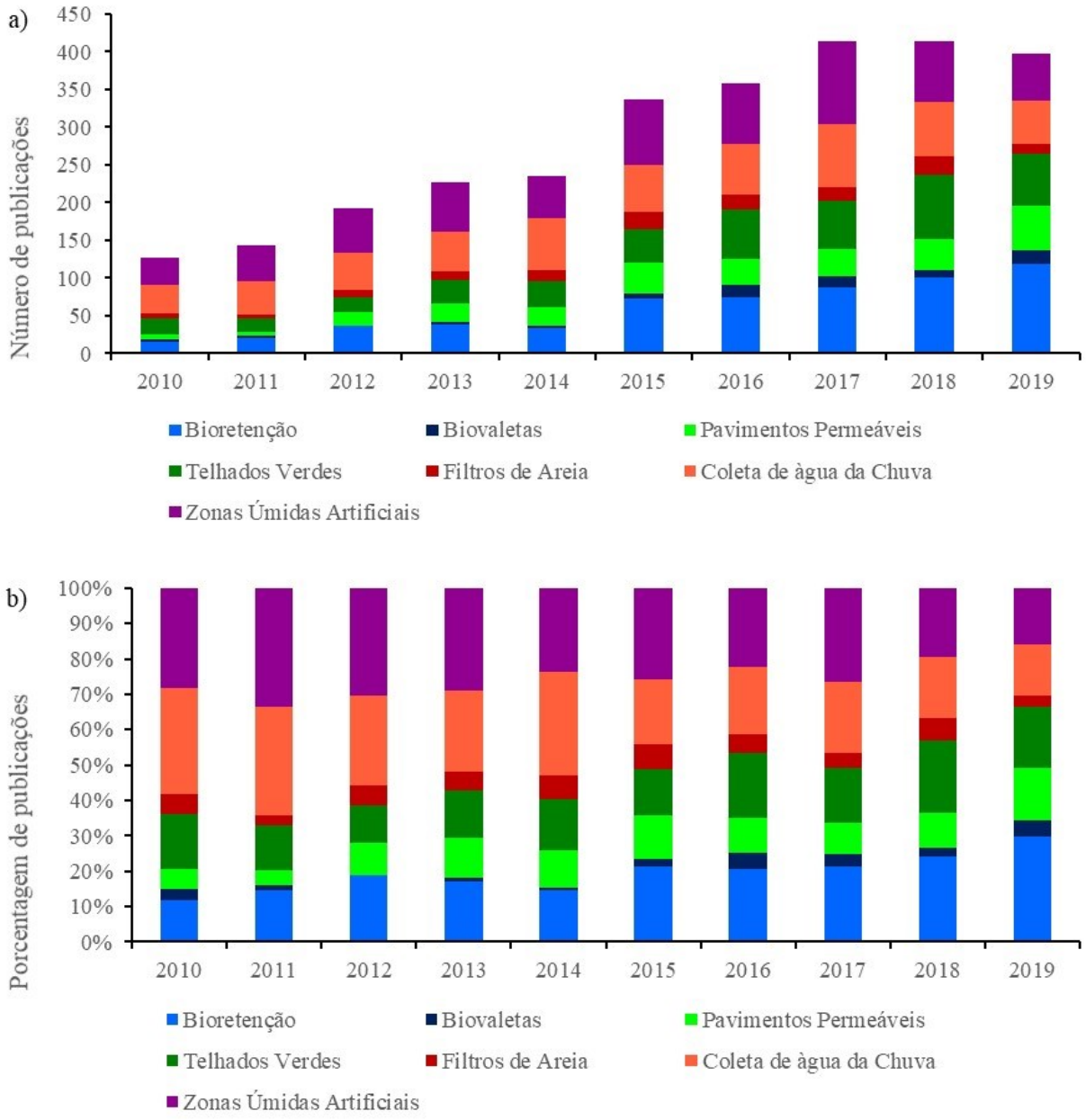


**Figura 6** – (a) Número e (b) porcentagem de artigos publicados por técnica LID para drenagem urbana no período entre 2010 e 2019.
**Fonte**: *Web of Science*.

As técnicas LID de drenagem urbana são bastante aplicadas em vários países. Entretanto, conforme a Figura 7a, o país que mais explorou o tema foi os Estados Unidos, com um total 1164 publicações. A Figura 7b mostra que as principais técnicas exploradas foram biorretenção e ZUA. A Austrália (453 publicações) e China (356 publicações) ocuparam o segundo e terceiro lugar, respectivamente. Na Austrália, o foco principal foi nas técnicas de coleta de águas da chuva e ZUA. Já na China, a biorretenção e ZUA foram as técnicas mais exploradas. Notavelmente, o Brasil ficou em décimo lugar com a técnica coleta de águas da chuva sendo o foco de 61% das publicações.

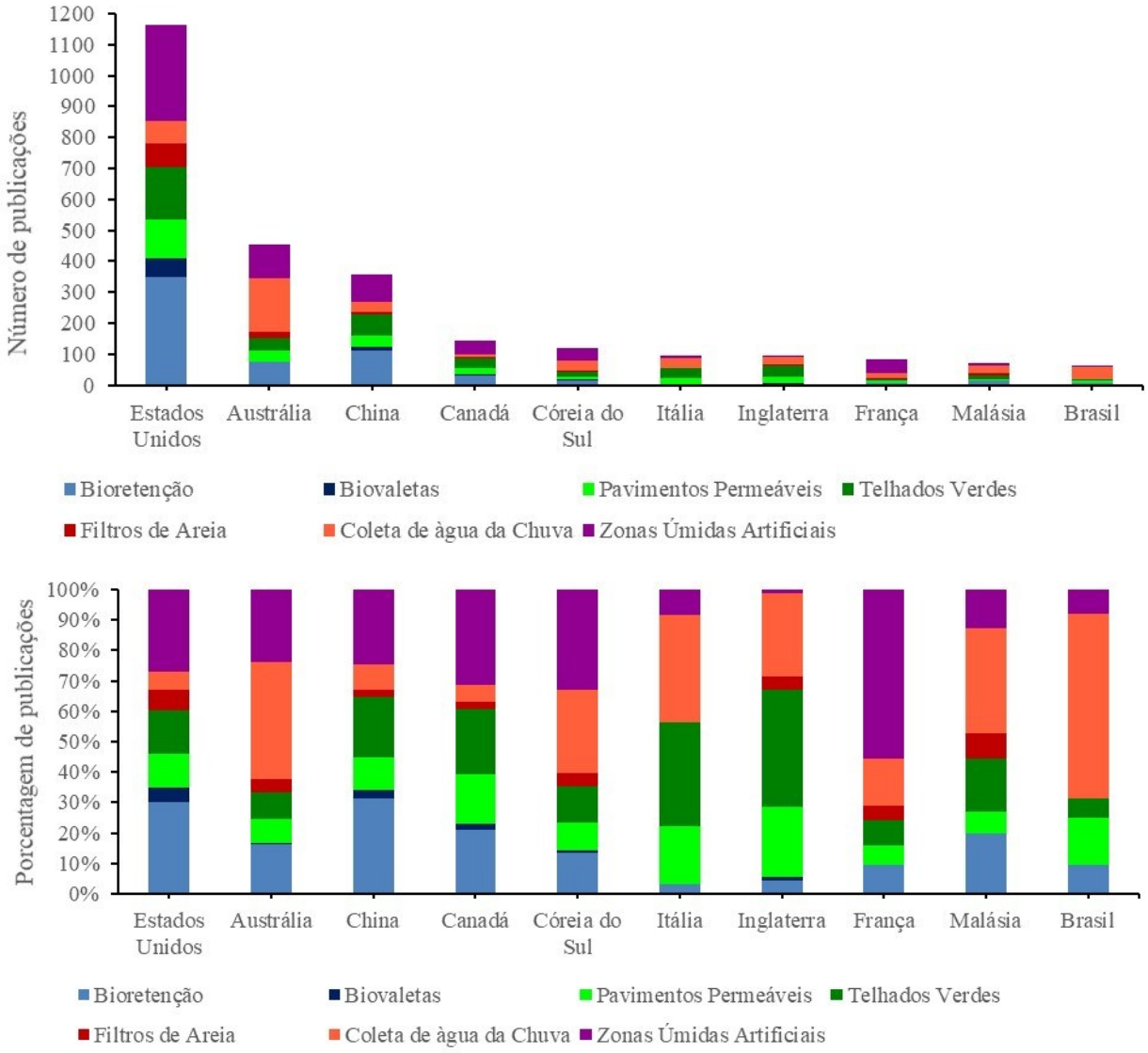


**Figura 7** – (a) Número e (b) porcentagem de artigos publicados por técnica LID para drenagem urbana dos 10 países com maior número de publicações no período entre 2010 e 2019.
**Fonte**: *Web of Science*.

## 3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No geral, o número de publicações aumentou significativamente para todas as técnicas LID de drenagem urbana pesquisadas neste estudo, comparando-se o início da década e os anos finais. O número absoluto de publicações, de acordo com os descritores utilizados, aumentou praticamente quatro vezes comparativamente entre os anos de 2010 e 2019. No entanto, analisando a proporção entre as técnicas LID pesquisadas observa-se que cada técnica seguiu uma tendência específica.

A técnica LID de biorretenção foi a técnica com o maior aumento proporcional na última década, passando de 10% em 2010 para quase 30% em 2019. Os benefícios desta técnica incluem, recarga dos lençóis freáticos, controle quantitativo e qualitativo do

ISSN 2318-2962
DOI 10.5752/p.2318-2962.2023v33n73p336

escoamento pluvial, reduzindo o risco de enchentes e a poluição difusa carregada para os corpos d'água. Além disso, seu tamanho compacto pode ser instalado em áreas pequenas e de difícil acesso, possui baixo custo de manutenção, implantação, comparadas a outras técnicas LID como zonas úmidas e telhados verdes, assim como técnicas convencionais de drenagem urbana.

Em contraposição, as técnicas LID zonas úmidas e coleta de água pluvial, que representaram os maiores números de publicações no início da década (cerca de 60% de 2010-2014), sofreram uma queda substancial chegando a 30% em 2019. A coleta de água pluvial é uma técnica LID eficiente na redução de fluxo e volume de escoamento superficial, e é especialmente eficiente no armazenamento e reuso de água pluvial.

A produção científica dos Estados Unidos e Canadá representaram aproximadamente 50% das publicações encontradas neste estudo. A biorretenção, foi a técnica LID mais pesquisada nesses dois países na última década. O alto número de publicações para esta técnica pode justificar-se pois a biorretenção apresenta diversas vantagens em comparação a técnicas convencionais e outras técnicas LID.

Historicamente o Brasil sempre abordou o padrão higienista que adota sistemas convencionais de drenagem urbana. Mas atualmente, o país demonstra um momento de transição entre as abordagens higienista e sustentável. De fato, o Brasil apareceu em décimo lugar na classificação geral entre os países que mais publicaram sobre técnicas LID mundialmente. No entanto, mais da metade das publicações focam na técnica LID de coleta da água da chuva.

Em conclusão, foi possível verificar por meio deste estado da arte que existe uma tendência mundial na pesquisa e implantação de técnicas LID de drenagem urbana. Estas técnicas oferecem uma alternativa sustentável para o gerenciamento de águas pluviais representando grandes benefícios ambientais, econômicos e sociais. No entanto, apesar do Brasil aparecer entre os países com mais publicações, o foco está concentrado principalmente em apenas uma técnica LID e, portanto, é necessário diversificar o portfólio e promover a integração das diversas técnicas disponíveis para aumentar a eficiência e a sustentabilidade dos sistemas de drenagem urbana.

## 4. AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), em especial ao Programa de Mestrado Profissional de Engenharia Hídrica, pela oportunidade concedida ao primeiro autor.

ISSN 2318-2962
DOI 10.5752/p.2318-2962.2023v33n73p336

## REFERÊNCIAS

AHN, C.; SCHMIDT, S. Designing wetlands as an essential infrastructural element for urban development in the era of climate change. **Sustainability,** v. 11, n. 7, p. 1920, 2019.

ALESSI, F.; KOKOT, P. J.; GOMES, J. Comparação do escoamento superficial gerado por pavimentos permeáveis em blocos de concreto e asfalto poroso. **Da Vinci,** v. 3, n. 1, p. 139-156, 2006.

ALLINSON, G. *et al.* Pesticide and trace metal occurrence and aquatic benchmark exceedances in surface waters and sediments of urban wetlands and retention ponds in Melbourne, Australia. **Environmental Science and Pollution Research,** v. 22, n. 13, p. 10214-10226, 2015.

ARAUJO, P. R.; TUCCI, C. E.; GOLDENFUM, J. A. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial. **Brazilian Journal of Water Resources,** v. 5, n. 3, p. 21-29, 2000.

ASSMUTH, E. *et al.* Impact of biochar on treatment performance of roadside sand filters – field monitoring and geochemical modelling. In: MANNINA, G. (Ed.). **New Trends in Urban Drainage Modelling.** 2018, Palermo: Springer. p.79-84.

BAPTISTA, M. B.; NASCIMENTO, N. D. O.; BARRAUD, S. **Técnicas compensatórias em drenagem urbana.** 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2011.

BARRET, M. E. Comparison of BMP performance using the international BMP database. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering,** v. 134, n. 5, p. 556-561, 2008.

BEDAN, E. S.; CLAUSEB, J. C. Stormwater runoff quality and quantity from traditional and low impact development watersheds. **Jawra Journal of the American Water Resources Association,** v. 45, n. 4, p. 998-1008, 2009.

BERNDTSSON, J. C. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. **Ecological Engineering,** v. 36, n. 4, p. 351-360, 2010.

BORNE, K. E.; FASSMAN, E. A.; TANNER, C. C. Floating treatment wetland retrofit to improve stormwater pond performance for suspended solids, copper and zinc. **Ecological Engineering,** v. 54, p. 173-182, 2013.

BROWN, R. A.; HUNT, W. F**.** Improving bioretention/biofiltration performance with restorative maintenance. **Water Science and Technology,** v. 65, n. 2, p. 361-367, 2012.

BROWN, R.; SKAGGS, R.; HUNT, I. I. I. W. Calibration and validation of DRAINMOD to model bioretention hydrology. **Journal of Hydrology,** v. 486, p. 430-442, 2013.

BRUNO, L. O.; AMORIN, R. S. S.; SILVEIRA, A. Estudo da redução do escoamento superficial direto em superfícies permeáveis. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos,** v. 18, n. 2, p. 237-247, 2013.

CAMPISANO, A. *et al.* Urban rainwater harvesting systems: Research, implementation and future perspectives. **Water Research,** v. 115, p. 195-209, 2017.

CÁRDENAS, S.; FHAISULY, E. **Avaliação dos sistemas urbanos de drenagem sustentável mediante o modelo Urban Water Use (UWU) em área urbana da cidade de Curitiba.** 2017. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

CASTRO, A. S.; GOLDENFUM, J. A. Uso de telhados verdes no controle quantitativo do escoamento superficial urbano. **Revista Atitude,** v. 4, n. 7, p. 75-81, 2010.

CHAPMAN, C.; HORNER, R. R. Performance assessment of a street-drainage bioretention system. **Water Environment Research,** v. 82, n. 2, p. 109-119, 2010.

CHEN, S. S. *et al.* **Designing sustainable drainage systems in subtropical cities: Challenges and opportunities.** Journal of Cleaner Production, v. 280, 2021.

CLAR, M.; BARFILEFD, B.; O'CONNOR, T. **Stormwater best management practices design guide:** Volume 1 - General considerations. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, 2004. Disponível em: https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report. Acesso em: 27 nov. 2019.

DAVIS, A. P. Field performance of bioretention: Water quality. **Environmental Engineering Science,** v. 24, n. 8, p. 1048-1064, 2007.

DAVIS, A. P. Field performance of bioretention: Hydrology impacts. **Journal of Hydrologic Engineering,** v. 13, n. 2, p. 90-95, 2008.

DAVIS, A. P. *et al.* Bioretention technology: Overview of current practice and future needs. **Journal of Environmental Engineering,** v. 135, n. 3, p. 109-117, 2009.

DEBUSK, K.; WYNN, T. Storm-water bioretention for runoff quality and quantity mitigation. **Journal of Environmental Engineering**, v. 137, n. 9, p. 800-808, 2011.

DEBUSK, K. *et al.* Rainwater harvesting: Integrating water conservation and stormwater management through innovative technologies. **Environmental and Water Resources Institute,** p. 3703-3710, 2012.

DELETIC, A.; FLERCHER, T. D. Performance of grass filters used for stormwater treatment - a field and modelling study. **Journal of Hydrology,** v. 317, n. 3-4, p. 261-275, 2006.

DE MORAIS, A. F. J.; ROCHA, C. Gendered waters: the participation of women in the 'One Million Cisterns' rainwater harvesting program in the Brazilian Semi-Arid region. **Journal of Cleaner Production, v**. 60, p. 163-169, 2013.

DINIC-BRANKOVIC, M. *et al.* Bioswales as elements of green infrastructure – foreign practice and possibilities of use in the district of the City of Nis, Serbia. **Internacional Conference on Urban Planning,** p. 347-355, 2019.

DRUMOND, A. *et al.* **Weather and Climate Extremes: Current Developments**. **Atmosphere,** v. 22, p. 24, 2020.

FAIRBAIRN, D. J. *et al.* Contaminants of emerging concern in urban stormwater: Spatiotemporal patterns and removal by iron-enhanced sand filters (IESFs). **Water Research,** v. 145, p. 332-345, 2018.

FLETCHER, T. D. *et al.* SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. **Urban Water Journal,** v. 12, n. 7, p. 525-542, 2015.

FREEBORN, J. R.; SAMPLE, D. J.; FOX, L. J. Residential stormwater: methods for decreasing runoff and increasing stormwater infiltration. **Journal of Green Building,** v. 7, n. 2, p. 15-30, 2012.

GEE, K.; HUNT, W**.** Enhancing stormwater management benefits of rainwater harvesting via innovative technologies. **Journal of Environmental Engineering,** v. 142, n. 8, p. 04016039, 2016.

GIMENEZ-MARANGES, M.; BREUSTE, J.; HOF, A. A new analytical tool for a more deliberate implementation of Sustainable Drainage Systems. **Sustainable Cities and Society,** v. 71, 2021.

GONÇALVES, M. *et al.* Modeling the effects of introducing low impact development in a tropical city: A case study from Joinville, Brazil. **Sustainability,** v. 10, n. 3, p. 728, 2018.

GU, C. *et al.* Modeling effects of low impact development on road salt transport at watershed scale. **Journal of Hydrology,** v. 574, p.1164-1175, 2019.

HALE, R. *et al.* Balancing biodiversity outcomes and pollution management in urban stormwater treatment wetlands. **Journal of Environmental Management,** v. 233, p. 302-307, 2019.

HEADLEY, T.; TANNER, C. C. Constructed wetlands with floating emergent macrophytes: an innovative stormwater treatment technology. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology,** v. 42, n. 21, p. 2261-2310, 2012.

HEANY, J. P.; SANSALONE, J. J. A vision for urban stormwater management in 2050. In: GRAVMAN, W. M.; LOYCKS, D. P.; SAITO, L. (Eds.). **Toward a Sustainable Water Future:** Visions for 2050. Reston: American Society of Civil Engineers, 2012. p.157-165.

JAMES, M. B.; DYMOND, R. L. Bioretention hydrologic performance in an urban stormwater network. **Journal of Hydrologic Engineering,** v. 17, n. 3, p. 431-436, 2011.

JEONG, J. *et al.* Modeling sedimentation-filtration basins for urban watersheds using Soil and Water Assessment Tool. **Journal of Environmental Engineering,** v. 139, n. 6, p. 838-848, 2012.

JIA, H.; YAO, H.; SHAW, L. Y. Advances in LID BMPs research and practice for urban runoff control in China. **Frontiers of Environmental Science & Engineering,** v. 7, n. 5, p. 709-720, 2013.

KOMLOS, J.; VACCAA, K.; WADZUK, B. Phosphate retention in a constructed stormwater wetland with low total suspended solids concentrations. **Journal of Sustainable Water in the Built Environment,** v. 4, n. 1, p. 04017017, 2017.
LI, J.; LI, Y.; LI, Y. SWMM-based evaluation of the effect of rain gardens on urbanized areas. **Environmental Earth Sciences,** v. 75, n. 1, p. 17, 2016.

LI, H.; DAVIS, A. P. Urban particle capture in bioretention media. I: Laboratory and field studies. **Journal of Environmental Engineering,** v. 134, n. 6, p. 409-418, 2008.

LI, H. *et al.* Mitigation of impervious surface hydrology using bioretention in North Carolina and Maryland. **Journal of Hydrologic Engineering,** v. 14, n. 4, p. 407-415, 2009.

LIU, G. *et al.* New framework for optimizing best management practices at multiple scales. **Journal of Hydrology,** v. 578, p. 124133, 2019.

LLOYS, S.; WONG, T. Paired catchment storm event monitoring: Assessing the performance of a bioretention system (rain garden). **Australasian Journal of Water Resources,** v. 12, n. 2, p. 133-141, 2008.

LOPEZ, H. **Performance examination of sustainable urban drainage systems - A multi-criteria analysis for the city of Gothenburg.** 2018. 120 f. Dissertação (Mestrado em Infraestrutura e Engenharia Ambiental) – Departamento de Arquitetura e Engenharia Civil, Chalmers University of Technology, Gothenburg, 2018.

LUCKE, T.; WALKER, C.; BEECHAM, S. Experimental designs of field-based constructed floating wetland studies: a review. **Science of the Total Environment,** v. 660, p. 199-208, 2019.

LYNCH, J. *et al.* Evaluation of commercial floating treatment wetland technologies for nutrient remediation of stormwater. **Ecological Engineering,** v. 75, p. 61-69, 2015.

MACEDO, M. B. D.; LAGO, C. A. F. D.; MENDIONDO, E. M. Stormwater volume reduction and water quality improvement by bioretention: Potentials and challenges for water security in a subtropical catchment. **Science of the Total Environment,** v. 647, p. 923-931, 2019.

MANGANGKA, I. R. Modelling the hydraulic processes on constructed stormwater wetland. **Civil Engineering Dimension,** v. 19, n. 1, p. 21-28, 2017.

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, 2006.

MERRIMAN, L.; HUNT, W.; BASS, K. Development/ripening of ecosystems services in the first two growing seasons of a regional-scale constructed stormwater wetland on the coast of North Carolina. **Ecological Engineering,** v. 94, p. 393-405, 2016.

REDDY, K. R.; XIE, T.; DASTGHEIBI, S. Evaluation of biochar as a potential filter media for the removal of mixed contaminants from urban storm water runoff. **Journal of Environmental Engineering,** v. 140, n. 12, p. 04014043, 2014.

ROMOWSKI, J. P.; ENS, R. T. As pesquisas denominadas do tipo" estado da arte" em educação. **Revista Diálogo Educacional,** v. 6, n. 19, p. 37-50, 2006.

ROSSMAN, L. A. **Storm water management model user's manual, version 5.1**. Cincinnati: United States Environmental Protection Agency, 2015. Disponível em: https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-02/documents.pdf. Acesso em: 28 nov. 2019.

SCHULTZ, I.; SAILOR, D. J.; STARRY, O. Effects of substrate depth and precipitation characteristics on stormwater retention by two green roofs in Portland OR. **Journal of Hydrology:** Regional Studies, v. 18, p. 110-118, 2018.

SHAFIQUE, M.; KIM, R. Green stormwater infrastructure with low impact development concept: A review of current research. **Desalination Water Treatment,** v. 83, p. 16-29, 2017.

SHAFIQUE, M.; KIM, R.; RAFIQ, M. Green roof benefits, opportunities and challenges–A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews,** v. 90, p. 757-773, 2018.

SILVA, G. B. L. *et al.* Avaliação da infiltração em revestimentos com superfícies permeáveis. **Ingeniería del agua,** v. 16, n. 3, p. 175-188, 2009.

SUAREZ, J. *et al.* Design of a sand filter for highway runoff in the north of Spain. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Municipal Engineer,** v. 166, n. 2, p. 121-129, 2013.

TAO, W. *et al.* Designing constructed wetlands for reclamation of pretreated wastewater and stormwater. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology,** v. 16, n. 1, p. 37-57, 2017.

TASSI, R. *et al.* Telhado verde: uma alternativa sustentável para a gestão das águas pluviais. **Ambiente Construído,** v. 14, n. 1, p. 139-154, 2014.

WALKER, C.; TONDERA, K.; LUCKE, T. Stormwater treatment evaluation of a constructed floating wetland after two years operation in an urban catchment. **Sustainability,** v. 9, n. 10, p. 1687, 2017.

WANG, M. *et al.* Assessing cost-effectiveness of bioretention on stormwater in response to climate change and urbanization for future scenarios. **Journal of Hydrology,** v. 543, p. 423-432, 2016.

WINSTON, R.; LUELL, S.; HUNT, W. **Evaluation of undersized bioretention for treatment of highway bridge deck runoff**. International Conference on Urban Drainage, 2011, IWA Porto Alegre.

WOODS-BALLARD, B. *et al.* **The SuDS Manual.** London: Ciria, 2015.

XU, W. D. *et al.* Improving the multi-objective performance of rainwater harvesting systems using real-time control technology. **Water,** v. 10, n. 2, p. 147, 2018.

XU, C. *et al.* Progress on environmental and economic evaluation of low-impact development type of best management practices through a life cycle perspective. **Journal of Cleaner Production,** v. 213, p. 1103-1114, 2019.

Recebido: 31.03.2022
Aceito: 21.01.2023