

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E  
SANEAMENTO**



**LUCAS TARDELLY LINS MARIZ FERREIRA**

**AVALIAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DE UM DISPOSITIVO DE  
BIORRETENÇÃO: MONITORAMENTO E MODELAGEM**

**MACEIÓ  
2017**

**LUCAS TARDELLY LINS MARIZ FERREIRA**

**AVALIAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DE UM DISPOSITIVO DE  
BIORRETENÇÃO: MONITORAMENTO E MODELAGEM**

Orientador(a): Prof. Dr. Marllus Gustavo F. P. das Neves

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.

**MACEIÓ**

**2017**

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**

Bibliotecário Responsável: Janaina Xisto de Barros Lima

F383a Ferreira, Lucas Tardelly Lins Mariz.  
Avaliação do funcionamento de um dispositivo de biorretenção:  
monitoramento e modelagem/Lucas Tardelly Lins Mariz Ferreira. – 2017.  
83 f. : il.

Orientador: Marllus Gustavo F. P. das Neves.  
Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) –  
Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Programa  
de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. Maceió, 2017.

Inclui bibliografia.

1. Drenagem urbana. 2. Águas pluviais – Monitoramento.  
3. Biorretenção. 4. Método de Puls. I. Título.

CDU: 628.1.037:627.5



## Folha de Aprovação

LUCAS TARDELLY LINS MARIZ FERREIRA

AVALIAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DE UM DISPOSITIVO DE  
BIORRETIENÇÃO: MONITORAMENTO E MODELAGEM

Dissertação apresentada no dia 24 de abril de 2017 ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.

Prof. Dr. Marllus Gustavo Ferreira Passos das Neves  
(Orientador - PPGRHS)

### Banca examinadora:

Prof. Dr. Vladimir Caramori Borges de Souza  
(Examinador interno - PPGRHS-UFAL)

Prof.ª Dr.ª Alexandra Rodrigues Finotti  
(Examinadora externa - PPGEA-UFSC)

Para minha esposa, Raquel Ferreira  
Lopes, para minha mãe, Valdevez Maria  
Rodrigues Lins e para meu pai (*In  
memoriam*), Aderildo Mariz Ferreira.

## AGRADECIMENTOS

A Deus por me conduzir nesta caminhada.

A minha mãe, Valderez, pelo incentivo dado em todas as minhas decisões e por me colocar diariamente em suas orações. A minha avó, Valdeci, pelo seu acolhimento. As minhas Primas/Mães, Waldja e Valquíria, por toda ajuda oferecida desde o meu nascimento. A minhas tias, Aberilda e Anerilda, por estarem sempre presentes em minha vida.

A minha esposa, Raquel, por completar a lacuna vazia em mim e por todo apoio dado em todos os anos de relacionamento.

A minha turma do PPGRHS (Marconi, Renata Braga, Camila Agra, Stephane Andrade, Alane Patrícia, Tainara Rodrigues, Cristiano Lima, Juliana, Keke Rosberg e Gabi Branquinho) que tornaram muito agradável a minha passagem pelo mestrado. Aos amigos Alberonaldo, Aryane Mota, Amesson e Pedro que contribuíram com a experiência de veteranos. Ao técnico Luiz Henrique pela ajuda e disponibilidade.

Ao professor Marllus, pela orientação e confiança no decorrer desses dois anos de mestrado. Ao professor Vladimir, pela contribuição investida neste trabalho. Ao professor Eduardo Lucena, por passar adiante suas experiências profissionais durante o horário de almoço.

Aos amigos de graduação, principalmente Mariana Soares, Maíra Menezes e Gustavo Solano por me incentivarem a entrar no mestrado.

A equipe responsável pela biorretenção (Marina, Luiza e os demais). Ao Bira, por ceder equipamentos necessários a limpeza do local de instalação do dispositivo.

A CAPES pelo apoio financeiro.

Por fim, a todos que contribuíram direta e indiretamente no desenvolvimento desta pesquisa.

*“Reza a lenda que a gente nasceu pra ser feliz”*

Humberto Gessinger

## RESUMO

FERREIRA, L. T. L. M. **Avaliação do funcionamento de um dispositivo de biorretenção: monitoramento e modelagem.** [Dissertação de mestrado]. Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 83f, 2017.

A biorretenção é uma espécie de armadilha para coletar, armazenar, infiltrar e tratar o escoamento de águas pluviais urbanas, consistindo em uma mistura de alta condutividade hidráulica de areia, solo e matéria orgânica, cercada pelos solos nativos, geralmente menos permeáveis. Ela se tornou popular em muitas partes do mundo, mas até agora não foram implementadas como uma prática comum no Brasil. Entretanto, existem algumas biorretenções instaladas em determinadas universidades brasileiras, construídas em escala real, que podem fornecer dados de desempenho tanto quantitativo, quanto qualitativo. Este trabalho é um estudo sobre uma célula de biorretenção construída na Universidade Federal de Alagoas. O dispositivo tem formato prismático com, aproximadamente, 400 cm de comprimento, 160 cm de largura e 100 cm de profundidade, e, dividido em 3 camadas, a parte superior com uma mistura de terra preta e húmus, a camada intermediária preenchida por brita e última camada contem areia. Nesse contexto, inicialmente, fez-se uma comparação sobre diferentes formas de concepção do dispositivo entre a célula construída na Universidade Federal de Alagoas e outras projetadas fora e dentro do Brasil. Em síntese, as biorretenções não seguem um padrão, tanto no Brasil, como em outros países. Os únicos aspectos notados em todos os dispositivos analisado foi a camada de zona de raiz e a camada de armazenamento interno de água. Conclui-se que apesar da pouca produção científica produzida no Brasil com esse objeto de estudo, pode-se introduzir essa prática em manuais de drenagem como opção de manejo de águas pluviais. Em seguida foi realizada uma análise de desempenho a partir da porcentagem de eventos totalmente absorvidos sem superar a capacidade máxima de armazenamento. Para isso, foram 18 meses de monitoramento quantitativo onde foram observadas fases do ciclo hidrológico, tais como a precipitação, infiltração e escoamento superficial. Resultados apontaram que a camada de armazenamento absorveu 89% dos eventos e dentre os 11% foram encontrados registros de extravasamento. Contudo, a biorretenção se mostrou eficiente em reduzir o escoamento gerado pela sua área de contribuição e altamente recomendada a sua instalação em lotes residenciais. E por último, aplicou-se um modelo simples de baixa exigência de dados para representar uma biorretenção instalada em escala real. Para isso, é utilizado o método de Puls como ferramenta de simulação quantitativa da biorretenção. Os resultados apontaram bons coeficiente de Nash-Sutcliffe e  $R^2$  na fase de calibração. Entretanto, parâmetro taxa de infiltração apresentou uma grande variação entre os coeficientes. Contudo, o modelo de Puls se mostrou eficiente ao representar um sistema de biorretenção, mas foi deficiente na simulação de 1 evento no modo reservatório único e de 2 eventos no modo reservatório duplo.

**Palavras-chave:** Jardim de chuva, Potencial Quantitativo, Técnica de Manejo.



## ABSTRACT

FERREIRA, L. T. L. M. **Evaluation of the functioning of a bioretention device: monitoring and modeling.** [Masters dissertation]. Federal University of Alagoas, Maceió, 83f, 2017.

The bioretention is a kind of trap to collect, store, infiltrate and treat urban full water runoff, consisting of a mixture of high hydraulic conduction of sand, soil and organic matter, surrounded by native, generally less permeable soils. It has become popular in many parts of the world, but so far, it has not been implemented as a common practice in Brazil. However, there are some bioretentions installed in certain Brazilian universities, built in real scale that can provide quantitative and qualitative performance data. This work is a study on a bioretention cell constructed at the Federal University of Alagoas. The device is prismatic in shape with approximately 400 cm long, 160 cm wide and 100 cm deep and, divided into 3 layers, an upper part with a mixture of black earth and humus, an intermediate layer satisfies by gravel and last layer contains sand. In this context, initially, a comparison was made on different forms of device design between a cell constructed at the Federal University of Alagoas and others designed for inside Brazil. In summary, as bioretentions do not follow a pattern, both in Brazil and in other countries. The only ones was noticed on all the devices analyzed for a root area layer and a layer of internal water storage. It is concluded that in spite of the little scientific production is not with this object of study, it is possible to introduce the practice in manuals of drainage as the option of handling of rainwater. Then a performance analysis was performed from the update of fully absorbed events without exceeding a maximum storage capacity. For this, it has 18 months of quantitative monitoring where phases of the hydrological cycle are observed, such as precipitation, infiltration and surface runoff. Results showed that the storage layer absorbed 89% of the events and of the 11% found extravasation records. However, a bioretention was efficient in reducing the flow generated by its contribution area and highly recommended its installation in residential lots. And finally, a simple low-data-demand model is applied to represent a real-scale bioretention. For this, the Puls Method is used as a quantitative bioretention simulation tool. The results showed good Nash-Sutcliffe and  $R^2$  coefficients in the calibration phase. However, the parameter infiltration rate presents a great variation between the coefficients. However, the Puls model proved to be efficient when representing a bioretention system, but it was deficient in the simulation of 1 event in the single reservoir mode and 2 events in the double reservoir mode.

**Palavras-chave:** Rain garden, Quantitative Potential, Management Technique.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2. 1: Imagem da biorretenção.</b> .....	23
<b>Figura 3. 1: Representação do local de instalação da biorretenção.</b> .....	38
<b>Figura 3. 2: Vista superior e perfil da biorretenção.</b> .....	39
<b>Figura 3. 3: Pontos onde ocorre o monitoramento da biorretenção.</b> .....	40
<b>Figura 3. 4: Imagem do circuito utilizado na calibração do vertedor.</b> .....	41
<b>Figura 3. 5: Curva calibrada do vertedor.</b> .....	42
<b>Figura 3. 6: Imagem de um evento simulado.</b> .....	45
<b>Figura 3. 7: Ensaio com o Duplo Anel.</b> .....	46
<b>Figura 3. 8: Variação da taxa de infiltração.</b> .....	47
<b>Figura 3. 9: Diagramas de caixa dos níveis máximos no interior da biorretenção.</b> .....	48
<b>Figura 3. 10: Extravasamento da biorretenção do 22/07/2015 por volta de 12:00.</b> .....	50
<b>Figura 3. 11: Gráfico do evento do dia 22/07/2015.</b> .....	50
<b>Figura 3. 12: Gráfico do evento do dia 29/05/2016.</b> .....	53
<b>Figura 3. 13: a) gráfico do evento do dia 03/06/2016; b) gráfico do evento do dia 19/06/2016.</b> ....	53
<b>Figura 3. 14: a) coeficientes de escoamento da primeira fase do monitoramento; b) coeficientes de escoamento da primeira segunda do monitoramento.</b> .....	55
<b>Figura 4. 1: Biorretenção estudada.</b> .....	65
<b>Figura 4. 2: Fluxograma com a rotina utilizada para calibrar K com a biorretenção em forma de 1 reservatório.</b> .....	71
<b>Figura 4. 3: Fluxograma com a rotina utilizada para calibrar K com a biorretenção em forma de 2 reservatórios.</b> .....	72
<b>Figura 4. 4: a) gráfico do evento do dia 21/01/2016; b) gráfico do evento do dia 13/04/2016.</b> .....	74
<b>Figura 4. 5: a) gráfico do evento do dia 19/06/2016; b) gráfico do evento do dia 28/06/2016.</b> .....	75

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2. 1: Descrição dos componentes de um projeto de biorretenção.....</b>	<b>18</b>
<b>Tabela 2. 2: Desempenho da qualidade no sistema de biorretenção extraído da literatura.....</b>	<b>21</b>
<b>Tabela 2. 3: Manuais de drenagem que divulgam os sistemas de biorretenção. ....</b>	<b>24</b>
<b>Tabela 2. 4: Descrição dos componentes das biorretenções. ....</b>	<b>26</b>
<b>Tabela 2. 5: Comparação entre biorretenções instaladas no Brasil. ....</b>	<b>27</b>
<b>Tabela 3. 1: Estatística descritiva dos níveis máximos no interior da biorretenção. ....</b>	<b>47</b>
<b>Tabela 3. 2: Resultado da primeira fase do monitoramento. ....</b>	<b>48</b>
<b>Tabela 3. 3: Resultado da segunda fase do monitoramento. ....</b>	<b>51</b>
<b>Tabela 3. 4: Dados dos eventos simulados.....</b>	<b>56</b>
<b>Tabela 4. 1: Eventos escolhidos para modelagem da biorretenção.....</b>	<b>69</b>
<b>Tabela 4. 2: Eventos escolhidos para modelagem. ....</b>	<b>73</b>
<b>Tabela 4. 3: Eventos escolhidos para modelagem. ....</b>	<b>74</b>
<b>Tabela 4. 4: Eventos validados para 1 reservatório. ....</b>	<b>75</b>
<b>Tabela 4. 5: Eventos validados para dois reservatórios.....</b>	<b>76</b>
<b>Tabela 4. 6: resumo das médias dos coeficientes NS e R<sup>2</sup>. ....</b>	<b>77</b>

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

CEENG – Conhecer e Experimentar Engenharia

CTEC – Centro de Tecnologia

DNREC – Departamento de Recursos Naturais e Meio Ambiente do estado de Delaware

EESC – Escola de Engenharia de São Carlos

EUA – Estados Unidos da America

H2Urb – Indicadores de eficiência quali quantitativos de drenagem em bacias urbanas e periurbanas

LID – Desenvolvimento de baixo impacto

MAPLU 2 – Manejo de águas pluviais 2

PPGRHS – Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento

SWMM – Modelo de Gestão de Águas Pluviais

TCs – Técnicas Compensatórias

UFAL - Universidade Federal de Alagoas

USP – Universidade de São Paulo

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	12
<b>1.1. Objetivos</b> .....	14
<b>1.2. Metodologia Geral</b> .....	14
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	15
<b>2. INTRODUÇÃO DA BIORRETENÇÃO COMO SOLUÇÃO PARA REGIÕES URBANIZADAS</b> .....	16
<b>Resumo</b> .....	16
<b>2.1. Introdução</b> .....	16
<b>2.2. Materiais e Métodos</b> .....	17
<b>2.2.1. Definição da técnica</b> .....	18
<b>2.2.2. Potencial qualitativo</b> .....	20
<b>2.2.3. Potencial quantitativo</b> .....	21
<b>2.2.4. Caracterização do objeto de estudo</b> .....	22
<b>2.3. Resultados Discussão</b> .....	23
<b>2.3.1. Estudos sobre biorretenção no Brasil</b> .....	23
<b>2.3.2. Manuais de drenagem com abordagem em biorretenção</b> .....	24
<b>2.3.3. Comparação entre as técnicas de biorretenção</b> .....	25
<b>2.4. Conclusões</b> .....	28
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	28
<b>3. COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO DE UM DISPOSITIVO DE BIORRETENÇÃO EM NÍVEL DE LOTE NA CIDADE DE MACEIÓ - AL</b> .....	36
<b>Resumo</b> .....	36
<b>3.1. Introdução</b> .....	36
<b>3.2. Materiais e Métodos</b> .....	37
<b>3.2.1. Descrição da biorretenção</b> .....	38
<b>3.2.2. Calibração do vertedor</b> .....	40
<b>3.2.3. Monitoramento</b> .....	42
<b>3.2.4. Taxa de infiltração na superfície superior e no fundo</b> .....	42
<b>3.2.5. Análise dos eventos</b> .....	43
<b>3.3. Resultados e Discussão</b> .....	46
<b>3.3.1. Taxa de infiltração na camada superior e na base</b> .....	46
<b>3.3.2. Eventos Monitorados</b> .....	47
<b>3.3.3. Verificação de coeficientes de escoamento do telhado</b> .....	54

3.3.4.	Eventos controlados .....	55
3.3.5.	Modificações após o período de monitoramento .....	56
3.4.	Conclusões.....	57
REFERÊNCIAS .....		58
<b>4.</b>	<b>MODELAGEM DE UM SISTEMA DE BIORRETENÇÃO EM ESCALA DE LOTE.....</b>	<b>63</b>
<b>Resumo</b> .....		<b>63</b>
<b>4.1.</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>63</b>
<b>4.2.</b>	<b>Materiais e Métodos.....</b>	<b>64</b>
4.2.1.	Área de estudo .....	64
4.2.2.	Modelos para biorretenção.....	66
4.2.3.	Modelo de Puls.....	68
4.2.4.	Simulação com 1 e com 2 reservatórios.....	69
4.2.5.	Calibração e validação .....	70
<b>4.3.</b>	<b>Resultados e Discussão.....</b>	<b>72</b>
4.3.1.	Simulação com um reservatório.....	72
4.3.2.	Simulação com dois reservatórios.....	74
4.3.3.	Validação.....	75
<b>4.4.</b>	<b>Conclusões.....</b>	<b>77</b>
REFERÊNCIAS .....		78
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>82</b>

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

Neste trabalho é apresentada a experiência adquirida ao estudar uma célula de biorretenção como técnica compensatória aos efeitos da urbanização. Ela se insere no contexto de um grupo de técnicas sustentáveis que visam reduzir o escoamento gerado pelas águas pluviais através da infiltração nos próprios locais de origem, o que se denomina controle na fonte. Dentre essas técnicas, podem-se citar: as superfícies de infiltração, as valetas de infiltração, as lagoas de infiltração, as bacias de percolação, os pavimentos porosos e os poços de infiltração. Estes dispositivos não somente têm a função do controle da vazão de pico do hidrograma; também há a função de controlar o volume do escoamento superficial(CANHOLI, 2005).

Particularmente, a biorretenção funciona como um pré-tratamento qualitativo das águas pluviais ao submetê-las a processos químicos, físicos e biológicos (Prince George's County, 2009). Ela também é conhecida como jardim de chuva, e consiste em uma área escavada e preenchida com camadas porosas, sendo a camada superior coberta com terra propícia ao cultivo de plantas. Essa técnica se tornou tendência em países como Estados Unidos, China e Austrália, tanto na comunidade científica, quanto na execução de projetos. No Brasil, a biorretenção é apenas explorada no campo científico com um dos primeiros estudos iniciados por Souza (2005).

Church (2015) indica que as instalações sustentáveis de manejo de águas pluviais têm potencial para ajudar na conscientização por parte da população sobre os cuidados com as águas pluviais. Tominaga (2013) afirma que a divulgação do funcionamento dessas instalações, bem como de seus benefícios, deve ser realizada para sensibilizar o poder público e a iniciativa privada na tentativa de se fazer entender que as ações tomadas em cada lote resultam em consequências para áreas a jusante.

Apesar dessas funções positivas destas novas técnicas, a incorporação delas na gestão da drenagem urbana ainda é um desafio, pois deve-se avaliar o seu funcionamento em longo prazo, através de monitoramento, desenvolvimento de rotinas de manutenção, avaliação de custos, entre outros (SOUZA, 2013). Surge então a necessidade de estudos que avaliem esses aspectos de modo a fomentar o uso como opção que pode ser integrada nas áreas urbanizadas de modo harmonioso, mantendo uma relação diária com a população.

O conteúdo deste trabalho é dividido em 3 partes: a primeira, capítulo 2, compara a biorretenção instalada no Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas (UFAL) com alguns dispositivos construídos tanto no Brasil, quanto em outros países; a segunda parte (capítulo 3) aborda a etapa de monitoramento do dispositivo desde o seu início de funcionamento; e a terceira (capítulo 4) estuda a aplicação do método de Puls para simular o processo de armazenamento e infiltração da biorretenção.

A biorretenção descrita neste trabalho foi construída para reduzir o escoamento superficial de uma área de contribuição em escala residencial no campus A. C. Simões da UFAL. Nessa localidade, o clima é caracterizado por ser quente e úmido (BARBIRATO et al., 2000) com temperatura média registrada em 2016 de 25 °C com desvio padrão de 0,93. O solo tem característica argiloso obtida em ensaio de granulometria com uma amostra coletada a uma profundidade de 80 cm do nível do terreno (ROSENDO, 2013).

Esta dissertação está inserida em um conjunto de projetos de pesquisa em Hidrologia Urbana, citados a seguir, e diretamente vinculado ao projeto de pesquisa “MAPLU 2 - Manejo de águas pluviais: monitoramento, modelagem, desenvolvimento de tecnologias de baixo impacto e de instrumentos para a gestão de águas pluviais em meio urbano”. O MAPLU 2 tem o objetivo de desenvolver soluções urbanísticas e ambientalmente adequadas de manejo de águas pluviais para a redução do impacto sobre o hidrograma de enchentes, com especial atenção para a qualidade da água, o controle de vetores e a gestão de resíduos sólidos em bacias experimentais urbanas.

Os demais projetos são:

- “Lote urbano real: concepção, implantação e avaliação de medidas simplificadas de controle na geração do escoamento superficial”, Edital Universal 14/2013 - Faixa A;
- H2Urb: indicadores de eficiência quali-quantitativos de drenagem em bacias urbanas e periurbanas, da Rede Hidroeco: Hidrograma ecológico e modelagem quali-quantitativa de bacias (em andamento), formada a partir da Chamada Pública MCT/FINEP CT-HIDRO 01/2010 com as seguintes instituições: UFRJ, UFSM, EESC-USP, FEIS-UNESP, UFAL.



## 1.1. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o desempenho de um sistema de biorretenção com base no monitoramento, avaliando também a aplicação do modelo Puls de forma simplificada.

Os objetivos específicos são:

- Avaliar o comportamento hidrológico da biorretenção;
- Comparar o comportamento hidrológico com o projeto da biorretenção após 2 anos da sua construção;
- Avaliar a aplicação do modelo Puls à biorretenção.

## 1.2. Metodologia Geral

O primeiro passo, descrito no capítulo 2, é resultado de uma revisão realizada sobre a técnica de biorretenção, informando o seu conceito apoiado aos diversos estudos publicados tendo-a como objeto de estudo. Nessa etapa, foi realizada uma comparação entre a biorretenção instalada no Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas (UFAL) com alguns dispositivos analisados ao redor do mundo.

A segunda parte (capítulo 3) aborda a etapa de monitoramento do dispositivo desde o seu início. Nessa etapa também são exibidos os principais eventos e a avaliação da sua eficiência ao reduzir o escoamento superficial. Essa análise fica restrita na parte quantitativa, já que os experimentos referentes a qualidade da água não são abordados.

E por fim, a terceira parte (capítulo 4) estuda a aplicação do método de Puls para simular a biorretenção. Esse método, bastante utilizado na simulação de reservatórios, foi escolhido por ser simples e bastante utilizado, inclusive em técnicas de infiltração como trincheiras, uma das funções da biorretenção é o armazenamento da água escoada até que o processo de infiltração esteja completo. Foi realizada uma calibração para cada um dos 12 eventos, como funções-objetivo o coeficiente de Nash–Sutcliffe e o coeficiente de determinação  $R^2$ .

Os passos metodológicos de cada capítulo estão detalhados no âmbito de cada um deles.

## REFERÊNCIAS

BARBIRATO, G. M.; BARBOSA, R. V. R.; FERNANDES, E. F.; TELES, V. R.; OLIVEIRA, T. C. S. Análise do Clima Urbano de Maceió-AL: comparações entre diversas escalas. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, vol. 11. Rio de Janeiro, 2000. Disponível em: <http://www.cbmet.com/cbm-files/12-0452921461266ed5e5f7b20589b9acaf.pdf>. Acesso em 05 mai 2017.

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. São Paulo. Editora Oficina de Textos, 302p, 2005.

CHURCH, S. P. Exploring Green Streets and rain gardens as instances of small scale nature and environmental learning tools. **Landscape and Urban Planning**, v. 134, p. 229-240, 2015. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204614002539>. Acesso em: 17 ago 2016.

PRINCE GEORGE'S COUNTY. **Bioretention Manual**. Prince George's County, Maryland, 206p, 2009.

ROSENDO, A. A. **Avaliação de métodos e critérios para dimensionamento de dispositivos de biorretenção**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Alagoas, 2013.

SOUZA, C. F. **Mecanismos Técnico-Institucionais para a Sustentabilidade da Drenagem Urbana**. [Dissertação de mestrado]. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 193p, 2005.

SOUZA, V. C. B. Gestão da drenagem urbana no Brasil: desafios para a sustentabilidade. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA)**, v. 1, n. 1, p. 57-72, 2013. Disponível em: <https://portalseer.ufba.br/index.php/gesta/article/view/7105/4877>. Acesso em: 20 dez. 2016.

TOMINAGA, E. N. S. **Urbanização e cheias: medidas de controle na fonte**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

## 2. INTRODUÇÃO DA BIORRETENÇÃO COMO SOLUÇÃO PARA REGIÕES URBANIZADAS

### Resumo

Biorretenção é uma técnica que promove o desenvolvimento de baixo impacto (LID) para gestão das águas pluviais. Ela se apresenta como uma opção sustentável para reduzir e tratar o escoamento superficial. Apesar de ser uma prática bastante conhecida em vários países, tais como Austrália e Estados Unidos, seu espaço no Brasil é reduzido a poucos trabalhos científicos. Este capítulo inclui uma pesquisa de literatura em artigos, dissertações/teses e manuais de drenagem sobre sistemas de biorretenções. Bem como, faz-se uma comparação sobre diferentes formas de concepção do dispositivo entre uma célula construída na Universidade Federal de Alagoas e outras projetadas fora e dentro do Brasil. Em síntese, as biorretenções não seguem um padrão, tanto no Brasil, como em outros países. Os únicos aspectos notados em todos os dispositivos analisado foi a camada de zona de raiz e a camada de armazenamento interno de água. Apesar da pouca produção científica produzida no Brasil com esse objeto de estudo, pode-se introduzir essa prática em manuais de drenagem como opção de manejo de águas pluviais.

**Palavras-Chave:** Jardim de chuva, Técnicas Compensatórias, Redução de Poluentes.

### 2.1. Introdução

Com as pressões ambientais e sociais das mudanças climáticas e do crescimento populacional, existe um interesse crescente por técnicas que reduzem os impactos decorrentes do processo de urbanização (LAURENSEN et al., 2013). Os sistemas de infiltração são soluções com grande potencial para a compensação do aumento do escoamento da água pluvial gerado pela impermeabilização. Por outro lado, esses sistemas geram dúvidas por parte do meio técnico a respeito do funcionamento e do desempenho de técnicas LID (Desenvolvimento de Baixo Impacto) e impedem que essas práticas sejam abordadas com maior abrangência.

Diante disso, as células de biorretenção estão se tornando umas das técnicas LID mais populares e o desempenho desses sistemas tem sido estudado extensivamente, tanto através de estudos laboratoriais quanto de campo, e os resultados alcançados têm confirmado o potencial dos sistemas de biorretenção para a retenção e tratamento de águas pluviais (ROY-POIRIER; CHAMPAGNE; FILION, 2010; BROWN; SKAGGS; HUNT, 2013; REIS; ILHA, 2014).

Para DeBusk & Wynn (2011), a biorretenção é altamente recomendada como método de tratamento de águas pluviais urbanas. No trabalho dos autores, o escoamento produzido por um estacionamento foi reduzido em média cerca de 97%. Resultado semelhante foi obtido

por Olszewski & Davis (2013), onde uma biorretenção reduziu com sucesso volumes de escoamento. E Khan et al. (2013) ao utilizar dados experimentais para construir um modelo de regressão linear múltipla para prever o desempenho hidrológico de células de biorretenção, mostrou que o volume de drenagem de escoamento superficial para uma célula de biorretenção e a duração do evento de precipitação, podem ser usados com sucesso para prever o desempenho da biorretenção. Trabalhos como esses lançam uma luz sobre o mecanismo físico da qualidade e quantidade da água, mas ainda há espaço para mais estudos experimentais e de modelagem (GÜLBAZ; KAZEZYILMAZ-ALHAN, 2016).

No Brasil, a biorretenção está vinculada, por enquanto, apenas ao campo científico. Estudos, tais como Melo et al. (2014) e Reis & Ilha (2014), ratificaram a eficiência do sistema de biorretenção na redução de escoamento. De modo similar, Macedo et al. (2015), concluíram, em termos econômicos, que a biorretenção é uma alternativa de dispositivo de drenagem viável e competitiva a longo prazo.

Em uma entrevista realizada na cidade de Santa Maria, RS-Brasil, foi perguntado a uma amostra de 518 residências quais são as preferências e principais percepções da população de diferentes estratos socioeconômicos com relação à implementação de TCs. Constatou-se que dos entrevistados que preferiram uma técnica compensatória com princípio de funcionamento associado à infiltração, a maioria optou pela biorretenção, sendo o motivo estético como principal critério de escolha (TASSI et al., 2016).

O propósito deste trabalho é realizar uma comparação entre o sistema de biorretenção instalado na Universidade Federal de Alagoas com alguns dispositivos avaliados pela comunidade científica.

## **2.2. Materiais e Métodos**

Neste trabalho, foi desenvolvida uma pesquisa bibliográfica tendo o sistema de biorretenção como tema a ser discutido. O intuito é identificar as características específicas e os condicionantes de instalação, bem como apresentar algumas publicações governamentais que incentivam o uso da biorretenção como técnica de manejo de águas pluviais. Este estudo também faz uma comparação entre as biorretenções construídas no Brasil e fora dele, cujas conclusões corroboram com a eficiência no desempenho dessa técnica.

### 2.2.1. Definição da técnica

Uma biorretenção pode ser instalada com o objetivo de suprir as limitações das práticas de gestão de águas pluviais convencionais, atuando para reduzir o volume escoado superficialmente, aumentar a recarga das águas subterrâneas, melhorar a qualidade da água infiltrada e reduzir a vazão de pico (ATCHISON; POTTER; SEVERSON, 2006). Exemplos encontrados na literatura mostram que uma biorretenção pode ser utilizada para tratar o escoamento provocado por um estacionamento (DAVIS, 2008; DEBUSK; WYNN, 2011), por um telhado (MELO et al. 2014), por uma rua (PELJO; DUBOWSKI; DALRYMPLE, 2016), ou ainda, por uma combinação de todos (LOURENÇO, 2014).

Em resumo, as instalações de biorretenção captam o escoamento da água da chuva para ser filtrado e armazenado através de camadas de materiais distintos. Uma vez que a capacidade do espaço vazio entre os grãos do solo é excedida, as águas pluviais começam a se juntar na superfície da camada superior. Essa água pode ser drenada através de infiltração, por meio de uma tubulação ou por uma combinação dos dois métodos (PRINCE GEORGE'S COUNTY, 2009). A Tabela 2.1 apresenta os componentes de um projeto de biorretenção a partir de diversos estudos.

**Tabela 2. 1: Descrição dos componentes de um projeto de biorretenção.**

Componente da Biorretenção	Descrição
Zona alagada	Zona superficial propícia ao alagamento. Profundidade e volume devem ser especificados. Profundidade: 15 a 52 cm.
Zona de raiz	Camada superior de solo disponível para as raízes das plantas. A água armazenada nesta região está disponível para a evapotranspiração e infiltração. Esta camada deve ter uma capacidade de infiltração ou permeabilidade suficientemente elevada para poder gerir eficazmente o escoamento e também deve ter um alto teor de matéria orgânica para facilitar a vegetação e a atividade microbiana.
Tubulação de drenagem (opcional)	Tubo perfurado de pequeno diâmetro (100-150 mm). Ele é colocado acima da camada de armazenamento interno de água para coletar a água excedente e transportá-la para a rede de drenagem. São frequentemente utilizados quando as células de biorretenção estão localizadas em solos lentamente drenáveis e são necessários quando o fundo e as laterais da célula são impermeabilizados.
Armazenamento interno de água (opcional)	Camada que fornece um volume de armazenamento adicional na célula de biorretenção. Em solos permeáveis, a água armazenada nesta camada é liberada por infiltração. Profundidade: 0,6 a 1,2 m.

Fonte: Hunt, Davis & Traver (2012); Davis et al. (2012) e Paus & Braskerud (2014).

Adaptada pelo autor.

Davis et al. (2009) listam algumas das questões de projeto ou elementos associados com a aplicação da biorretenção. Entre as mais importantes, destacam-se: os objetivos de concepção do projeto, tais como a recarga de água subterrânea, prevenção e remoção de poluentes e redução do pico do escoamento; diretrizes de localização da área de drenagem; processos de tratamento, tais como a detenção, retenção, infiltração, evaporação e precipitação; dimensionamento da área da superfície e profundidade da zona alagada; composição das camadas; vegetação; tubulação de drenagem; modelos computacionais; e; manutenção, vida útil e inspeção do dispositivo.

Em suma, o projeto de uma biorretenção contém basicamente 3 fases: dimensionamento, escolha dos materiais que vão preencher o volume escavado e a seleção de plantas. No dimensionamento pode-se utilizar equações simples, tal como o método da curva envelope citada por Daniel Júnior (2013), ou por equações mais complexas, como as equações utilizadas por Roy-Poirier, Filion & Champagne (2015) na criação de um modelo hidrológico de biorretenção.

O critério de dimensionamento varia bastante com as diversas diretrizes locais, conforme manuais de drenagem de diferentes localidades do mundo que utilizam diversos tipos de critérios para dimensionar uma biorretenção, como por exemplo os manuais de drenagem do Departamento de Recursos Naturais e Meio Ambiente do estado de Delaware, EUA (DNREC) e do Distrito de Esgoto e Drenagem da Grande Vancouver, Canadá que dimensionam uma biorretenção de diferentes metodologias. No entanto, não se pode afirmar o melhor método por depender da solicitação requerida pelo sistema

Durante a construção do dispositivo, deve-se ter cautela no início da escavação, Brown & Hunt III (2010) recomendam que em solo de areia pura, a escavação pode ocorrer sob condições de solo molhado ou seco, enquanto de solo argiloso a argilo-arenoso, a escavação pode ser realizada durante condições do solo seco. Dependendo das características de infiltração nos solos locais, determina-se a necessidade de ter na célula de biorretenção uma tubulação de drenagem e/ou se o próprio solo natural pode absorver a água por infiltração (PAUS; BRASKERUD, 2014).

Em relação a entrada de água, Paus & Braskerud (2014) afirmam que a velocidade da água que entra na biorretenção deve ser tão pequena quanto possível para evitar erosão, podendo ser alocados blocos de pedra na entrada para dissipar energia.

A escolha da vegetação é uma das principais etapas, pois ela desempenha um controle qualitativo e quantitativo, interferindo positivamente na infiltração, na interceptação, no controle de poluentes, no controle de erosão, na evapotranspiração e na diminuição do escoamento superficial (GONÇALVES; BARBASSA; PEREIRA, 2016). Muerdter et al. (2015) recomendam a utilização de *Eutrochium Dubium* (Erva de Joe Pye) devido a sua sobrevivência e estrutura radicular. Em relação a biodiversidade contida na biorretenção, os estudos de Kazemi et al. (2009) apontam que quanto maior a quantidade de plantas e serapilheira, melhor será a condição do habitat para o aumento da biodiversidade.

### **2.2.2. Potencial qualitativo**

A função de melhorar a qualidade da água escoada superficialmente é a que faz a diferença entre a biorretenção e outras técnicas compensatórias, tais como, trincheiras de infiltração, bacias de infiltração e pavimentos permeáveis. Poluentes podem ser depositados em telhados, ruas e na atmosfera e levados pela água da chuva até a rede de drenagem. Com a introdução da biorretenção, essa primeira lavagem pode ser tratada antes de ir a rede de drenagem ou infiltrar até algum manancial subterrâneo. Diversos estudos tomam como foco principal o potencial da biorretenção na redução de poluentes.

Trowsdale & Simcock (2011) estudaram uma biorretenção que recebe a água de uma bacia industrial e de uma estrada e identificou que o dispositivo conseguiu reduzir a concentração de sedimentos e zinco. Entretanto, as concentrações de zinco que saem do sistema de biorretenção ainda excedem as diretrizes de saúde do ecossistema. Eles constataram também que a biorretenção foi ineficaz na redução de concentrações de cobre (Cu). Por outro lado, LaBarre et al. (2016) avaliaram a capacidade da biorretenção de atenuar o Cu advindo do escoamento de águas pluviais de um telhado e demonstraram que o dispositivo foi capaz de reter mais de 90% desse elemento.

Em outro estudo, Jaber (2015) testou a eficiência da biorretenção em reduzir a concentração de alguns poluentes e observou que a carga total durante o período de coleta de dados para nitrato de nitrogênio ( $\text{NO}_3$ ), nitrogênio amônio ( $\text{NH}_4$ ), nitrogênio total Kjeldahl (NTK), ortofosfato, fósforo total e sólidos em suspensão foi reduzida em 78%, 66%, 64%,

36%, 41% e 83%, respectivamente. A Tabela 2.2 apresenta o potencial de redução de poluentes em um sistema de biorretenção extraído da literatura.

**Tabela 2. 2: Desempenho da qualidade no sistema de biorretenção extraído da literatura.**

Poluente	Potencial de redução (%)	Fonte
	-197; -388; -213	Bakacs, Yergeau & Obropta, 2013
	66	Ergas et al., 2010
Fósforo total	-65,3	Géhéniau et al., 2015
	55,1; 84	Liu & Davis, 2014
	-567; -64	McNett, Hunt & Davis, 2011
	96; 87; 84	Bakacs, Yergeau & Obropta, 2013
	69	Ergas et al., 2010
Sólidos suspenso	74,5	Géhéniau et al., 2015
	96,4; 95,7	Liu & Davis, 2014
	100	Muthanna et al. 2007
Turbidez	33,9	Géhéniau et al., 2015
Cádmio	0	
	95	Muthanna et al. 2007
Cromo	1,8	Géhéniau et al., 2015
Cobre	-14,1	Géhéniau et al., 2015
	89	Muthanna et al. 2007
Níquel	-123,5	Géhéniau et al., 2015
Chumbo	54,3	Géhéniau et al., 2015
	99	Muthanna et al. 2007
Zinco	48,3	Géhéniau et al., 2015
	96	Muthanna et al. 2007
NTK	1,6	
Cálcio	-106,6	
Potássio	-261,5	Géhéniau et al., 2015
Magnésio	-114,2	
Sódio	-248,6	

Em alguns estudos exibidos na Tabela 2.2 são mostrados poluentes que tiveram um aumento na sua concentração ao percolar pelas camadas do dispositivo. De acordo com Shafique (2016), os meios de filtração e de solo têm grande influência na qualidade da água e aa vezes, a eficiência de remoção de nutrientes do sistema de biorretenção é diminuída após um período de tempo. Dessa forma, são necessárias mais pesquisas para selecionar camadas mais adequadas que possam ter um melhor desempenho após um longo período de tempo.

### 2.2.3. Potencial quantitativo



O grande diferencial da biorretenção é o tratamento qualitativo trabalhando em paralelo com o quantitativo. Dessa forma, ao pesquisar na literatura trabalhos específicos para cada função, encontram-se poucos e a maior parte deles se conserva no estudo de remoção de poluentes. Por outro lado, ao se tratar de quantidade, é unânime a conclusão de que um dispositivo de biorretenção reduz o escoamento superficial em variadas proporções.

Por exemplo, o estudo realizado por Davis (2008) monitorou duas instalações de biorretenção por quase 2 anos no campus da Universidade de Maryland. As duas células de paralelas de 28 m<sup>2</sup> cada uma, capturaram o escoamento de águas pluviais de um estacionamento de 0,24 ha. Ele quantificou a redução do volume e do valor de vazão de pico, e ainda do tempo de pico do hidrograma de entrada. Com isso, foram observadas reduções médias de pico de 49 e 58% para as duas células e redução do volume de saída em relação ao de entrada. Além de ser constatada que o tempo de pico foi retardado.

James & Dymond (2012) investigaram o papel que a biorretenção desempenha quando distribuída ao longo de uma bacia urbanizada a partir de dois cenários: o primeiro com a biorretenção recebendo o escoamento de muitos usos de terra e o outro em que apenas os escoamentos de grandes áreas impermeáveis foi encaminhado. E concluíram que ambos os cenários foram capazes de reduzir o escoamento da bacia mesmo que não se tenha alcançada a característica de pré-desenvolvimento.

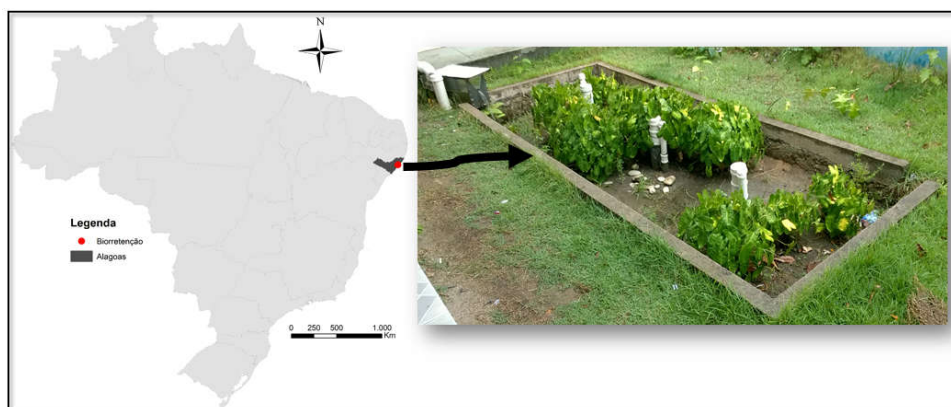
Strauch, Rus & Holm (2016) avaliaram o balanço hídrico de duas biorretenções localizadas em Omaha, Nebraska, monitorando a quantidade de águas pluviais que entram e saem do dispositivo. Eles encontraram na primeira célula uma variação entre 33% e 100% na redução de volumes de cada evento. E no outro dispositivo, não houve extravasamento registrado. Analisou-se ainda, porcentagem das saídas atribuídas a evapotranspiração, sendo uma redução de 3% e de 5% em cada uma das células, o que indica que a absorção vegetativa não é um fator primário no ciclo hidrológico da biorretenção.

#### **2.2.4. Caracterização do objeto de estudo**

Para essa revisão, utilizou-se como comparativo uma biorretenção de 6,64 m<sup>2</sup> de área instalada no Centro de Tecnologia (CTEC) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL). Esse dispositivo contém 3 camadas, sendo cada uma delas separadas por manta geotêxtil. A parte superior é composta com plantas e possuindo uma zona alagada de 0,28 m, conforme a Figura

2.1, a zona de raiz contém uma mistura de terra preta e húmus com 19 cm de espessura, a camada de armazenamento interno contém 72 cm de brita e a última camada é um colchão de areia de 10 cm de espessura.

**Figura 2. 1: Imagem da biorretenção.**



Fonte: Autor, 2017.

## 2.3. Resultados Discussão

### 2.3.1. Estudos sobre biorretenção no Brasil

Um dos primeiros estudos sobre biorretenção no Brasil ocorreu na primeira metade da última década com Souza, Cruz & Tucci (2011). Eles investigaram o efeito da aplicação de técnicas LID, entre elas a biorretenção, na recuperação dos processos hidrológicos e constataram que o hidrograma do local analisado com essas técnicas, aproximou-se do hidrograma de pré-urbanização. Esse estudo envolveu apenas simulações a partir de cenários hipotéticos. Após isso, outros estudos apareceram desde o início da década atual (2010-2020).

Iniciando cronologicamente, Melo (2011) analisou o desempenho de uma biorretenção em relação às funções de retenção e infiltração e como a estrutura se comportou ao armazenar água em seu interior. Rosa, Mediondo & Souza (2013) apresentaram uma metodologia generalizada de dimensionamento e avaliação da eficiência de técnicas compensatórias (TCs) com ênfase em biorretenção. Essa abordagem possibilita o estudo de como as TCs aumentam a vida útil de uma obra.

Moura (2013), por sua vez, projetou, construiu e monitorou uma biorretenção em um campus da Universidade de São Paulo (USP) com foco em analisar a eficiência de redução da concentração de poluentes. A biorretenção foi composta por 4 células, onde formou-se pares

não comunicáveis e cada par com células em série. Um par foi recoberto por grama e outro por diversos tipos de plantas. Nesse estudo, a biorretenção teve sua base e laterais impermeabilizadas e não ocorrendo infiltração para o solo natural, portanto, a água após passar pelo dispositivo foi direcionada a um canal. No mesmo ano, Daniel Júnior (2013) construiu e avaliou a capacidade de um dispositivo de biorretenção controlar qualitativamente o escoamento da água de um telhado no campus da Universidade Federal de Santa Maria. Quantitativamente, revelou-se que a estrutura suportou todos os eventos ocorridos no período de monitoramento com o nível máximo de água alcançar 80 cm, onde o limite era de 1,20 m.

O último trabalho foi realizado por Rosa (2016) que criou um modelo de dimensionamento e simulação para sistemas de biorretenção com base no método da precipitação efetiva e no método de Puls. Ele aplicou essa ferramenta na concepção de um dispositivo no Campus II da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP).

### 2.3.2. Manuais de drenagem com abordagem em biorretenção

Manuais de drenagem são ferramentas fundamentais para a divulgação dos sistemas de biorretenção, eles mostram como devem ser projetados os dispositivos e os passos que devem ser executados na sua construção.

No Brasil, ainda falta a elaboração de manuais que estimulem o emprego dessa técnica, embora existam manuais que tratam de diversas técnicas de controle do escoamento na fonte (Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais da cidade de São Paulo, por exemplo). Na Tabela 2.3 são mostrados alguns manuais de drenagem que inserem a biorretenção no manejo das águas pluviais. De acordo com Takaijudin, Ghani & Zakaria (2016), a maioria dos manuais seguem os requisitos específicos alinhados com as necessidades de cada país.

**Tabela 2.3: Manuais de drenagem que divulgam os sistemas de biorretenção.**

Manual	Descrição	País / Estado vigente
New Jersey Stormwater Best Management Practices Manual	Desenvolvido para fornecer orientação para abordar os padrões nas Normas de Gestão de águas Pluviais.	Estados Unidos / New Jersey
Urban Storm Water Management (MSMA)	Contém 48 capítulos, sendo recomendada a utilização de sistema de biorretenção no capítulo 42.	Malásia

Manual	Descrição	País / Estado vigente
Pennsylvania Stormwater Best Management Practices Manual	Publicado em 2006, fornece descrição de um sistema de biorretenção e as orientações de projeto.	Estados Unidos / Pennsylvania
Stormwater Best Management Practices Manual	Publicado em 2007, fornece uma descrição detalhada de um sistema de biorretenção e orienta os usuários em relação a manutenção.	Estados Unidos / North Carolina
Georgia Stormwater Management Manual	Publicado em 2001, fornece comparações entre técnicas compensatórias.	Estados Unidos / Georgia
Stormwater Management Manual for Western Washington	Publicado em 2014, fornece orientação sobre as medidas necessárias para controlar a quantidade e a qualidade das águas pluviais.	Estados Unidos / Washington
Bioretention Technical Design Guidelines	Publicado em 2014, fornece uma descrição focada em biorretenção.	Austrália / Queensland
Stormwater Management Manual	Publicado em 2016, fornece requisitos de política e projeto para gerenciamento de águas pluviais em toda a cidade de Portland.	Estados Unidos / Oregon

Na Tabela 2.3, destaca-se o Gergia Sormwater Management Manual pois mostra que a biorretenção já era uma técnica pública no início da última década (2000 a 2010), enquanto no Brasil, essa técnica está ainda não foi consolidada e não incorpora os atuais manuais de drenagem municipais. Dessa forma, existe a necessidade do desenvolvimento de estudos para consolidar esse tema. Como ocorreu com a trincheira de infiltração que foi analisada por Souza (2002) e atualmente (2017) faz parte praticamente de todos os manuais de drenagem que tratam do controle do escoamento na fonte. Frente a isto, é essencial que o Poder Público, durante a elaboração dos Planos Diretores de Drenagem Urbana, considere o uso de dispositivos que controlem as águas pluviais na fonte. Porém, é relevante mencionar que medidas compensatórias de drenagem urbana não é a solução definitiva para o controle das inundações, mas as amenizam (BEUX; OTTONI, 2015).

### 2.3.3. Comparação entre as técnicas de biorretenção

Neste item são realizadas comparações entre os componentes da biorretenção instalada em Alagoas, chamada de B1, e outras biorretenções localizadas na Malásia (SIDEK ET AL., 2014), chamada de B2, em Ohio, EUA (WINSTON; DORSEY; HUNT, 2016), chamada de B3, e na Carolina do Norte, EUA (HUNT et al., 2008), chamada de B4. Esses 3 últimos

dispositivos foram escolhidos por terem dimensões semelhantes ao dispositivo de Alagoas. As principais características estão descritas na Tabela 2.4.

**Tabela 2. 4: Descrição dos componentes das biorretenções.**

Características	Deste estudo	Sidek et al. (2014)	Winston, Dorsey & Hunt (2016)	Hunt et al. (2008)
Zona alagada	0,28 m	0,23 m	0,30 m	-
Zona de raiz	0,19 m	0,07 m	0,60 m	1,20 m
Armazenamento interno de água	0,72 m	1,2 m	0,60 m	0,18 m
Base	0,10 m	-	0,15 m	-
Tubulação de drenagem	-	Sim	Sim	Sim
Inclinação	2,53%	-	-	-
Escala de drenagem	Residencial	Microbacia	Microbacia	Microbacia
Área-bio/Área-dren	2,23%	0,50%	5%	6%

As espessuras das camadas e a inclinação da biorretenção B1 foram coletadas a partir de medição após quase 2 anos do seu funcionamento. Nota-se na Tabela 4.4 que a área propícia a alagamento da célula B1 e as das células B2 e B3 tem espessuras semelhantes, enquanto a biorretenção B4 não possui essa camada. A zona de raiz das células dos EUA é mais espessa do que as de Alagoas e Malásia, podendo conter plantas de maior porte. Ao comparar o armazenamento interno de água, observa-se que B3 e B4 possuem menores espessuras, por outro lado, elas têm maiores áreas, de 5 e 6%, gerando maiores volumes de armazenamento ao depender da porosidade dos materiais que as compõe.

As espessuras das camadas e a inclinação da biorretenção B1 foram coletadas a partir de medição após quase 2 anos do seu funcionamento. Nota-se na Tabela 4.4 que a área propícia a alagamento da célula B1 e as das células B2 e B3 tem espessuras semelhantes, enquanto a biorretenção B4 não possui essa camada. A zona de raiz das células dos EUA é mais espessa do que as de Alagoas e Malásia, podendo conter plantas de maior porte. Ao comparar o armazenamento interno de água, observa-se que B3 e B4 possuem menores espessuras, por outro lado, elas têm maiores áreas, de 5 e 6%, gerando maiores volumes de armazenamento ao depender da porosidade dos materiais que as compõe. Em seguida, é mostrada na Tabela 4.5 a comparação entre as biorretenções construídas no Brasil.

**Tabela 2. 5: Comparação entre biorretenções instaladas no Brasil.**

Características	Deste estudo	Melo (2011)	Daniel Júnior (2013)	Moura (2013)	Rosa (2016)
Zona alagada	0,28 m	0,10 m	-	0,30 m	-
Zona de raiz	0,19 m	0,10 m	0,30 m	0,45 a 0,75 m	0,60 m
Armazenamento interno de água	0,72 m	0,70 m	0,90 m	0,80 m	2,70 m
Base	0,10 m	0,10 m	-	-	-
Tubulação de drenagem	-	-	-	-	-
Inclinação	2,53%	-	-	-	-
Escala de drenagem	Residencial	Residencial	Residencial	Microbacia	Microbacia
Área-bio/Área-dren	2,23%	5,35%	4,71%	0,61%	0,31%
Método de dimensionamento	Precipitação efetiva	Balanço Hídrico	Curva envelope	-	Modelo BIRENICE

Até agora no Brasil, apenas as biorretenções apresentadas na Tabela 2.5 foram objetos de estudos experimentais que geraram dissertações ou teses. Ao compará-las, nota-se maiores semelhanças entre os dispositivos deste estudo e a biorretenção de Melo (2011). E todas possuem pelo menos uma camada de zona de raiz e uma camada de armazenamento interno de água, isso também é evidenciado na Tabela 2.5. No caso de Rosa (2016), sua célula apresenta uma grande espessura de armazenamento, em compensação, ao relacionar sua área da biorretenção com sua área de drenagem, observa-se que ele, juntamente com Moura (2013), possui uma grande área de contribuição para uma pequena área de biorretenção.

Nota-se que nenhum dos dispositivos da Tabela 2.5 apresentou uma tubulação de drenagem e os 3 primeiros foram projetados em escala residencial e os dois últimos em escala de microbacia. Em relação a razão entre a área da biorretenção e a área de drenagem, apenas Melo (2011) concluiu que o dimensionamento do jardim de chuva baseado na taxa mínima de 5% da área impermeável não se adequou ao seu caso estudado.

Apesar dos métodos de dimensionamentos terem nomes diferentes, são semelhantes na sua concepção, pois todos, exceto Moura (2013), utilizam o critério de entrada e saída de água do dispositivo. Os critérios de dimensionamento utilizados por Moura (2013) foram baseados no Manual de Manejo de chuva da cidade de Portland nos Estados Unidos e a área do dispositivo foi dimensionada ao equivalente à vaga de dois veículos em zonas de estacionamento ao longo de vias públicas.

Todos os artigos citados na Tabela 2.4 e 2.5 recomendam a utilização da biorretenção na mitigação da poluição difusa e do escoamento superficial. Todos corroboram da ideia de que a instalação de um sistema de biorretenção pode ajudar a amenizar os efeitos urbanização no meio ambiente.

## 2.4. Conclusões

Esses trabalhos desenvolvidos no Brasil podem servir de estímulo para a criação de manuais de drenagem focados em TCs com a biorretenção inserida como uma alternativa viável e atrativa. Esses manuais servem para orientar profissionais que planejam e projetam a drenagem de águas pluviais. Ao pesquisar sobre a evolução do sistema de drenagem em outros países, tais como EUA, Austrália e Canadá, nota-se que o Brasil não está acompanhando os exemplos dos países que fornecem uma melhor qualidade de vida para seus cidadãos, pois enquanto esses países tratam as águas pluviais como parte das atividades da população, são poucos os estados brasileiros que pensam dessa mesma forma.

Apesar do Brasil ter pouca produção científica voltada a dispositivos de biorretenção, não se pode afirmar que os trabalhos não estão avançando. Já foram instaladas células no Nordeste, Sul e Sudeste com informações quantitativas e qualitativas sobre esses dispositivos.

## REFERÊNCIAS

AMEC EARTH AND ENVIRONMENTAL. Center for Watershed Protection. Debo and Associates. Jordan Jones and Goulding. Atlanta Regional Commission. **Georgia Stormwater Management Manual**. Volume 2. Technical Handbook. First Edition – August 2001. Disponível em: <http://documents.atlantaregional.com/gastormwater/GSMMVol2.pdf>>. Acesso em: 16 mar. 2017.

ATCHISON, D.; POTTER, K. W.; SEVERSON, L. **Design Guidelines for Stormwater Bioretention Facilities**, University of Wisconsin Water Resources Institute, Publicação N° WIS-WRI-06-01, 40p, 2006. Disponível em: <http://aqua.wisc.edu/publications/PDFs/stormwaterbioretention.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2017.

BAKACS, M. E.; YERGEAU, S. E.; OBROPTA, C. C. Assessment of Car Wash Runoff Treatment Using Bioretention Mesocosms. **Journal of Environmental Engineering**, v. 139, n. 8, p. 1132-1136, 2013. Disponível em: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000719](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000719). Acesso em: 14 fev. 2017.

BEUX, F. C.; OTTONI, A. B. Métodos alternativos de drenagem a partir da retenção e infiltração das águas de chuva no solo, visando a redução das enchentes urbanas. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v. 3, n. 17, p. 1-13, 2015. Disponível em: [http://www.amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/gerenciamento\\_de\\_cidades/articloe/view/1005](http://www.amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/gerenciamento_de_cidades/articloe/view/1005). Acesso em 9 nov. 2016.

BROWN, R. A.; HUNT III, W, F. Impacts of Construction Activity on Bioretention Performance. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 15, n. 6, p. 386-394, 2010. Disponível em: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000165](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000165). Acesso em: 7 jan. 2017.

BROWN, R.A.; SKAGGS, R.W.; HUNT, W.F. Calibration and validation of DRAINMOD to model bioretention hydrology, **Journal of Hydrology**, v. 486, p. 430-442, 2013. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169413001297>. Acesso em: 7 jan. 2017.

CITY OF PORTLAND. **Stormwater Management Manual**.2016. Disponível em: <https://www.portlandoregon.gov/bes/71127>>. Acesso em: 16 mar. 2017.

DANIEL JÚNIOR, J. J. **Avaliação de uma biorretenção como estrutura sustentável de drenagem urbana**. 2013. [Dissertação de Mestrado].Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Rio Grande do Sul, RS, 115p, 2013. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/7839>. Acesso em: 12 mar. 2017.

DAVIS, A. P. Field performance of Bioretention: hydrology impacts. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 13, n. 2, p. 90-95, 2008. Disponível em: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2008\)13%3A2\(90\)](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)1084-0699(2008)13%3A2(90)). Acesso em: 9 fev. 2017.

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. Disponível em: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2009\)135:3\(109\)](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9372(2009)135:3(109)). Acesso em: 9 fev. 2017.

DAVIS, A. P.; et al. Hydrologic performance os Bioretention storm-water control measures. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 17, n. 5, p. 604-614, 2012. Disponível em: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000467](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000467). Acesso em: 15 out. 2016.

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



[http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000388](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000388). Acesso em: 2 fev. 2017.

DELAWARE DEPARTMENT OF NATURAL RESOURCES AND ENVIRONMENTAL CONTROL. **Post Construction Stormwater BMP Standards and Specifications**. Division of Watershed Stewardship. 2013. Disponível em:

<http://www.dnrec.delaware.gov/swc/Drainage/Documents/Sediment%20and%20Stormwater%20Program/Technical%20Document/Latest%20Version%20of%20all%20Articles/3.06.2%20Post%20Construction%20Stormwater%20BMP%20Standards%20and%20Specifications.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2017.

DEPARTMENT OF ECOLOGY. **Stormwater Management Manual For Western Washington**. State of Washington. 2012. Disponível em:

[www.ecy.wa.gov/programs/wq/stormwater/manual/2014SWMMWWinteractive/Content/Resources/DocsForDownload/2014SWMMWW.pdf](http://www.ecy.wa.gov/programs/wq/stormwater/manual/2014SWMMWWinteractive/Content/Resources/DocsForDownload/2014SWMMWW.pdf)>. Acesso em: 16 mar. 2017.

DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL PROTECTION. **Pennsylvania Stormwater Best Management Practices Manual**. Bureau of Watershed Management. 2006. Disponível em:

<http://www.elibrary.dep.state.pa.us/dsweb/Get/Document-67993/6.4.5%20BMP%20Rain%20Garden%20Bioretention.pdf>>. Acesso em: 16 mar. 2017.

ERGAS, S. J.; et al. Performance of Nitrogen-Removing Bioretention Systems for Control of Agricultural. **Journal of Environmental Engineering**, v. 136, n. 10, p. 1105-1112, 2010. Disponível em: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000243](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000243). Acesso em: 8 mar. 2017.

GÉHÉNIAT, N.; et al. Monitoring of a Rain Garden in Cold Climate: Case Study of a Parking Lot near Montréal. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 141, n. 6, 2015. Disponível em: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000836](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000836). Acesso em: 16 jan. 2017.

GREATER VANCOUVER SEWERAGE & DRAINAGE DISTRICT. **Stormwater Source Control Design Guidelines 2012**. Metrovancouver. 2012. Disponível em:

<http://www.metrovancouver.org/services/liquid-waste/LiquidWastePublications/StormwaterSourceControlDesignGuidelines2012.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2017.

GONÇALVES, L. M.; BARBASSA, A. P.; PEREIRA, T. R. D. S. **O projeto paisagístico como elemento integrador e identificador de técnicas compensatórias de drenagem**. In: Congresso Internacional Towards Green Cities. Mérida, México, 15–17 de Fevereiro de 2016, 10p, 2016. Disponível em:

[https://www.researchgate.net/publication/301231435\\_O\\_PROJETO\\_PAISAGISTICO\\_COM\\_O\\_ELEMENTO\\_INTEGRADOR\\_E\\_IDENTIFICADOR\\_DE\\_TECNICAS\\_COMPENSATO](https://www.researchgate.net/publication/301231435_O_PROJETO_PAISAGISTICO_COM_O_ELEMENTO_INTEGRADOR_E_IDENTIFICADOR_DE_TECNICAS_COMPENSATO)

RIAS\_DE\_DRENAGEM\_Estrategias\_para\_apropriacao\_pelos\_usuarios\_de\_Planos\_de\_Infiltracao\_em\_campus\_universitario. Acesso em: 7 jan. 2017.

GÜLBAZ, S.; KAZEZYILMAZ-ALHAN, C. M. Experimental investigation on hydrologic performance of LID with rainfall-watershed-bioretenion system. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 22, n. 1, 2016. Disponível em: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001450](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001450). Acesso em: 9 fev. 2017.

HUNT, W. F.; et al. Pollutant removal and peak flow mitigation by a bioretention cell in urban charlotte, N.C. **Journal of Environmental Engineering**, v. 134, n. 5, p. 403-408, 2008. Disponível em: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2008\)134%3A5\(403\)](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9372(2008)134%3A5(403)). Acesso em: 18 out. 2016.

HUNT, W. F.; DAVIS, A. P.; TRAVER, R. G. Meeting hydrologic and water quality goals through targeted bioretention design. **Journal of Environmental Engineering**, v. 138, n. 6, p. 698-707, 2011. Disponível em: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000504](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000504). Acesso em: 1 fev. 2017.

JABER, F. Bioretention and Permeable Pavemente Performance in Clay Soil. **International Low Impact Development Conference 2015: It Works in All Climates and Soils**, Houston, Texas, 19-21 de Janeiro, p. 151-160, 2015. Disponível em: <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/9780784479025.015>. Acesso em: 1 fev. 2017.

JAMES, M. B.; DYMOND, R. L. Bioretention Hydrologic Performance in an Urban Stormwater Network. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 17, n. 3, p. 432-436, 2012. Disponível em: [http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000448](http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000448). Acesso em: 9 mar. 2017.

KAZEMI, F.; BEECHAM, S.; GIBBS, J. CLAY, R. Factors affecting terrestrial invertebrate diversity in bioretention basins in an Australian urban environmental. **Landscape and Urban Planning**, v. 92, n. 3-4, p. 304-313, 2009. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204609001029>. Acesso em: 10 dez. 2016.

KHAN, T. U.; VALEO, C.; CHU, A.; HE, J. A Data Driven Approach to Bioretention Cell Performance Prediction and Design. **Water**, v. 5, n 1, p. 13-28. 2013. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2073-4441/5/1/13>. Acesso em: 26 fev. 2017.

LABARRE, W. J.; et al. Attenuation of copper in runoff from copper roofing materials by two stormwater control measures. **Water Research**, v. 88, p. 207-215, 2016. Disponível em:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135415302748>. Acesso em: 12 jan. 2017.

LAURENSEN, G.; et al. **The role of Bioretention systems in the treatment of stormwater**. In: Sparks, D. L. (Ed.), *Advances in Agronomy*, v. 120. Elsevier Inc, PA., p. 223-274, 2013.

LIU, J.; DAVIS, A. P. Phosphorus Speciation and Treatment Using Enhanced Phosphorus Removal Bioretention. **Environmental Science & Technology**, v. 48, n. 1, p. 607-614, 2014. Disponível em: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es404022b>. Acesso em: 19 out. 2016.

LOURENÇO, R. **Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentáveis**. [Dissertação de mestrado]. Instituto Politécnico de Coimbra, Instituto superior de Engenharia de Coimbra. Coimbra, Portugal, 162p, 2014. Disponível em: [http://files.isec.pt/DOCUMENTOS/SERVICOS/BIBLIO/Teses/Tese\\_Mest\\_Rossana-Lourenco.pdf](http://files.isec.pt/DOCUMENTOS/SERVICOS/BIBLIO/Teses/Tese_Mest_Rossana-Lourenco.pdf). Acesso em: 16 fev. 2017.

MCNETT, J. K.; HUNT, W. F.; DAVIS, A. P. Influent Pollutant Concentrations as Predictors of Effluent Pollutant Concentrations for Mid-Atlantic Bioretention. **Journal of Environmental Engineering**, v. 137, n. 9, p. 790-799, 2011. Disponível em: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000373](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000373)

MELO, T. A. T. **Jardim de chuva: sistema de biorretenção como técnica compensatória no manejo de águas pluviais urbanas**. [Dissertação de Mestrado]. Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Pernambuco, Pe. 178p. 2011.

MELO, T. A. T.; et al. Jardim de chuva: sistema de biorretenção para o manejo das águas pluviais urbanas. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 4, p. 147-165, 2014. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ac/v14n4/a11v14n4.pdf>. Acesso em: 16 set. 2016.

MOURA, N. C. B. **Biorretenção: tecnologia ambiental urbana para manejo das águas de chuva**. [Tese de Doutorado]. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo – FAUUSP, São Paulo, Sp, 177p, 2013. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16135/tde-30052014-104153/pt-br.php>. Acesso em: 12 mar. 2017.

MUERDTER, C.; ÖZKÖK, E.; LI, L.; DAVIS, A. Vegetation and Media Characteristics of an Effective Bioretention Cell. **Journal of Sustainable Water in the Built Environment**, v. 2, n. 1, 2015. Disponível em: <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/JSWBAY.0000804>. Acesso em: 15 jan. 2017.

MUTHANNA, T. M.; VIKLANDER, M.; BLECKEN, G.; THOROLFSSON, S. T. Snowmelt pollutant removal in bioretention areas. **Water Research**, v. 41, n. 18, p. 4061-4072, 2007. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17604808>. Acesso em: 16 nov. 2016.

NCDENR. **Stormwater Best Management Practices Manual**. North Carolina. Division of Water Quality. 2007. Disponível em: [https://www.ncsu.edu/ehs/environ/DWQ\\_StormwaterBMPmanual\\_001%5B1%5D.pdf](https://www.ncsu.edu/ehs/environ/DWQ_StormwaterBMPmanual_001%5B1%5D.pdf)> Acesso em: 16 mar. 2017.

NJ STORMWATER.ORG. State of New Jersey. Department of Environmental protection. **New Jersey Stormwater Best Management Practices Manual**. 2016. Disponível em: [http://www.njstormwater.org/bmp\\_manual2.htm](http://www.njstormwater.org/bmp_manual2.htm)>. Acesso em: 16 mar. 2017.

OHNUMA JÚNIOR, A. A.; SILVA, L. P.; MENDIONDO, E. M. Vazões afluentes em trincheira de infiltração domiciliar. **Ciência & Engenharia**, v. 24, n. 1, p. 89-98, 2015. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/cieng/article/view/29927>. Acesso em: 19 out. 2016.

OLSZEWSKI, J. M.; DAVIS, A. P. Comparing the hydrologic performance of a bioretention cell with predevelopment values. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 139, n. 2, p. 124-130, 2013. Disponível em: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000504](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000504). Acesso em: 20 dez. 2016.

PAUS, K. H.; BRASKERUD, B. C. Suggestions for designing and constructing bioretention cells for a Nordic climate. **Journal of Water Management and Research**, v. 70, p. 139-150, 2014. Disponível em: [http://www.tidskriftenvatten.se/mag/tidskriftenvatten.se/dircode/docs/48\\_article\\_4748.pdf](http://www.tidskriftenvatten.se/mag/tidskriftenvatten.se/dircode/docs/48_article_4748.pdf). Acesso em: 9 mar. 2017.

PELJO, L.; DUBOWSKI, P.; DALRYMPLE, B. **The Performance of Streetscape Bioretention Systems in South East Queensland**. In: Conference Stormwater, Australia. 2016, 8p, 2016. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/312170970\\_The\\_Performance\\_of\\_Streetscape\\_Bioretention\\_Systems\\_in\\_South\\_East\\_Queensland](https://www.researchgate.net/publication/312170970_The_Performance_of_Streetscape_Bioretention_Systems_in_South_East_Queensland). Acesso em: 9 mar. 2017.

PRINCE GEORGE'S COUNTY. **Bioretention Manual**. Prince George's County, Maryland, 206p, 2009.

REIS, R. P. A.; ILHA, M. S. O. Comparação de desempenho hidrológico de sistemas de infiltração de água de chuva: poço de infiltração e jardim de chuva. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 2, p. 79-90, 2014. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ac/v14n2/06.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2017.

ROSA, A. **Bioretention for diffuse pollution control in SUDS using experimental-adaptive approaches of ecohydrology**. [Tese de Doutorado]. Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, São Carlos, São Paulo, 123 p, 2016.

ROSA, A.; MENDIONDO, E. M.; SOUZA, V. B. C. **Biorretenção da poluição difusa na drenagem urbana usando abordagem experimental-adaptativa com base ecohidrológica**. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 17-22 de Novembro. Bento Gonçalves, RS, 2013. Disponível em: [https://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=3&ID=155&SUMARIO=3819&ST=bioretencao\\_da\\_poluicao\\_difusa\\_na\\_drenagem\\_urbana\\_usando\\_abordagem\\_experimental\\_adaptativa\\_com\\_base\\_ecohidrolologica](https://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=3&ID=155&SUMARIO=3819&ST=bioretencao_da_poluicao_difusa_na_drenagem_urbana_usando_abordagem_experimental_adaptativa_com_base_ecohidrolologica). Acesso em: 19 out. 2016.

ROY-POIRIER, A.; CHAMPAGNE, P.; FILION, Y. Review of Bioretention system research and design: past, presente, and future. **Journal Environmental Engineering**, v. 136, n. 9, p. 878-889, 2010. Disponível em: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000227](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000227). Acesso em: 14 set. 2016.

ROY-POIRIER, A.; FILION, Y.; CHAMPAGNE, P. An event-based hydrologic simulation model for bioretention systems. **Water Science & Technology**, v. 72, n. 9, p. 1524-1533, 2015. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26524443>. Acesso em: 13 jan. 2017.

SÃO PAULO (cidade). Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano. **Manual de drenagem e manejo de águas pluviais: aspectos tecnológicos; fundamentos**. vol. 2, 220p, 2012. Disponível em: [http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/desenvolvimento\\_urbano/arquivos/manual-drenagem\\_v2.pdf](http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/desenvolvimento_urbano/arquivos/manual-drenagem_v2.pdf). Acesso em: 18 mar. 2017.

SHAFIQUE, M. A review of the Bioretention system for sustainable storm water management in urban áreas. **Materials and Geoenvironment**, v. 63, n. 4, p. 227-236, 2016. Disponível em: <https://www.degruyter.com/downloadpdf/j/rmzmag.2016.63.issue-4/rmzmag-2016-0020/rmzmag-2016-0020.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2017.

SIDEK, L. M.; MUHA, N. E.; BEECHAM, S.; ROSELI, M.; ABDIN, Z.; PUAD, A. H. M. **Evaluation of Bioretention System Performance for The Treatment of Urban Storm Water Runoff**. In: 13<sup>th</sup> International Conference on Urban Drainage, Sarawak, Malaysia, 2014. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Lariyah\\_Mohd\\_Sidek2/publication/280917777\\_Evaluation\\_of\\_Bioretention\\_System\\_Performance\\_for\\_The\\_Treatment\\_of\\_Urban\\_Storm\\_Water\\_Runoff/links/55cb38b108aeb975674aed70.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Lariyah_Mohd_Sidek2/publication/280917777_Evaluation_of_Bioretention_System_Performance_for_The_Treatment_of_Urban_Storm_Water_Runoff/links/55cb38b108aeb975674aed70.pdf). Acesso em: 27 fev. 2017.

SOUZA, C. F.; CRUZ, M. A. S.; TUCCI, C. E. M. **Adapting a rainfall-runoff model to simulate LID stormwater systems**. 12<sup>nd</sup> International Conference on Urban Drainage, Porto

Alegre, Brasil, p. 1-8, 2011. Disponível em:  
<https://web.sbe.hw.ac.uk/staffprofiles/bdgsa/temp/12th%20ICUD/PDF/PAP005574.pdf>.  
Acesso em: 19 dez. 2016.

STRAUCH, K. R.; RUS, D. L.; HOLM, K. E. **Water balance monitoring for two Bioretention gardens in Omaha, Nebraska, 2011-14**. US Geological Survey, 2016. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/sir/2015/5188/sir20155188.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2017.

TAKAIJUDIN, H.; GHANI, A. A.; ZAKARIA, N. A. Challenges and developments of Bioretention facilities in treating urban stormwater runoff; A review. **Pollution**, v. 2, n. 4, p. 489-508, 2016. Disponível em:  
[https://journals.ut.ac.ir/article\\_58312\\_fcc8c77346690eb5fb16728fded60afa.pdf](https://journals.ut.ac.ir/article_58312_fcc8c77346690eb5fb16728fded60afa.pdf). Acesso em: 19 jan. 2017.

TASSI, R.; PICCILLI, D. G. A.; BRANCHER, S. C.; ROMAN, C. A. Preferências da população de diferentes estratos sociais no manejo das águas pluviais urbanas. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 3, p. 39-52, 2016. Disponível em:  
<http://www.scielo.br/pdf/ac/v16n3/1678-8621-ac-16-03-0039.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2017.

THE OFFICIAL PORTAL FOR DEPARTMENT OF IRRIGATION AND DRAINAGE MALAYSIA. Ministry of Natural Resources and Environment. **Urban Storm Water Management (MSMA)**. 2016. Disponível em: <http://www.water.gov.my/home/56/1201-msma-manual?lang=en>. Acesso em: 16 mar. 2017.

TROWSDALE, S. A.; SIMCOCK, R. Urban stormwater treatment using bioretention. **Journal of Hydrology**, v. 397, n. 3, p. 167-174, 2011. Disponível em:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169410007195>. Acesso em: 16 mar. 2017.

WATER BY DESIGN. **Bioretention Technical Design Guidelines** (Version 1.1). Healthy Waterways Ltd, Brisbane. 2014. Disponível em:  
[http://waterbydesign.com.au/u/lib/mob/20150715140823\\_de4e60ebc5526e263/wbd\\_2014\\_bioretentiontdg\\_mq\\_online.pdf](http://waterbydesign.com.au/u/lib/mob/20150715140823_de4e60ebc5526e263/wbd_2014_bioretentiontdg_mq_online.pdf). Acesso em: 16 mar. 2017.

WINSTON, R. J.; DORSEY, J. D.; HUNT, W. F. Quantifying volume reduction and peak flow mitigation for three bioretention cells in clay soils in northeast Ohio. **Science of the Total Environment**, v. 553, p. 83-95, 2016. Disponível em:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969716302911>. Acesso em 20 fev. 2017.

### **3. COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO DE UM DISPOSITIVO DE BIORRETENÇÃO EM NÍVEL DE LOTE NA CIDADE DE MACEIÓ - AL**

#### **Resumo**

Biorretenção, também conhecida como jardim de chuva, é uma técnica que compensa a impermeabilização do solo causada pelo processo de urbanização. Ela está inserida no conceito de Desenvolvimento de Baixo Impacto que visa a restauração das funções hidrológicas do local a partir de técnicas e ações multidisciplinares. Dentre as práticas que abordam esse conceito, a biorretenção é uma das mais estudadas por aliar a função de mitigar o escoamento superficial com o papel de melhorar a qualidade da água infiltrada a partir da redução da concentração de poluentes. Apesar do dispositivo ser objeto de estudos de diversos trabalhos, a maioria deles o exhibe de diversas formas e de acordo com cada região específica de instalação. Diante disso, a instalação e monitoramento desse jardim em locais ainda não analisados são necessários para gerar informação sobre o seu comportamento em ambientes não explorados. O objetivo deste artigo é mostrar o desempenho de uma biorretenção instalada em escala real na Universidade Federal de Alagoas a partir da porcentagem de eventos totalmente absorvidos sem extravasamento. Para isso, foram 18 meses de monitoramento quantitativo onde foram observadas fases do ciclo hidrológico, tais como a precipitação, infiltração e escoamento superficial. Resultados apontaram que a camada de armazenamento absorveu 89% dos eventos e dentre os 11% foram encontrados registros de extravasamento. Contudo, a biorretenção se mostrou eficiente em reduzir o escoamento gerado pela sua área de contribuição e altamente recomendada a sua instalação em lotes residenciais.

**Palavras-Chave:** Dispositivo de infiltração, Técnicas Compensatórias, LID.

#### **3.1. Introdução**

No contexto da drenagem urbana sustentável, técnicas de controle que procuram atuar no denominado desenvolvimento de baixo impacto (LID), tais como telhados verdes, poços de infiltração e sistemas de biorretenção (FLETCHER et al. 2014) são promissoras para reduzir o escoamento superficial e melhorar sua qualidade da água, reduzindo assim, a poluição difusa nas áreas urbanas (BARKDOLL et al. 2016). As estratégias LID são focadas na evapotranspiração e infiltração de águas pluviais para reduzir e tratar o escoamento superficial nos locais de geração (PUGET SOUND ACTION TEAM & WASHINGTON STATE UNIVERSITY PIERCE COUNTY EXTENSION, 2005), o denominado controle na fonte. Esse controle pode ser tanto residencial (MELO, 2014) quanto em escala de bacia, incluindo as ruas como geradores de escoamento afluente dessas técnicas (JARDEN; JEFFERSON; GRIESER, 2015).

Entre as técnicas LID, a biorretenção é cada vez mais utilizada como uma ferramenta de gestão de escoamento com o potencial de impactar positivamente a infraestrutura urbana, melhorando o balanço hídrico e a qualidade da água (DAVIS et al. 2012). Ela é capaz de mitigar os impactos hidrológicos causados pelo desenvolvimento urbano, sendo, talvez, a melhor técnica já criada para fornecer a restauração hidrológica de áreas urbanas (LIU et al. 2014; SHAFIQUE, 2016). Ela também alia a filtragem ao armazenamento da água afluyente antes de processo de infiltração por conter uma camada, diferenciando-a de outros dispositivos.

Em resumo, a biorretenção é uma área que foi escavada que serve para coletar, armazenar, infiltrar e tratar o escoamento de águas pluviais urbanas, consistindo em uma mistura de alta condutividade hidráulica de areia, solo e matéria orgânica, cercada pelos solos nativos, geralmente menos permeáveis (HE; DAVIS, 2011). A água ao entrar na célula de biorretenção fica inicialmente armazenada na superfície da instalação, onde um jardim é instalado e infiltra-se, ao atravessar as raízes, para uma camada adicional de armazenamento interno ou para o solo nativo diretamente. A camada de armazenamento internopode vir sob um tubo de drenagem ou não (DAVIS et al. 2012). A instalação de células de biorretenção pode resultar em um sistema hidrológico mais próximo da hidrologia de pré-desenvolvimento tanto para o local como para a bacia hidrográfica (BUCKLAND; DYMOND; HODGES, 2015). Uma área de biorretenção de 10% e de 5% da área total impermeabilizada pode reduzir, respectivamente, cerca de 85% e 60% o escoamento superficial (JENNINGS; BERGER; HALE, 2015). Entretanto, a instalação é limitada por muitos fatores, tais como, locais com espaço disponível para coletar o escoamento causado por áreas impermeáveis e conectar o dispositivo com os sistemas de drenagem da cidade (TANG et al. 2016).

Nesse contexto, é apresentado neste capítulo a experiência com o monitoramento de uma biorretenção, observando seu funcionamento ao longo de um período de 18 meses. Ela foi construída no Centro de Tecnologia (CTEC) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), visando à redução e o tratamento do escoamento gerado pelo telhado do prédio do projeto CEENG (Conhecer e Experimentar Engenharia) e pela sua área adjacente. O dispositivo tem uma área de 3,8% da área total impermeável, possuindo instalações para o monitoramento quantitativo e qualitativo.

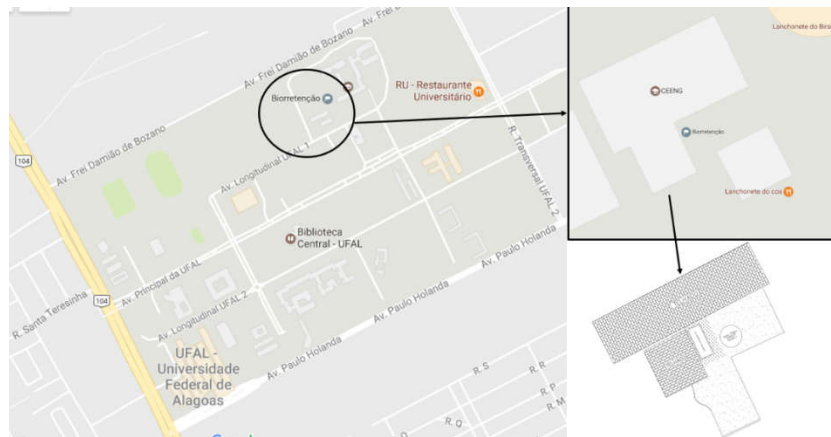
### **3.2. Materiais e Métodos**



### 3.2.1. Descrição da biorretenção

A biorretenção foi instalada nas coordenadas geográficas -9,551901; -35,775553 (Figura 3.1) com objetivo de tratar os escoamentos superficiais gerados por uma área impermeável de 173,77 m<sup>2</sup> e permeável de 125 m<sup>2</sup>. Essa técnica foi dimensionada pelo método da precipitação efetiva, utilizando uma precipitação de 76,8 mm com tempo de retorno de 2 anos e o tempo de pico do hidrograma alcançado aos 400 minutos (ROSENDO, 2013). Esse método de dimensionamento também foi utilizado por Rosa (2016) para uma biorretenção instalada a jusante de uma bacia na escala de microdrenagem em São Carlos-SP.

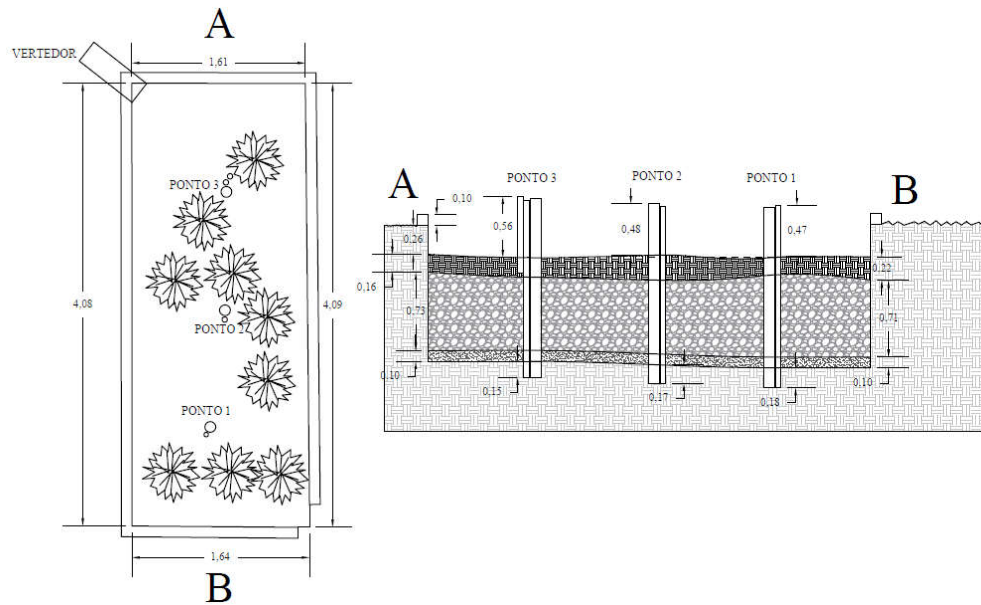
**Figura 3. 1: Representação do local de instalação da biorretenção.**



Fonte: Google Maps, 2017. Adaptada pelo autor.

O dispositivo foi construído em maio de 2015 e projetado para ter 6,4 m<sup>2</sup> de área com 4m de comprimento, 1,6 m de largura e 1,5 m de profundidade, sendo preenchido através de 3 tipos de materiais separados por manta geotêxtil, conforme Figura 3.2, que apresenta uma vista superior e um perfil, resultantes de um levantamento realizado em dezembro de 2017, após 20 meses da sua construção.

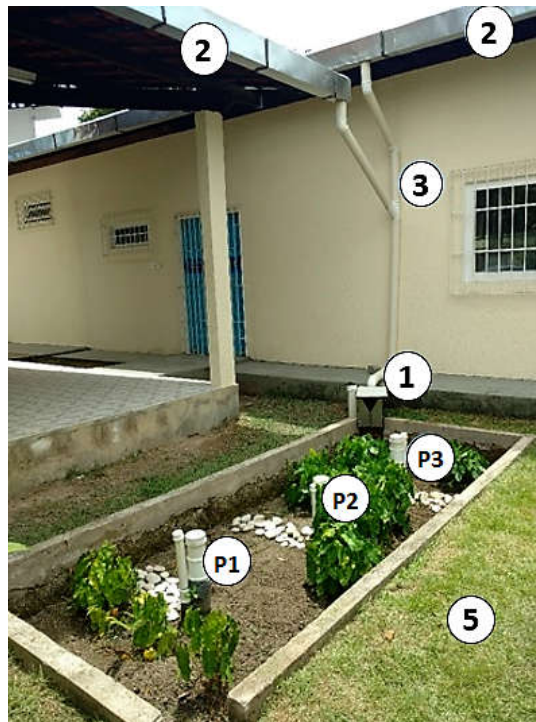
**Figura 3. 2: Vista superior e perfil da biorretenção.**



Fonte: Autor, 2017.

No sentido fundo-superfície na Figura 3.2, a primeira camada é composta por um colchão de areia, a segunda camada é constituída por brita e a terceira de terra preta. De acordo com Melo et al. (2014), a faixa de areia funciona com um filtro natural para as águas infiltradas no dispositivo e a de brita facilita o movimento da água no sistema e desempenha a função de armazenamento. A camada de areia tem porosidade estimada em 30 % e a camada de brita de 43% (valor encontrado através de ensaio). Dessa forma, considerando as duas camadas, o volume máximo armazenado é de 2,42 m<sup>3</sup>, aproximadamente. Outra informação importante é que a biorretenção foi instalada no ponto mais baixo do terreno e não possui tubulação de drenagem para controlar o extravasamento, isto é, toda água que é levada até ela é infiltrada, mesmo que extravase (MENEZES, 2015). A Figura 3.3 ilustra o estado do dispositivo.

**Figura 3. 3: Pontos onde ocorre o monitoramento da biorretenção.**



Fonte: Ferreira et al. (2016). Adaptado pelo autor.

Conforme Figura 3.3, o monitoramento é realizado por 1 vertedor (1) e 3 pontos de monitoramento do nível e de qualidade da água no interior da camada de brita (P1, P2 E P3). As calhas (2) são responsáveis por recolher a água do telhado e a levar pelos os tubos (3) até o vertedor. Em seguida a água é despejada na parte superior da biorretenção. O dispositivo também recebe água provinda da sua área adjacente (5) que é composta por grama e solo nu.

No vertedor há um sensor de nível, de modo que seja possível determinar os hidrogramas de entrada na biorretenção. Os pontos P1 e P3 contêm em cada um, 1 tubo de 50 mm para alocação de sensor de nível (S1 e S3) e 1 tubo de 100 mm para coleta de água (T1 e T3). E no P3, também foi adicionado outro tubo de 50 mm para medição do nível de água acima da superfície de terra preta, denominado de SS. Todos os tubos são perfurados e revestidos por manta geotêxtil. O ponto P2 não foi utilizado para o monitoramento por sensores.

Na biorretenção em estudo, a única saída de água analisada se dá por infiltração, de modo que a taxa de infiltração da camada de terra preta e a taxa de infiltração saturada do solo nativo são os dois elementos mais importantes para o desempenho hidrológico, além da área de superfície (SUN; WEI; POMEROY, 2011; TAKAIJUDIN; GHANI; ZAKARIA, 2016).

### **3.2.2. Calibração do vertedor**

O vertedor foi calibrado em laboratório de hidráulica do CTEC, utilizando dois reservatórios comunicantes e um sistema de bombas para movimentação da água, conforme Figura 3.4. A metodologia empregada nesse ensaio foi feita da seguinte maneira: ao acionar as bombas afogadas, essas recalcam a água de um reservatório a montante e a conduzem diretamente para o vertedor via tubulação e mangueira. Após escoar pela crista do mesmo, a água retorna ao circuito, caindo no reservatório de jusante. Para uma determinada vazão, mantém-se o nível da água constante acima da crista do vertedor, medindo-o. A determinação da vazão é feita a partir da redução do nível da água no reservatório de montante em um intervalo de tempo estipulado, resultante da interrupção da comunicação entre os reservatórios, por meio de um registro. Esses passos foram repetidos 30 vezes gerando dados de vazão e altura a partir da crista do vertedor.

**Figura 3. 4: Imagem do circuito utilizado na calibração do vertedor.**



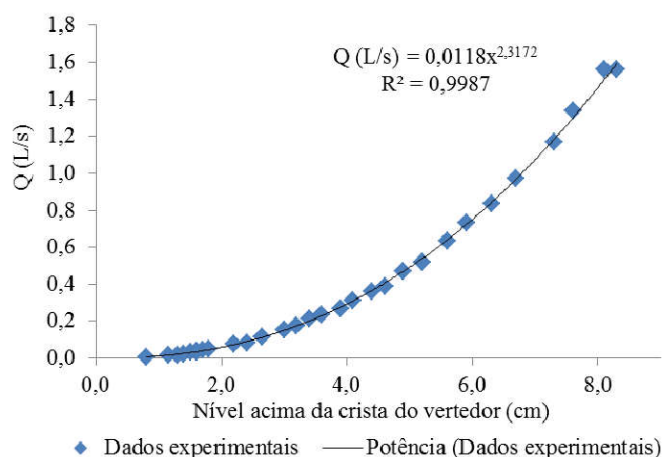
Fonte: Autor 2017.

Com os dados de níveis, foi elaborada a curva calibrada do vertedor (Figura 3.5) tendo como base a função de potenciação (Equação 3.1) com coeficiente de correlação  $R^2=0,9987$ . Esse método é similar ao utilizado por Souza (2002) e em outros projetos de pesquisa, conforme vídeo disponível na *playlist* do Youtube (YOUTUBE, 2015).

$$Q_e = 0,0118h^{2,3172} \text{ Equação 3.1}$$

Onde:  $Q_e$  é a vazão de entrada do vertedor em L/s e  $h$  é a altura acima da crista do vertedor em cm.

**Figura 3. 5: Curva calibrada do vertedor.**



### 3.2.3. Monitoramento

A coleta de dados no período de monitoramento da biorretenção foi realizada em duas fases, tendo como referência temporal a data da instalação de um pluviômetro ao lado do jardim a 3,5 m de altura. A primeira fase, logo após a construção do dispositivo, foi iniciada em junho de 2015 e finalizada em maio de 2016. Nessa etapa, os dados de precipitação foram coletados do pluviômetro do Cemaden (Centro Nacional e Monitoramento e alerta de Desastres Naturais), localizado a 1,5 km. A segunda fase iniciou no instante do término da primeira e encerrada em setembro de 2016. Logo após a primeira fase também foi inserido o sensor de monitoramento SS.

Os eventos foram monitorados por 3 sensores de pressão Solinst modelo LT F100/M30 (pontos P1, P3 e vertedor) e por 1 sensor de pressão Onset HOB0 modelo U20L-04 (ponto SS). Esses sensores registraram a pressão total a intervalos de 1 minuto. Os dados de pressão barométrica foram registrados também por um sensor Solinst modelo Barologger na sala de permanência do PPGRHS (Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento) que fica 30 m da biorretenção e foram usados para subtrair os dados dos sensores de nível.

### 3.2.4. Taxa de infiltração na superfície superior e no fundo

Foram realizados dois ensaios de infiltração pelo método do Duplo Anel na superfície superior da biorretenção para verificar se as taxas de infiltração são semelhantes em pontos distintos. O primeiro localizado ao lado do P1 e o segundo ao lado do P3. Essa técnica também foi utilizada nos períodos de dimensionamento (ROSENDO, 2013) e construção da biorretenção (MENEZES, 2015). Esse tipo de ensaio é uma maneira simples de determinar a

taxa de infiltração de saturação de um solo, sendo utilizado em outros estudos, tanto para auxiliar no dimensionamento de técnicas de controle do escoamento na fonte (TECEDOR, 2014), quanto para modelagem dessas técnicas (LUCAS, 2011).

Para a superfície inferior (fundo da biorretenção), a taxa de infiltração foi determinada a partir do monitoramento do nível no interior do dispositivo. Primeiro, foram escolhidos eventos no qual a recessão do nível de água não estivesse recebendo contribuição da precipitação, dessa forma, o nível diminui por conta da infiltração sem a necessidade de obter vazões de entrada. Em seguida, calculou-se a diferença entre dois níveis a cada 2 minutos, resultando na taxa de infiltração. Posteriormente, encontrou-se um valor médio para cada 10 cm de altura, de modo que foi possível observar como a taxa de infiltração varia em função do nível de água.

### **3.2.5. Análise dos eventos**

Na análise, considerou-se um evento de chuva aquele que o nível interno de água ultrapassou a camada de areia ficando acima dos 10 cm. Esse critério é necessário para priorizar os eventos relevantes, pois na cidade de Maceió, mesmo no verão, há chuvas regulares no início da manhã. E para este trabalho, levou-se em consideração a independência de eventos quando a biorretenção permaneceu vazia por intervalo de tempo superior a 12 horas. Como explanado por Souza (2002), isso se deve ao fato de que os efeitos da umidade no solo afetam o comportamento do dispositivo.

Os dados gerados pelos sensores e pluviômetros foram separados por evento, tendo como código de identificação a data de início da chuva com dois dígitos para ano, mês e dia (AAMMDD). Para cada evento foi levado em conta o início e término da precipitação, a quantidade precipitada e o volume de chuva que ocorreu em até 12 horas antes do início do evento. A elevação do nível de água no interior do dispositivo foi determinante na caracterização de um evento por desconsiderar precipitações que não conseguiram elevar o nível interno de água acima da camada de areia. Além dessas informações, também foram analisados o tempo de esvaziamento, o nível máximo de água alcançado e o tempo de retorno de todos os eventos, estimado pela equação apresentada por Dernardin e Freitas (1982).

Para determinar o tempo de esvaziamento, fez-se a subtração entre o momento do término da entrada de água na biorretenção e o instante em que o dispositivo volta ao nível zero. O nível de referência foi estabelecido de acordo com a profundidade de alocação dos

tubos dos pontos P1, P2 e P3. Já a altura máxima de armazenamento da água é limitada até a superfície superior da camada de brita (aproximadamente 82 cm). Após essa altura, dependendo do evento, a biorretenção pode não suportar o volume precipitado e extravasar.

O volume de entrada de água na biorretenção é medido por duas equações (Equação 3.2 e Equação 3.3). A Equação 3.2 tem como base a equação do vertedor (Eq. 3.1) que registra o volume escoado pelos telhados, enquanto a Equação 3.3 é calculada de acordo com a área de contribuição direta de precipitação nos telhados e na biorretenção.

$$V_{e1} = \frac{\Delta t}{1000} \sum_{t=1}^n Q_{e_t} \quad \text{Equação 3.2}$$

$$V_{e2} = \frac{1}{1000} P \times (A_t + A_{bio}) \quad \text{Equação 3.3}$$

onde:  $V_{e1}$  é o volume de entrada registrado no vertedor em  $m^3$ ;  $\Delta t$  é o intervalo de tempo em segundos;  $Q_{e_t}$  é a vazão de entrada registrada no vertedor no tempo  $t$  em L/s;  $V_{e2}$  é o volume precipitado em  $m^3$ ;  $P$  é a precipitação em mm;  $A_t$  é a área do telhado de contribuição para o vertedor e  $A_{bio}$  é a área da biorretenção.

Olszewski & Davis (2013), utilizaram uma equação semelhante a Equação 3.2 para calcular os volumes de entrada e saída de uma biorretenção instalada em Maryland, Estados Unidos. Eles registraram os níveis de água a cada 4 minutos e multiplicaram esse valor pela vazão.

Analisou-se também o coeficiente de escoamento do telhado, calculado pela razão entre o volume registrado pelo vertedor (Equação 3.2) e o volume precipitado nos telhados (Equação 3.4). A Equação 3.4 é semelhante à Equação 3.3, fazendo nesta última  $A_{bio}$  igual a zero.

$$V_{e2}' = \frac{1}{1000} P \times A_t \quad \text{Equação 3.4}$$

$$C_t = \frac{V_{e1}}{V_{e2}'} \quad \text{Equação 3.5}$$

onde:  $V_{e2}'$  é o volume precipitado nos telhados de contribuição do vertedor em  $m^3$  e  $C_t$  é o coeficiente de escoamento do telhado.

Após a determinação do  $C_t$ , realizaram-se eventos controlados a partir da introdução de volumes controlados despejados na biorretenção, passando pelo vertedor. Essa simulação tem como objetivo determinar a veracidade dos dados fornecidos pelo vertedor no seu local

de funcionamento. Primeiramente, foi realizada a cubagem de uma caixa d'água de 500 L, conectando-a em seguida ao vertedor por meio de mangueira (Figura 3.6). Durante a realização do evento controlado, marcou-se o início e o fim do lançamento para comparar com o volume registrado no vertedor com o volume esvaziado da caixa d'água. Eventos desse tipo também foram realizados em Queensland, um dos estados da Austrália, para avaliar o desempenho hidrológico e de remoção de poluentes de sistemas de biorretenção operando em condições reais (PELJO, DUBOWSKI & DALRYMPLE, 2016).

**Figura 3. 6: Imagem de um evento simulado.**



Fonte: Autor, 2017.

A eficiência da biorretenção foi analisada de acordo com a porcentagem de eventos absorvidos pelo dispositivo. De acordo com Zhang & Guo (2014), a razão ou porcentagem de águas pluviais capturadas por uma célula de biorretenção é referida como a sua eficiência de captura do escoamento superficial. Esse valor pode ser usado como um indicador importante para fornecer o desempenho do gerenciamento das águas pluviais por sistemas de biorretenção. Indicador semelhante para o desempenho de retenção foram adotados em outras análises de Davis (2008) e Li & Lam(2015), por exemplo de comportamento de células de biorretenção.

Como a biorretenção em estudo foi instalada no ponto mais baixo do terreno, possuindo saída somente para infiltração, considerou-se que um evento não foi capturado quando a taxa de infiltração não foi alta o suficiente para que fosse evitada a formação limite de lâmina d'água acima da camada de solo. Como é mostrado no item subsequente, nessas ocasiões a taxa lenta de infiltração ocorreu na camada de terra preta, de modo que mesmo



com a camada de brita sem estar preenchida totalmente com água, houve extravasamento. Isso também motivou a criação do ponto SS de monitoramento.

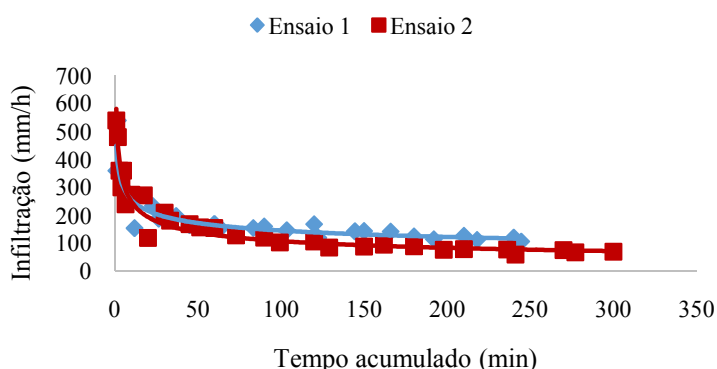
Neste trabalho não levou em conta nas análises de entrada de água a precipitação indireta advinda do escoamento superficial das áreas adjacentes, pois não foi instalado um vertedor para essa finalidade. Entretanto, para ter a noção de ordem de grandeza, foi realizada uma simulação pelo método SCS e foi constatado que a vazão máxima gerada por uma chuva de 2,3 anos de tempo de retorno é estimada em 0,12 L/s. A partir do que será visto no item seguinte, a menor vazão máximas que ocorreu nos eventos registrados no vertedor (escoamento do telhado) foi de 0,59 L/s.

### 3.3. Resultados e Discussão

#### 3.3.1. Taxa de infiltração na camada superior e na base

Os ensaios com o Duplo Anel na superfície superior da biorretenção resultaram em valores de taxa de infiltração distintos: o primeiro com a taxa de infiltração de 120 mm/h e o segundo com 70 mm/h. Variabilidade grande de taxas de infiltração também foi encontrada no estudo de Melo et al. (2014), onde afirmaram que devido a diversidade na composição do solo, a água pode criar caminhos preferências em determinados pontos do experimento.

**Figura 3. 7: Ensaios com o Duplo Anel.**

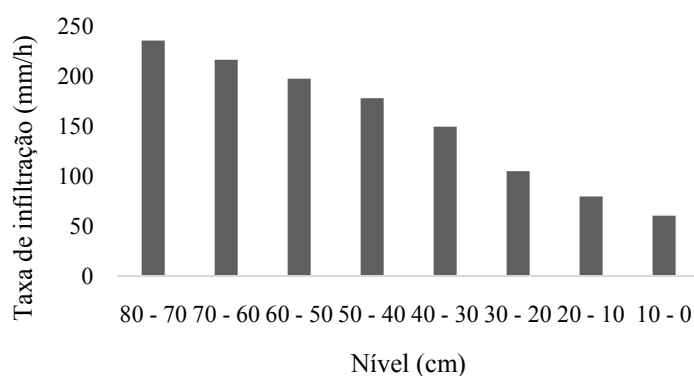


Fonte: Autor, 2017.

As taxas encontradas através do ensaio de Duplo Anel podem ser utilizadas na modelagem do dispositivo, como é o caso do modelo SWMM 5.0 que representa uma biorretenção de acordo com as características hidráulicas de cada camada (ROSSMAN, 2015). Por outro lado, esse valor da condutividade hidráulica diferencia bastante do valor encontrado por Melo (2011) de 312 mm/h.

Diante dos dados dos sensores instalados no interior da biorretenção (S1 e S3), montou-se um gráfico exibindo a taxa de infiltração média a cada 10 cm de profundidade de lâmina d'água. A Figura 3.8 mostra o decaimento dessa taxa em função da altura de água após o termino da precipitação.

**Figura 3. 8: Variação da taxa de infiltração.**



Conforme a Figura 3.8, a taxa de infiltração decai a partir da diminuição da altura da lâmina d'água. Como as paredes da biorretenção são permeáveis, quanto mais água estiver armazenada, maior será a área de infiltração, e com isso, maior será a velocidade com que a água irá infiltrar no solo natural. Portanto, entre 80 e 70 cm de altura, a taxa de infiltração média será de 240 mm/h, enquanto a uma altura entre 20 e 10 cm, taxa média será de 78 mm/h.

### 3.3.2. Eventos Monitorados

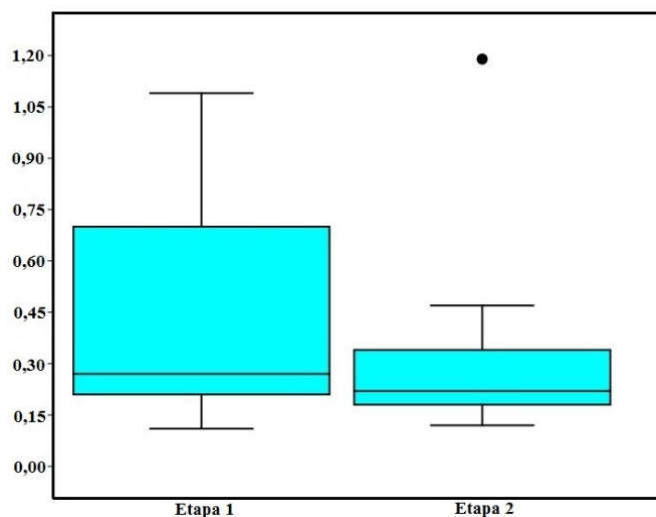
A seguir, será exibida uma análise dos eventos monitorados em duas etapas, delimitadas pela forma como foram obtidos os dados de precipitação. Inicialmente, mostramos uma síntese dos valores de níveis máximos no interior da biorretenção na Tabela 2.1 e na Figura 2.8.

**Tabela 3. 1: Estatística descritiva dos níveis máximos no interior da biorretenção.**

<b>Estatística</b>	<b>Etapa 1</b>	<b>Etapa 2</b>
Média (m)	0,44	0,31
Mediana (m)	0,27	0,22
Moda (m)	0,27	0,18
Desvio padrão (m)	0,33	0,27
Coefficiente de variação (%)	73,86	87,30
Mínimo (m)	0,11	0,12
Máximo (m)	1,09	1,19

<b>Estatística</b>	<b>Etapa 1</b>	<b>Etapa 2</b>
Nº de eventos	23	14
1º Quartil (m)	0,21	0,18
3º Quartil (m)	0,70	0,35

**Figura 3. 9: Diagramas de caixa dos níveis máximos no interior da biorretenção.**



Conforme síntese da Tabela 3.1 e da Figura 3.9, vê-se que, em média (ou mediana), nas duas etapas os eventos tiveram comportamento semelhantes. A maior parte dos eventos da etapa 1 (75%) ficaram abaixo do nível de 70 cm e a maior parte dos eventos da etapa 2 (75%) ficaram abaixo do nível de 35 cm. No entanto, os valores máximos ficaram próximos, sendo o nível de 1,19 m da etapa 2 um valor discrepante (*outlier*). A seguir uma análise detalhada por etapa.

### ***Primeira etapa de monitoramento***

A primeira etapa do monitoramento resultou em 23 eventos. Durante esta etapa, foi registrada uma precipitação acumulada no pluviômetro do Cemaden (código 270430216A) de 1.522,6 mm. As informações sobre esses eventos são exibidas na Tabela 3.2.

**Tabela 3. 2: Resultado da primeira fase do monitoramento.**

Evento	Precipitação	Elevação do nível	Tempo	Nível	Tr
--------	--------------	-------------------	-------	-------	----

	Ínicio	Duração (h)	Quant. (mm)	I Máx (mm/h)	Anterior: 12h (mm)	Ínicio	Fim	Duração (h)	de esvaz. (h)	máximo (m)	(anos)
150624	13:00	18,17	63,2	18,6	6,2	15:15	15:25	24,17	8,25	1,06	11,1
150714	16:50	32,17	19,4	3,8	0	19:47	5:57	34,17	4,95	0,20	<0,1
150722	0:40	36,83	42,4	9,2	0	1:12	14:33	37,35	1,05	1,09	0,9
150813	19:20	35,50	21,8	4,8	5,2	20:04	7:12	35,13	0,37	0,22	<0,1
150815	0:00	7,33	8,8	5,0	0	1:07	9:13	8,10	1,88	0,25	0,1
150818	22:00	10,00	10,6	6,0	0,4	23:37	7:52	8,25	<b>-0,13</b>	0,27	0,2
150820	0:40	28,83	63,6	7,2	1,2	3:27	12:44	33,28	7,23	0,93	0,4
150901	5:50	4,50	8,8	4,0	0,6	6:40	12:22	5,70	2,03	0,11	<0,1
151008	6:00	3,83	10	8,0	0	7:29	11:05	3,60	1,25	0,14	0,5
160129	11:50	2,67	15,4	12,2	0,2	13:03	19:19	6,27	4,82	0,74	2,5
160129	11:30	5,17	28,2	17,2	0	12:46	21:22	8,60	4,70	0,44	8,4
160201	1:40	5,50	9	7,0	2,4	2:01	6:49	4,80	<b>-0,35</b>	0,21	0,3
160202	11:10	4,83	6,2	5,0	0,2	11:51	16:31	4,67	0,52	0,23	0,1
160218	23:10	7,83	21,8	13,0	1,2	23:22	9:50	10,47	2,83	0,37	3,1
160303	0:50	13,00	34,6	14,0	0,2	1:13	16:08	14,92	2,30	0,28	4,0
160314	8:00	12,00	16,2	6,6	1	8:19	20:20	12,02	0,33	0,18	0,3
160329	1:50	25,00	41,8	13,0	0	2:04	7:18	29,23	4,47	0,68	3,1
160413	23:40	31,83	45,4	14,0	1,8	0:08	6:44	30,60	<b>-0,77</b>	1,05	4,0
160417	21:10	6,33	8,6	5,0	7,8	22:41	7:30	8,82	4,00	0,15	0,1
160424	22:30	6,83	16,6	8,8	3	22:57	7:08	8,18	1,80	0,27	0,8
160516	1:20	9,33	15	11,8	4	3:30	12:12	8,70	1,53	0,24	2,2
160522	18:00	9,17	37,8	9,6	1	20:52	8:56	12,07	5,77	0,70	1,0
160524	1:10	7,33	14,6	5,4	2,4	1:45	10:49	9,07	2,32	0,38	0,1

\* Duração da precipitação. \*\*Duração do funcionamento da biorretenção

Dentre os 23 eventos, 18 não ultrapassaram a camada de armazenamento (brita) e apenas 3 deles ultrapassaram a camada de terra preta, ficando aproximadamente 87% dos eventos abaixo do volume útil. Apesar de 13% dos eventos terem ultrapassado as camadas, não obteve-se registro de extravasamento da biorretenção.

No entanto, houve eventos em que se formou uma lâmina d'água acima da camada de solo sem que o volume de vazios no interior tenha sido preenchido totalmente por água. Isso ocorreu porque, dependendo da intensidade da precipitação, a vazão de entrada de água por um certo período pode ser maior do que a taxa de infiltração na camada de solo acima da brita, causando o extravasamento sem que o volume de vazios no interior esteja preenchido totalmente por água. Segundo Palhegyi (2010), a elevação da espessura da lâmina d'água na área propícia à infiltração, inicia-se após a capacidade de campo do solo estar satisfeita ou quando a vazão de entrada exceder a capacidade de infiltração da camada superior. Isso ficou

evidenteno evento 150722 queregistrou uma altura de 1,09 m pelos sensores e visualmente alcançou o nível de extravasamento rente a área adjacente, conforme fotografia tomada por volta do meio dia (Figura 3.10).

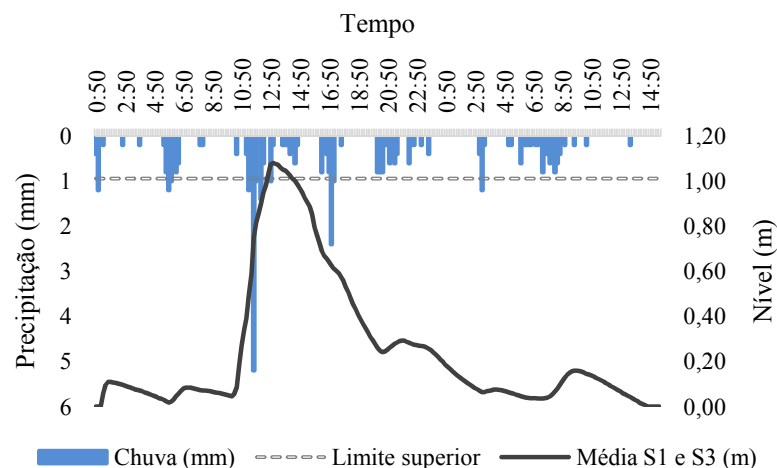
**Figura 3. 10: Extravasamento da biorretenção do 22/07/2015 por volta de 12:00.**



Fonte: Autor, 2017.

Nota-se naFigura 3.10que a água penetrou pela parte superior do tubo, constatando a existência de vazios não preenchidos no interior da biorretenção. Melo (2011), ao monitorar uma biorretenção, também registrou extravasamento devido a limitação da capacidade de infiltração da superfície superior da camada de terra preta.A Figura 3.11 mostra o evento 150722 com uma precipitação de aproximadamente 10 mm em 1 hora de chuva, entre 11:10 e 12:10, onde houve um aumento significativo em um curto período de tempo do nível de água.

**Figura 3. 11: Gráfico do evento do dia 22/07/2015.**



Fonte: Autor, 2017.

Na Figura 3.11, a linha tracejada nomeada de Limite superior indica a superfície acima da camada de terra preta. Foi após esse registro que se decidiu criar um ponto de monitoramento com sensor de nível na camada superior porque não havia certeza se eventos com profundidades pequenas registradas na camada de brita significava que a biorretenção reteve o volume totalmente em seu interior. Por exemplo, os eventos 150624 e 160413 não foram monitorados visualmente, não sendo assim possível afirmar se houve ou não extravasamento no dispositivo. Além disso, no evento 160303 houve um problema de entupimento de uma das calhas do telhado, fazendo com que parte do volume chegasse ao vertedor.

Outro fator gerador de incerteza nos resultados da primeira fase foi o fato de que não havia pluviômetro próximo à biorretenção. Em negrito, na Tabela 3.2, estão descritos os tempos de esvaziamento que apresentaram erro nas suas medições. Isso se deve ao fato de que a chuva que precipitou no pluviômetro do Cemaden não foi a mesma chuva precipitada na biorretenção.

Comparando a quantidade de chuva entre os eventos da fase 2, já com o pluviômetro instalado ao lado da biorretenção, e os eventos registrados pelo Cemaden, encontrou-se um erro relativo percentual de 22%. Logo, os valores de precipitação da primeira fase do monitoramento podem estar com valores muito diferentes do que os verificados.

### ***Segunda etapa de monitoramento***

A segunda fase do monitoramento contemplou 6 meses de medição de chuva, totalizando uma precipitação acumulada de 565 mm no pluviômetro de balança instalado próximo à biorretenção. Quando essa precipitação do ano de 2016 é comparada com a precipitação do mesmo período do ano de 2015 (971,4 mm), nota-se que o ano de 2016 foi menos chuvoso do que o de 2015. A Tabela 3.3 resume as características dos principais eventos monitorados.

**Tabela 3. 3: Resultado da segunda fase do monitoramento.**

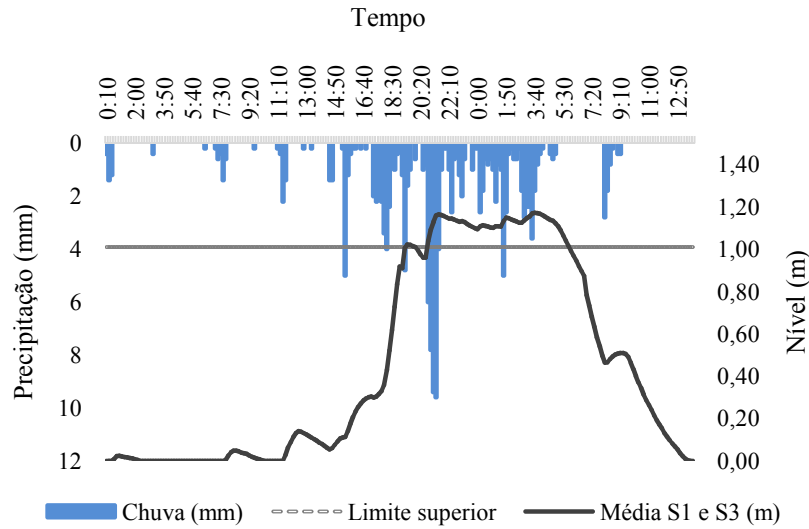
Evento	Precipitação	Elevação do nível	Tempo	Nível	Tr
--------	--------------	-------------------	-------	-------	----

	Ínicio	Duração (h)	Quant. (mm)	I Máx (mm/h)	Anterior: 12h (mm)	Ínicio	Fim	Duração (h)	de esvaz. (h)	máximo (m)	(anos)
160529	0:04	33,07	146,8	37,8	2,6	0:38	13:31	36,88	4,38	1,19	139,4
160602	3:26	13,36	22,4	10,8	1,6	7:18	22:01	14,72	5,21	0,34	1,6
160603	13:59	1,24	5,6	5,2	4	14:15	18:37	4,37	3,39	0,18	0,1
160604	16:01	5,57	9	6,4	0	18:11	22:24	4,22	0,80	0,17	0,2
160615	13:08	0,30	6,6	21,7	0,8	13:18	16:26	3,13	2,99	0,18	19,3
160619	2:49	24,18	29,6	11,2	0	3:11	3:35	24,40	0,58	0,47	1,8
160625	18:49	5,43	19,6	10,2	0,2	19:35	3:03	7,47	2,79	0,27	1,3
160628	2:29	9,33	16	6,0	0,2	5:47	13:06	7,32	1,28	0,28	0,2
160702	8:01	8,73	15,6	5,4	3,2	9:53	19:42	9,82	2,95	0,22	0,1
160704	21:48	13,74	19,8	8,8	0,4	22:25	16:18	17,88	4,76	0,38	0,8
160707	1:52	3,09	13,6	6,6	0	2:10	8:54	6,73	3,92	0,22	0,3
160712	8:38	4,37	12,4	4,8	0,8	9:04	16:51	7,78	3,84	0,18	<0,1
160910	17:24	10,08	12	5,8	0	18:40	5:08	10,47	1,65	0,12	0,2
160819	8:29	27,43	26,6	6,2	0	9:48	14:01	28,22	2,09	0,15	0,2

O instante do término das chuvas dos 14 eventos da Tabela 3.3 acontece antes do fim do armazenamento da biorretenção, diferente do que ocorreu na primeira fase onde foram encontrados tempos de esvaziamento negativos devido ao erro atribuído a coleta de dados do pluviômetro do Cemaden. Verificou-se também o valor do coeficiente de determinação  $R^2$  a partir de gráficos de dispersão entre a quantidade de chuva e o nível máximo armazenado. E foram encontrados valores para a primeira e segunda fase de 0,77 e 0,92, respectivamente.

Dentre os eventos da Tabela 3.3, o nível de água interno ultrapassou as camadas apenas 1 vez, no dia 29 de junho de 2016, dessa forma, 93% dos eventos não excedeu o volume útil do dispositivo. Este evento, apresentado na Figura 3.12, produziu praticamente o dobro de quantidade de chuva para a que a biorretenção foi projetada ao considerar a intensidade média de precipitação. Essa precipitação pode ser considerada atípica com um tempo de retorno superior a 100 anos.

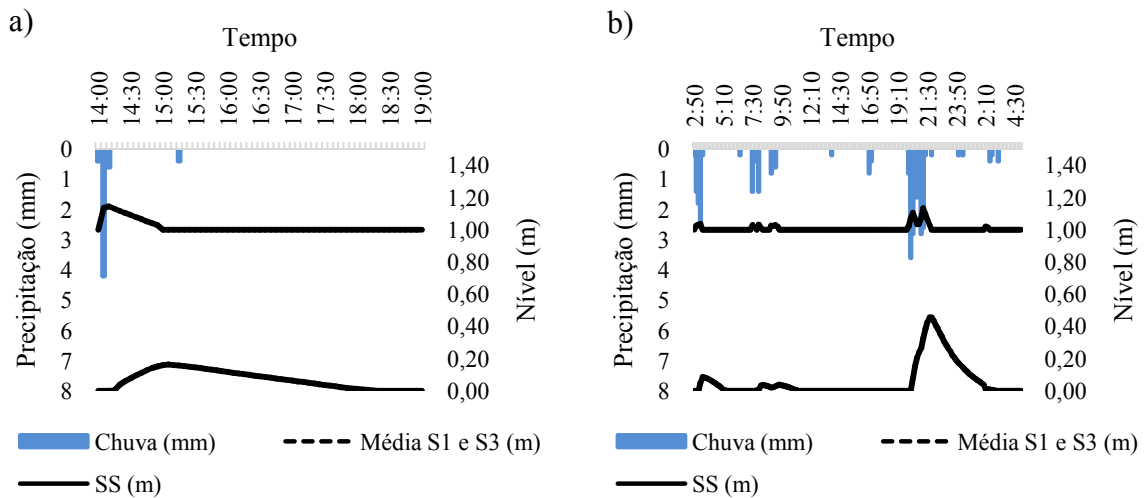
**Figura 3. 12: Gráfico do evento do dia 29/05/2016.**



Fonte: Autor, 2017.

Ainda na Figura 3.12, vê-se que o nível se manteve acima de 1 m por volta de um intervalo de 10 horas, com precipitação total de 104,4 mm no mesmo período. Como a chuva mais intensa foi noturna, não houve registro visual do funcionamento da biorretenção, mas por experiência de outros eventos, é possível que tenha havido extravasamento, mesmo que os sensores não tenham acusado um nível acima de 1,3 m. Nesta segunda fase, também foram registrados eventos com o sensor SS, cujos principais eventos são exibidos na a Figura 3.13.

**Figura 3. 13: a) gráfico do evento do dia 03/06/2016; b) gráfico do evento do dia 19/06/2016.**



Fonte: Autor, 2017.



Esses eventos que foram monitorados os níveis de água tanto internamente (pontos 1 e 3) quanto externamente (ponto SS). Nota-se que houve uma resposta mais rápida do sensor do ponto SS do que nos sensores S1 e S3. Ao analisar os dados dos eventos 160603 e 160619, nota-se uma defasagem de 58 min e 38 min, respectivamente, entre o pico do sensor SS e do pico do nível interno do dispositivo. No evento 160604, que tem tempo de funcionamento do dispositivo semelhante ao evento 160603, a sua defasagem de 63 min, também é próxima do evento 160603.

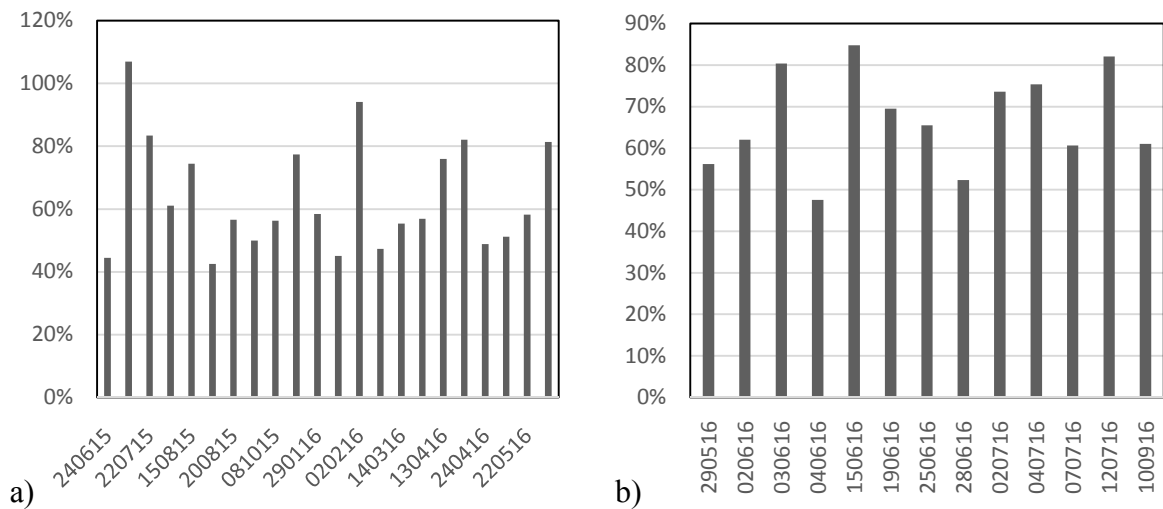
Diferentemente da primeira fase que teve um erro devido ao local de coleta de dados de chuva, o tempo de esvaziamento na Tabela 3.2 passa a ser o mais próximo do valor real. Diante disso, o tempo de esvaziamento variou entre 0,58 e 5,21 horas, não ultrapassando o intervalo máximo que foi determinado para atender ao critério da independência dos eventos de 12 horas.

No geral, ao analisar os dados das duas etapas, verificou-se que apenas 4 eventos apresentaram o nível de água interno acima da camada de terra preta. Dessa forma, o desempenho da biorretenção foi satisfatório por ter absorvido completamente 89% de todos os eventos monitorados sem que o nível interno de água ultrapassasse a camada de armazenamento (brita). Comparando com a biorretenção estudada por Davis (2008) que absorveu completamente 18% de todos eventos monitorados e com a biorretenção de Daniel Júnior (2013) que teve uma eficiência de 100%, comprovou-se que a biorretenção estudada neste trabalho se mostrou eficiente na redução do escoamento gerado pelo telhado. Entretanto, Jennings (2016) afirma que é difícil fazer generalizações sobre o desempenho por conta da variação da intensidade de chuva. Logo, a distribuição dos eventos é muito mais importante para a eficácia global do dispositivo do que a quantidade de chuva despejada.

### **3.3.3. Verificação de coeficientes de escoamento do telhado**

A Figura 3.14 exhibe os gráficos com os coeficientes de escoamento de cada evento mostrado na Tabela 3.2 e na Tabela 3.3. Tais eventos levam em consideração apenas a chuva que precipitou nos telhados e o volume monitorado pelo vertedor a partir do sensor de nível. Para analisar o coeficiente de escoamento das áreas permeáveis, necessita-se da instalação de outro vertedor que receba essa contribuição e registre o volume escoado para a biorretenção.

**Figura 3. 14: a) coeficientes de escoamento da primeira fase do monitoramento; b) coeficientes de escoamento da primeira segunda do monitoramento.**



Fonte: Autor, 2017.

Nota-se que, pelo gráfico a) da Figura 3.14, o coeficiente de escoamento do telhado teve uma grande variabilidade com valores variando de 44% a 94%. Vale lembrar da incerteza provável, relativa ao uso do pluviômetro do Cemaden na primeira fase. Isso é evidenciado pelo evento 150714 que obteve um coeficiente de escoamento de 107%. A média entre todos os eventos monitorado exceto o 150714, foi igual a 62% com desvio padrão de 15%. O gráfico b) apresenta uma menor variabilidade entre os coeficientes de escoamento, variando de 48% a 85%. A média entre os eventos foi de 67%, com desvio padrão de 12%.

Segundo Tomaz (2009), o valor padrão do coeficiente de escoamento médio para telhas cerâmicas varia entre 80% e 90%. Já no estudo experimental de Cavalcanti (2010) foram encontrados valores de 71% e 61% para o mesmo tipo de telhas. Esses últimos valores assemelham-se com os números encontrados para os telhados da biorretenção.

Os diversos valores baixos de coeficientes de escoamento fizeram com que se realizasse eventos controlados para atestar capacidade do vertedor de medir o volume de água gerado no telhado.

### 3.3.4. Eventos controlados

Foram realizados dois eventos controlados, um no dia 31/08/2016 e outro no dia 23/09/2016. Esses dias não registraram precipitação em até 12 horas antes do início do ensaio. Os resultados estão na Tabela 3.4 e revelam erros baixos na estimativa do volume.

**Tabela 3. 4: Dados dos eventos simulados.**

Eventos	Vol. Vertedor (L)	Vol. Lançado (L)	Erro Relativo	Nível Máx. S1 (cm)	Nível Máx. S3 (cm)
310816	453,5	480	5,53%	4,01	1,90
230916	893,0	840	-6,31%	0,00	12,71

Importa observar que os valores de nível máximo da Tabela 2.4 não podem ser utilizados para verificar o comportamento da biorretenção, justamente por serem muito baixos e sujeitos às prováveis incertezas por estarem próximo ao fundo do dispositivo. Recomenda-se o lançamento de um volume de no mínimo 2.500 L em um período máximo de 2,5 h. Ao iniciar cada evento simulado, deve-se realizar o ensaio de umidade higroscópica para saber as condições iniciais do solo.

Além das simulações da Tabela 3.4, foram realizados outros eventos controlados, como por exemplo o evento160819 que contemplou uma simulação de chuva com a introdução de 480 litros de água escoada em um estacionamento para testar a eficiência da biorretenção na redução de poluentes. Esse ensaio não invalidou o monitoramento quantitativo exibido na Tabela 3.3, pois o pico foi alcançado antes do início da simulação.

### 3.3.5. Modificações após o período de monitoramento

O sistema de biorretenção passou por adaptações desde a sua instalação. Estas modificações foram necessárias para resolver problemas durante o monitoramento ou para simplesmente melhorar na coleta de dados. O principal problema resolvido foi a instalação do pluviômetro, que tal importância já foi citada neste trabalho. Em segundo lugar foi a introdução do sensor no ponto SS que permitiu a análise com dados observados e não apenas na visualização.

Vale frisar a diferença entre o projeto da biorretenção, que já tinha sido adaptado durante a construção, e a técnica essencialmente construída. Inicialmente, de acordo com Menezes (2015), a camada de terra preta teria 40 cm de espessura, a de brita 80 cm e a de areia 10 cm. Ao passar do tempo a biorretenção foi compactando e ficando com novas medidas entre as camadas, além de apresentar uma inclinação da base de 2,53% do P3 para o P1. A faixa de terra preta varia em torno de 19 cm, a de brita em 72 cm e a de areia ficou igualmente estimada em 10 cm. Ainda há uma dúvida na espessura da camada de areia devido à dificuldade de medição.

Durante 1 ano e meio de monitoramento, não foi realizada a plantação de novas mudas e nem uma descompactação da camada de mistura de solos. Optou-se em analisar sem que se tenha uma manutenção por parte dos responsáveis. Dessa forma, a biorretenção tem que se mostrar sustentável tanto na redução do escoamento superficial e no melhoramento da qualidade da água infiltrada, quanto no seu desempenho durante sua vida útil.

### **3.4. Conclusões**

A biorretenção estudada neste trabalho teve um bom desempenho por reduzir 100% do escoamento superficial de 33 dos 37 eventos analisados durante o período de monitoramento sem extravasamento. Dos eventos que superaram o volume útil de armazenamento, apenas 1 deles teve uma precipitação acima da quantidade de chuva utilizada no dimensionamento do dispositivo. Apesar disso, o dispositivo absorveu com eficiência as águas pluviais provindas da sua área de contribuição.

Devido à incerteza quanto a quantidade e a duração da chuva na primeira etapa do monitoramento, a análise do tempo de esvaziamento só foi realizada após a instalação de um pluviômetro ao lado da biorretenção e foram registrados valores que variaram entre 0,58 e 5,21 horas. Com esses tempos, tem-se noção do período que a biorretenção precisa para recuperar sua condição inicial antes que ocorra outro evento. O tempo de retorno da chuva calculado pela metodologia criada por Denardin e Freitas (1982) pode não ter sido a melhor opção por conta da sua longa data de elaboração e por ter gerado uma alta variabilidade de tempos de retorno.

O coeficiente de escoamento médio do telhado encontrado de 67% pode ser considerado baixo para uma área impermeável mas não significa que esteja errado, como apresentado em outro estudo também foram encontrados valores semelhantes.

Em trabalhos futuros deve ser realizado o monitoramento do escoamento superficial causado pela área adjacente e com isso, ter dados quantitativos que representem de forma mais completa a performance da biorretenção. Bem como a utilização de outros indicadores de desempenho adotados em diversos dispositivos instalados ao redor do mundo podem corroborar no detalhamento tanto quantitativo, como quanto qualitativo.

## REFERÊNCIAS

- BARKDOLL, B. D.; KANTOR, C. M.; WESSELDYKE, E. S.; GHIMIRE, S. R. Stormwater Low-Impact Development: A Call to Arms for Hydraulic Engineers. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 142, n. 8, 2016. Disponível em: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001152](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001152). Acesso em: 19 out. 2016.
- BUCKLAND, B. A.; DYMOND, R. L.; HODGES, C. C. Using Bioretention retrofits to meet Virginia's new stormwater management regulations: a case study. **Environment and Natural Resources Research**, v. 5, n. 2, p. 135-147, 2015. Disponível em: <http://www.ccsenet.org/journal/index.php/enrr/article/view/46628/25803>. Acesso em: 14 dez. 2016.
- CAVALCANTI, N. B. Efeito do escoamento da água de chuva em diferentes coberturas. **Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v. 7, n. 4, p. 201-210, 2010. Disponível em: <http://ferramentas.unipinhal.edu.br/engenhariaambiental/include/getdoc.php?id=1344&article=543&mode=pdf>. Acesso em: 7 out. 2016.
- DAVIS, A. P. Field performance of Bioretention: hydrology impacts. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 13, n. 2, p. 90-95, 2008. Disponível em: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2008\)13%3A2\(90\)](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)1084-0699(2008)13%3A2(90)). Acesso em: 8 set. 2016.
- DAVIS, A. P.; et al. Hydrologic performance of Bioretention storm-water control measures. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 17, n. 5, p. 604-614, 2012. Disponível em: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000467](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000467). Acesso em: 15 out. 2016.
- DEBUSK, K. M.; WYNN, T. M. Storm-water Bioretention for Runoff Quality and Quantity Mitigation. **Journal of Environmental Engineering**, v. 137, n. 9, p. 800-808, 2011. Disponível em: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000388](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000388). Acesso em: 18 set. 2016.
- DENARDIN, J. E.; FREITAS, P. L. Características fundamentais da chuva no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 17, n. 10, p. 1409-1416, 1982. Disponível em: <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/16306>. Acesso em: 10 dez. 2016.
- FERREIRA, L. T. L. M.; et al. **Monitoramento de um dispositivo de biorretenção: análises preliminares**. In: XIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 10p, 2016.

Disponível em: [http://www.evolvedoc.com.br/srhne/detalhes-169\\_monitoramento-de-um-dispositivo-de-biorretencao-analise-preliminares](http://www.evolvedoc.com.br/srhne/detalhes-169_monitoramento-de-um-dispositivo-de-biorretencao-analise-preliminares). Acesso em: 12 jan. 17.

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, 2014. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/1573062X.2014.916314>. Acesso em: 18 fev. 2017.

HE, Z.; DAVIS, A. P. Process modeling of storm-water flow in a bioretention cell. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 137, n. 3, p. 121-131, 2011. Disponível em: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000166](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000166). Acesso em: 19 set. 2016.

JARDEN, K. M.; JEFFERSON, A. J.; GRIESER, J. M. Assessing the effects of catchment-scale urban green infrastructure retrofits on hydrograph characteristics. **Hydrological Process**, v. 30, n. 10, p. 1536-1550, 2015. Disponível em: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.10736/abstract>. Acesso em: 12 out. 2016.

JENNINGS, A. A.; BERGER, M. A.; HALE, J. D. Hydraulic and hydrologic performance of residential rain gardens. **Journal of Environmental Engineering**, v. 141, n. 11, 2015. Disponível em: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000967](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000967). Acesso em: 12 out. 2016.

LI, Z. Y.; LAM, K. M. Statistical evaluation of bioretention system for hydrologic performance. **Water Science & Technology**, v. 71, n. 11, p. 1742-1749, 2015. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26038941>. Acesso em: 10 jan. 2017.

LIU, J.; SAMPLE, D. J.; BELL, C.; GUAN, Y. Review and research needs of Bioretention used for the treatment of urban stormwater. **Water**, v. 6, n. 4, p. 1069-1099, 2014. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2073-4441/6/4/1069>. Acesso em: 20 jan 2017.

LUCAS, A. H. **Monitoramento e modelagem de um sistema filtro-vala-trincheira de infiltração em escala real**. [Dissertação de Mestrado]. Universidade Federal de São Carlos – UFSCar. São Carlos, SP, 159p, 2011.

MANGANGKA, I. R.; LIU, A.; EGODAWATTA, P.; GOONETILLEKE, A. Performance characterisation of a stormwater treatment bioretention basin. **Journal of Environmental Management**, v. 150, p. 173-178, 2015. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479714005337>. Acesso em: 9 jan. 2017.

MELO, T. A. T. **Jardim de chuva: sistema de biorretenção como técnica compensatória no manejo de águas pluviais urbanas**. [Dissertação de Mestrado]. Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Pernambuco, Pe. 178p. 2011.

MELO, T. A. T.; et al. Jardim de chuva: sistema de biorretenção para o manejo das águas pluviais urbanas. **Ambiente Construído**, v 14, n. 4, p. 147-165, 2014. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ac/v14n4/a11v14n4.pdf>. Acesso em: 16 set. 2016.

MENEZES, M. C. **Construção de um dispositivo de um sistema de biorretenção no Centro de Tecnologia – UFAL**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Alagoas. 2015.

OLSZEWSKI, J. M.; DAVIS, A. P. Comparing the hydrologic performance of a bioretention cell with predevelopment values. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 139, n 2, p. 124-130, 2013. Disponível em: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000504](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000504). Acesso em: 28 jan. 2016.

PALHEGYI, E. G. Modeling and Sizing Bioretention Using Flow Duration Control. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 15, n 6, p. 417-425, 2010. Disponível em: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000205](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000205). Acesso em: 2 fev. 2017.

PELJO, L.; DUBOWSKI, P.; DALRYMPLE, B. **The Performance of Streetscape Bioretention Systems in South East Queensland**. In: Conference Stormwater Australia 2016, 8p, 2016. Disponível em [https://www.researchgate.net/publication/312170970\\_The\\_Performance\\_of\\_Streetscape\\_Bioretention\\_Systems\\_in\\_South\\_East\\_Queensland](https://www.researchgate.net/publication/312170970_The_Performance_of_Streetscape_Bioretention_Systems_in_South_East_Queensland). Acesso em: 18 jan. 2017.

PUGET SOUND ACTION TEAM. **Low Impact Development – Technical Guidance Manual for Puget Sound**. Puget Sound Action Team, Washington State University Pierce County Extension, January.2005. Disponível em: [http://www.psp.wa.gov/downloads/LID/LID\\_manual2005.pdf](http://www.psp.wa.gov/downloads/LID/LID_manual2005.pdf). Acesso em: 17 out. 2016.

ROSA, A. **Bioretention for diffuse pollution control in SUDS using experimental-adaptive approaches of ecohydrology**. [Tese de Doutorado]. Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, São Carlos, São Paulo, 123 p, 2016.

ROSENDO, A. A. **Avaliação de métodos e critérios para dimensionamento de dispositivos de biorretenção**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Alagoas, 2013.

ROSSMAN, L. A. **Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1**. United States Environmental Protection Agency, 2015. Disponível em: <http://www.innovyze.com/products/swmm/download/ZyPDF.pdf>. Acesso em: 22 dez. 2016.

SHAFIQUE, M. A review of the Bioretention system for sustainable storm water management in urban áreas. **Materials and Geoenvironment**, v. 63, n. 4, p. 227-236, 2016. Disponível em: <https://www.degruyter.com/downloadpdf/j/rmzmag.2016.63.issue-4/rmzmag-2016-0020/rmzmag-2016-0020.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2017.

SOUZA, V. C. B. **Estudo experimental de trincheiras de infiltração no controle da geração do escoamento superficial**. [Tese de doutorado]. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2002. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/3006/000330321.pdf?sequence=1>. Acesso em: 12 ago. 2016.

SUN, Y.; WEI, X.; POMEROY, C. A. Global analysis of sensitivity of Bioretention cell design elements to hydrologic performance. **Water Science and Engineering**, v. 4, n. 3, p. 246-257, 2011. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674237015301599>. Acesso em: 6 jan. 2017.

TAKAIJUDIN, H.; GHANI, A. A.; ZAKARIA, N. A. Challenges and developments of Bioretention facilities in treating urban stormwater runoff; **A review. Pollution**, v. 2, n. 4, p. 489-508, 2016. Disponível em: [https://journals.ut.ac.ir/article\\_58312\\_fcc8c77346690eb5fb16728fded60afa.pdf](https://journals.ut.ac.ir/article_58312_fcc8c77346690eb5fb16728fded60afa.pdf). Acesso em: 19 jan. 2017.

TANG, S.; et al. Evaluating retention capacity of infiltration rain gardens and their potential effect on urban stormwater management in the Sub-Humid Loess region of China. **Water Resources Management**. v. 30, n. 3, p. 983-1000, 2016. Disponível em: <http://link.springer.com/article/10.1007/s11269-015-1206-5>. Acesso em: 15 jan. 2017.

TECEDOR, N. **Monitoramento e modelagem hidrológica de plano de infiltração construído em escala real**. [Dissertação de Mestrado]. Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, São Carlos, São Paulo, 92p, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/4387/6136.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 18 fev. 2017.

TOMAZ, P. Curso de manejo de águas pluviais. Guarulhos: Plíneo Tomaz, 2009.

YOUTUBE. **Projeto Universal Edital 2013: monitoramento de lote urbanoreal**. Disponível em:



<https://www.youtube.com/playlist?list=PLcfqqpHnsZWsnOzrjCqpaXpx79L3QlgAm>. Acesso em: 12 fev. 2017.

ZHANG, S.; GUO, Y. Stormwater Capture Efficiency of Bioretention Systems. **Water Resources Management**, v 28, n. 1, p. 149-168, 2014. Disponível em: <http://link.springer.com/article/10.1007/s11269-013-0477-y> . Acesso em: 20 jan. 2017.

#### 4. MODELAGEM DE UM SISTEMA DE BIORRETENÇÃO EM ESCALA DE LOTE

##### Resumo

A biorretenção tem sido uma das técnicas LID mais difundida para a gestão de águas pluviais no início do século XXI. Ela pode ser aplicada para tratar e reduzir o escoamento superficial gerado por áreas impermeáveis. Apesar de ser uma técnica de simples instalação, há processos físicos, químicos e biológicos que são representados por diversos modelos que simulam cada um desses procedimentos ou todos. No entanto, um modelo de fácil implementação e que tenha poucos parâmetros, pode ser útil no desenvolvimento de projetos, tornando a biorretenção uma alternativa atrativa entre os projetistas envolvidos com a drenagem urbana. Neste estudo, apresenta-se aplicação de um modelo simples de baixa exigência de dados para representar uma biorretenção instalada em escala real. Para isso, é utilizado o método de Puls como ferramenta de simulação quantitativa da biorretenção. Os resultados apontaram bons coeficiente de Nash-Sutcliffe e  $R^2$  na fase de calibração. Entretanto, parâmetro taxa de infiltração apresentou uma grande variação entre os coeficientes. Contudo, o modelo de Puls se mostrou eficiente ao representar um sistema de biorretenção, mas foi deficiente na simulação de um evento no modo reservatório único e de dois eventos no modo reservatório duplo.

**Palavras-Chave:** Jardim de chuva, Técnicas Compensatórias, LID.

##### 4.1. Introdução

Células de biorretenção são capazes de atenuar as vazões de pico por conta das suas elevadas taxas de infiltração na superfície e do potencial para armazenar a água nos poros das camadas internas (HUNT et al. 2008), elas podem ser estudadas como reservatórios, cuja saída de água ocorra, por exemplo, somente por infiltração. Modelos computacionais são utilizados para estimar o desempenho hidrológico e remoção de poluentes, mas cada modelo tem alguma deficiência e nenhum deles é apropriado para todos locais (SHAFIQUE, 2016).

Sendo assim, pode-se pensar na utilização de modelos de simulação simplificados como o método de Puls, de modo que a modelagem seja inserida no contexto de dimensionamento/verificação do dispositivo. Apesar de todos os benefícios, há muitas incertezas nas técnicas LID que precisam ser investigadas devido às complexidades hidráulicas, heterogeneidade de sedimentos e reações biológicas complicadas (BARKDOLL et al. 2016), sendo necessária assim a elaboração de modelos de fácil utilização para que os gestores possam avaliar os benefícios dessas práticas em termos de hidrológicos (LIU et al. 2014). Na literatura, por sua vez, são encontrados vários modelos que são específicos em representar um dispositivo de biorretenção tanto na parte quantitativa, como na qualitativa,

dessa forma, modelos que representem partes dos processos atuantes no dispositivo são importantes quando se deseja estudar uma função particular.

Dentre os modelos disponíveis para representar a biorretenção, o modelo de Puls (também conhecido como *Level Pool Routing*) foi escolhido por ser um método de simulação mais simples, em que a vazão a montante pode ser expressa explicitamente em termos da vazão a jusante e das características do canal ou reservatório (ZOPPOU, 1999).

Para o caso da biorretenção, esse modelo a transforma em um reservatório com vazão de saída estimada a partir de uma taxa de infiltração inserida com base na calibração do modelo. Pode-se ainda inserir um coeficiente que represente o efeito da colmatação (SIEVERS; PINHEIRO, 2013). Porém, o método não fornece condições de introduzir o efeito da evapotranspiração, mas, de acordo com Jennings (2016), essa contribuição pode ser omitida por ter um impacto de menos de 1,1% na redução do escoamento. Além do mais, há pouca evapotranspiração durante a noite quando está chovendo por conta da alta umidade, ou durante o tempo frio, quando as plantas se tornam menos ativas. Isso difere da infiltração que se houver água em uma célula, ela será removida mesmo durante a noite ou em tempos frios e chuvosos.

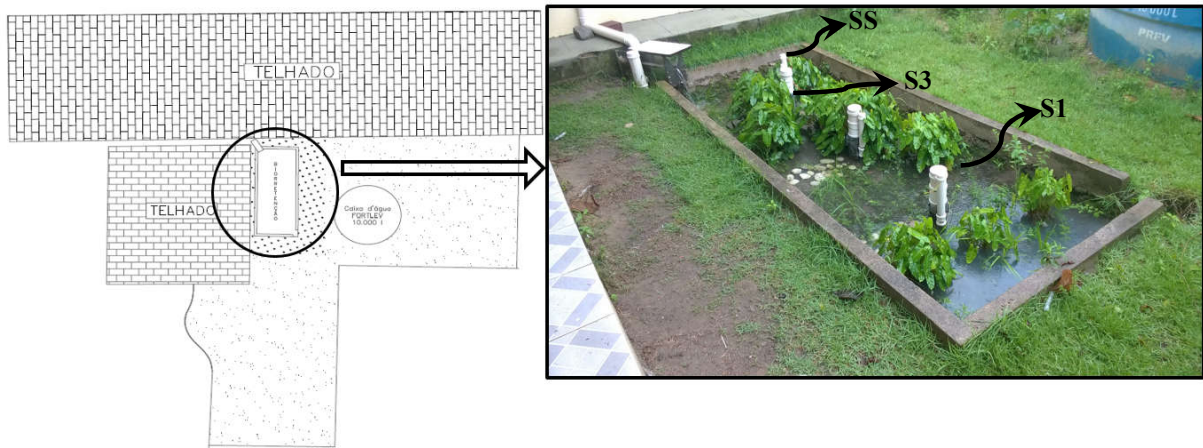
A proposta deste capítulo é avaliar a aplicação de um modelo baseado no método de Puls comumente utilizado em reservatórios, tratando a saída como uma taxa de infiltração constante, vista no processo como um parâmetro do modelo. Para isso, serão utilizados dados de monitoramento quantitativo de um sistema de biorretenção instalado em escala residencial.

## **4.2. Materiais e Métodos**

### **4.2.1. Área de estudo**

Instalou-se a biorretenção, em escala de real, para reter e tratar o escoamento superficial gerado pelo prédio CEENG (Conhecer e Experimentar Engenharia) e pela área adjacente, localizado no Centro de Tecnologia (CTEC) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL) (Figura 3.1).

**Figura 4. 1: Biorretenção estudada.**



Fonte: Autor, 2017.

A biorretenção tem 6,64 m<sup>2</sup> de área e preenchida por 10 cm de areia, 72 cm de brita e 19 cm de terra preta (essas espessuras são valores médios pois há uma variação de altura de cada camada). Contempla ainda uma área alagada de 30 cm de profundidade com plantas da espécie Imbé. As camadas são separadas por manta geotêxtil que permite o movimento da água no interior do dispositivo sem que tenha comunicação entre os distintos materiais. O monitoramento da água é realizado através de sensores de nível, onde são registradas as variações da altura de água no seu interior e a vazão de entrada gerada pelo escoamento dos telhados, conforme a Figura 4.1.

Os dados coletados da biorretenção foram formatados e separados em eventos independentes. Dessa forma, 4 sensores foram utilizados para registrar o nível de água, sendo 3 deles na biorretenção e 1 no vertedor. Entre os sensores do dispositivo, 2 deles foram instalados no interior da biorretenção, chamados de S1 e S3, e o outro sensor, chamado de SS, foi alocado na camada superior com a intenção de registrar o nível de água na superfície.

Aqui a palavra evento significa que a precipitação conseguiu fazer com que o nível de água no interior da biorretenção, ultrapassasse a camada de areia. Cada evento recebeu um código de acordo com o ano, o mês e o dia que iniciou a chuva com duas unidades (AA/MM/DD), por exemplo, o evento que ocorreu no dia 24 de junho de 2015 recebe a identificação de 150624.

#### 4.2.2. Modelos para biorretenção

Existe uma variedade de modelos que representam dispositivos de infiltração e boa parte deles servem para modelar sistemas de biorretenção. Dentre os modelos mais utilizados para essa finalidade, pode-se citar o DRAINMOD, RECARGA e SWMM(LIU et al., 2014) RECHARGE(DUSSAILLANT; CHUN; POTTER, 2004) E MUSIC (IMTEAZ et al., 2013).

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; SKAGGS; HUNT, 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 RECHARGE se baseia na equação de Richards acoplada a um balanço hídrico superficial para simular continuamente o escoamento superficial, a evapotranspiração e a recarga de água subterrânea. Nele, inclui-se os principais processos relevantes de armazenamento de interceptação e depressão, executados a partir de uma ou mais superfícies impermeáveis, inundação e infiltração, através das camadas de solo, e evapotranspiração (DUSSAILLANT; CHUN; POTTER, 2004). Seus parâmetros principais são: relação entre a área da biorretenção e a área de contribuição, espessura da camada média de armazenamento, profundidade de depressões e condutividade hidráulica.

O MUSIC também simula o desempenho de biorretenção, além de outros dispositivos de gerenciamento de águas pluviais. Ele é um modelo estocástico que calcula a geração de poluentes advindos do escoamento superficial com capacidade de simular a quantidade e qualidade de escoamento de diferentes tipos de captações (isto é, urbano, agrícola e florestal), podendo o usuário escolher seu próprio tipo de captação. Seus parâmetros principais envolvem as dimensões da biorretenção e as propriedades do solo local (IMTEAZ et al., 2013).

Outro modelo conhecido por ter sido elaborado para simular o desempenho de projetos de biorretenção, chama-se RECARGA. Esse algoritmo simula o movimento de água em toda a instalação, registra a umidade do solo e o volume de água em cada fase do processo da água (infiltração, recarga, transbordamento, drenagem subterrânea, evapotranspiração, etc). O RECARGA utiliza o modelo de infiltração de Geen-Ampt para a infiltração inicial na

superfície do solo e a relação de Van Genuchten para drenagem entre camadas de solo (ATCHISON; POTTER; SEVERSON, 2006). Sun, Wei & Pomeroy (2011) utilizaram esse programa para simular e fornecer dados sobre o desempenho hidrológico de uma biorretenção. Seus principais parâmetros são: precipitação e evaporação, condições do solo local e distribuição das camadas.

O modelo SWMM é um dos mais citados na literatura. Ele considera uma biorretenção como sendo uma depressão artificial que contém vegetação plantada em uma camada de solo preparado especificamente para remover sedimentos e agentes 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 & Li (2016) utilizaram o SWMM para simular sistemas de biorretenção. Seus principais parâmetros são: distribuição da chuva, condições de cada camada, fator de colmatação e existência de dreno profundo.

Embora exista uma grande variedade de modelos computacionais disponíveis para representar e avaliar sistemas de biorretenção, existe a necessidade de um modelo que inclua processos importantes atuantes na biorretenção, tais como a computação da mudança de biomassa, captação de plantas e defoliação. Esse modelo pode fornecer um meio para identificar o que está sendo transferido para as águas subterrâneas (LIU et al. 2014).

Por outro lado, modelos simples podem representar processos específicos que dão uma estimativa do comportamento da biorretenção diante de uma variedade de solicitações. É o caso do modelo de Puls que simula de modo quantitativo a atuação de reservatórios. Esse é um método tradicional, aplicado e discutido em diversos estudos fornecendo bons resultados nas simulações, como em Fenton (1989) e Zoppou (1999), por exemplo.

O uso do método de Puls também vem ganhando adeptos ao ser utilizado em estruturas de controle de escoamento na fonte. Barbassa, Angelini Sobrinha & Moruzzi (2014) utilizaram esse método para avaliar o desempenho e auxiliar o projeto de um poço de infiltração. Já Tecedor (2014), modelou um plano de infiltração também com Puls. Entretanto, Rosa (2016) introduziu o método de Puls como uma das fases de um modelo para dimensionar e simular uma biorretenção, chamado de BIRENICE. Para esse modelo, o Puls foi utilizado para estimar o volume retido no dispositivo. Seus principais parâmetros são: tempo de retorno, propriedades do solo local, cenário de ocupação da área de contribuição e porcentagem de vazios.

Ao contrário de Rosa (2016) que aplicou o BIRENICE para simular uma biorretenção com uma área de contribuição de 2,3 ha em escala de microbacia, este trabalho utiliza apenas o método de Puls para simular um sistema de biorretenção em escala residencial e limitando-se apenas a função quantitativa do dispositivo.

#### 4.2.3. Modelo de Puls

Este é um dos modelos mais conhecidos para simulação do escoamento em reservatórios. Sua metodologia consiste numa expressão discretizada da equação da continuidade concentrada (Equação 3.1) e na relação entre armazenamento e vazão do reservatório. As incógnitas são o Q e o S no tempo t+1 e são obtidas pelo traçado da curva cota x vazão de saída (TUCCI, 2005). Para facilitar, a Equação 4.1 pode ser rearranjada resultando na Equação 4.2.

$$\frac{S_{t+1}-S_t}{\Delta t} = \frac{I_t+I_{t+1}}{2} - \frac{Q_t+Q_{t+1}}{2} \quad \text{Equação 4.1}$$

$$Q_{t+1} + \frac{2S_{t+1}}{\Delta t} = I_t + I_{t+1} - Q_t + \frac{2S_t}{\Delta t} \quad \text{Equação 4.2}$$

onde:  $I_t$  e  $I_{t+1}$  são as vazões de entrada no reservatório nos tempos t e t+1;  $Q_t$  e  $Q_{t+1}$  são vazões de saída do reservatório nos tempos t e t+1;  $S_t$  e  $S_{t+1}$  são os volumes de armazenamento do reservatório nos tempos referidos e  $\Delta t$ , o intervalo de tempo de simulação.

O modelo de Puls ao simular um reservatório redistribui o hidrograma, deslocando o seu centroide da posição do hidrograma de entrada para o do hidrograma de saída. Para estes sistemas, a vazão de saída máxima ocorre quando a curva de saída intersecta a curva de entrada, alcançando também, a altura máxima de armazenamento (RAMIREZ, 2000).

No caso da biorretenção, a vazão de saída ocorre por infiltração e neste estudo, considerou-se que esse processo ocorre pela lateral e pelo fundo do dispositivo, conforme realizado por Angelini Sobrinha (2012) ao modelar um poço de infiltração e por Lucas, Barbassa & Moruzz (2013) ao representarem uma trincheira de infiltração. Logo, para este estudo, a equação da continuidade concentrada discretizada de forma semelhante à equação 4.2 se torna

$$Q_{inf_{t+1}} + \frac{2S_{t+1}}{\Delta t} = I_t + I_{t+1} - Q_{inf_t} + \frac{2S_t}{\Delta t} \quad \text{Equação 4.3}$$

onde, para o traçar a curvacota x vazão de saída foi utilizada a Equação 4.4, que é o produto entre a taxa de infiltração (K) e a área de infiltração.

$$Q_{inf} = K[B \cdot L + 2H(B+L)] \quad \text{Equação 4.4}$$

onde:  $Q_{inf}$  é a vazão de infiltração em  $m^3/s$ ; K é a taxa de infiltração em m/s; B é a largura da biorretenção em m; L é o comprimento da biorretenção em m; e H é a cota do nível interno de água.

A realização da simulação segue os passos tradicionais do método (LUCAS; BARBASSA; MORUZZ, 2013):

1. Traça-se a curva cota x vazão de infiltração;
2. No instante  $t+1$ , os termos da direita da Equação 4.3 são conhecidos e determina-se o valor de  $[Q_{inf,t+1} + 2S_{t+1}/\Delta t]$ ;
3. A partir de  $[Q_{inf,t+1} + 2S_{t+1}/\Delta t]$  é obtida a vazão de saída por interpolação pela curva cota x vazão de infiltração;
4. Conhecida a vazão de saída, calcula-se o nível de água de acordo com o  $\Delta t$ .

#### 4.2.4. Simulação com 1 e com 2 reservatórios

O método de Puls foi aplicado na biorretenção de duas formas: a primeira, simulando o escoamento como se o dispositivo fosse uma trincheira de infiltração; a segunda, levando em conta a área propícia a alagamento acima da camada de solo como um reservatório afluyente da zona de armazenamento interna, ou seja, como se houvesse dois reservatórios de modo que a saída do primeiro fosse a entrada do segundo (método de Puls aplicado duas vezes).

Dessa forma, no primeiro caso o parâmetro calibrável foi um valor de taxa de infiltração e no segundo caso foram dois parâmetros. Foram registrados 37 eventos durante o período de monitoramento entre junho de 2015 a setembro de 2016. Entre esses eventos, foram escolhidos 15 para serem representados por Puls (Tabela 4.1). Optou-se por uma amostra que tivesse variados níveis máximos de água.

**Tabela 4. 1: Eventos escolhidos para modelagem da biorretenção.**

Evento	Precipitação (mm)	Duração (h)	Nível Máx. (m)
150624	63,2	18,2	1,06



Evento	Precipitação (mm)	Duração (h)	Nível Máx. (m)
150722	42,4	36,8	1,09
150815	8,8	7,3	0,25
150818	10,6	10,0	0,27
150820	63,6	28,8	0,93
160121	15,4	2,7	0,74
160129	28,2	5,2	0,44
160413	45,4	31,8	1,05
160424	16,6	6,8	0,27
160522	37,8	9,2	0,70
160524	14,6	7,3	0,38
160529	146,8	33,1	1,19
160602	22,4	13,4	0,34
160619	29,6	24,2	0,47
160628	16	9,3	0,28

A Tabela 4.1 mostra a precipitação de cada evento, a duração da chuva e o nível máximo registrado pelos sensores. As informações obtidas no monitoramento do evento 150624 ao 160529 foram coletadas a partir de pluviômetros, vertedor de entrada calibrado para fornecer dados de vazão e sensores de nível alocados no interior da biorretenção.

Os eventos 160602, 160619 e 160628 contemplam as mesmas informações dos eventos anteriores com o adicional de um sensor instalado para medir o nível de água acima da camada de terra preta, ou seja, com eles, pode-se calibrar duas taxas de infiltração, uma na superfície da camada superior e outra na base da camada inferior.

Entre os eventos 150624 e 160529, o método de Puls foi utilizado para representar a biorretenção de modo semelhante a uma trincheira de infiltração, utilizando as camadas como reservatório de água único. Para isso, foi necessário obter valores fixos de porosidade e espessura de cada camada e o valor da taxa de infiltração calibrado por evento. Por outro lado, as simulações dos eventos 160602, 160619 e 160628 foram baseadas na estrutura de dois reservatórios em série, ou seja, a vazão de saída do primeiro, transformou-se na vazão de entrada do segundo reservatório. Dessa forma, foram necessários os dados de nível da área acima da camada de solo para fazer a calibração da taxa de infiltração.

#### 4.2.5. Calibração e validação

A taxa de infiltração foi o único parâmetro a ser calibrado no modelo e foi realizada pelo método de tentativa e erro a partir de gráficos e com o auxílio da avaliação dos resultados pelos coeficientes de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS) e de determinação  $R^2$ . O NS (Equação 4.5) varia de 1 até  $-\infty$ , sendo 1 o valor ideal (NASH; SUTCLIFFE, 1970) e o  $R^2$  (Equação 4.6) varia de 0 a 1, sendo que quanto mais perto de 1 melhor estará o modelo (MONTGOMERY; RUNGER, 2003).

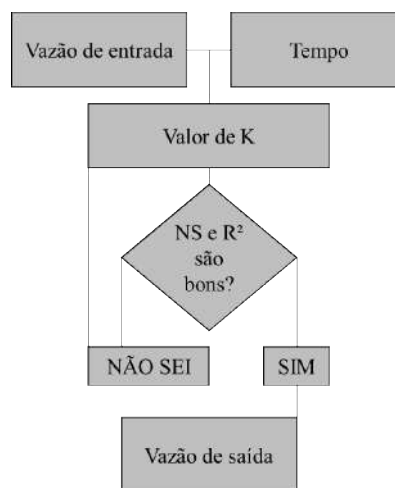
$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs} - X_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{obs} - \overline{X_{sim}})^2} \text{Equação 4.5.}$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (X_{obs} - \overline{X_{obs}}) \cdot (X_{sim} - \overline{X_{sim}})]^2}{\sum_{i=1}^n (X_{obs} - \overline{X_{obs}})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (X_{sim} - \overline{X_{sim}})^2} \text{Equação 4.6.}$$

onde:  $X_{obs}$  é o dado observado;  $\overline{X_{obs}}$  é a média dos dados observados no período  $n$ ;  $X_{sim}$  é o dado simulado; e  $\overline{X_{sim}}$  é a média dos dados simulados no período  $n$ .

O coeficiente NS foi utilizado como instrumento para comparar as vazões de saída observadas de um dispositivo de biorretenção com as vazões simuladas (ROY-POIRIER; FILION; CHAMPAGNE, 2015). A Figura 4.2 mostra o esquema básico de desenvolvimento do método de Puls.

**Figura 4. 2: Fluxograma com a rotina utilizada para calibrar K com a biorretenção em forma de 1 reservatório.**

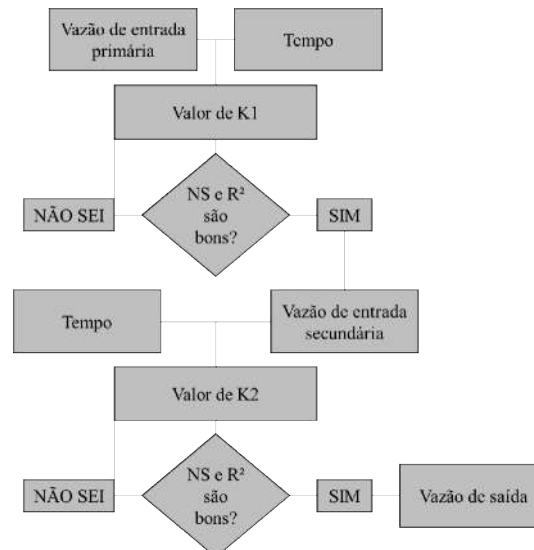


Fonte: Autor, 2017.

Conforme a Figura 4.2 após as fórmulas do método de Puls serem alocadas em uma planilha do Microsoft Excel, insere-se a vazão de entrada ( $m^3/s$ ) e o tempo que foi registrada a vazão. Em seguida, adota-se um valor para o K (mm/h) e verifica-se ao comparar os níveis internos de água, se os valores de NS e  $R^2$  são os melhores, caso não se tenha certeza, troca-se

o valor de K até encontrar o valor em o NS e o  $R^2$  fiquem próximos de 1. Esse procedimento foi realizado para os 9 primeiros eventos da Tabela 3.1, onde os 3 eventos posteriores não foram calibrados com o intuito de serem utilizados na validação. A Figura 4.3 exibe de forma similar a Figura 4.2, a rotina adotada ao representar a biorretenção como 2 reservatórios.

**Figura 4. 3: Fluxograma com a rotina utilizada para calibrar K com a biorretenção em forma de 2 reservatórios.**



Fonte: Autor, 2017.

A validação foi realizada de duas formas. A primeira com a média das calibrações das nove primeiras taxas de infiltração aplicadas nos eventos 160522, 160524 e 160529. E a segunda com a aplicação das médias das taxas de infiltração, obtidas nas simulações dos eventos da biorretenção na forma de dois reservatórios, nos eventos que não possuem dados de nível acima da camada superior.

Dessa forma, ao calibrar os eventos 160602, 160619 e 160628, encontrou-se um K para a superfície da camada superior (K1) e um K a superfície da base da biorretenção (K2). Em seguida, fez-se a média entre todos os K1 e a média entre os K2 e as utilizou para representar os eventos 240615, 220715, 150820 e 160529, sendo esses eventos escolhidos de forma aleatória para validar os valores os parâmetros de acordo com os níveis observados na parte interior da biorretenção.

### 4.3. Resultados e Discussão

#### 4.3.1. Simulação com um reservatório

A Tabela 4.2 exibe o resultado das calibrações da taxa de infiltração a partir do método de Puls. Nela, são mostrados os eventos, os valores de K, o nível máximo de água observado, o nível máximo simulado, os coeficientes NS e R<sup>2</sup> e erro relativo entre as alturas máximas.

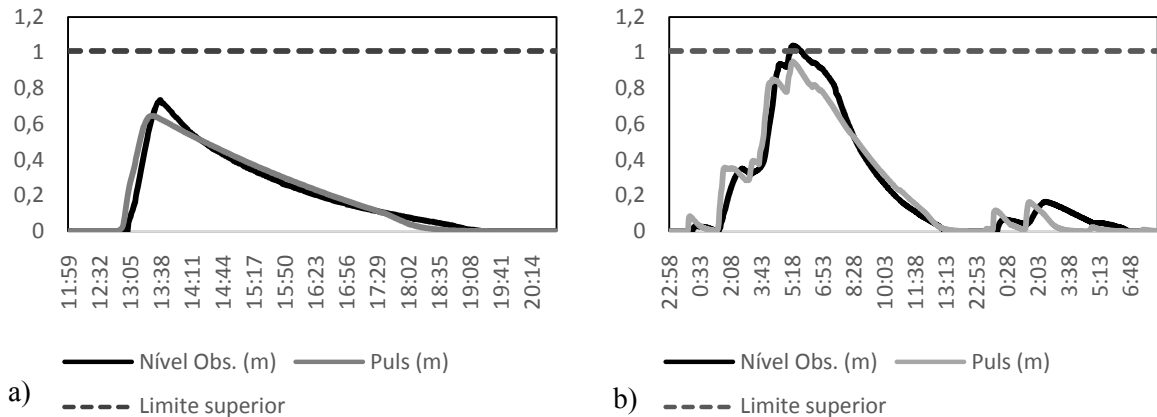
**Tabela 4. 2: Eventos escolhidos para modelagem.**

Evento	K (mm/h)	Nível Máx. (m)	Nível Máx. Puls (m)	NS	R <sup>2</sup>	ERRO
150624	17	1,06	0,77	0,79	0,84	27%
150722	25	1,09	0,97	0,93	0,94	11%
150815	20	0,25	0,26	0,84	0,84	4%
150818	14	0,27	0,23	0,89	0,89	14%
150820	21	0,93	0,56	0,71	0,80	40%
160121	38	0,74	0,64	0,95	0,95	13%
160129	42	0,44	0,56	0,64	0,85	26%
160413	35	1,05	0,95	0,94	0,95	9%
160424	22	0,27	0,29	0,86	0,90	5%

De acordo com a Tabela 4.2, os coeficientes NS e R<sup>2</sup> variaram de 0,64 a 0,95 e 0,80 a 0,95, respectivamente. Esses valores são próximos de 1 e mostram que as calibrações tiveram sucesso ao comparar os dados de níveis entre os valores observados e os simulados. O K médio é igual a 26 mm/h e essa taxa difere do valor utilizado por Rosendo (2013) ao realizar o dimensionamento da biorretenção analisada neste trabalho (50 mm/h).

De acordo com Ohnuma Júnior, Silva & Mendiondo (2015), a taxa de infiltração é influenciada diretamente pela duração e intensidade da precipitação. Ao verificar a correlação entre os valores de K e a intensidade média da chuva de cada evento, utilizando a função CORREL do Microsoft Excel, encontrou-se um valor de 0,66. Enquanto ao fazer o mesmo, mas trocando a intensidade pela duração, foi encontrado um valor de -0,13 mostrando que não apresentam correlação. A Figura 4.4 apresenta os gráficos com os melhores coeficientes (160121 e 160413).

**Figura 4. 4: a) gráfico do evento do dia 21/01/2016; b) gráfico do evento do dia 13/04/2016.**



Fonte: Autor, 2017.

Conforme Figura 4.4, o modelo de Puls simulou o nível de água interno de modo semelhante ao observado com apenas o parâmetro K calibrado. O valor de  $R^2$  médio na calibração foi de 0,88. Tecedor et al. (2015), ao utilizarem o mesmo método para simular um plano de infiltração, encontraram um  $R^2$  médio igual 0,72.

#### 4.3.2. Simulação com dois reservatórios

A Tabela 4.3 apresenta os resultados das simulações com o Puls considerando a biorretenção como sendo dois reservatórios onde a saída de água do primeiro por infiltração é a vazão de entrada para o segundo reservatório.

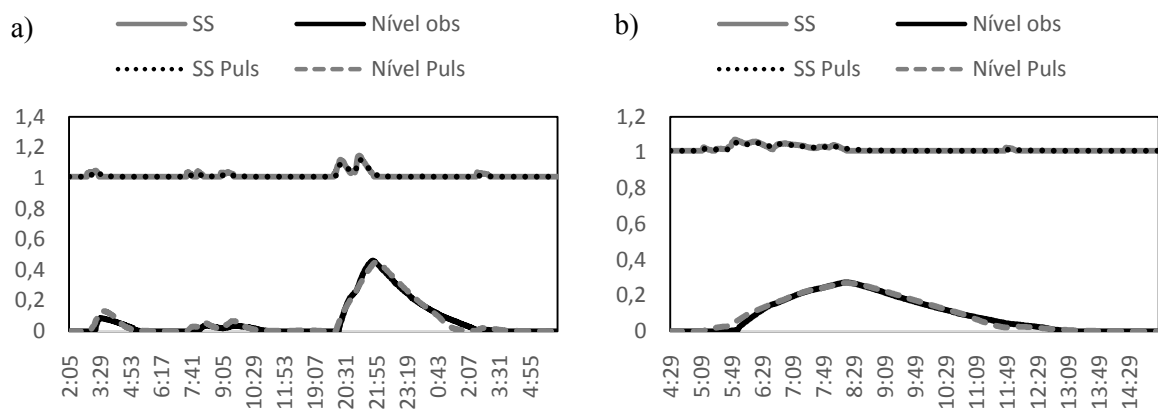
**Tabela 4. 3: Eventos escolhidos para modelagem.**

Evento	K (mm/h)	Nível Máx. (m)	Nível Máx. Puls (m)	NS	$R^2$	ERRO
160602	87	0,21	0,14	0,88	0,93	30%
	31	0,34	0,29	0,91	0,91	14%
160619	147	0,14	0,11	0,90	0,91	18%
	42	0,47	0,45	0,97	0,98	5%
160628	73	0,06	0,05	0,94	0,94	26%
	26	0,28	0,27	0,98	0,98	5%

Os eventos da Tabela 4.3 estão dispostos com dois valores de K para cada evento, assim como nas demais colunas. O primeiro K médio ( $K_{1med}$ ) que representa a taxa de infiltração da camada superior da biorretenção é de 102 mm/h e o segundo K médio ( $K_{2med}$ ) no interior do dispositivo é igual a 33 mm/h.

Os valores de NS e  $R^2$  variaram de 0,88 a 0,98 e de 0,91 a 0,98, respectivamente. Esses valores são próximos de 1 e podem ser considerados ótimos valores para fazer a validação do modelo. O erro relativo entre o nível máximo observado e o simulado por Puls foi maior no primeiro reservatório do evento 160602. A Figura 4.5 exibe os gráficos dos eventos 160619 e 160628.

**Figura 4. 5: a) gráfico do evento do dia 19/06/2016; b) gráfico do evento do dia 28/06/2016.**



Fonte: Autor, 2017.

Conforme Figura 4.5, há uma ótima concordância entre os valores observados e os simulados, tanto para o primeiro, quanto para o segundo reservatório. Destaca-se a camada superior, cujo o método conseguiu reproduzir com excelência a variação do nível ao longo do tempo. Em contrapartida, os valores de K1 e K2 tiveram uma grande variação, podendo prejudicar na validação do modelo.

### 4.3.3. Validação

Inicialmente, fez a introdução do parâmetro K médio no modelo Puls para simular os eventos 160522, 160524 e 160529. A Tabela 4.4 resume o resultado da validação.

**Tabela 4. 4: Eventos validados para 1 reservatório.**

Evento	K (mm/h)	Nível Máx. (m)	Nível Máx. Puls (m)	NS	$R^2$	ERRO
160522	26	0,70	0,74	0,76	0,93	6%
160524	26	0,38	0,39	0,85	0,90	3%
160529	26	1,19	1,77	0,48	0,27	49%

Essa validação forneceu bons valores de NS e  $R^2$  para os eventos 220516 e 240516, por outro lado, o valor de K igual a 26 mm/h não foi validado para o evento 290516. Lucas, Barbassa & Moruzz (2013), encontraram uma variação maior no coeficiente NS e no ERRO(-0,98 a 0,98 e 3,1% a 68%, respectivamente). Eles atribuíram essa variação por conta da simplificação do método de Puls ao considerar a infiltração constante e não levar em consideração a variação entre a capacidade de infiltração inicial e final do solo proporcionada pelo umedecimento do solo. Tecedor et al. (2015), por sua vez, encontraram valor para o  $R^2$  médio igual a 0,71, semelhante ao calculado neste trabalho (0,70), ao considerar o valor baixo do último evento. Dessa forma ao realizar uma tentativa de calibrar um K que melhor forneça a representação do evento 160529, encontrou-se um valor de 42 mm/h.

Para validar os valores de K para dois reservatórios, utilizou-se os eventos 150624, 150722, 140820 e 160529. Conforme Tabela 4.5, os valores de NS e  $R^2$  variaram de 0,43 a 0,89 e de 0,67 a 0,92, respectivamente. Nesse caso, os valores foram insatisfatórios por apresentarem o coeficiente NS distante de 1, salvo o evento 150722. O erro relativo entre o nível máximo observado e o simulado também apresentou valores altos.

**Tabela 4. 5: Eventos validados para dois reservatórios.**

Evento	K (mm/h)	Nível Máx. (m)	Nível Máx. Puls (m)	NS	$R^2$	ERRO
150624	102	-	0,16	-	-	-
	33	1,06	0,52	0,43	0,89	51%
150722	102	-	0,17	-	-	-
	33	1,09	0,62	0,89	0,88	43%
150820	102	-	0,07	-	-	-
	33	0,93	0,34	0,52	0,92	63%
160529	102	-	0,33	-	-	-
	33	1,19	1,05	0,60	0,67	11%

De acordo com a Tabela 4.5, o parâmetro K calibrado não foi validado quando utilizado o Puls para dois reservatórios, pois ao comparar os níveis de água observados e os calculados, foi apresentado em cada simulação, um coeficiente NS próximo a 0,5. E ao comparar os níveis máximos calculados e observados, encontrou-se um erro relativo alto nas três primeiras simulações. Isso deve ter ocorrido pelo fato de que a amostra de calibração do

K contém 3 eventos, podendo ser insuficiente para realizar a calibração e como isso, afetar a validação do modelo.

Outro ponto que deve ser levado em conta é o fato do K ser uma constante, não permite que o modelo de Puls represente o processo de infiltração real no solo (ANGELINI SOBRINHA, 2012). Além do mais, a qualidade dos dados de entrada é extremamente importante para se ter uma melhor calibração do modelo e para este trabalho, foi escolhida uma vazão registrada a intervalos de 1 minuto, podendo talvez ter um melhor aproveitamento com um registro a intervalos mais curtos. A Tabela 4.6 resume as médias dos coeficientes gerados tanto na calibração, quanto na validação.

**Tabela 4. 6: resumo das médias dos coeficientes NS e R<sup>2</sup>.**

Quant. de camadas	Calibração		Validação	
	NS	R <sup>2</sup>	NS	R <sup>2</sup>
1	0,84	0,88	0,70	0,70
2	0,90	0,93	-	-
	0,95	0,96	0,61	0,84

#### 4.4. Conclusões

O modelo de Puls forneceu bons coeficientes de determinação e de Nash-Sutcliffe na fase de calibração com valores próximos de 1. Por outro lado, ao validar o parâmetro K nos eventos 160522, 160524 e 160529, transformando a biorretenção em um único reservatório, encontrou-se valores baixos de NS e R<sup>2</sup> para esse último evento, apesar de que os dois primeiros tiveram uma boa validação.

As validações do modelo para dois reservatórios, no geral, obtiveram coeficiente NS médio 0,61 ao validar o  $K_{2_{med}}$  comparando os níveis de água observados com as alturas simuladas da camada de brita. Esse valor pode ser considerado mediano, pois apenas a validação do evento 150722 obteve um valor próximo. Em contra partida, o R<sup>2</sup> médio foi igual a 0,84.

Apesar de bons coeficientes, a calibração do modelo não conseguiu gerar uma taxa de infiltração única que represente de forma eficaz a biorretenção. Recomenda-se que o resultado da calibração seja realiza com mais eventos utilizando o sensor SS conjuntamente com os sensores internos e que seja avaliado o método de Puls com intervalos de vazão de entrada menores que 1 minuto.



É interessante também avaliar o caso de parâmetros como taxas de infiltração como função da profundidade na camada simulada. É uma alternativa simples, pois não altera a essência do método de Puls. O que pode ocorrer nesse caso é que novos parâmetros calibráveis apareçam, o que pode ser compensado com mais representatividade na simulação do comportamento do dispositivo, melhorando os coeficientes na fase de validação.

## REFERÊNCIAS

ANGELINI SOBRINHA, L. **Monitoramento e modelagem de um poço de infiltração de águas pluviais em escala real e com filtro na tampa**. [Dissertação de mestrado]. Universidade Federal de São Carlos-UFSCar, São Carlos, São Paulo, 147 p, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/4324>. Acesso em: 22 nov. 2016.

ATCHISON, D.; POTTER, K. W.; SEVERSON, L. **Design Guidelines for Stormwater Bioretention Facilities**, Water Resources Institute, University of Wisconsin. Publicação N° WIS-WRI-06-01, 40p, 2006. Disponível em: <http://aqua.wisc.edu/publications/PDFs/stormwaterbioretention.pdf>. Acesso em: 18 out. 2016.

BARBASSA, A. P.; ANGELINI SOBRINHA, L.; MORUZZI, R. B. Poço de infiltração para controle de enchentes na fonte: avaliação das condições de operação e manutenção. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 2, p. 91-107, 2014. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ac/v14n2/07.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2016.

BARKDOLL, B. D.; KANTOR, C. M.; WESSELDYKE, E. S.; GHIMIRE, S. R. Stormwater Low-Impact Development: A Call to Arms for Hydraulic Engineers. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 142, n. 8, 2016. Disponível em: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001152](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001152). Acesso em: 19 out. 2016.

BROWN, R.A.; SKAGGS, R.W.; HUNT, W.F. Calibration and validation of DRAINMOD to model bioretention hydrology, **Journal of Hydrology**, v. 486, p. 430-442, 2013. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169413001297>. Acesso em: 7 jan. 2017.

DUSSAILLANT, A. R.; WU, H. C.; POTTER, K. W. Richards Equation Model of a Rain Garden. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 9, n. 3, p. 219-225, 2004. Disponível em: [http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2004\)9%3A3\(219\)](http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/(ASCE)1084-0699(2004)9%3A3(219)). Acesso em: 21 dez. 2016.

FENTON, J. D. **A simplified approach to reservoir routing**. In: Hydrology and Water Resources Symposium 1989: Comparisons in Austral Hydrology; Preprints of Papers. Institution of Engineers, Australia, 1989. p. 377-381. Disponível em: <http://search.informit.com.au/documentSummary;dn=484344862098816;res=IELENG>. Acesso em: 10 jan. 2017.

HUNT, W. F.; et al. Pollutant removal and peak flow mitigation by a bioretention cell in urban charlotte, N.C. **Journal of Environmental Engineering**, v. 134, n. 5, p. 403-408, 2008. Disponível em: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2008\)134%3A5\(403\)](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9372(2008)134%3A5(403)). Acesso em: 18 out. 2016.

IMTEAZ, M. A.; AHSAN, A. RAHMAN, A. MEKANIK, F. Modelling stormwater treatment systems using MUSIC: Accuary. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 71, p. 15-21, 2013. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344912002066>. Acesso em: 12 nov. 2016.

JENNINGS, A. A. Residential Rain Garden Performance in the Climate Zones of the Contiguous United States. **Journal of Environmental Engineering**, v. 142, n. 12, p, 2016. Disponível em: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001143](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001143). Acesso em: 28 nov. 2016.

LI, J.; LI, Y.; LI, Y. SWMM-based evaluation of the effect of rain gardens on urbanized. **Environmental Earth Sciences**, v. 75, n. 17, 2016. Disponível em: <http://link.springer.com/article/10.1007/s12665-015-4807-7>. Acesso em: 19 fev. 2017.

LIU, J.; SAMPLE, D. J.; BELL, C.; GUAN, Y. Review and research needs of Bioretention used for the treatment of urban stormwater. **Water**, v. 6, n. 4, p. 1069-1099. 2014. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2073-4441/6/4/1069>. Acesso em: 13 jan 2017.

LUCAS, A. H.; BARBASSA, A. P.; MORUZZ, E. B. Modelagemde um Sistema Filtro-Vala-Trincheira de Infiltração pelo Método de Puls Adaptado para calibração de Parâmetros. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 2, p. 225-236, 2013. Disponível em: [http://www.rc.unesp.br/igce/planejamento/download/rodrigo/modelagem\\_sistema\\_filtro\\_vala\\_trincheira.pdf](http://www.rc.unesp.br/igce/planejamento/download/rodrigo/modelagem_sistema_filtro_vala_trincheira.pdf). Acesso em: 12 dez. 2016.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. **Journal of hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022169470902556>. Acesso em: 18 ago. 2016.

MACEDO, M. B.; ROSA, A.; MENDIONDO, E. M.; SOUZA, V. C. B. Otimização da eficiência de técnicas compensatórias de biorretenção em clima subtropical. In: XXI Simpósio

Brasileiro de Recursos Hídricos, 2015, Brasília. Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2015.

MONTGOMERY, D. C.; GEORGE, C. R. **Applied statistic and probability for engineers**. 3ª Edition, John Wiley & Sons, Inc. 820p, 2003.

OHNUMA JÚNIOR, A. A.; SILVA, L. P.; MENDIONDO, E. M. Vazões afluentes em trincheira de infiltração domiciliar. **Ciência & Engenharia**, v. 24, n. 1, p. 89-98, 2015. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/cieng/article/view/29927>. Acesso em: 19 out. 2016.

RAMIREZ, J. A. **Prediction and modeling of flood hydrology and hydraulics**. In: **WOHL, Ellen. Inland Flood Hazards: Human, Riparian and Aquatic Communities**. Ed.: Cambridge University Press, 2000.

ROSA, A. **Bioretention for diffuse pollution control in SUDS using experimental-adaptive approaches of ecohydrology**. [Tese de Doutorado]. Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, São Carlos, São Paulo, 123 p, 2016.

ROSENDO, A. A. **Avaliação de métodos e critérios para dimensionamento de dispositivos de biorretenção**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Alagoas, 2013.

ROSSMAN, L. A. **Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1**. United States Environmental Protection Agency, 2015. Disponível em: <http://www.innovyze.com/products/swmm/download/ZyPDF.pdf>. Acesso em: 22 dez. 2016.

ROY-POIRIER, A.; FILION, Y.; CHAMPAGNE, P. An event-based hydrologic simulation model for bioretention systems. **Water Science & Technology**, v. 72, n. 9, p. 1524-1533, 2015. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26524443>. Acesso em: 13 jan. 2017.

SHAFIQUE, M. A review of the Bioretention system for sustainable storm water management in urban áreas. **Materials and Geoenvironment**, v. 63, n. 4, p. 227-236, 2016. Disponível em: <https://www.degruyter.com/downloadpdf/j/rmzmag.2016.63.issue-4/rmzmag-2016-0020/rmzmag-2016-0020.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2017.

SIEVERS, C. K.; PINHEIRO, A. Trincheira de infiltração em série com reservatório de água de chuva. **Revista de estudos ambientais**, v. 15, n. 1, p. 52-59, 2013. Disponível em: <http://proxy.furb.br/ojs/index.php/rea/article/view/4026>. Acesso em: 9 dez. 2016.

SUN, Y.; WEI, X.; POMEROY, C. A. Global analysis of sensitivity of Bioretention cell design elements to hydrologic performance. **Water Science and Engineering**, v. 4, n. 3, p. 246-257, 2011. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674237015301599>. Acesso em: 14 fev. 2017.

TECEDOR, N.; BARBASSA, A. P.; MORUZZI, R.; GONÇALVES, M. L. **Monitoramento e modelagem hidrológica de plano de infiltração construído em escala real**, v. 20, n. 3, p. 594-604, 2015. Disponível em: [https://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/78af8a9bea927f85540777fad5030e6e\\_8066392efddcad77170c6c5cc0acdbaf.pdf](https://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/78af8a9bea927f85540777fad5030e6e_8066392efddcad77170c6c5cc0acdbaf.pdf). Acesso em: 10 fev. 2017.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2ª Ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 678p, 2005.

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, parte B, p. 423-432, 2016. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169416306643>. Acesso em: 18 fev. 2017.

ZOPPOU, C. Reverse routing of flood hydrographs using level pool routing. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 5, n. 2, p. 184-188, 1999. Disponível em: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1999\)4%3A2\(184\)](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4%3A2(184)). Acesso em: 15 set 2016.

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O objetivo geral desta pesquisa foi avaliar em escala real o desempenho do dispositivo de biorretenção a partir do monitoramento e o representar através de um modelo de simples implementação.

Nesse contexto as principais conclusões foram:

- O dispositivo teve um bom desempenho por reduzir 100% do escoamento superficial de 33 dos 37 eventos analisados durante o período de monitoramento;
- O modelo de Puls forneceu bons coeficientes de determinação e de Nash-Sutcliffe na fase de calibração com valores próximos de 1;
- Apesar de bons coeficientes, a calibração modelo não conseguiu gerar uma taxa de infiltração única que represente de forma eficaz a biorretenção;
- Esses trabalhos desenvolvidos no Brasil podem servir de estímulo para a criação de manuais de drenagem focados em TCs com a biorretenção inserida como uma alternativa viável e atrativa.

Ao comparar a média da taxa de infiltração encontrada nos testes de infiltração pelo ensaio do duplo anel de 95 mm/h, no capítulo 2, e a média do K calculado por Puls de 102 mm/h, no capítulo 3, encontram-se valores próximos.

Contudo, as recomendações para trabalhos futuros são:

- Deve ser realizado o monitoramento do escoamento superficial causado pela área adjacente e com isso, ter dados quantitativos que representem de forma mais completa a performance da biorretenção;
- Utilizar de outros indicadores de desempenho adotados em diversos dispositivos instalados ao redor do mundo podem corroborar no detalhamento tanto quantitativo, como quanto qualitativo;
- Recomenda-se que o resultado da calibração seja realiza com mais eventos utilizando o sensor SS conjuntamente com os sensores internos e que seja avaliado o método de Puls com intervalos de vazão de entrada menores que 1 minuto;

- Utilizar o recurso da modelagem para implementar o sistema de biorretenção em áreas propícias a alagamentos, utilizando tanto em escala de residencial como em escala de bacia;
- Desenvolver pesquisas sobre biorretenções em outros estados brasileiros.