

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Regina Cera Cadore

CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO DE BIORRETENÇÕES

Santa Maria, RS
2016

PPGEC/UFSM, RS

CADORE, Regina Cera

Mestre 2016

Regina Cera Cadore

CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO DE BIORRETENÇÕES

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Gustavo Allasia Picilli

Santa Maria, RS
2016

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Cadore, Regina Cera
CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO DE BIORRETENÇÕES / Regina
Cera Cadore, 2016

116 p.; 30cm

Orientador: Daniel Gustavo Allasia Piccilli
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil, RS, 2016.

1. Drenagem urbana sustentável I. Allasia Piccilli,
Daniel Gustavo II. Título.

© 2016

Todos os direitos autorais reservados a Regina Cera Cadore. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.
e-mail: cadore.regina@gmail.com

Regina Cera Cadore

CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO DE BIORRETENÇÕES

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**.

Aprovada em 04 de fevereiro de 2016:

Daniel Gustavo Allasia Piccilli, Dr. (UFSM)
Presidente/Orientador

Cristiano Poletto, Dr. (UFRGS)

Geraldo Lopes da Silveira, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2016

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Valsir e Malize, a minha irmã Rejana e à Camila.

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai Valsir agradeço pelo apoio incondicional nas minhas decisões, pelo amor, pelo carinho, dedicação e pelo exemplo de caráter e honestidade.

A minha mãe Malize por acreditar em mim, até mesmo quando eu já havia desistido. Agradeço por todo o apoio, amor, tempo dedicado, pela paciência e carinho. Certamente, só cheguei até aqui pois tive ela ao meu lado.

Ao Professor Daniel Allasia pela orientação na realização do presente trabalho e pelo apoio e confiança demonstrados ao longo da minha vida acadêmica de forma profissional e paterna. Além de mestre, teve a calma necessária para me ajudar a vencer e não desistir nos momentos difíceis.

À Professora Rutinéia Tassi por todas as conversas e cafés que muito contribuíram no enriquecimento do trabalho.

Ao Professor Geraldo Silveira por me receber no meu estágio em docência, proporcionando-me crescimento profissional e pessoal e por todos os conselhos desde a graduação.

Aos colegas do mestrado e bolsistas do Ecotecnologias da UFSM, pelo companheirismo e apoio nos momentos críticos como também nos felizes. Em especial, à Jéssica, Gabriel, Carla, Jean, Pedro, Raviel e Vitor pelo convívio diário e que foram essências durante a minha pós-graduação.

A minha irmã Rejana e aos amigos Camila, João e Martin por serem a minha família em Santa Maria, e pela compreensão ao longo de todos esses anos de convivência.

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, pelo ensino gratuito e de qualidade proporcionado durante a graduação e da pós-graduação.

Muito obrigada!

*Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo,
qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim.*

(Chico Xavier)

RESUMO

CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO DE BIORRETENÇÕES

AUTORA: Regina Cera Cadore
ORIENTADOR: Daniel Gustavo Allasia Picilli

A procura por alternativas de manejo de águas pluviais sempre foi uma constante na história da Humanidade. Atualmente tem gerado muitos debates, agentes públicos procuram soluções rápidas no intuito de amenizar as constantes catástrofes em decorrências das enchentes e inundações, fruto de uma urbanização acelerada e desorganizada. A busca por inovações se faz necessária para a manutenção da qualidade de vida, do meio ambiente e principalmente pela preservação do ciclo hidrológico. Alternativas de infiltração como biorretenções, trincheiras e valas de infiltração tem se mostrado como opções viáveis e de aprovação geral porque amenizam os efeitos negativos da urbanização buscando restaurar o ciclo hidrológico natural. No Brasil, ainda são poucos os estudos voltados aos critérios de dimensionamento, funcionamento e vida útil das referidas estruturas, que são dados importantes para o profissional dimensionar uma biorretenção, caso contrário, estaria levando a construção de obras superdimensionadas, onerosas e subutilizadas. O objetivo deste trabalho é analisar os critérios de técnicas de dimensionamentos para sistemas de biorretenção e propor sugestões para sua aplicação nas condições geomorfológicas da região de Santa Maria/RS. A pesquisa teve como base a estrutura de infiltração construída, em 2010, na Universidade Federal de Santa Maria. E neste estudo, buscou-se analisar o desempenho de duas metodologias de dimensionamento comparando as dimensões com a estrutura implementada na UFSM. A metodologia utilizada consistiu na coleta de dados de infiltração a partir de: ensaios de infiltração recomendados pela NBR 13969/97, com algumas modificações visando simular um evento real; de dados coletados no monitoramento da biorretenção da UFSM no período de 2011 a 2013 e dados obtidos no Teste de estresse aplicado na estrutura em dezembro de 2015. A partir desses dados, ajustou-se as curvas de infiltração de Horton para as condições médias e inseriu-se o conceito de taxa de infiltração unitária ($\text{mm.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$). Procedeu-se ao dimensionamento através das metodologias analisadas (Método da Curva-Envelope e Método do LID), após foram analisados os resultados dos dimensionamentos com o comportamento real da estrutura construída no campus Sede da UFSM sugerindo ajustes. Com base nos resultados obtidos neste estudo, os dimensionamentos apresentaram dimensões maiores do que o existente, porém, na análise do histórico da biorretenção construída indica que ela está funcionando perfeitamente no quesito armazenamento. Assim, consta-se a importância da área lateral e da pressão hidrostática no funcionamento da estrutura, como também, a relação solo-planta, com a criação de caminhos preferencias, que acabam melhorando a infiltração ao longo da vida útil. Sendo recomendados novos estudos com o objetivo de incorporar estes itens nas metodologias de dimensionamento, e monitoramento de estruturas semelhantes afim de verificar se o comportamento aqui encontrado é o padrão ou uma exceção.

Palavras-chave: Biorretenção. Taxa de infiltração. Dimensionamento. Curva de Horton.

ABSTRACT

DESIGNING CRITERIA FOR BIORETENTIONS

AUTHORA: REGINA CERA CADORE
ADVISOR: DANIEL GUSTAVO ALLASIA PICCILLI

The search for solutions in stormwater management has been a constant in human history. Being a well discussed topic nowadays, public agencies seek for quick solutions in order to minimize the catastrophes caused by floods in result to rapid and disorganized urbanization. Thus, the search for solutions in stormwater management is necessary for maintaining the quality of life, the environment and especially the preservation of the hydrological cycle. Furthermore, infiltration alternatives such as bioretention, trenches and swales have been shown as feasible and well accepted options because they minimize the negative effects of urbanization seeking to restore the natural water cycle. In Brazil, there are few studies focused on design criteria, operation and service-life of these structures, which are important data for the scale of a bioretention otherwise, would be leading to an oversized, costly and underused construction. The main purpose of this study is to analyze the sizing criteria for bioretention systems proposing suggestions for its implementation in the geomorphological conditions of the Santa Maria / RS region. The research evaluates the infiltration structure built in 2010 at the Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). The performance of two sizing methodologies was analyzed and the dimensions were compared to the dimensions of the structure implemented at UFSM. The methodology consists of collecting infiltration data from infiltration tests recommended by NBR 13969/97, with some modifications in order to simulate a real event, data of monitoring bioretention at UFSM from 2011 to 2013, and data obtained in the stress test applied to the structure in December 2015. From these data, Horton infiltration curves for the average conditions were adjusted and inserted into the concept of unit infiltration rate ($\text{mm.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$). The sizing was based on the analyzed methodologies (Curve-Envelope Method and LID method), after the results were compared to the actual behavior of the real structure suggesting adjustments. The results of this study indicate that the methodologies analyzes oversize the bioretention structure. From the analysis of the built bioretention behavior history it can be concluded that despite having smaller dimensions than those obtained through other methodologies sizing, it is effective to storage the drained volume. Therefore, it is clear that the lateral area and the hydrostatic pressure are important to the functioning of the structure, but also the soil-plant relationship, with the creation of preferential paths that end up improving infiltration over the service-life. Further studies are recommended in order to incorporate these items in sizing methodologies, and monitoring of similar structures in order to determine whether the behavior presented by the bioretention is default or an exception.

Keywords: Bioretention. Infiltration rate. Designing criteria. Horton infiltration curves

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Variabilidade do escoamento	21
Figura 2 - Efeito da urbanização sobre a vazão máxima	21
Figura 3 - Fatores agravantes das inundações: Obras inadequadas	22
Figura 4 - Fatores agravantes das inundações: Ocupação intensa	23
Figura 5 - Fatores agravantes das inundações: Obstrução de bueiros	23
Figura 6 a) e b) - Exemplos de aplicação de bacias de infiltração.	27
Figura 7 a) e b) - Exemplos de aplicações de valas de infiltração.....	28
Figura 8 - Poço de infiltração em formato cilíndrico.	29
Figura 9 - Perfil de uma biorretenção típica.....	30
Figura 10 - Aplicação de uma biorretenção.....	30
Figura 11 - Esquema típico de uma biorretenção.....	32
Figura 12 - Método da curva envelope.....	38
Figura 13 - Procedimento para determinar a porcentagem de área local necessário para manter o volume de escoamento de pré-desenvolvimento e vazão de pico.	39
Figura 14 - Volume de armazenamento necessário para manter a vazão de pico de pré-desenvolvimento.	40
Figura 15 - Exemplo de ajuste da Equação de Horton.....	44
Figura 16 - Esquema de implantação de uma biorretenção.....	47
Figura 17- Biorretenção em um estacionamento.....	47
Figura 18 – Mapa do Rio Grande do Sul.....	49
Figura 19 - Dados climatológicos do município de Santa Maria (2014).	50
Figura 20 - a) Localização do experimento. b) Área de captação das águas que compõem a trincheira.....	51
Figura 21 - Modelo esquemático da biorretenção.	51
Figura 22 - Planilha de cálculo utilizada para o levantamento das condições antecedentes.....	53
Figura 23 - a) Biorretenção construída na UFSM b) Solo retirado da cava	54
Figura 24 - Localização das cavas.	55
Figura 25 - Cava 01 com nível de água em 0,15m.....	55
Figura 26 - Tabela padrão confeccionada para a coleta de dados de infiltração.	56
Figura 27 - Planilha dos dados monitorados disponibilizada pelo Ecotecnologias....	57
Figura 28 - Biorretenção durante o teste com água acumulada na superfície.	58

Figura 29 - Planilha dos resultados brutos do teste de estresse.....	58
Figura 30 - Modelo de planilha de cálculo para o ajuste dos parâmetros de Horton para os resultados dos ensaios de infiltração.....	59
Figura 31 - Diagrama esquemático do balanço de radiação durante o dia.	61
Figura 32 - Modelo de planilha de cálculo utilizada.....	62
Figura 33 - Modelo de planilha de cálculo para o ajuste dos parâmetros de Horton para os resultados do teste de estresse.....	62
Figura 34 - Planilha de cálculo padrão para a determinação da chuva efetiva e hidrograma unitário.	67
Figura 35 - Planilha de cálculo padrão para aplicação da convolução.....	67
Figura 36 - Gráfico do comportamento da biorretenção para o E1.	71
Figura 37 - Gráfico do comportamento da biorretenção para o E2.	71
Figura 38 - Gráfico do comportamento da biorretenção para o E3.	72
Figura 39 - Gráfico do comportamento da biorretenção para o E4.	73
Figura 40 - Gráfico do comportamento da biorretenção para o Evento 5.....	73
Figura 41 - Gráfico do comportamento da biorretenção para o Evento 6.....	74
Figura 42 - Comportamento dos níveis durante a realização dos ensaios.	76
Figura 43 - Comportamento dos níveis durante os eventos selecionados.	77
Figura 44 - Comportamento dos níveis durante os eventos após 24h.	77
Figura 45. Comportamentos dos níveis durante a realização do teste de funcionamento.....	78
Figura 46 - Curvas de Horton ajustadas dos ensaios realizados <i>in loco</i>	80
Figura 47 - Valores de infiltração e infiltração unitária dos ensaios 2 e 3 realizados <i>in loco</i>	81
Figura 48 - Plantio das mudas de bananeiras.	83
Figura 49 - Estádio atual das espécies vegetais plantadas.....	83
Figura 50 - Curvas de Horton ajustadas dos eventos observados.	84
Figura 51 - Valores de infiltração e infiltração unitária dos eventos E2 e E3.....	85
Figura 52 - Valores de infiltração e infiltração unitária dos eventos E6, E5 e E4.	85
Figura 53 - Ajuste da curva de Horton - Teste 1.....	86
Figura 54 - Ajuste da curva de Horton - Teste 2.....	87
Figura 55 - Ajuste da curva de Horton - Teste 3.....	87
Figura 56 - Ajuste da curva de Horton - Teste 4.....	88
Figura 57 - Ajuste da curva de Horton - Teste 5.....	88

Figura 58 - Curvas ajustadas do teste de funcionamento.	89
Figura 59 - Valores de infiltração e infiltração unitária para o teste 1.....	90
Figura 60 - Valores de infiltração e infiltração unitária para os testes 2 e 5.	90
Figura 61 - Curvas médias de Horton dos ensaios, eventos e teste de estresse.....	92
Figura 62 - Dimensionamento 1ª abordagem – situação 1.....	95
Figura 63 - Dimensionamento 1ª abordagem - situação 2.	95
Figura 64 - Dimensionamento 1ª abordagem - situação 3	96
Figura 65 – Dimensionamento 1ª abordagem – situação 1 – taxa de infiltração unitária dos ensaios.	97
Figura 66 - Dimensionamento 1ª abordagem – situação 2 – taxa de infiltração unitária dos eventos.	97
Figura 67 - Dimensionamento 1ª abordagem – situação 3 – taxa de infiltração unitária dos testes.	97
Figura 68 - Dimensionamento 2ª abordagem - situação 1.	98
Figura 69 - Dimensionamento 2ª abordagem - situação 2.	98
Figura 70 - Dimensionamento 2ª abordagem - situação 3.	99
Figura 71 - Dimensionamento 2ª abordagem - situação 1 - taxa de infiltração unitária dos ensaios.	99
Figura 72 - Dimensionamento 2ª abordagem - situação 2 - taxa de infiltração unitária dos eventos.	100
Figura 73 - Dimensionamento 2ª abordagem - situação 3 - taxa de infiltração unitária dos testes.	100
Figura 74 - Dimensionamento 3ª abordagem - situação 1.	101
Figura 75 - Dimensionamento 3ª abordagem - situação 2.	102
Figura 76 - Dimensionamento 3ª abordagem - situação 3.	102
Figura 77 - Dimensionamento 3ª abordagem - situação 1 - taxa de infiltração unitária dos ensaios.	103
Figura 78 - Dimensionamento 3ª abordagem - situação 2 - taxa de infiltração unitária dos eventos.	104
Figura 79 - Dimensionamento 3ª abordagem - situação 3 - taxa de infiltração unitária dos testes.	104
Figura 80 - Hidrogramas resultantes de pré e pós-urbanização.....	107

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Importância relativa de restrições à implantação	25
Quadro 2 - Desempenho da remoção de contaminantes em biorretenções.	36
Quadro 3 - Alguns modelos de infiltração empíricos presentes na literatura.	43
Quadro 4 - Condições do solo e os limites de 5 dias de chuva antecedente.	52
Quadro 5 - Eventos de precipitação monitorados.	60
Quadro 6 - Análise anual das condições antecedentes.	68
Quadro 7. Análise mensal das condições antecedentes - período latente.....	69
Quadro 8. Análise mensal das condições antecedentes - período de crescimento. .	69
Quadro 9 - Parâmetros da Equação de Horton para os ensaios.....	79
Quadro 10 - Parâmetros da Equação de Horton para os eventos observados.	82
Quadro 11 - Parâmetros da Equação de Horton para o teste de funcionamento.....	89
Quadro 12 - Parâmetros Médios da Equação de Horton.	91
Quadro 13 - Resultados dos dimensionamentos pela Curva-Envelope.	105
Quadro 14 - Resultados dos dimensionamentos pela Curva-Envelope com os valores unitários.....	106

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	16
1.1 INTRODUÇÃO	16
1.2 JUSTIFICATIVA	17
1.3 OBJETIVOS	18
1.3.1 Objetivo geral.....	18
1.3.2 Objetivos específicos	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 SITUAÇÃO ATUAL DA DRENAGEM URBANA.....	20
2.2 ESTRUTURAS SUSTENTÁVEIS DE DRENAGEM URBANA	24
2.2.1 Estruturas sustentáveis que favorecem a infiltração.....	26
2.2.2 Bacia de Infiltração.....	27
2.2.3 Vala de Infiltração	27
2.2.4 Poço de Infiltração	28
2.3 BIORRETENÇÃO.....	29
2.3.1 Definição.....	29
2.3.2 Processos	33
2.3.3 Eficiência	35
2.3.4 Dimensionamento	37
2.3.4.1 Método da Curva-Envelope - “Rain-envelope-method”	37
2.3.4.2 Método do LID Hydrologic Analysis	38
2.3.5 Infiltração	41
2.3.5.1 Equação de Horton.....	43
2.3.5.2 Implementação de um sistema de biorretenção	44
3 METODOLOGIA	48
3.1 INTRODUÇÃO	48
3.2 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	48
3.3 LEVANTAMENTO DAS CONDIÇÕES ANTECEDENTES DO SOLO	52
3.4 COLETA DE DADOS	53
3.4.1 Ensaio de infiltração segundo a NBR 13969/97	53
3.4.2 Dados monitorados.....	56
3.4.3 Teste de estresse.....	57
3.5 AJUSTE DA EQUAÇÃO DE HORTON	59
3.5.1 Ajustes para os ensaios de infiltração	59
3.5.2 Ajustes para os dados monitorados	59
3.5.3 Ajustes para os testes de estresse.....	62

3.6 DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS DE BIORRETENÇÃO	63
3.6.1. Método da Curva-Envelope – “Rain-envelope-method”	63
3.6.2. Método do LID hydrologic analysis	65
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
4.1 LEVANTAMENTO DAS CONDIÇÕES ANTECEDENTES DO SOLO	68
4.2 ANÁLISE DE FUNCIONAMENTO DA BIORRETENÇÃO	70
4.3 ESTIMATIVA DA TAXA DE INFILTRAÇÃO E AJUSTES DA EQUAÇÃO DE HORTON.	74
4.3.1. Análise dos níveis	75
4.3.1.1. <i>Níveis durante os ensaios de infiltração</i>	75
4.3.1.2. <i>Níveis durante os eventos monitorados</i>	76
4.3.1.3. <i>Níveis durante o teste de estresse</i>	78
4.3.2. Ajustes dos parâmetros da Equação de Horton	79
4.3.2.1. Ajuste dos parâmetros de Horton para os ensaios de infiltração	79
4.3.2.2. Ajuste dos parâmetros de Horton para os dados monitorados	81
4.3.2.3. Ajuste dos parâmetros de Horton para os testes de estresse	86
4.3.2.4. Análise comparativa das curvas médias	91
4.4 DIMENSIONAMENTO PELO MÉTODO DA CURVA-ENVELOPE	93
4.4.1 Dimensionamento 1ª abordagem – utilizando taxa de infiltração média saturada dos ensaios	94
4.4.2 Dimensionamento 2ª abordagem - utilizando taxa de infiltração média saturada dos eventos	98
4.4.3 Dimensionamentos 3ª abordagem utilizando taxa de infiltração média saturada dos testes	100
4.4.4 Resultados gerais dos dimensionamentos	105
4.5 DIMENSIONAMENTO PELO MÉTODO DO LID	106
5 CONCLUSÕES	108
6 RECOMENDAÇÕES	109
REFERÊNCIAS	110

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

1.1 INTRODUÇÃO

De acordo com dados do Censo Demográfico de 2010, realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o Brasil é o quinto país mais populoso do mundo, ficando atrás apenas da China, Índia, Estados Unidos e Indonésia. A população brasileira atingiu a marca de 200 milhões habitantes (IBGE, 2015) este crescimento populacional, em conjunto com o crescimento econômico do país, nos últimos anos, gerou uma grande expansão das cidades; hoje, de acordo com os dados do IBGE, 84,36% dos brasileiros vivem em áreas urbanas (IBGE, 2010).

No entanto, esse crescimento populacional urbano foi realizado desorganizadamente e sem planejamento por parte do poder público (TUCCI, 2002). Assim, atualmente a situação das cidades inclui problemas sociais que se multiplicam como, por exemplo, poluição, inundações, enchentes, destruição do meio ambiente e desenvolvimento de sub-habitações.

Conseqüentemente, houve uma queda da qualidade de vida nos centros urbanos e, particularmente, na área dos recursos hídricos, mensurável pelo aumento significativo de inundações, produção de sedimentos e deterioração da qualidade da água. Este agravamento é função tanto da crescente impermeabilização do solo, decorrente da urbanização acelerada, como da ocupação de áreas de risco (VILLANUEVA, A. O. N. et al. 2011).

No início do processo de urbanização das cidades o objetivo principal das redes de drenagem era evacuar o mais rápido possível as águas pluviais, conhecido como método higienista (BAPTISTA et al.,2005). Porém, com o aumento do volume escoado, extrapola-se a capacidade dos condutos existentes e tem um alto custo de ampliação do sistema nos centros urbanos já consolidados, essa abordagem tornou-se inviável nos dias de hoje.

Para resolver estes problemas, foram propostas técnicas que estão diretamente ligadas à ideia de fazer com que o ciclo hidrológico de determinada região se mantenha o mais parecido com o ciclo hidrológico natural. Assim, se adotou a ideia de compensação dos efeitos da urbanização, onde o aumento dos volumes e vazões causadas pelas construções de novas obras deve ser atenuado novamente à sua

condição natural através de medidas protetivas e compensatórias a serem tomadas pelos proprietários.

Nessas técnicas, novas estruturas foram propostas, tais como trincheiras de infiltração, reservatórios de detenção, telhados verdes e os sistemas de biorretenção. No entanto, em função de serem técnicas pouco implementadas no Brasil, não há parâmetros ou critérios de dimensionamentos locais, mas critérios utilizados de publicações estrangeiras, que muitas vezes levam a estruturas não adequadas para as características pedológicas, climáticas e edáficas típicas brasileiras.

1.2 JUSTIFICATIVA

Nos dias atuais, a sustentabilidade ambiental é um ideal que se perfaz principalmente pela ação, e pela constante busca entre desenvolvimento econômico e ao mesmo tempo preservação do ecossistema. Dimensionar uma estrutura de infiltração sem levar em consideração pontos relevantes, numa visão conservadora, estaria levando a construção de projetos superdimensionados, onerosos e subutilizados.

Em busca de aprimorar as técnicas e aplicações de estruturas compensatórias (trincheiras de infiltração, telhados verdes, biorretenções, etc), vários autores estrangeiros têm desenvolvido pesquisas como: Bettes, (1996); Ermilio (2005); Fujita (1996); PGDER (1993); Hunt et al. (2006); PGDER (1993); Sharkey (2006) e Yamada (1993).

Já no Brasil, têm-se poucos estudos que forneçam dados precisos de dimensionamento e funcionamento de estruturas de infiltração específicos para cada região. Por exemplo, Caramori (2002) avaliou a eficiência de trincheiras de infiltração instaladas no campus do Vale da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), em Porto Alegre, RS. Galbiati (2009) avaliou a eficiência de uma trincheira de evapotranspiração/fossa bananeira, no tratamento de águas negras de uma residência no estado do Mato Grosso do Sul.

Rosa et al. (2013) trabalharam com biorretenção da poluição difusa na drenagem urbana, usando uma abordagem experimental-adaptativa com base ecoidrológica. Graciosa et al. (2007) monitoraram uma trincheira de infiltração instalada em lote residencial para controle do escoamento superficial. Mendiando e

Valdes (2002) vêm trabalhando estratégias para o desenvolvimento sustentável dos sistemas de recursos hídricos. Peiter e Poletto (2012) testaram trincheiras de infiltração instaladas no Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus de Toledo, buscando soluções alternativas para diminuir a sobrecarga dos sistemas de drenagem convencionais.

Daniel Jr. (2013) avaliou uma biorretenção atuando no controle quali/quantitativo dos efluentes pluviais, construída no campus da Universidade Federal de Santa Maria, em Santa Maria. No entanto, o dimensionamento da trincheira apresentada foi realizado com as técnicas existentes na época e, que mostrou uma superestimação das dimensões da estrutura.

Mendiondo (2015) vem pesquisando técnicas de dimensionamento com uso de simulações de cenários climáticos futuros e dados como a extensão, o grau de urbanização e de vegetação e a previsão de novas construções na área onde a técnica de drenagem será implementada.

Assim, é necessário analisar as informações disponíveis com a finalidade de se fazer um estudo de técnicas utilizadas e, eventualmente, propor ajustes de dimensionamento necessários em sistemas de biorretenção, para que possam ser aplicados nas condições pedológicas e climáticas de Santa Maria- RS.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral analisar os critérios de técnicas de dimensionamento para sistemas de biorretenção e propor sugestões para sua aplicação nas condições pedológicas e climáticas brasileiras, em particular para as de Santa Maria, RS.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Analisar o comportamento de uma biorretenção existente no Campus Sede da UFSM, monitorada de 2011 a 2013;
- b) Avaliar o ensaio de infiltração proposto pela NBR 13969/97;

- c) Dimensionar o sistema de biorretenção através do método da curva-envelope e do método do LID;
- d) Realizar teste de estresse na biorretenção, simulando uma situação crítica;
- e) Avaliar se o dimensionamento atende as características atuais; e,
- f) Propor aperfeiçoamentos ou adaptações às metodologias atualmente utilizadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SITUAÇÃO ATUAL DA DRENAGEM URBANA

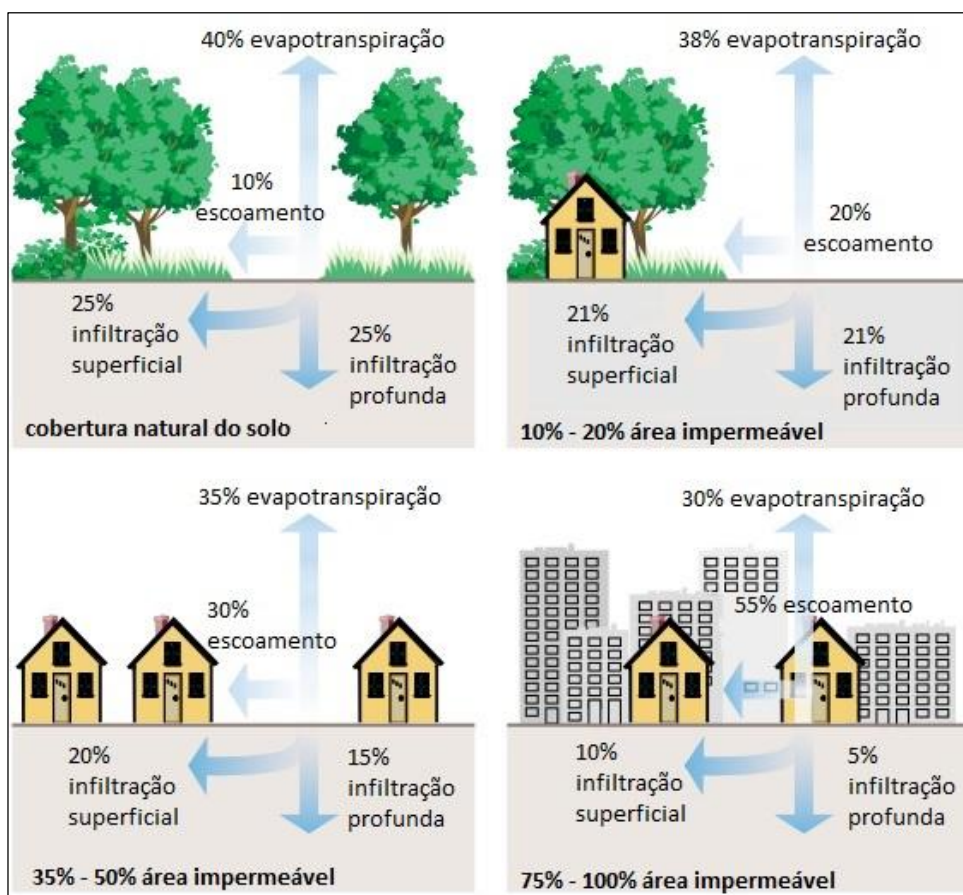
No Brasil e no Mundo, o intenso e desorganizado processo de urbanização das cidades, têm gerado problemas de infraestrutura urbana, principalmente, em relação à drenagem de águas pluviais. A impermeabilização do solo, desmatamento, lixo e poluição, erosão e assoreamento, canalização e retificação de rios e riachos, ocupação de espaços inadequados, ausência de planos urbanísticos específicos agravados ainda pela falta de aplicação das legislações vigentes geram impactos econômicos, sociais e ambientais afetando a qualidade de vida dos habitantes, sendo as enchentes urbanas uma das consequências mais visíveis e recorrentes (TUCCI, 2002).

Dessa forma, o sistema de drenagem faz parte do conjunto de melhoramentos públicos existentes em uma área urbana (CETESB,1986). A qualidade do sistema é que determinará se os benefícios ou prejuízos à população serão maiores ou menores, pois o sistema de drenagem tem uma particularidade: o escoamento de águas pluviais sempre ocorrerá independentemente de existir ou não sistema de drenagem adequado. É conveniente, para a sociedade, que a área urbanizada seja planejada de forma integrada, isto é, que todos os melhoramentos públicos sejam planejados coerentemente.

Assim, qualquer alteração que o homem faça na superfície de uma bacia hidrográfica gera impactos no ciclo hidrológico, principalmente, no escoamento. Esse impacto, geralmente, é caracterizado pelo efeito que provoca no comportamento das enchentes, nas vazões mínimas, máximas e na vazão média, além das condições ambientais locais e a jusante. A Figura 1 apresenta um esquema do impacto causado pela urbanização nos índices dos processos de evapotranspiração, escoamento e infiltração.

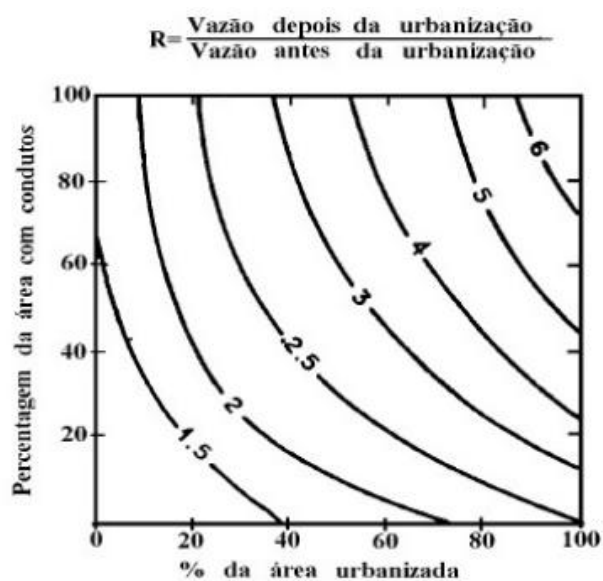
De acordo com Tucci (1997), as alterações no escoamento direto causadas pela urbanização inadequada, são as que mais afetam o sistema de drenagem urbana. Pode-se verificar que o pico da cheia numa bacia urbanizada pode ser até 6 vezes maior que o pico da mesma em condições naturais em períodos críticos (Figura 2).

Figura 1 - Variabilidade do escoamento com o aumento das superfícies impermeáveis.



Fonte:(Adaptado de FISRWG, 1998).

Figura 2 - Efeito da urbanização sobre a vazão máxima



Fonte: (LEOPOLD, 1965).

Segundo Baptista et al. (2005), a maioria dos sistemas de drenagem urbanos foram elaborados e implantados visando o rápido escoamento das águas pluviais, almejando sempre o aumento de vazão e o aumento da capacidade do sistema (chamado de sistema tradicional ou sistema higienista). Não solucionando o problema, apenas transferindo-o para a jusante.

Grande parte dos municípios apenas exigem que os projetos sejam eficientes no cenário que se enquadram no momento e não avaliam o impacto em toda a bacia hidrográfica, nem em cenários futuros (TUCCI, 1995). Para ilustrar, 94,5% dos municípios do Brasil possuem algum serviço de manejo de águas pluviais, mas apenas 12,7% dos municípios declaram possuir dispositivos coletivos de retenção e amortecimento de vazão das águas pluviais urbanas (IBGE, 2011). Ainda, um pouco mais de 30% dos municípios possuem legislação municipal sobre proteção de mananciais.

Para exemplificar o problema das enchentes urbanas, em 2008, o IBGE realizou um levantamento junto aos municípios sobre fatores agravantes das inundações no país, obtendo os seguintes dados: obras inadequadas com 31,7%; ocupação intensa e desordenada do solo 43,1% e obstrução de bueiros e bocas de lobo com 45,1% (Figura 3, 4 e 5, respectivamente).

Figura 3 - Fatores agravantes das inundações: Obras inadequadas



Fonte: (IBGE, 2011).

Figura 4 - Fatores agravantes das inundações: Ocupação intensa e desordenada do solo.



Fonte: (IBGE, 2011).

Figura 5 - Fatores agravantes das inundações: Obstrução de bueiros, bocas de lobo etc.



Fonte: (IBGE, 2011).

Após décadas de uma drenagem urbana agressiva, com a exploração dos recursos naturais provocando a degradação do ambiente, a partir dos anos 70 surgem técnicas com o objetivo de manter o ciclo hidrológico urbanizado de determinada região o mais próximo do ciclo hidrológico natural, buscando, assim, neutralizar os efeitos negativos da urbanização (BAPTISTA et al., 2005).

Posteriormente, o papel do solo e da vegetação ganhou destaque no controle quali/quantitativo de águas pluviais, com estruturas que promovem a infiltração, a evapotranspiração e o contato da água com bactérias e plantas (SOUZA et al., 2012).

O Plano Diretor de Drenagem Urbana de Porto Alegre (PDDrU de Porto Alegre) (2005) baseia-se em princípios como o de que novos empreendimentos não podem aumentar a vazão de pico das condições naturais (ou prévias) – controle da vazão de saída; e da necessidade de planejar o conjunto da bacia hidrográfica para controlar o seu volume e evitar a transferência dos impactos para a jusante. Aliando medidas estruturais e não estruturais de drenagem, isto é, obras de engenharia e ações de infraestrutura no geral, e ações que envolvem novas práticas de gestão e de comportamento da própria população, respectivamente.

Assim, se faz necessário novas formas de controle e/ou diminuição dos efeitos negativos da urbanização desordenada dos últimos anos. Diante desse cenário, estruturas alternativas vêm surgindo como opções, por exemplo: bacias de infiltração, valas de infiltração, poços de infiltração, pavimentos permeáveis e biorretenções. São algumas das várias soluções disponíveis.

2.2 ESTRUTURAS SUSTENTÁVEIS DE DRENAGEM URBANA

Atualmente, existem diversas alternativas aplicadas para o desenvolvimento dos sistemas de drenagem pluvial nas áreas urbanizadas e para a gestão do escoamento pluvial, de maneira que se tenha o controle do aumento da vazão máxima e a melhoria das condições ambientais.

As alternativas que incluem medidas estruturais podem ser classificadas conforme sua ação na bacia hidrográfica como: na fonte, na microdrenagem e na macrodrenagem (BAPTISTA et al., 2005). As principais medidas de controle do escoamento pluvial funcionam de acordo com três princípios (armazenamento, infiltração e canalização). E segundo o PDDrU de Porto Alegre (2005), o

armazenamento promove o amortecimento do escoamento reduzindo a vazão de pico; a infiltração busca restaurar a infiltração natural perdida com a impermeabilização das superfícies provocadas pela urbanização e, a canalização, apenas transfere para jusante o aumento da vazão, transferindo o problema e não solucionando-o.

Brandão et al. (2009) resalta outro item de importância alterado pela urbanização, a evapotranspiração, a qual possui relevante papel no ciclo hidrológico e de grande influência na agricultura, atuando como fator estabilizador dos solos, no regime de chuvas até na regularização do regime hídrico de rios.

E segundo Da Silva (2009, p.13) “O uso de uma ou de outra estrutura está condicionado a restrições relativas à topografia, ao solo, ao subsolo e aos objetivos que se pretende atingir com o seu uso”.

Diversas estruturas vêm sendo desenvolvidas a partir desses princípios. E na busca da mais ideal, faz-se um comparativo com o auxílio de tabelas (Quadro 1), com suas principais restrições e usos, facilitando uma decisão preliminar na identificação das técnicas mais adequadas para cada situação.

Quadro 1 - Importância relativa de restrições à implantação e operação das técnicas.

(continua)

Técnica	Restrições à implantação e operação das técnicas					
	Permeabilidade do solo	Declividade	Proximidade do lençol freático	Proximidade de leito rochoso	Restrições ao uso do solo	Aporte de sólidos
Bacia de detenção	+	+	+	++	+++	++
Bacia de infiltração	+++	+	+++	+++	+++	+++
Valas e valetas de detenção	+	++	+	++	++	++
Valas e valetas de infiltração	+++	+++	+++	+++	++	+++
Pavimentos Porosos	++	+++	++	+	+	+++
Revestimentos permeáveis	++	+++	++	+	+	+++

Fonte: Baptista et al. (2005).

Quadro 1 - Importância relativa de restrições à implantação e operação das técnicas.

(continuação)

Técnica	Restrições à implantação e operação das técnicas					
	Permeabilidade do solo	Declividade	Proximidade do lençol freático	Proximidade de leito rochoso	Restrições ao uso do solo	Aporte de sólidos
Trincheiras de detenção	+	++	++	++	++	+
Trincheiras de infiltração	+++	+++	+++	+++	++	+
Poços de infiltração	+++	+	+++	+++	+	+
Telhados armazenadores	+	+	+	+	+	+
Reservatórios individuais	+	+	++	++	+	+

Fonte: Baptista et al. (2005).

2.2.1 Estruturas sustentáveis que favorecem a infiltração

O crescimento urbano alterou um dos principais fatores de controle de águas pluviais que é a infiltração. Definida por Collischonn e Dornelles, em 2013, como “a passagem da água através da superfície do solo, passando pelos poros e atingindo o interior, ou perfil, do solo”. Conforme as áreas impermeáveis aumentam, tem-se uma redução na taxa de infiltração e um aumento do escoamento superficial (FISRWG, 1998). E, conseqüentemente, provoca o aumento das enchentes urbanas, que é um dos grandes desafios dos gestores de recursos hídricos nos centros urbanos (TUCCI, 1997).

A infiltração também é um fator importante relacionado à ocorrência das secas. Sabe-se que os aquíferos subterrâneos, responsáveis pela perenização dos cursos d'água nos períodos de estiagem, dependem da percolação (movimento da água no solo) que é diretamente afetada pelas alterações na capacidade de infiltração (BRANDÃO et al., 2009). Assim, optou-se pelo enfoque nas estruturas sustentáveis que favorecem a infiltração.

2.2.2 Bacia de Infiltração

A bacia de infiltração (Figura 6a e b) tem como objetivo principal conduzir as águas superficiais e criar condições de escoamento através do solo. Consiste numa região de solo cercada por uma margem ou contenção, que armazena as águas pluviais até as mesmas infiltrarem através da base e dos lados.

E segundo o PDDrU Porto Alegre (2005) além de promover a infiltração, pode ser utilizada para amenizar os picos de cheias e permitir a evapotranspiração. Sua principal desvantagem é a probabilidade de falha se construída sobre solo inadequado e necessita de frequente manutenção. Também pode dar origem a problemas como solo encharcado, odores e insetos.

Figura 6 a) e b) - Exemplos de aplicação de bacias de infiltração.



Fonte: a) SUDSWALES (2014); b) LOCAL ECOLOGIST (2009).

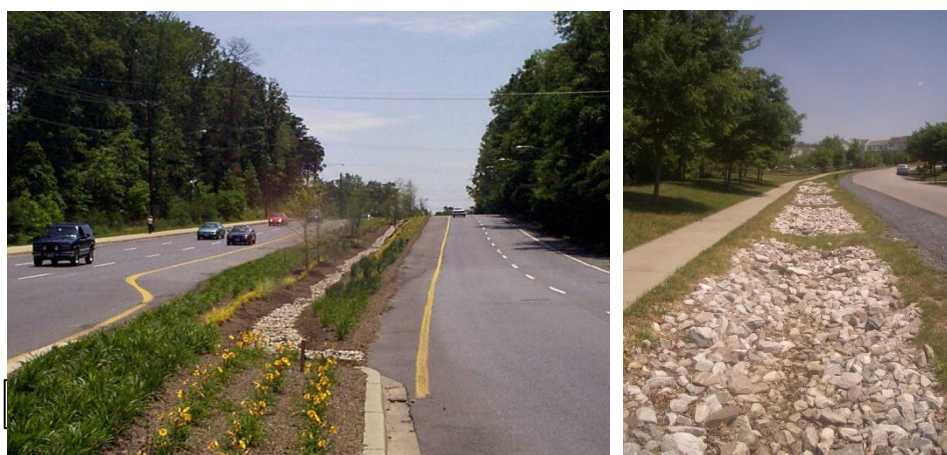
2.2.3 Vala de Infiltração

A vala de infiltração é uma alternativa de drenagem lateral, utilizada de forma paralela às estradas, rodovias, estacionamentos, conjuntos habitacionais, entre outros. Geralmente é longa e estreita, cujos taludes laterais e o fundo são cobertos por vegetação (Figura 7a e b). O Manual de drenagem e manejo de águas pluviais de São Paulo (2012) ressalta que a vala facilita a infiltração da água para as camadas superficiais do solo como também para as mais profundas, permitindo a manutenção da recarga do aquífero, prejudicada com a grande impermeabilização das áreas

urbanas. Como também, promove a captura de poluentes e a diminuição da velocidade de escoamento superficial.

Entre as principais desvantagens são: risco de contaminação do aquífero, a frequente necessidade de manutenção e o entupimento por material fino e resíduos sólidos.

Figura 7 a) e b) - Exemplos de aplicações de valas de infiltração.



Fonte: a) LID (2014); b) SUSTAINABLE (2007).

2.2.4 Poço de Infiltração

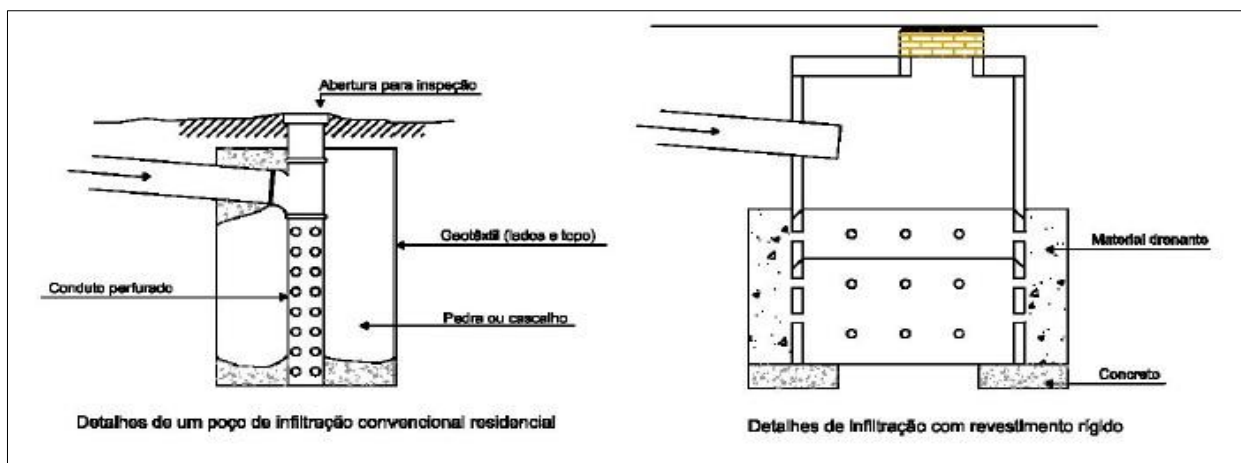
Reis et al. (2008) define poço de infiltração como uma escavação em forma cilíndrica ou retangular (Figura 8), preenchida com material pré-definido (usualmente utiliza-se pedregulhos ou cascalhos) para manter a forma original da escavação; pode-se conectar vários poços. O seu princípio de funcionamento é semelhante ao de outras estruturas de infiltração, parte do escoamento fica armazenado, infiltrando pela base e laterais.

O PDDrU Porto Alegre (2005) ressalta que um dos principais cuidados na sua manutenção é com relação aos dispositivos para retenção de sedimentos na entrada do sistema, que devem ser limpos regularmente e com maior frequência, quando for em grandes áreas ou com a presença de materiais que possam causar obstrução.

O uso de tecnologias como as supracitadas, deve ser ampliado para se melhorar a concepção higienista, de se canalizar as águas pluviais e ainda retificar os córregos urbanos. O manejo das águas pluviais, visando a redução dos impactos no

ciclo hidrológico urbano, passa pela utilização dessas tecnologias. Por isso, no presente trabalho será dada maior ênfase para as estruturas de biorretenção que estão detalhadas a seguir.

Figura 8 - Poço de infiltração em formato cilíndrico.



Fonte: (TASSI, 2002 apud PDDrU Porto Alegre, 2005).

2.3 BIORRETENÇÃO

A biorretenção começou a ser aplicada como um método de drenagem sustentável, no início dos anos 90, no Condado de *Prince George*, Maryland (EUA), no Departamento de Recursos Ambientais, isto é, o *Prince George's County Department of Environmental Resources* (PGDER).

Segundo o Manual da Biorretenção (PGDER, 2007) abaixo foram apresentadas as suas principais características.

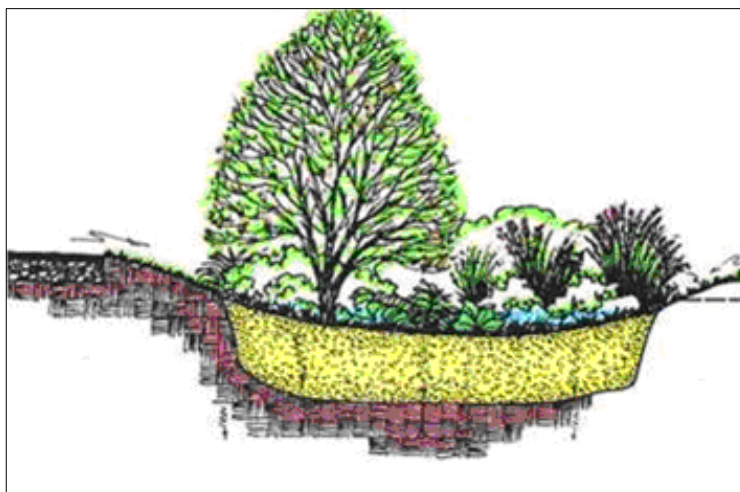
2.3.1 Definição

A biorretenção (Figura 9 e Figura 10) é uma prática de gestão e de tratamento do escoamento de águas pluviais pela utilização de um solo condicionado à plantação e a materiais para filtrar o escoamento armazenado dentro de uma depressão rasa (SOUZA, 2005).

Consiste em uma depressão rasa com solo preparado para o plantio de uma diversidade de espécies, combinando filtragem física e adsorção por processos

biológicos, estimulando a interceptação, infiltração, deposição de partículas e sólidos suspensos, evaporação, absorção, transpiração, evapotranspiração, assimilação de poluentes, nitrificação, desnitrificação, volatilização, atenuação termal, degradação de componentes químicos e decomposição (SOUZA, 2005).

Figura 9 - Perfil de uma biorretenção típica.



Fonte: (PGDER, 2007).

Figura 10 - Aplicação de uma biorretenção.



Fonte: (LID, 2010).

A Figura 11 representa um esquema de funcionamento de controle do escoamento por biorretenção. O escoamento ao longo da bacia de captação é transportado para a área de tratamento, o qual consiste em uma faixa de proteção de grama, leito de areia, área de acumulação de água, camada de solo orgânico e plantas.

Segundo o Prince George's County Department Of Environmental Resources (PGDER)(1993) o escoamento passa primeiro sobre ou através de uma camada de grama e leito de areia, o que diminui a velocidade do escoamento, distribuindo-se uniformemente ao longo do comprimento da área de acumulação de água, que consiste em uma camada de superfície orgânica e/ou de cobertura do solo e da plantação no solo subjacente.

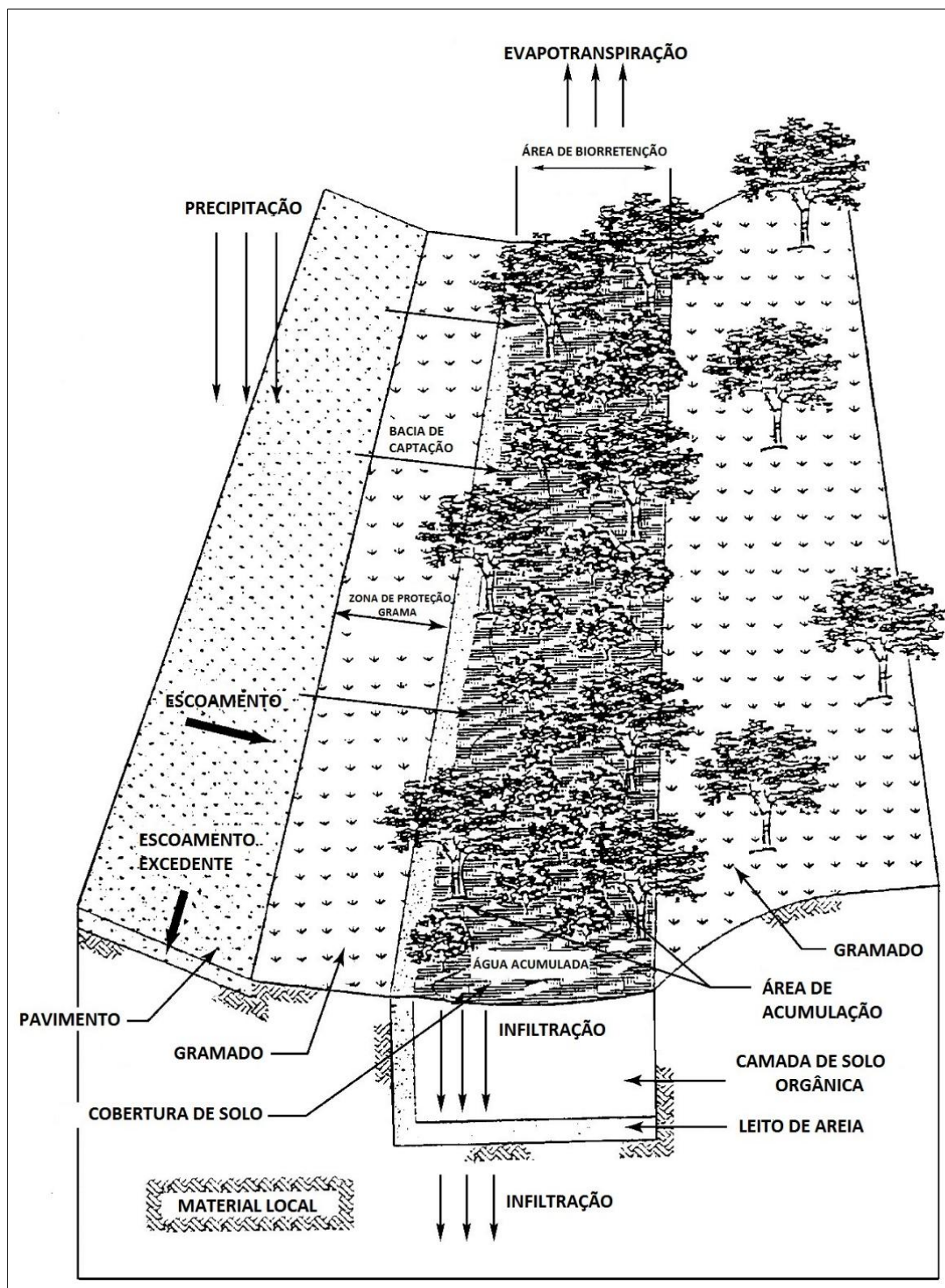
A área de acumulação é uma área rebaixada, a água fica acumulada a uma profundidade de 15 centímetros e gradualmente infiltra para a área de biorretenção ou evapotranspira.

A biorretenção foi desenvolvida para uma ampla gama de aplicações. Para a sua implantação necessita-se de uma análise completa do local do projeto. A análise inicial permite ao projetista implantar as estruturas ao longo do projeto local proposto, sempre considerando os seguintes itens conforme a recomendações do PGDER (2007):

- a) condições do local e as suas restrições;
- b) propostas de uso do solo;
- c) tipos de plantas;
- d) os tipos de solos no local;
- e) poluentes das águas pluviais;
- f) condições da umidade do solo;
- g) drenagem;
- h) recarga de águas subterrâneas.

Por esta razão, a biorretenção é classificada como uma prática de gestão integrada (*IMP – Integrated Management Practice*). Ao contrário de várias outras práticas que controlam apenas as vazões de pico, a biorretenção é projetada para manter ou se aproximar ao máximo das condições hidrológicas pré-existentes (EPA, 2000).

Figura 11 - Esquema típico de uma biorretenção.



Fonte: (PGDER, 1993).

A utilização desta estrutura além de fornecer o controle da quantidade e qualidade do escoamento, segundo PGDER (2007) acrescenta diversidade na paisagem do ambiente construído tais como:

- a) cria uma sensação única de lugar (especialmente com plantas nativas da região);
- b) incentiva a gestão ambiental e a parceria com a comunidade;
- c) proporciona vários benefícios ambientais adicionais (habitat para animais e plantas nativas, melhorando a qualidade do ar, reduzindo o consumo de energia, mitigando climas urbanos);
- d) os valores dos imóveis aumentam até 20% usando-se o paisagismo esteticamente agradável.

De acordo com PGDER (1997) apesar das vantagens, também existem algumas desvantagens. Por exemplo, a construção em regiões onde o nível do lençol freático se localiza próximo à superfície, pode causar a contaminação do mesmo. Outro ponto negativo é a possibilidade de que ocorra a colmatação da estrutura, provocada pelo acúmulo de sedimentos finos no fundo e nas paredes da biorretenção.

Outros pontos de atenção são a falta de informações sobre o funcionamento a longo prazo de tais estruturas em regiões com características hidrológicas semelhantes às encontradas no Brasil, dificultando a determinação de sua vida útil, assim como, medidas de operação, manutenção e dimensionamento.

2.3.2 Processos

A biorretenção é concebida para funcionar da mesma forma como os processos que ocorrem em ambiente natural. Tenta-se reproduzir os processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem na natureza e dependendo do formato da estrutura, em diferentes processos pode-se maximizar ou minimizar a remoção de determinado poluente (EPA, 2000).

Segundo PGDER (2007), os principais processos que ocorrem nas instalações de biorretenção são os seguintes:

- a) *interceptação*: retenção de parte da precipitação acima da superfície do solo devido à vegetação ou obstruções ao escoamento, formando-se poças de água no centro da instalação;

- b) *infiltração*: consiste na passagem da água retida na superfície e a armazenada nos poros do solo para as camadas mais profundas do solo;
- c) *assentamento*: com a formação de poças, partículas e sólidos suspensos se fixarão na superfície proporcionando um pré-tratamento antes da entrada no meio filtrante;
- d) *evaporação*: A lâmina fina de água formada na superfície da biorretenção é transformada em vapor de água pela energia da luz solar;
- e) *filtração*: as partículas são filtradas do escoamento que se move através do solo. Na biorretenção a filtração remove grande parte das partículas carregadas pela água;
- f) *absorção*: a água é absorvida para dentro dos espaços entre as partículas do solo e, em seguida, retoma-se pelas raízes das plantas e os fungos associados;
- g) *transpiração*: perda de água (em forma de vapor) pelas folhas e outras partes das plantas. Estudos estimam que 90% da água absorvida pela vegetação retorna a atmosfera em formato de vapor;
- h) *evapotranspiração*: consiste na união do processo de evaporação e transpiração. A instalação da biorretenção busca maximizar esses processos;
- i) *assimilação*: As plantas capturam os nutrientes e os usa para o seu crescimento e outros processos biológicos. A escolha pelas espécies a serem implantadas deve levar em consideração a capacidade da planta em assimilar certos tipos de poluentes;
- j) *adsorção*: é a atração iônica que mantém uma substância líquida, gasosa ou dissolvida à superfície de um sólido;
- k) *nitrificação*: As bactérias oxidam os íons de amônia e amônio para formar nitrato (NO_3), uma forma altamente solúvel de nitrogênio, que é facilmente utilizada pelas plantas;
- l) *desnitrificação*: quando a quantidade de oxigênio do solo é baixa, as temperaturas são altas e a matéria orgânica é abundante, os microorganismos reduzem o nitrato (NO_3) para formas voláteis, tais como óxido nitroso (N_2O) e gás nitrogênio (N_2), que retornam para a atmosfera;

- m) *volatilização*: convertendo uma substância à forma de vapor mais volátil. Desnitrificação é um exemplo de volatilização, bem como a transformação de hidrocarbonetos complexos em CO₂;
- n) *atenuação térmica*: A atenuação térmica é obtida por filtração do escoamento através do solo de uma biorretenção. Um estudo em uma biorretenção constatou que a temperatura de entrada de escoamento foi reduzida de 33°C para 22°C. A poluição térmica do escoamento urbano eleva os índices de mortalidade de peixes e da degradação do seu *habitat*,
- o) *degradação*: É a transformação química provocada pela quebra de compostos químicos por microrganismos no meio do solo;
- p) *decomposição*: É a transformação de compostos orgânicos pela fauna e fungos do solo.

Todos os processos acima citados ocorrem em intensidades variadas dentro de uma mesma estrutura de biorretenção, tratando-se de um processo complexo e não apenas a simples prática de filtragem.

2.3.3 Eficiência

A biorretenção além da prevenção das enchentes contribui para a biodiversidade dos ambientes, embeleza as áreas, protege os rios, arroios e lagos de contaminantes transportados pelos deságues pluviais urbanos. Estudos têm mostrado que a quantidade de contaminação no escoamento na forma de sedimentos, nutrientes (nitrogênio e fósforo), óleos e gorduras e metais aumenta substancialmente com o desenvolvimento das cidades. Pode-se incorporar as biorretenções nas paisagens para remover os contaminantes gerados a partir de fontes pontuais e não pontuais (PGDER, 1993).

Nos dias atuais, o banco de dados sobre o desempenho de remoção de poluentes nesses sistemas é ainda relativamente pequeno. Os primeiros resultados relatados por Davis et al. (2001) foram promissores e sugeriu que o sistema de biorretenção têm o potencial para ser uma das práticas de gestão de águas pluviais em nível de lote ou loteamento (BMPs) mais eficazes na remoção de contaminantes.

Estes resultados foram confirmados em alguns estudos (ERMILIO e TRAYER, 2006; DIETZ e CLAUSEN, 2006; HUNT et al., 2006 e YU et al., 1999).

O Quadro 2 apresenta dados da eficácia de remoção de contaminantes para os seguintes parâmetros: sólidos suspensos totais (SST), nitrogênio total (NT), fósforo total (TP), metais pesados, incluindo o cobre (Cu), chumbo (Pb) e Zinco (Zn); óleos e gorduras e bactérias patogênicas.

Quadro 2 - Desempenho da remoção de contaminantes em biorretenções.

Parâmetro	% Remoção	Fonte
Sólidos Suspensos Totais (TSS)	97	Hsieh and Davis, 2005b; UNHSC, 2006; Ermillio & Traver, 2006
Fósforo Total (TP)	35 – 65	Davis et al., 2006; Hunt et al., 2006; Ermillio, 2005
Nitrogênio Total (TN)	33 – 66	NHSC, 2006; Hunt et al., 2006; Sharkey, 2006; Davis et al., 2006
Cobre (Cu)	36 – 93	Ermillio, 2005; Davis et al., 2006
Chumbo (Pb)	24 – 99	Ermillio, 2005; Davis et al., 2006
Zinco (Zn)	31 – 99	NHSC, 2006; Ermillio, 2005
Óleos e gorduras	99	NHSC, 2006; Hong et al., 2006
Bactérias patogênicas	70	Hunt et al., 2007

Fonte: (Adaptado de PGDER, 2007).

Ao interceptar o escoamento em áreas perto da fonte, além de benefícios ao meio ambiente existe uma redução de custos, pois os valores aplicados na infraestrutura de drenagem de águas pluviais podem ser reduzidos, resultando em uma economia significativa de custos de instalação. Por exemplo, no edifício do Escritório Médico no Condado de Prince George, Maryland, Estados Unidos da América, a implantação de uma biorretenção reduziu a quantidade da rede de drenagem convencional necessária, de 800 para 230 metros, o que resultou em uma

economia de custo de 24 mil dólares ou 50% do custo de drenagem geral ao local (PGDER, 1993).

As biorretenções são menos dispendiosas do que os sistemas estruturais tradicionais de transporte de águas pluviais. Construção de uma biorretenção no County de Prince George, Maryland é entre US \$ 5.000 e US \$ 10.000 por acre drenado (0,4ha), dependendo do tipo de solo (WEINSTEIN, 2000). Sendo assim, uma alternativa econômica e ambientalmente eficaz para proporcionar tratamento e controle de escoamento de águas pluviais.

2.3.4 Dimensionamento

O dimensionamento de uma biorretenção pode ser realizado por diversos métodos. No entanto, nos próximos itens foram abordados os métodos da Curva-Envelope (URBONAS e STAHRÉ, 1993) e do *Low-Impact Development Hydrologic Analysis* (EPA, 2000) que tem sido os mais mencionados na literatura avaliada.

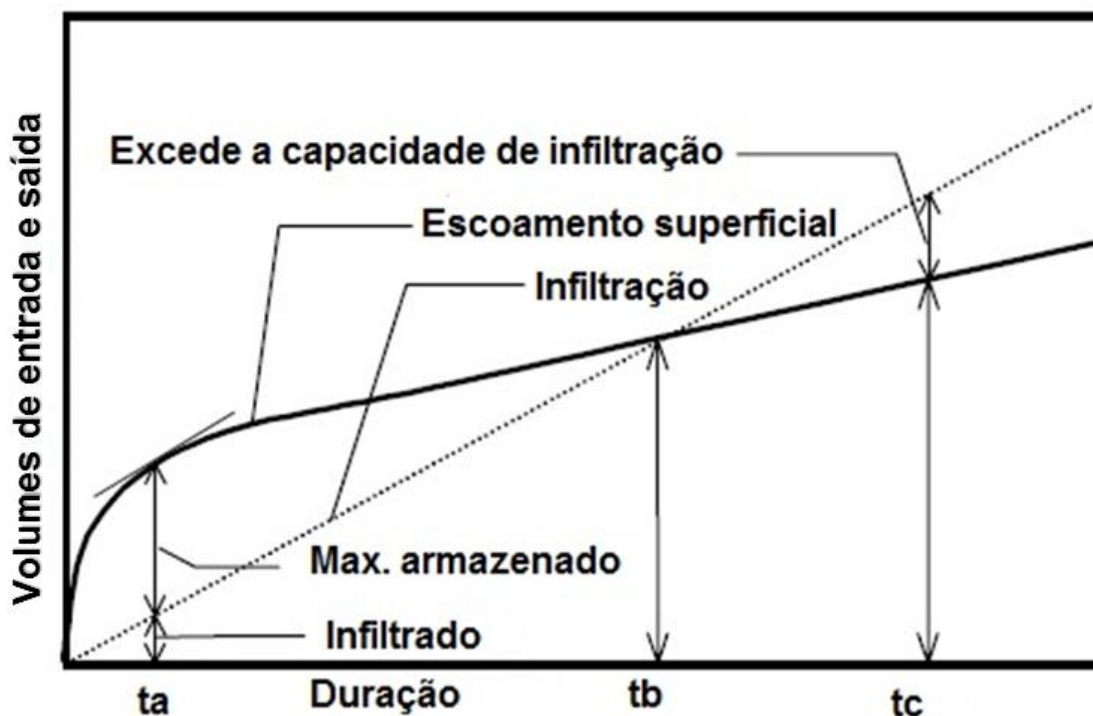
2.3.4.1 Método da Curva-Envelope - “Rain-envelope-method”

A utilização do Método da Curva-Envelope (“rain-envelope-method”) é recomendado por Urbonas e Stahre (1993) por ser um método simples, de aplicação direta dos dados de caracterização do local de implantação e da curva de intensidade-duração-frequência (IDF) do local. O método é baseado na determinação dos volumes acumulados de entrada e de saída do dispositivo.

O volume do dispositivo deverá ser suficiente para armazenar a máxima diferença entre os volumes acumulados de entrada e de saída (Figura 12). Observa-se que sempre deve se considerar a porosidade do material utilizado no preenchimento. Souza (2002) e Melo (2011) são alguns autores brasileiros que aplicaram os princípios do método no dimensionamento em estruturas compensatórias, trincheira de infiltração e jardim de chuva, respectivamente.

O PDDrU Porto Alegre (2005) apresenta o passo-a-passo para aplicação do Método da Curva-Envelope. Como foi aplicado neste trabalho, este método será apresentado em detalhe na análise da metodologia no Capítulo 3.

Figura 12 - Método da curva envelope.



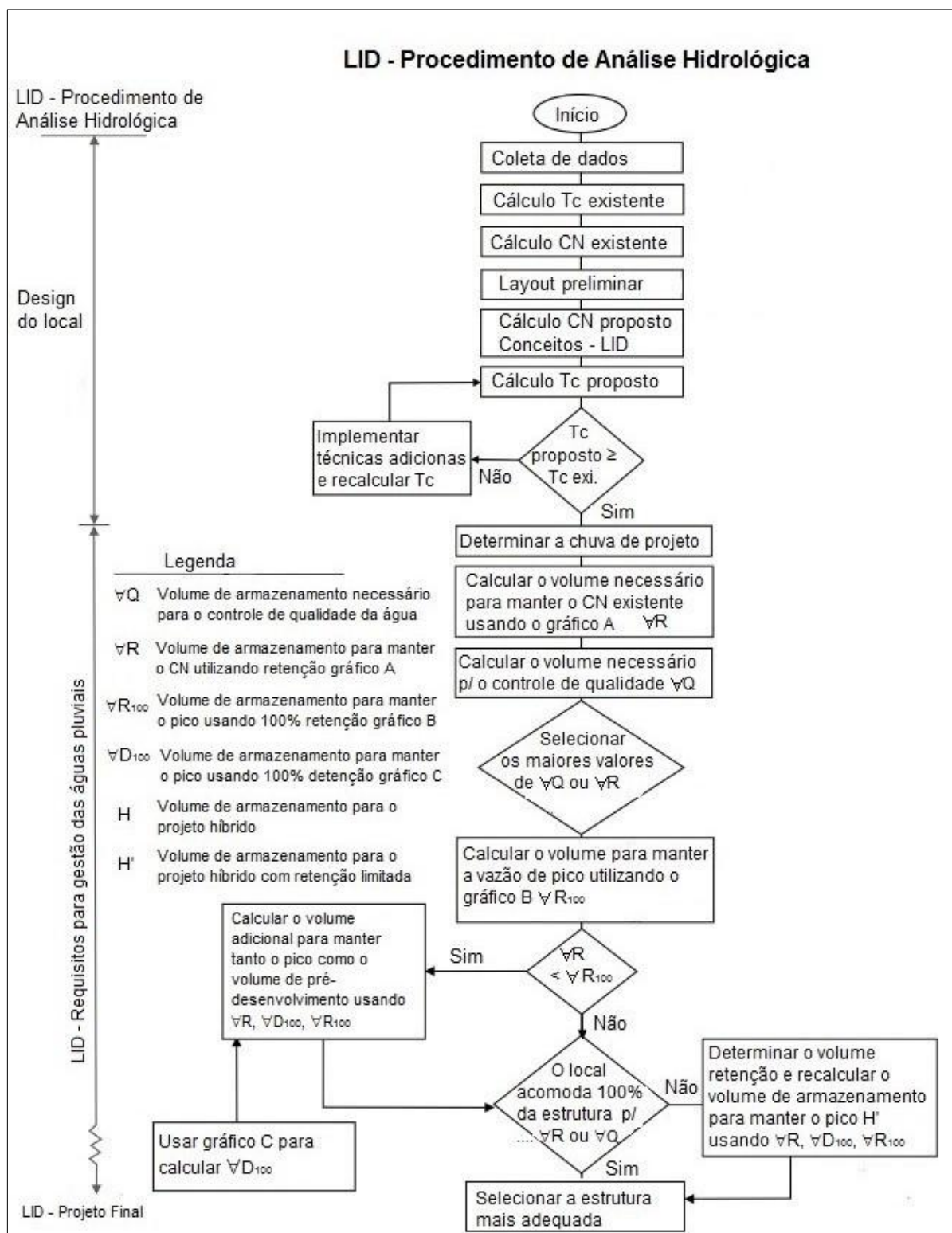
Fonte: (URBONAS E STAHR, 1993 apud PDDrU Porto Alegre, 2005).

2.3.4.2 Método do LID Hydrologic Analysis

O método do LID *Hydrologic Analysis*, conhecido como método americano, segue os critérios de projeto seguidos pelo Condado de Prince George, isto é, baseia-se na análise hidrológica contida no documento *Low-Impact Development Hydrologic Analysis* (EPA, 2000). Consiste basicamente, na determinação do volume a ser armazenado para que a vazão de pós-urbanização não supere a vazão máxima atual.

O dimensionamento é um processo de tomada de decisão em sequência, que pode ser ilustrado pelo diagrama de fluxo mostrado na Figura 13. O método baseia-se no Soil Conservation Service (SCS) modelo hidrológico TR-55 (SCS, 1986) e nos mesmos conceitos de armazenamento em reservatórios de detenção. Assim, eventualmente o dimensionamento pode ser realizado pela metodologia de PULS.

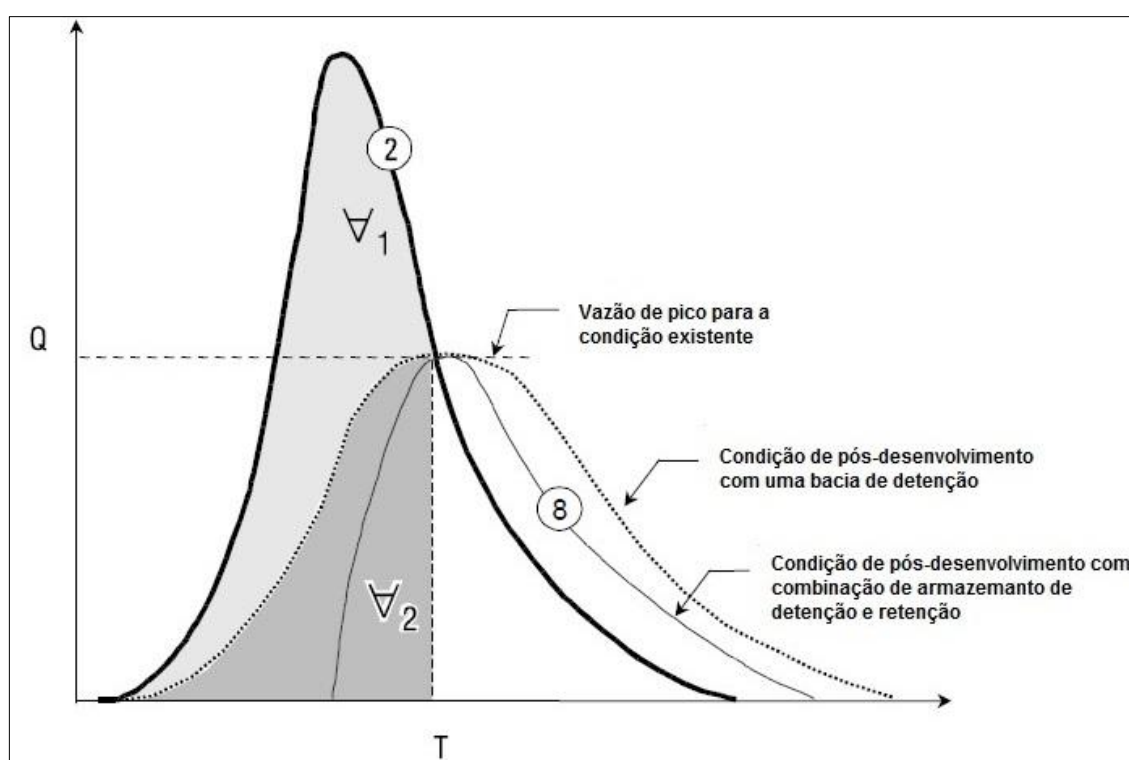
Figura 13 - Procedimento para determinar a porcentagem de área local necessário para manter o volume de escoamento de pré-desenvolvimento e vazão de pico.



Fonte: (Adaptado de EPA, 2000).

A metodologia é representada em forma esquemática na Figura 14. O objetivo foi estimar o volume necessário para que a vazão para o cenário futuro (representada pela linha 2) não supere a vazão máxima atual ou vazão de pré-desenvolvimento ou vazão máxima limite estabelecida pela legislação local (linha de traços). A vazão de pico atual é considerada como a vazão limite máxima que pode sair num determinado momento do empreendimento.

Figura 14 - Volume de armazenamento necessário para manter a vazão de pico de pré-desenvolvimento.



Fonte: (Adaptado de EPA, 2000).

O volume ∇_1 representa o volume que seria armazenado se fosse utilizado um reservatório para o amortecimento das vazões. Como no caso de uma biorretenção, a mesma irá se esgotar somente por infiltração/evapotranspiração que se desenvolvem em tempos muito grandes em relação ao do evento de chuva (a diferença de um reservatório, por exemplo, em que a água irá esvaziar pelo descarregador de fundo), é necessário armazenar ainda a área marcada por ∇_2 . Desta forma o volume necessário em uma biorretenção (que ainda deve ser multiplicado pela porosidade do material, já que a água somente pode ser

armazenada nos vazios do solo) sempre será maior que de um reservatório de detenção.

O volume infiltrado/evapotranspirado durante o evento de chuva pode eventualmente ser reduzido do volume a armazenar (reduzindo $\nabla 2$). No entanto, considerando a eventual colmatação do solo, se sugere que quando o projetista opte por reduzir o valor, em nenhuma circunstância realizar uma redução maior a 10% do volume.

Esse volume é ainda comparado com o volume necessário para melhorar a qualidade d'água. Que baseia-se na obrigação de tratar os primeiros 12,5mm de chuva efetiva das áreas impermeáveis. O volume final da biorretenção será o maior das duas medidas (tratamento quantitativo ou qualitativo). Sendo necessário realizar vistorias para averiguação de que o esvaziamento deste volume aconteça antes do próximo evento de chuva.

2.3.5 Infiltração

Em ambas as metodologias apresentadas, o conhecimento das características do solo é essencial para a qualidade e confiabilidade dos resultados. Sendo a infiltração, um dos fatores alterados pela urbanização, cuja definição é “a passagem da água através da superfície do solo, passando pelos poros e atingindo o interior, ou perfil, do solo” (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013), e que tem grande peso no processo decisório e no dimensionamento das estruturas de infiltração.

Para calcular a infiltração, segundo Brandão et al. (2009), deve-se fazer uso de métodos simples e capazes de representar, adequadamente, as condições em que se encontra o solo. Sendo recomendado o método do infiltrômetro de anel que consiste de dois anéis posicionados de forma concêntrica no solo. O anel central deve ter um diâmetro interno da ordem de 300mm, já o externo deve ter diâmetro de 600 mm, com altura de aproximadamente 300mm para os 2 anéis.

De acordo com Rezende (2010), os anéis devem ser fixados no solo de forma vertical. O anel externo tem como função a redução do efeito da dispersão lateral da água infiltrada do anel interno. Assim, a água do anel interno infiltra no perfil do solo de forma vertical evitando desta forma a superestimativa da taxa de infiltração.

Brandão (2006) ressalta que durante a realização do ensaio deve-se manter uma lâmina de água dentro do cilindro interno de 30 a 50 mm, podendo ser medida de tempos em tempos com o uso de uma régua na vertical. E manter uma lâmina de água no anel externo para assegurar a ininterruptão no processo de infiltração e por consequência ocorrer a dispersão lateral da água infiltrada a partir do anel interno. O processo todo deve ser mantido até que a taxa de infiltração, torne-se aproximadamente constante com o tempo, no anel central.

Outra forma de cálculo é sugerida pela norma brasileira (NBR 13969/1997) de Tanques sépticos – Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – Projeto, construção e operação da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que apresenta o procedimento para estimar a capacidade de percolação da água no solo. O ensaio sugerido é simples, de fácil instalação e execução, consiste, basicamente, na escavação de uma cava ou perfuração vertical na profundidade pretendida para a construção da estrutura, o fundo regularizado com uma fina camada de brita e preenchida com água. Após, em intervalos de tempo pré-determinados são realizadas as medições dos níveis de água no interior da cava.

Segundo a norma ABNT-NBR 13969/1997, o procedimento de preparação do local e execução do ensaio de percolação deve seguir os seguintes passos:

- a) determinar no mínimo 3 pontos de ensaios, distribuídos de modo a cobrir áreas iguais no local utilizado para campo de infiltração;
- b) escavar uma cava vertical com o uso de trado de 150 mm, de modo que o fundo da cava fique próximo ao nível previsto para o fundo das valas;
- c) limpar a cava, retirando todos os materiais soltos no fundo e cobri-lo com aproximadamente 0,05 m de brita;
- d) colocar água na cava até a profundidade de 0,3 m do fundo e manter constante este nível durante 4 h, pelo menos, completando com água sempre que o nível baixar.

No dimensionamento de uma biorretenção, para expressar matematicamente a infiltração da água nos solos costuma-se extrair alguns parâmetros a partir de diversas fórmulas propostas (Quadro 3). São equações que foram desenvolvidas empiricamente ou a partir de considerações físicas, por exemplo, o modelo de Kostiaikov (1932) e o modelo de Horton (1940). Por este último apresentar resultados mais consistentes (Brandão et al., 2006) será detalhado em um item separado.

Quadro 3 - Alguns modelos de infiltração empíricos presentes na literatura.

Modelo	Equação	Observações
Kostiakov (1932)	$I = k \cdot t^\alpha$	k e α são constantes que dependem do solo, t é intervalo de tempo.
Kostiakov-Lewis	$I = k \cdot t^\alpha + i_f \cdot t$	k e α são constantes que dependem do solo, t é intervalo de tempo, i_f é a taxa de infiltração estável.
Horton (1940)	$f = f_b + (f_o + f_b)e^{-k \cdot t}$	f a taxa de infiltração no instante t , f_b é a taxa de infiltração saturada, f_o é a taxa de infiltração inicial, t é o tempo, e k constante que depende do solo.
Holtan (1967)	$i = i_f + a \cdot (M - I)^n$	i é a capacidade de infiltração, M é o armazenamento potencial do solo, I é a infiltração acumulada, i_f é a taxa de infiltração estável, a e n são parâmetros que dependem do solo e do tipo de cobertura.

Fonte: (Adaptado de Brandão, 2006).

2.3.5.1 Equação de Horton

Para Libardi (1995), a equação de Horton (Equação 1) tem grande vantagem na explicação da lei de infiltração, pois, é baseada na teoria física de escoamento em meio poroso, apresentada por Darcy (1856).

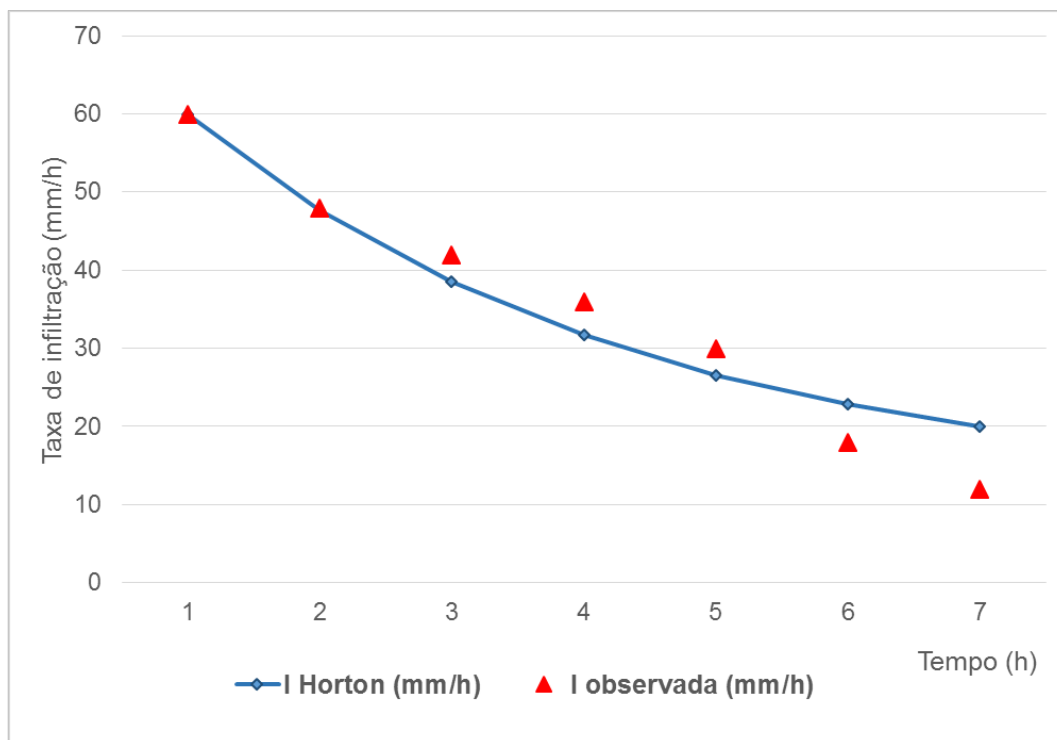
Horton (1940) observou que a redução da taxa de infiltração com o tempo é fortemente controlada por fatores que ocorrem na superfície do solo, como também, concluiu que a taxa de infiltração se aproxima de um valor constante.

$$f = f_b + (f_o + f_b)e^{-k \cdot t} \quad (1)$$

Na Figura 15 temos o exemplo de ajuste da Equação de Horton: sendo: **f** a taxa de infiltração decorrido o tempo **t** (mm/hora); **f_b** é a taxa de infiltração básica, na condição de saturação (mm/hora); **f_o** é a taxa de infiltração inicial (**t=0**) (mm/hora); **t** é

o tempo (horas); e k constante relacionada às características do solo e que determina o tempo necessário para f atingir o valor de f_b partindo do seu valor inicial.

Figura 15 - Exemplo de ajuste da Equação de Horton.



Fonte: Autora.

2.3.5.2 Implementação de um sistema de biorretenção

Os sistemas de biorretenção são bastante flexíveis no projeto, proporcionando ao projetista ser bastante criativo. No entanto, para desenvolver um projeto bem sucedido é necessário ter em mente uma série de problemas de design, para realizar as adequações corretas no projeto.

Primeiramente, de acordo com PGDER (2007), é necessário fazer um balanço das condições existentes no local de implementação da estrutura. Ele deve conter a localização da área, a identificação de problemas como erosão, compactação, o excesso de volume escoado e declividade do terreno, e também os atributos positivos (um bom ponto de vista, uma boa planta de amostra, etc.). Deverá incluir outros fatores ambientais, tais como os padrões de vento, padrões de sol e problemas de ruído e fatores de infraestrutura (fundações, limites da propriedade, estradas e edifícios próximos, entre outros).

Além disso, as áreas de conservação para preservação da vegetação existente, também são motivos de preocupação ao projetar ou na instalação de uma estrutura de biorretenção. Também, segundo PGDER (1993) é necessário observar o volume de água escoado para fora do local em um evento de chuva típico, definindo os padrões de movimento da água dentro do empreendimento.

Para facilitar a análise, é recomendada a confecção de um mapa do local as informações podem variar de local para local, podendo-se acrescentar mais itens ao mapa, onde as seguintes informações básicas devem estar apresentadas:

- a) limites do terreno;
- b) estruturas nas proximidades;
- c) instalações existentes no terreno;
- d) como as pessoas se movem através da área;
- e) tipos de solos encontrados no local, e demarcar os locais onde há problemas relacionados com o solo, como por exemplo, erosão;
- f) declividade e suas variações no terreno;
- g) identificar as fontes de água;
- h) determinar o ponto de umidade no solo local, e as regiões que são úmidas e secas;
- i) determinar os locais de maior e menor exposição solar;
- j) determinar a vegetação existente, a que deverá ser mantida como também a que irá ser retirada;
- k) determinar as áreas impermeáveis no estabelecimento.

Após a confecção do mapa, se faz a análise do processo, atribuindo valores para as informações coletadas conforme a importância na construção da biorretenção, para a determinação do melhor local de implantação, do dimensionamento necessário e se haverá da necessidade de se instalar ou não outra estrutura compensatória.

Nesta fase tem-se os seguintes passos:

- a) determinação do posicionamento ideal e do tamanho, com base na análise de onde a água fica retida após a chuva, o local da fonte de água e como ela se movimenta na propriedade;
- b) definição da movimentação das pessoas através da área;
- c) outras considerações de projeto, tais como pontos de vista, a vida selvagem, a proximidade desejada;

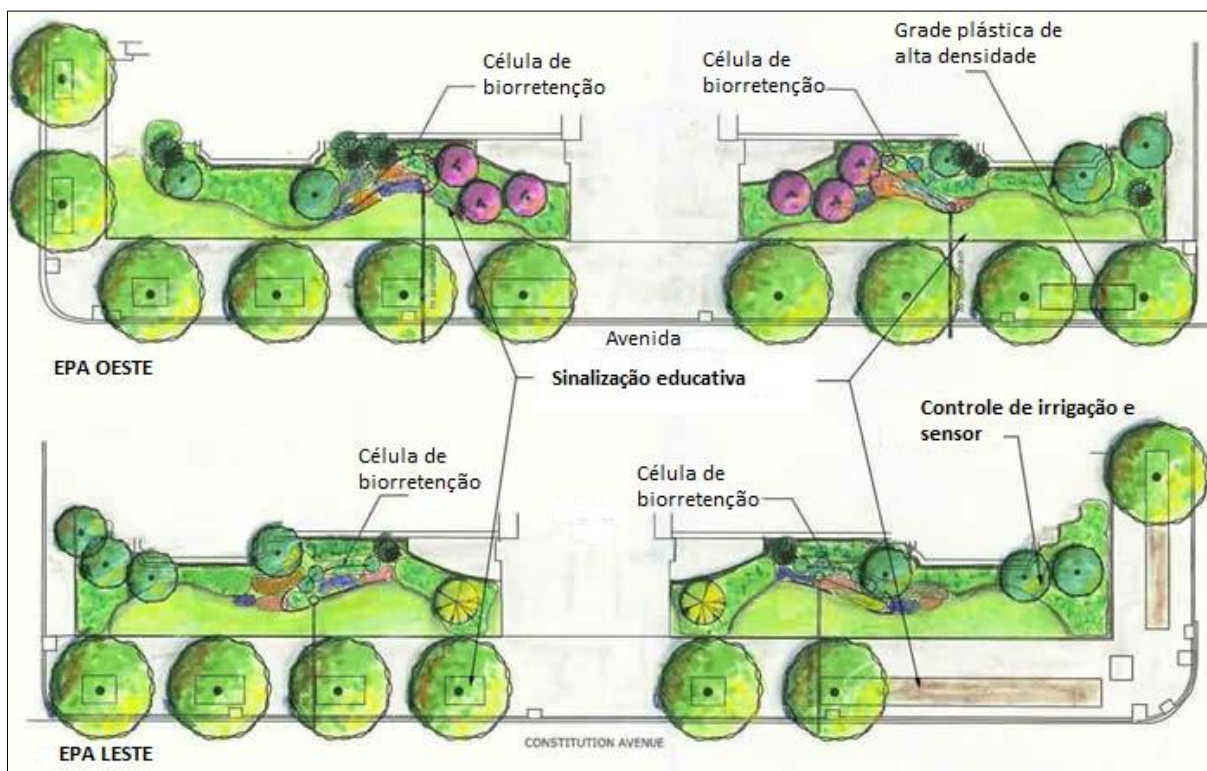
- d) custos (escavação, mudas e outros);
- e) determinação do modelo a ser usado com base em: plantas adequadas ao local, os níveis de luz, condições de umidade, tipos de solo, funções desejadas (social, ambiental ou estética) e as práticas de manutenção desejada.

Uma vez que o tamanho e a localização estejam resolvidos, é fundamental a determinação das espécies vegetais mais adequadas para o plantio. O produto final deve ser funcional e visualmente agradável (Figura 16 e Figura 17). As plantas devem ser capazes de lidar com os extremos, do molhado ao seco, como também, tolerar concentrações de contaminantes que possam encontrar no escoamento. Breda (2011) fez uma avaliação de diferentes espécies vegetais para implantação no Brasil.

O sucesso das estruturas de biorretenção é dependente das especificações técnicas de instalação. As especificações incluem os procedimentos para instalar as plantas e as medidas necessárias tomadas antes e após a instalação. De acordo com PGDER, (2007) as especificações projetadas para biorretenção devem incluir as seguintes considerações:

- a) sequência de construção: A sequência de construção descreve as atividades de preparação do local, como classificação, alterações do solo, previsão para compactação de solos. Ele também deve abordar os procedimentos de controle de erosão e sedimentos.
- b) programação e especificações de plantio: O cronograma e as especificações de plantio incluem o tipo de material a ser instalado, o tempo de instalação e os procedimentos pré e pós-instalação (transporte de material vegetal, preparação da cova de plantio, fertilização, instalação de material vegetal, estabilização de semeadura (se aplicável) e rega e cuidados gerais).
- c) manutenção: As necessidades de manutenção de áreas de biorretenção pouco diferem de outras áreas de paisagem. No entanto, é importante o uso de práticas de manutenção que não comprometam a capacidade de remoção de poluentes da instalação. Evitar o bloqueio dos pontos de entrada de vazões e do fluxo de dispersão ao longo de toda a área de superfície das instalações causados por cobertura vegetal morta amontoada ou plantações levantadas.

Figura 16 - Esquema de implantação de uma biorretenção.



Fonte: (Adaptado de EPA, 2014).

Figura 17- Biorretenção em um estacionamento.



Fonte: (BAE, 2014).

3 METODOLOGIA

3.1 INTRODUÇÃO

Neste estudo, buscou-se analisar o desempenho das metodologias de dimensionamento para estruturas de biorretenção, o Método da Curva-Envelope e o Método do LID Hydrologic Analysis, comparando as dimensões encontradas com a estrutura implementada na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). A metodologia básica consta das seguintes etapas:

- a) Primeira: procedeu-se à coleta de dados de infiltração a partir dos ensaios de infiltração, dos dados monitorados de 2011 a 2013 e do teste de estresse da estrutura;
- b) Segunda: a partir desses dados, ajustou-se as curvas de infiltração de Horton e procedeu-se ao dimensionamento através das metodologias analisadas (Método da Curva-Envelope e Método do LID);
- c) Terceira: foram analisados os resultados dos dimensionamentos com o comportamento real da estrutura construída no Campus da UFSM.

A seguir são descritos o local da realização do estudo e a metodologia utilizada.

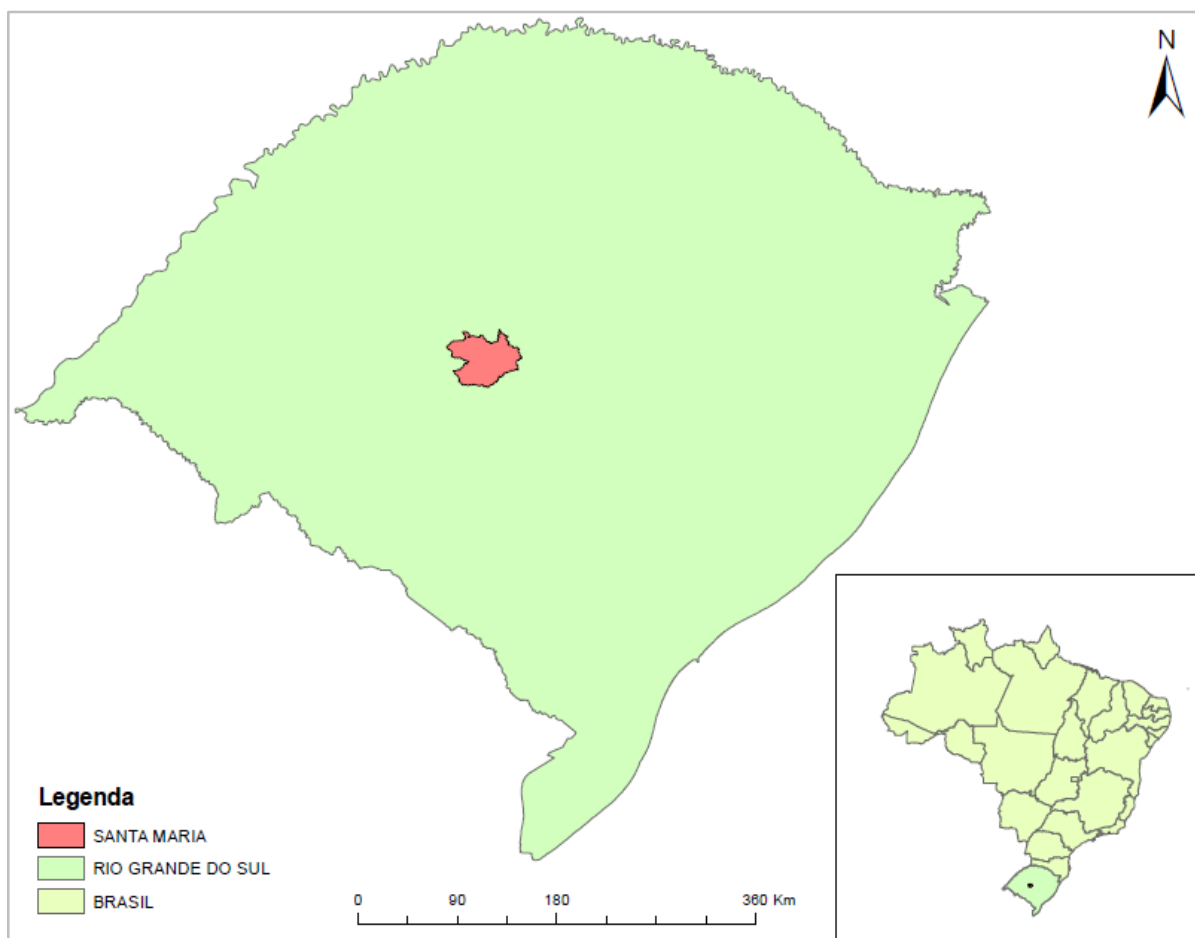
3.2 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O local escolhido para o presente trabalho foi o experimento instalado no Campus Sede da UFSM, no município de Santa Maria, Rio Grande do Sul (Figura 18). Santa Maria é considerada uma cidade média e de grande influência na região central do estado. Com população aproximada de 261 mil habitantes e uma área territorial aproximada de 1.788,121 km².

O clima da região pode ser classificado como sendo mesotérmico brando, utilizando a classificação de Köppen (apud AYOADE, 1986). Apresenta os invernos frios, com temperatura média no mês mais frio entre 13°C e 15°C e média das mínimas entre 8°C e 10°C. Os verões quentes, com temperatura média do mês mais quente, superior a 24°C, média das máximas variando entre 28°C e 32°C e as máximas absolutas podendo oscilar em torno dos 39°C. Tendo temperaturas médias anuais entre 16°C e 20°C. Em relação ao regime das precipitações, são regulares durante

todo o ano, com índices pluviométricos anuais entre 1500 mm e 1600 mm. Os ventos predominantes são de leste e sudeste (FACCO et al., 2012).

Figura 18 – Mapa do Rio Grande do Sul.



Fonte: Autora.

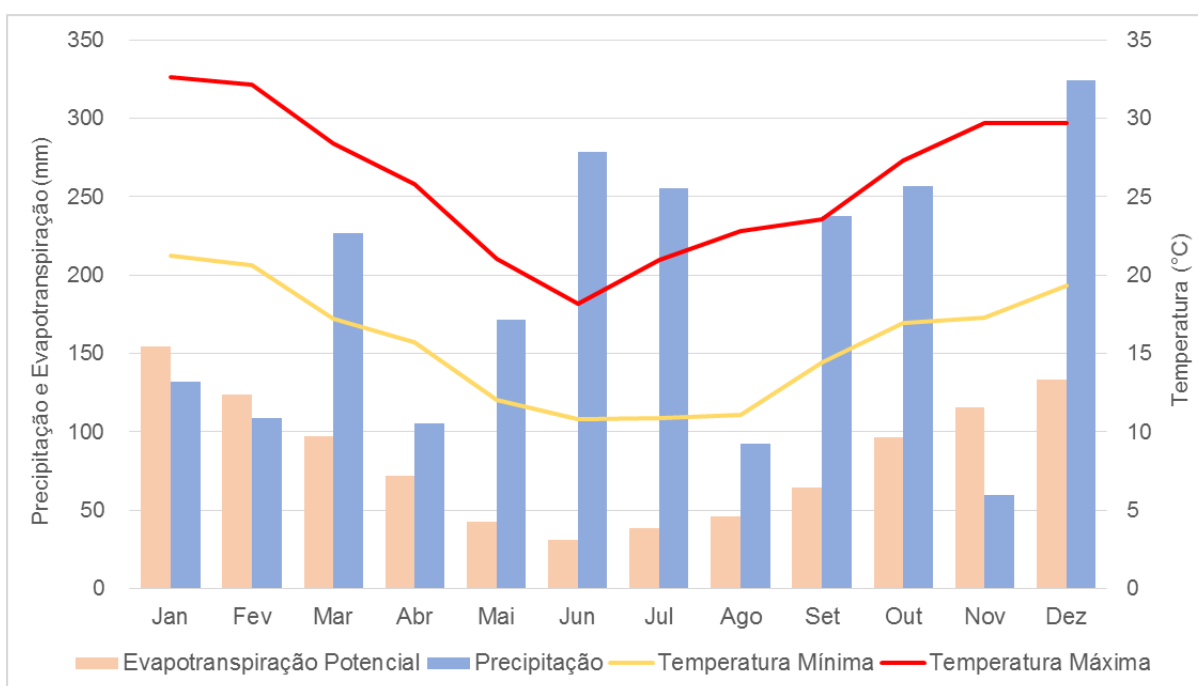
Conforme Figura 19, observa-se os principais elementos climatológicos do município de Santa Maria/RS para o ano 2014, fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

No município, foi desenvolvida uma biorretenção com recursos do edital Auxílio Recém Doutor (ARD) da Fundação de Amparo à Pesquisa do Rio Grande do Sul (FAPERGS). Construída no campus da Universidade Federal de Santa Maria, em Santa Maria/RS, próximo do Laboratório de Hidráulica do Centro de Tecnologia (Figura 20). Posteriormente, Daniel Jr. (2013) avaliou seu funcionamento no controle quali/quantitativo dos efluentes pluviais. Os dados observados nesta estrutura foram utilizados no presente estudo a fim de se avaliar as metodologias apresentadas.

Para o dimensionamento da biorretenção implementada no campus, foi considerada uma área total de captação (telhado) de 85,00 m². Adotou-se que a evapotranspiração diária seria de 3 mm/dia e a infiltração de 1 mm/h, reduzida por um coeficiente de segurança de 1,5. Os volumes de entrada foram calculados através da IDF local, considerando um coeficiente de escoamento de 0,95, resultando uma estrutura semelhante à da Figura 21.

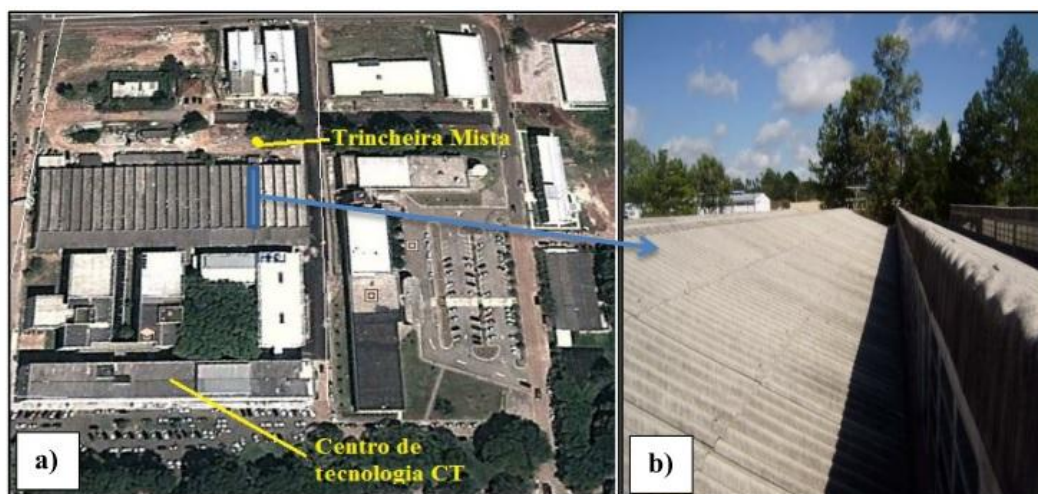
Construída nas seguintes dimensões: 2,00 m de largura, 4,00 m de comprimento e 1,20 m de profundidade. Para o preenchimento da estrutura foram utilizados resíduos da construção civil (tijolos e materiais cerâmicos), pneus, brita, areia e solo. E para cobertura vegetal foram plantadas mudas de bananeira (*Musa velutina*), Taioba (*Xanthosoma sagittifolium*) e espécies do gênero *Canna*.

Figura 19 - Dados climatológicos do município de Santa Maria (2014).



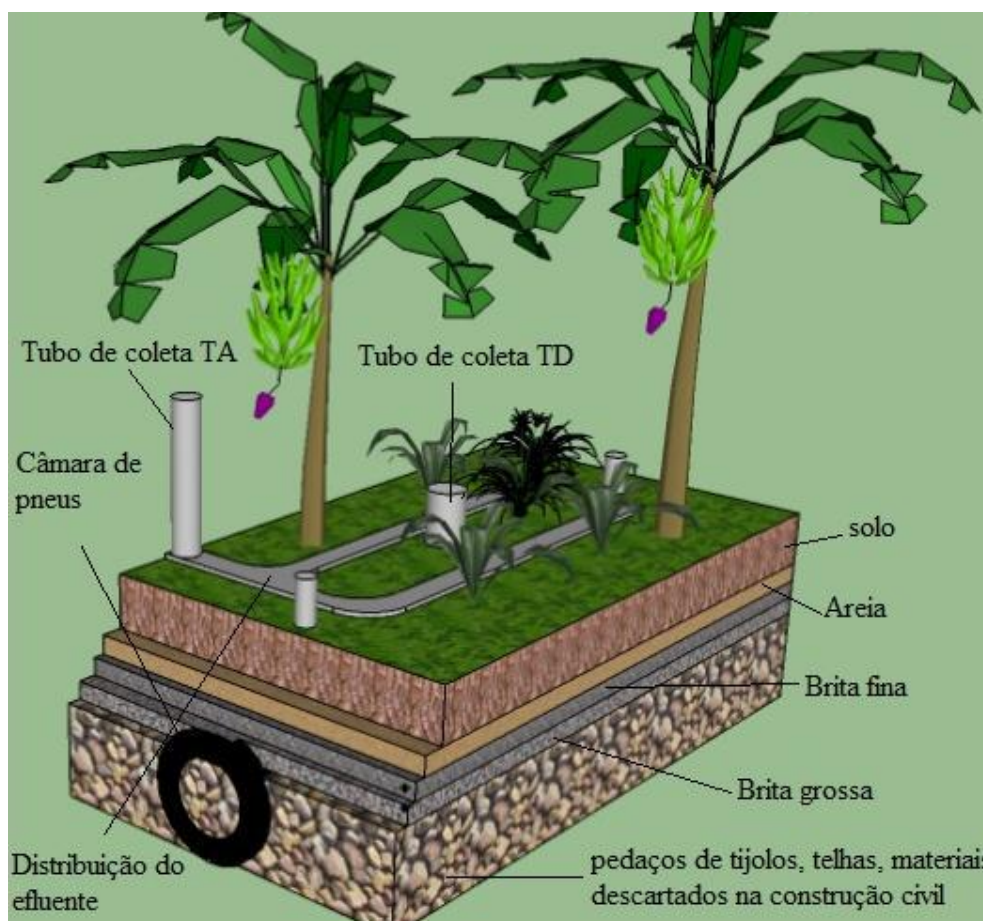
Fonte: (Adaptação INMET, 2015).

Figura 20 - a) Localização do experimento. b) Área de captação das águas que compõem a trincheira.



Fonte: (DANIEL JR., UFSM, 2013).

Figura 21 - Modelo esquemático da biorretenção.



Fonte: (DANIEL JR., UFSM, 2013).

3.3 LEVANTAMENTO DAS CONDIÇÕES ANTECEDENTES DO SOLO

Dentro da classificação de solos do Soil Conservation Service – SCS (SCS,1969), foi reconhecida a importância da condição antecedente do solo, pois o mesmo poderá estar em condições normais ou muito seco ou muito úmido, afetando diretamente o comportamento da taxa de infiltração durante um evento de precipitação.

Por uma questão de segurança, muitos métodos de dimensionamento consideram, no momento do cálculo de estruturas de infiltração, o solo na pior condição, ou seja, totalmente saturado. Com o objetivo de verificar se é uma decisão coerente ou muito conservadora, será feito o levantamento das condições antecedentes do solo.

A classificação é dividida em três condições: solo seco (ARC I), condições médias (ARC II) e solo úmido (ARC III) para os períodos: latente e de crescimento da vegetação (Quadro 4).

Quadro 4 - Condições do solo e os limites de 5 dias de chuva antecedente.

Grupo	Chuva antecedente de 5 dias em mm	
	Período latente	Período de crescimento
ARC I – Solo seco	< 13	< 36
ARC II – Condições médias	13 a 28	36 a 53
ARC III – Solo úmido	> 28	> 53

Fonte: (Adaptado de NEH-4, 1964).

Com base no Quadro 4 e com os dados diários de precipitação do período de 1961 a 2014 disponíveis no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP), foi elaborado o levantamento anual e o mensal (junho, julho e agosto) das condições antecedentes do local de estudo, do referido período. Trabalhou-se com o auxílio de planilha de cálculo conforme a Figura 22.

Figura 22 - Planilha de cálculo utilizada para o levantamento das condições antecedentes.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Estação	Data	Precipitação	P-F		Estação	83936		
6212	83936	22/06/1979	0	0		01/01/1978	1.2	72.10	Condição 3
6213	83936	23/06/1979	0	0		02/01/1978	0	72.10	Condição 3
6214	83936	24/06/1979	8.2	8.2		03/01/1978	0	72.10	Condição 3
6215	83936	25/06/1979	0.4	0.4		04/01/1978	0	56.20	Condição 3
6216	83936	26/06/1979	0	0		05/01/1978	44	45.20	Condição 2
6217	83936	27/06/1979	0	0		06/01/1978	8.8	52.80	Condição 2
6218	83936	28/06/1979	0	0		07/01/1978	0	52.80	Condição 2
6219	83936	29/06/1979	0.1	0.1		08/01/1978	0	52.80	Condição 2
6220	83936	30/06/1979	0.2	0.2		09/01/1978	0	52.80	Condição 2
6221	83936	03/07/1979	8.4	8.4		10/01/1978	0	8.80	Condição 1

Fonte: Autora.

3.4 COLETA DE DADOS

O conhecimento do clima e das demais características do local são atributos importantes a serem considerados na hora de projetar e construir os sistemas de biorretenção. Os eventos de chuva foram quantificados através do pluviógrafo instalado na parte superior do telhado do laboratório de hidráulica. Além disso, obteve-se informações adicionais (temperatura, evapotranspiração, pressão entre outras) da estação automática do INMET (Código OMM 86977), instalada na UFSM.

Foram coletados os dados de infiltração a partir dos ensaios de infiltração, do monitoramento realizado de 2011 a 2013 e do teste de estresse da estrutura de biorretenção.

3.4.1 Ensaios de infiltração segundo a NBR 13969/97

A primeira técnica testada para a determinação da taxa de infiltração foi o ensaio recomendado pela NBR 13969/97 (Tanques sépticos: Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – Projeto, construção e operação), com algumas modificações objetivando simular um evento real.

Primeiramente, executou-se a limpeza do local (Figura 23a) e fez-se uma análise visual e de textura do solo (Figura 23b), através da qual se verificou que suas

características enquadram-se no grupo C da metodologia do SCS, isto é, solos que geram escoamento superficial acima da média quando molhados (NEH, 2009).

Figura 23 - a) Biorretenção construída na UFSM b) Solo retirado da cava de ensaio



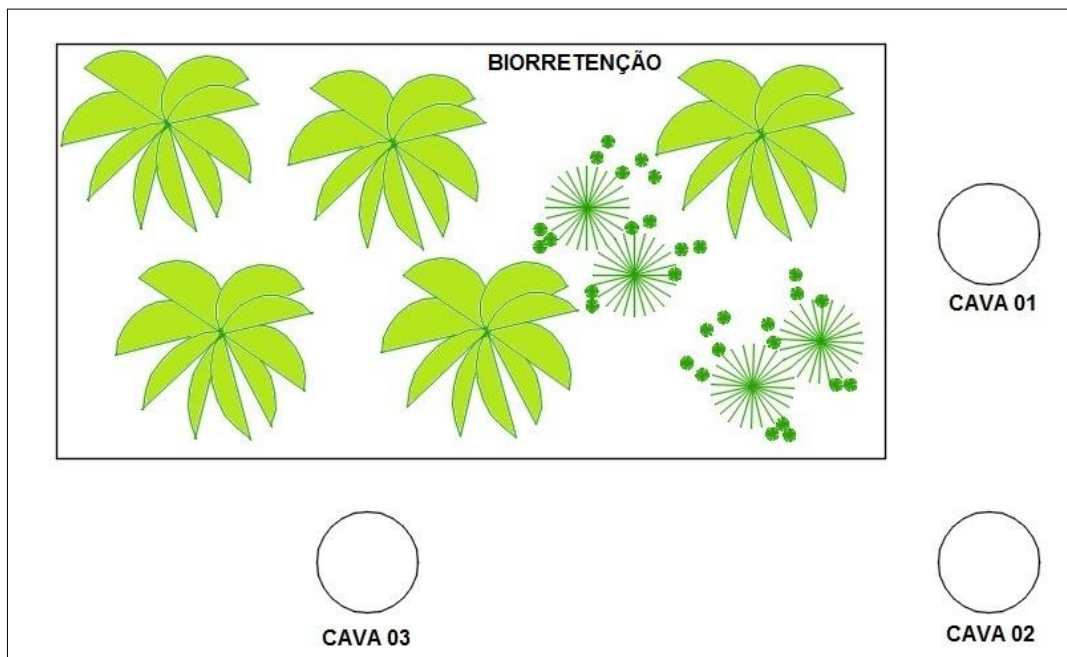
Fonte: Autora.

Posteriormente, escavou-se três cavas (Figura 24) distribuídas pela área de instalação, com profundidade aproximada de 1,00m e preenchidas com 0,05m de brita, para a regularização do fundo.

Na cava 01 (Ensaio 01), seguiu-se todos os requisitos apresentados na NBR 13969/97, iniciou-se com a etapa preliminar de saturação do solo, enchendo-se a cava com água até a profundidade de 0,30m, sendo mantida nessa condição durante 4 horas, fazendo-se a reposição quando necessário. Nas demais cavas, a adição de água foi feita somente no momento do ensaio.

As medições na cava 01 (Figura 25) foram realizadas a cada 30 minutos com a medição do nível de água e as reposições ao nível de 0,15m (manutenção da condição de carga constante). As coletas das medidas foram feitas até que a diferença de rebaixamento dos níveis entre duas determinações sucessivas fosse menor a 0,015m.

Figura 24 - Localização das cavas.



Fonte: Autora.

Figura 25 - Cava 01 com nível de água em 0,15m.



Fonte: Autora.

Na cava 02 (Ensaio 02), adicionou-se 0,30m de água e as coletas das medidas dos níveis foram realizadas em intervalos de 10 minutos, até que a taxa de infiltração fosse igual em três medições consecutivas. Não se manteve uma carga constante

durante o período de coleta das medidas e não se realizou a saturação preliminar do solo para simular uma situação real onde o solo encontra-se seco ou pouco úmido.

Na cava 03 (Ensaio 03) foi adicionado 0,40m de profundidade de água, porém, a medição dos níveis foi realizada através de um sensor de nível e vazão (SL2000-NV da marca Solar) até o esvaziamento completo da cava.

Durante a execução dos ensaios foi confeccionado uma planilha padrão para coleta dos dados, conforme Figura 26.

Figura 26 - Tabela padrão confeccionada para a coleta de dados de infiltração.

Hora	t (min)	t (h)	Nível (cm)	Diferença (cm)
13:40	0	0.00	15.00	0.00
14:10	30	0.50	14.00	1.00
14:40	60	1.00	14.00	1.00
15:10	90	1.50	14.00	1.00
15:40	120	2.00	14.00	1.00
16:10	150	2.50	14.20	0.80
16:40	180	3.00	14.20	0.80
17:10	210	3.50	14.20	0.80

Fonte: Autora.

3.4.2 Dados monitorados

O grupo Ecotecnologias disponibilizou os dados coletados por Daniel Jr. (2013) do período de 2011, isto é, de quando a biorretenção foi construída e entrou em funcionamento, até em 2013 (Figura 27). No início de 2014, quando seriam retomadas as atividades, foi verificado que os sensores de pressão apresentavam problemas técnicos e em função do alto custo do conserto, impossibilitou temporariamente o monitoramento quantitativo da mesma.

Para o monitoramento do nível no interior da biorretenção, foi utilizado um sensor de nível por pressão (SL2000-NV da marca Solar), instalado no interior da mesma, registrando o nível acumulado. Já para o registro dos eventos de precipitação instalou-se um pluviógrafo no telhado. Os valores de nível e precipitação foram

registrados pelo equipamento em metros e milímetros respectivamente, para um intervalo de tempo de 5 minutos.

Assim, observando todos os dados de níveis disponíveis foi averiguado que, após estar em pleno funcionamento a estrutura em nenhum momento atingiu o seu nível máximo.

Figura 27 - Planilha dos dados monitorados disponibilizada pelo Ecotecnologias.

	A	B	C	D	E	F
1	datahora	hora	P mm	data	nível M	Correção precipitação
2	19/04/2011 15:44	15:44:01	0	19/04/2011	0.003482	0
3	19/04/2011 15:49	15:49:01	0	19/04/2011	0.003482	0
4	19/04/2011 15:54	15:54:01	0	19/04/2011	0.003482	0
5	19/04/2011 15:59	15:59:01	0	19/04/2011	0.003482	0
6	19/04/2011 16:04	16:04:01	0	19/04/2011	0.005056	0
7	19/04/2011 16:09	16:09:01	0	19/04/2011	0.003482	0
8	19/04/2011 16:14	16:14:01	0	19/04/2011	0.005056	0
9	19/04/2011 16:19	16:19:01	0	19/04/2011	0.003482	0
10	19/04/2011 16:24	16:24:01	0	19/04/2011	0.003482	0
11	19/04/2011 16:29	16:29:01	0	19/04/2011	0.003482	0
12	19/04/2011 16:34	16:34:01	0	19/04/2011	0.003482	0
13	19/04/2011 16:39	16:39:01	0	19/04/2011	0.003482	0
14	19/04/2011 16:44	16:44:01	0	19/04/2011	0.003482	0

Fonte: Ecotecnologias.

3.4.3 Teste de estresse

Em função da escassez de informações para a estimativa da vida útil de dispositivos de infiltração para a região e da perda de eficiência dos mesmos em função da colmatção.

Ao final de período desta pesquisa (dezembro de 2015), foi realizado um teste de estresse na estrutura, que consistiu no enchimento da biorretenção até a água ser visível na superfície (Figura 28). E para o monitoramento de nível foi instalado um sensor de pressão em seu interior, sendo os dados apresentados conforme Figura 29.

A estrutura se esvazia em torno de 24h, assim, após esse período, repetiu-se o processo de enchimento. Ao todo foram quatro dias e três enchimentos totais. Durante o segundo e o terceiro dia houve conjuntamente eventos de precipitação.

Figura 28 - Biorretenção durante o teste com água acumulada na superfície.



Fonte: Autora.

Figura 29 - Planilha dos resultados brutos do teste de estresse.

	A	B	C	D
1	Date	Time	LEVEL	Pressão (mca)
2	11/12/2015	16:00:00	10.815	10.1811
3	11/12/2015	16:05:00	10.782	10.1811
4	11/12/2015	16:10:00	10.728	10.1811
5	11/12/2015	16:15:00	10.647	10.1811
6	11/12/2015	16:20:00	10.581	10.1811
7	11/12/2015	16:25:00	10.533	10.1811
8	11/12/2015	16:30:00	10.5	10.1811
9	11/12/2015	16:35:00	10.485	10.1811
10	11/12/2015	16:40:00	10.473	10.1811
11	11/12/2015	16:45:00	10.464	10.1811
12	11/12/2015	16:50:00	10.458	10.1811

Fonte: Autora.

3.5 AJUSTE DA EQUAÇÃO DE HORTON

3.5.1 Ajustes para os ensaios de infiltração

A partir dos resultados obtidos nos ensaios da NBR 13969/97 ajustou-se a Equação de Horton (1940) com o auxílio de planilha de cálculo (Figura 30) e do software CurveExpert (k) (HYAMS, 2015).

Figura 30 - Modelo de planilha de cálculo para o ajuste dos parâmetros de Horton para os resultados dos ensaios de infiltração.

Dia	Hora	Sensor 1 (m)	Diferença	Área lateral (m ²)	I (mm/h)	I Horton (mm/h)
02/04/2015	13:35:14	0.399	-	0.38	-	-
02/04/2015	13:45:14	0.377	0.022	0.36	129.95	117.93
02/04/2015	13:55:14	0.365	0.012	0.34	74.26	107.06
02/04/2015	14:05:14	0.348	0.017	0.33	102.10	97.28
02/04/2015	14:15:14	0.337	0.011	0.32	64.97	88.47
02/04/2015	14:25:14	0.328	0.009	0.31	55.69	80.54
02/04/2015	14:35:14	0.319	0.009	0.30	55.69	73.40
02/04/2015	14:45:14	0.309	0.009	0.29	55.69	66.97
02/04/2015	14:55:14	0.299	0.011	0.28	64.97	61.18
02/04/2015	15:05:14	0.291	0.008	0.27	46.41	55.97
02/04/2015	15:15:14	0.281	0.009	0.27	55.69	51.28
02/04/2015	15:25:14	0.274	0.008	0.26	46.41	47.06
02/04/2015	15:35:14	0.266	0.008	0.25	46.41	43.25
02/04/2015	15:45:14	0.260	0.006	0.24	37.13	39.83
02/04/2015	15:55:14	0.251	0.009	0.24	55.69	36.75
02/04/2015	16:05:14	0.247	0.003	0.23	18.56	33.97

Fonte: Autora.

3.5.2 Ajustes para os dados monitorados

Inicialmente foi analisada toda a série de dados, do período de abril de 2011 a maio de 2013, selecionando-se os eventos de maior precipitação observados na biorretenção instalada na UFSM, resultando numa amostra de seis eventos (Quadro 5).

Quadro 5 - Eventos de precipitação monitorados.

Eventos Selecionados	Data de ocorrência	P_{total} (mm)
Evento 1	30.09.2011	71,26
Evento 2	17.09.2012	103,81
Evento 3	29.09.2012	73,97
Evento 4	12.03.2013	74,95
Evento 5	04.04.2013	82,22
Evento 6	11.04.2013	94,26

Fonte: Autora.

Para os eventos selecionados será utilizada a seguinte nomenclatura: E1, E2, E3, E4, E5 e E6, respectivamente.

Na realização do ajuste a partir destes dados, foram necessários cálculos preliminares. Para a determinação da infiltração foi realizado o balanço hídrico da biorretenção, considerando como volumes de entrada as precipitações registradas pelo pluviógrafo, para os volumes de saída a evapotranspiração e a infiltração, e o volume de armazenamento foi determinado pelos níveis coletados pelo sensor de pressão.

Os volumes de entrada e o armazenamento são determinados diretamente através dos dados coletados (nível e precipitação), com o auxílio de planilha de cálculo (Figura 27).

Para a determinação da evapotranspiração utilizou-se o método de Penman-Monteith (MONTEITH, 1973) recomendado pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO 56,1998), o qual utiliza dados diários de radiação (ou temperatura máxima e mínima), umidade relativa do ar, insolação, pressão atmosférica e velocidade do vento.

Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP).

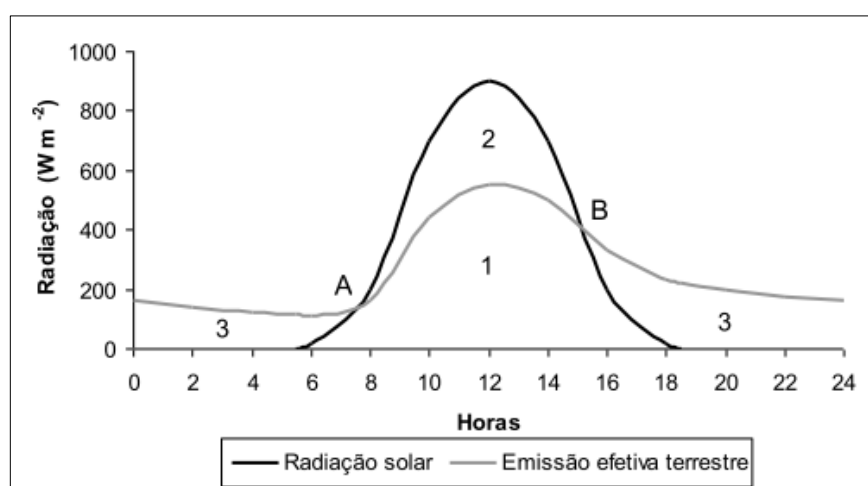
O método se utiliza da seguinte Equação 2:

$$E = \left(\frac{\Delta \cdot (R_L - G) + \rho_A \cdot c_p \cdot \frac{(e_s - e_d)}{r_a}}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \right) \cdot \frac{1}{\lambda \cdot \rho_w} \quad (2)$$

onde: E é taxa de evaporação da água (m/s); λ é calor latente de vaporização (MJ/kg); Δ é a taxa de variação da pressão de saturação do vapor (kPa/°C); RL é a radiação líquida na superfície (MJ/m²s); G é o fluxo de energia para o solo (MJ/m²s); ρ_a é a massa específica do ar (kg/m³); ρ_w é a massa específica da água (kg/m³); C_p é o calor específico do ar úmido (MJ/kg°C); e_s é a pressão de saturação do vapor (kPa); e_d é a pressão do vapor (kPa); γ é a constante psicrométrica (kPa/°C); r_s é a resistência superficial da vegetação (s/m); r_a é a resistência aerodinâmica (s/m).

Para se obter o valor da evapotranspiração horária, utilizou-se a variação da radiação durante o dia (Figura 31), com o pico entre as 12-14h.

Figura 31 - Diagrama esquemático do balanço de radiação durante o dia.



Fonte: (Adaptado de TUBELIS e NASCIMENTO, 1980).

A partir dos volumes de entrada, do volume de armazenamento e da evapotranspiração e aplicando-se os princípios do balanço hídrico. Determinou-se o volume de infiltração através da Equação 3:

$$S_{(t+1)} = S_t + (P \cdot A_t \cdot C) - EVTP - Inf \quad (3)$$

onde: $S(t+1)$ e $S(t)$ são os volumes armazenados em m³, P é a precipitação em m, A_t é a área de captação em m² e C é o coeficiente de escoamento, $EVTP$ é a evapotranspiração horária e Inf é a infiltração em m³.

Sendo elaborada uma planilha de cálculo padrão para cada evento selecionado, conforme Figura 32, aplicando-se a Equação 3. Após, foi gerado uma série gráficos

representando o comportamento da estrutura durante os eventos de precipitação, os quais são apresentados e discutidos no Capítulo 4.

Figura 32 - Modelo de planilha de cálculo utilizada.

DADOS - Biorretenção									
Abio =	8.00	m ²	C =	0.95	Lbio =	2.00	m		
Atelhado =	170.00	m ²	Porosidade =	0.60	Cbio =	4.00	m		

Data	Hora	P (mm)	Níveis (m)	Nivel (cm)	S ^(t+1) (m ³)	S ^(t) (m ³)	P*Atelhado *C (m ³)	EVTP (m ³)	Infiltração (m ³)
04/04/2013 00:56	1	0.00	0.0649	6.49	0.31	0.32	0.00	0.0007	0.0067
04/04/2013 01:56	2	0.00	0.0634	6.34	0.30	0.31	0.00	0.0009	0.0065
04/04/2013 02:56	3	0.00	0.0618	6.18	0.30	0.30	0.00	0.0011	0.0063
04/04/2013 03:56	4	0.00	0.0603	6.03	0.29	0.30	0.00	0.0013	0.0061
04/04/2013 04:56	5	0.00	0.0587	5.87	0.28	0.29	0.00	0.0015	0.0059

Fonte: Autora.

3.5.3 Ajustes para os testes de estresse

A partir dos resultados obtidos no teste de estresse, foi trabalhado de forma semelhante ao ajuste para os ensaios de infiltração, isto é, ajustou-se a Equação de Horton (1940) com o auxílio de planilha de cálculo (Figura 33) e do software CurveExpert (k) (HYAMS, 2015).

Figura 33 - Modelo de planilha de cálculo para o ajuste dos parâmetros de Horton para os resultados do teste de estresse.

Date	Time	T (h)	Nivel (mca)	dif	Infiltração - Real (mm/h)	Área Lateral (m ²)	Infiltração - Horton	ajuste do solver
11/12/2015	16:00:00		0.6339					
11/12/2015	17:00:00	1.00	0.2750	0.3589	358.86	7.61	207.47	22918.36
11/12/2015	18:00:00	2.00	0.2341	0.0409	40.86	3.30	120.68	6371.59
11/12/2015	19:00:00	3.00	0.2062	0.0279	27.90	2.81	70.93	1851.31
11/12/2015	20:00:00	4.00	0.1873	0.0189	18.90	2.47	42.40	552.36
11/12/2015	21:00:00	5.00	0.1674	0.0199	19.92	2.25	26.05	37.57
11/12/2015	22:00:00	6.00	0.1534	0.0140	14.04	2.01	16.68	6.95
11/12/2015	23:00:00	7.00	0.1413	0.0121	12.06	1.84	11.30	0.58

Fonte: Autora.

3.6 DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS DE BIORRETENÇÃO

A partir dos resultados obtidos, em especial, dos ensaios de caracterização do local e do comportamento real da estrutura, dimensionou-se o sistema de biorretenção utilizando-se os métodos da Curva-Envelope (URBONAS e STAHLRE, 1993) e o apresentado pelo *Low-Impact Development Hydrologic Analysis* (EPA, 2000).

3.6.1. Método da Curva-Envelope – “Rain-envelope-method”

Para a aplicação do Método da Curva-Envelope foram utilizadas as instruções contidas no Plano Diretor de Drenagem Urbana de Porto Alegre (PDDrU Porto Alegre, 2005).

Na primeira abordagem do método empregou-se os dados dos ensaios de infiltração realizados no local, os dados monitorados da estrutura e os do teste de estresse. Foram efetuadas todas as etapas de cálculo sem nenhuma modificação, conforme os seguintes passos:

- a) 1º Passo: para determinação do volume de projeto afluente à estrutura de infiltração ou percolação, utilizou-se a Equação 4. Desta forma, obteve-se o volume afluente acumulado através da multiplicação da vazão pelo tempo, para diversas durações de chuva. Onde V_e é volume total escoado no tempo t para uma precipitação de T anos de retorno (m^3); C é o coeficiente de escoamento; I_T é a intensidade da precipitação de T anos de retorno ($l/s/ha$), t a duração da precipitação (h) e A é a área da bacia de contribuição (ha).

$$V_e = 1,25. \left[3600. C. \left(\frac{I_T}{1000} \right). t. A \right] \quad (4)$$

Para o dimensionamento foi considerado que apenas as áreas impermeáveis estariam contribuindo para a estrutura, tendo um coeficiente de escoamento (C) entre 0,85 e 0,95 (URBONAS e STAHLRE, 1993). E para a determinação da intensidade da precipitação foi utilizada a equação IDF (Equação 5) para o município de Santa Maria, apresentada por Roman (2015), onde (T_r) corresponde ao tempo de retorno em anos, e (t) ao tempo em minutos.

$$IDF = \frac{870,289 \cdot Tr^{0,1632}}{(t+8,76)^{0,7258}} \quad (5)$$

- b) 2º Passo: estimaco das dimenses iniciais da biorreteno e determinao do volume da estrutura (V_t) para estas dimenses, usando-se a Equao 6, onde V_T é o volume da estrutura (m^3), L é o comprimento da estrutura (m), h é a altura da estrutura (m) e b é a largura da estrutura (m).

$$V_T = L \cdot h \cdot b \quad (6)$$

- c) 3º Passo: construo da curva de volumes acumulados de sada (V_s), com base na condutividade hidrlica saturada e nas dimenses atuais, conforme Equao 7, onde V_s é o volume acumulado de sada para diversas duraes t , k é a condutividade hidrlica saturada, A_{perc} é a rea de infiltrao ou percolao, e t é a durao da precipitao (h).

$$V_s = k \cdot \frac{A_{perc}}{2} \cdot 3600 \cdot t \quad (7)$$

Uma vez que, os solos tendem a se tornarem gradualmente colmatados com o tempo reduzindo sua condutividade hidrlica disponvel, é recomendado que a condutividade hidrlica seja reduzida por um fator de segurana. Recomenda-se que o valor seja reduzido por um coeficiente de segurana 2 ou 3, de acordo com o local onde est inserida a estrutura de percolao.

A rea de percolao (A_{perc}) corresponde  rea das paredes laterais da estrutura de infiltrao, podendo ser determinada pela Equao 8, onde h , b e L so as caractersticas das dimenses da biorreteno.

$$A_{perc} = 2 \cdot h \cdot (b + L) \quad (8)$$

- d) 4º Passo: identificao do ponto de mxima diferena entre as curvas de volume afluente (V_e) e o volume de sada da estrutura (V_s), conforme Equao 9. A mxima diferena corresponde ao volume (V) da estrutura.

$$V = \text{mx}(V_e - V_s) \quad (9)$$

- e) 5º Passo: determinao do volume necessrio para o armazenamento (V_{dim}), conforme Equao 10, onde ϕ é a porosidade do material.

$$V_{dim} = \frac{V}{\phi} \quad (10)$$

- f) 6º Passo: Comparaco do volume da biorreteno (V_t) com o volume de dimensionamento (V_{dim}):

- se $V_t \gg V_{dim} \Rightarrow$ reduzir as dimensões da estrutura e recomeçar no passo 3;
- se $V_t < V_{dim} \Rightarrow$ aumentar as dimensões da estrutura e recomeça-se no passo 3;
- se $V_t \geq V_{dim} \Rightarrow$ fim do processo de dimensionamento.

Na segunda abordagem do método, os volumes de entrada são calculados pelo Método Racional sem o acréscimo de 25% ao volume calculado como Urbonas e Stahre (1993) recomendam.

Para a terceira abordagem, além da alteração nos volumes de entrada, são utilizadas as equações ajustadas de Horton para a determinação dos volumes de saída. Por fim, os resultados foram comparados e verificados com o comportamento real da biorretenção.

3.6.2. Método do LID hydrologic analysis

O método do LID Hydrologic Analysis (EPA, 2000) consiste, basicamente, na determinação do volume para que a vazão de pós-urbanização não supere a vazão máxima atual.

Não foi possível aplicar o passo-a-passo apresentado pelo Manual de Biorretenção (PGDER, 1993) para o dimensionamento, pois não há como considerar que terreno foi 100% impermeabilizado, como é o caso da estrutura construída.

Contudo, seguiu-se os princípios de análise hidrológica utilizados pelo EPA (2000), onde o volume da estrutura será a diferença do hidrograma de pós-urbanização com o de pré-urbanização mais o volume para o controle da vazão de pico de pré-urbanização. Assim, com o auxílio uma planilha de cálculo padrão, conforme Figura 34, foram desenvolvidos os seguintes passos:

- 1º Passo: determinação do tempo de concentração para as condições de pré e pós-urbanização, utilizando a fórmula SCS Lag (Equação 11). Onde L é comprimento em m, S é a declividade do terreno em m/m e t_c é o tempo de concentração em horas.

$$t_c = 0,057 \cdot \left(\frac{1000}{CN - 9} \right)^{0,7} \cdot L^{0,8} \cdot S^{-0,5} \quad (11)$$

- b) 2º Passo: determinação da chuva de projeto com base na IDF de Santa Maria (Equação 5) e no uso do método dos Blocos Alternados. Para a separação do escoamento, é utilizado o modelo do SCS (1975) com base na Equação 12;

$$P_{ef} = \frac{(P-0,2.S)^2}{P+0,8.S} \quad (12)$$

onde P é a precipitação em mm, P_{ef} é a precipitação efetiva em mm e S é armazenamento no solo em mm, estimado pela Equação 13.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (13)$$

- c) 3º Passo: confecção do Hidrograma unitário triangular do SCS para as condições de pré e pós-urbanização.
- d) 4º Passo: propagação do escoamento e determinação dos hidrogramas resultantes com uso da equação de convolução discreta (Equação 14), agora com auxílio de outra planilha de cálculo (Figura 35).

$$Q_t = \sum_{i=t-k+1}^t P_{ef_i} \cdot h_{t-i+1} \quad (14)$$

- e) 5º Passo: cálculo dos volumes com utilização hidrogramas resultantes e do programa de cálculo Curve Expert.
- f) 6º Passo: cálculo do volume para melhorar a qualidade de água, onde se devem armazenar os primeiros 12,5 mm de chuva efetiva.
- g) 7º Passo: comparação entre os volumes encontrados nos passos 5 e 6.

Após o dimensionamento do sistema pelos métodos apresentados, foi realizada a análise dos resultados e posterior comparação entre os mesmos, buscando a metodologia de cálculo que melhor se adapte para as condições pedológicas e climáticas do município de Santa Maria.

Figura 34 - Planilha de cálculo padrão para a determinação da chuva efetiva e hidrograma unitário.

DADOS		CN = 74	A = 85 m ²	Tempo de concentração		Equações - HU	
Tr = 2	anos	S = 89.24 mm	A = 0.000085 km ²	SCS Lag		tp = 0.11 h	
		la = 17.85 mm	L = 22 m	tc pós = 0.19 h		D = 1 h	
			Desnivel = 0.2 m	tc pós = 11.47 min		Tp = 0.61 h	
			S decli = 0.0091 m/m				

PRÉ-URBANIZAÇÃO										HIDROGRAMA UNITÁRIO			
Nint	Δt (min)	t (h)	I (mm/h)	P acum (IDF) (mm)	P desacum (mm)	Rearr.	P projeto (mm)	P projeto acum (mm)	Pef	Pef*	t (min)	t (h)	Vazão (m ³ /s por mm)
1	60	1	45.21	45.21	45.21	24	1.40	1.40	3.72	0.00	0	0	0
2	120	2	28.68	57.35	12.14	22	1.50	2.90	3.01	0.00	60	1	0.0000121
3	180	3	21.72	65.17	7.82	20	1.61	4.50	2.35	0.00	120	2	0.0000088
4	240	4	17.78	71.12	5.95	18	1.74	6.25	1.73	0.00	180	3	0.0000256
5	300	5	15.20	76.00	4.88	16	1.91	8.15	1.18	0.00	240	4	0.0000444
6	360	6	13.36	80.17	4.17	14	2.11	10.26	0.70	0.00	300	5	0.0000633
7	420	7	11.98	83.84	3.67	12	2.38	12.64	0.32	0.00	360	6	0.0000821
8	480	8	10.89	87.12	3.29	10	2.75	15.39	0.07	0.00	420	7	0.0001010

Fonte: Autora.

Figura 35 - Planilha de cálculo padrão para aplicação da convolução.

CONVOLUÇÃO												
tb =	0.00	h	k =	0.000	48							
Δt =	18	h	m =	48								
			n =	95								
Ordem	t (min)	t (h)	HU SCS	Pef* (mm)	Q1 = P1*hu	Q2 = P2*hu	Q3 = P3*hu	Q4 = P4*hu	Q5 = P5*hu	Q6 = P6*hu	Q7 = P7*hu	Q8 = P8*hu
1	0	0	0.00000	0.02	0.000000							
2	60	1	0.00001	0.49	0.000000	0.000000						
3	120	2	0.00001	1.39	0.000000	0.000006	0.000000					
4	180	3	0.00003	2.61	0.000001	0.000004	0.000016	0.000000				
5	240	4	0.00005	4.12	0.000001	0.000014	0.000012	0.000030	0.000000			
6	300	5	0.00007	5.91	0.000002	0.000024	0.000040	0.000022	0.000048	0.000000		
7	360	6	0.00009	8.02	0.000002	0.000034	0.000067	0.000074	0.000035	0.000069	0.000000	
8	420	7	0.00011	10.55	0.000003	0.000044	0.000095	0.000127	0.000117	0.000050	0.000093	0.000000
9	480	8	0.00013	13.64	0.000003	0.000053	0.000123	0.000179	0.000200	0.000168	0.000067	0.000000

Fonte: Autora.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 LEVANTAMENTO DAS CONDIÇÕES ANTECEDENTES DO SOLO

Nos dimensionamentos considerar o solo na pior condição ou saturado, é uma prática consolidada de planejamento ou na elaboração do projeto visando trabalhar a favor da segurança estrutural. E com uma visão atual mais focada na sustentabilidade ambiental, não se concebe projetar obras e estruturas com dimensões maiores que o necessário. Por isso, é preciso uma análise mais minuciosa de cada situação.

Neste estudo foi analisado o registro de precipitações diárias do BDMEP (Estação Santa Maria, OMM: 83936), no período de 1961 a 2014 para estimar condições típicas de chuva antecedente de 5 dias. Primeiramente, analisou-se os dados dos anos sem falhas de monitoramento após, os meses mais críticos (junho, julho e agosto) para a infiltração no referido local. Da série de 53 anos de dados de precipitação, selecionou-se 32 anos que não possuíam nenhuma falha, depois, seguiu-se com a análise:

a) Análise anual das condições antecedentes

Conforme Quadro 6, constata-se que para o período latente, mais de 51,08% do tempo, o solo encontra-se seco (ARCI) e 16,13% em condições normais (ARCII). E para o período de crescimento da vegetação, a soma da porcentagem para ARCI e ARCII é de 84,58%. Lembrando, que a diferença entre período latente e de crescimento é em função do estado de desenvolvimento da vegetação encontrada no local, levando considerando a necessidade hídrica das plantas.

Quadro 6 - Análise anual das condições antecedentes.

Condição Antecedente	Período latente		Período de crescimento	
	% Tempo	Dias	% Tempo	Dias
ARC I	51,08	186	74,08	270
ARC II	16,13	59	10,50	38
ARC III	32,79	120	15,49	57

Fonte: Autora.

b) Análise mensal das condições antecedentes:

Quando se analisa somente os meses de junho, julho e agosto observa-se a mesma tendência. Para o período latente (Quadro 7) mais de 60% do tempo o solo encontra-se seco e/ou em condições normais e para o período de crescimento (Quadro 8) essa porcentagem é acima de 80%.

Quadro 7. Análise mensal das condições antecedentes para o período latente.

Condição Antecedente	Período Latente					
	Junho		Julho		Agosto	
	% Tempo	Dias	% Tempo	Dias	% Tempo	Dias
ARC I	49,15	15	49,44	15	54,68	17
ARC II	16,24	5	18,31	6	16,45	5
ARC III	34,62	10	32,26	10	28,87	9

Fonte: Autora.

Quadro 8. Análise mensal das condições antecedentes para o período de crescimento.

Condição Antecedente	Período de Crescimento					
	Junho		Julho		Agosto	
	% Tempo	Dias	% Tempo	Dias	% Tempo	Dias
ARC I	75,98	23	72,74	22	78,39	24
ARC II	11,03	3	11,61	4	8,06	3
ARC III	12,99	4	15,65	5	13,55	4

Fonte: Autora.

Constatado que, a infiltração inicial tem grande influência na estrutura e que na pior situação (mês de junho – período latente) 49,15% do tempo, o solo em Santa Maria/RS encontra-se em condições secas e 16,24% em condições normais, ou seja, apenas 34,62% o solo encontrou-se saturado. Dimensionar uma estrutura de infiltração sem observar esses pontos relevantes e apenas considerar o solo como sempre saturado, levaria a construção de projetos grandes, onerosos e subutilizados.

4.2 ANÁLISE DE FUNCIONAMENTO DA BIORRETENÇÃO

Em 2010, foi iniciado o processo de estudo e construção da estrutura de biorretenção na UFSM e o monitoramento quantitativo deu-se a partir de 2011. Para a medição da precipitação contou-se com o auxílio de pluviógrafo instalado no telhado de captação, e para controle do armazenamento fez-se uso de sensores de nível instalados no interior da mesma.

Assim, no primeiro ano (2010), em função de problemas financeiros e de demoras na chegada dos sensores, foi realizado acompanhamento visual semanal e diário nos períodos chuvosos do comportamento da trincheira. Em janeiro de 2010, foi quando se verificou a única vez que a estrutura atingiu o seu nível máximo e extravasou, que na ocasião choveu 135mm em 3 dias. Considera-se que este episódio tenha ocorrido em função da estrutura estar em processo final de construção, não estando totalmente funcional, podendo ter ficado alguma obstrução no sistema de alimentação. Em função disso e da falta de monitoramento quantitativo do evento, ele não foi considerado na análise.

O monitoramento quantitativo e qualitativo publicado em Daniel Jr. (2013), ocorreu no período de 2011 a 2013. A partir desses dados, selecionou-se os 6 eventos de maior precipitação com o objetivo de se observar o comportamento da construção ao longo do tempo.

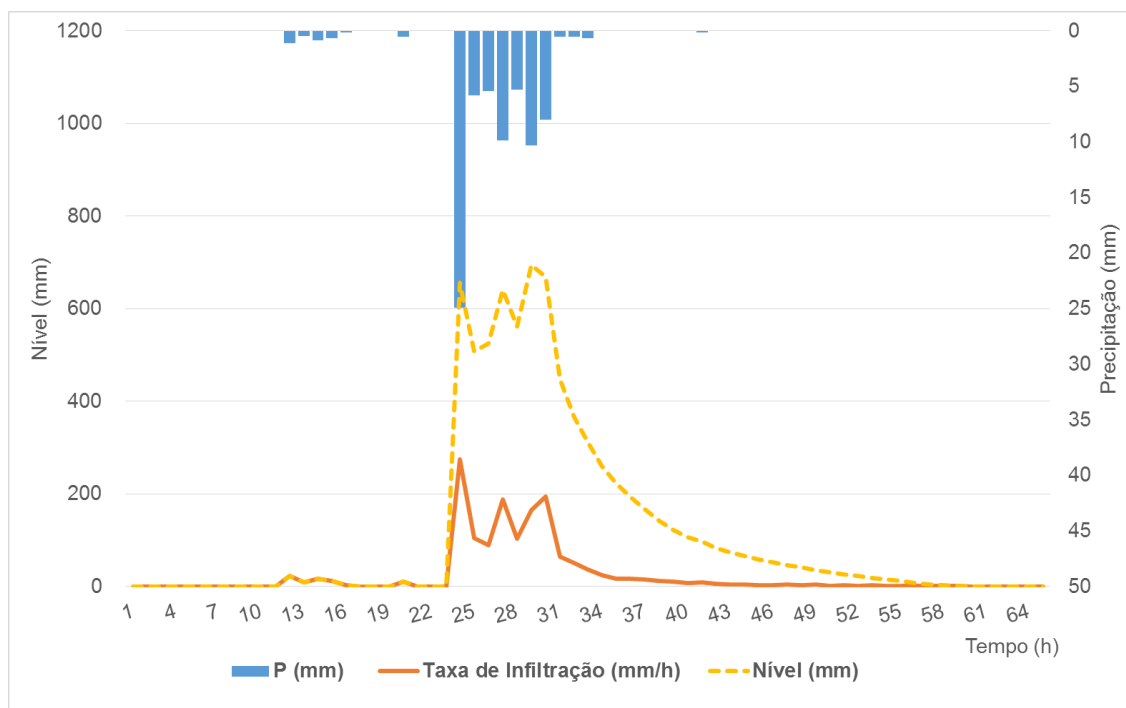
Para cada evento selecionado, se elaborou o balanço hídrico da estrutura e foi gerado um gráfico Nível x Taxa de infiltração x Precipitação, a fim de se observar o comportamento da biorretenção antes, durante e após um evento de chuva (Figura 36 a Figura 41).

Analisando o Evento 1 (Figura 36), de 30/09/2011, quando ocorreu uma chuva de 71,26mm e nos 5 dias anteriores não houve nenhum registro de precipitação, ou seja, o solo encontrava-se em condição seca. O nível máximo atingido foi de 52,92 cm e dentro de 8h baixou para aproximadamente 15 cm e o esvaziamento completo em 29h.

O Evento 2 (Figura 37), de 17/09/2012, registrou uma chuva de 103,81mm e nos 5 dias anteriores houve aproximadamente 34,8mm, portanto, o solo encontrava-se em condição úmida. O nível máximo atingido foi de 82,91 cm e dentro de 29h baixou para aproximadamente 15 cm e antes de seu esvaziamento completo, outros

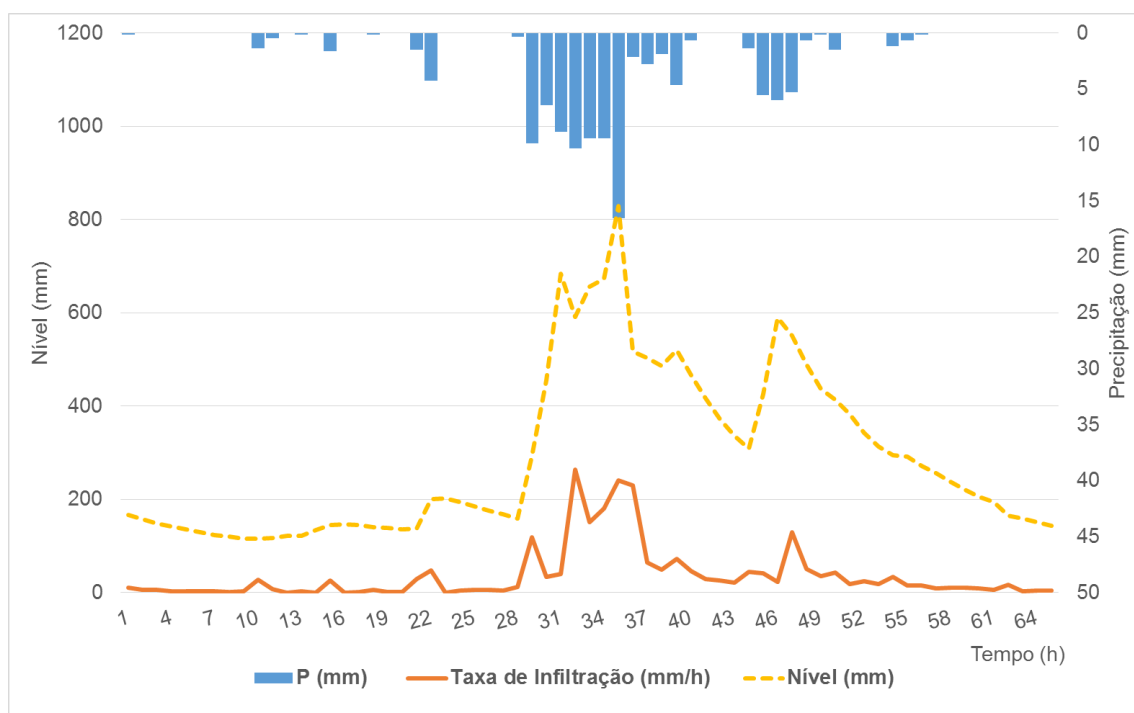
pequenos eventos acontecerem, porém, em níveis menores. E esvaziou totalmente, somente após decorrer 6 dias do maior evento.

Figura 36 - Gráfico do comportamento da biorretenção para o E1.



Fonte: Autora.

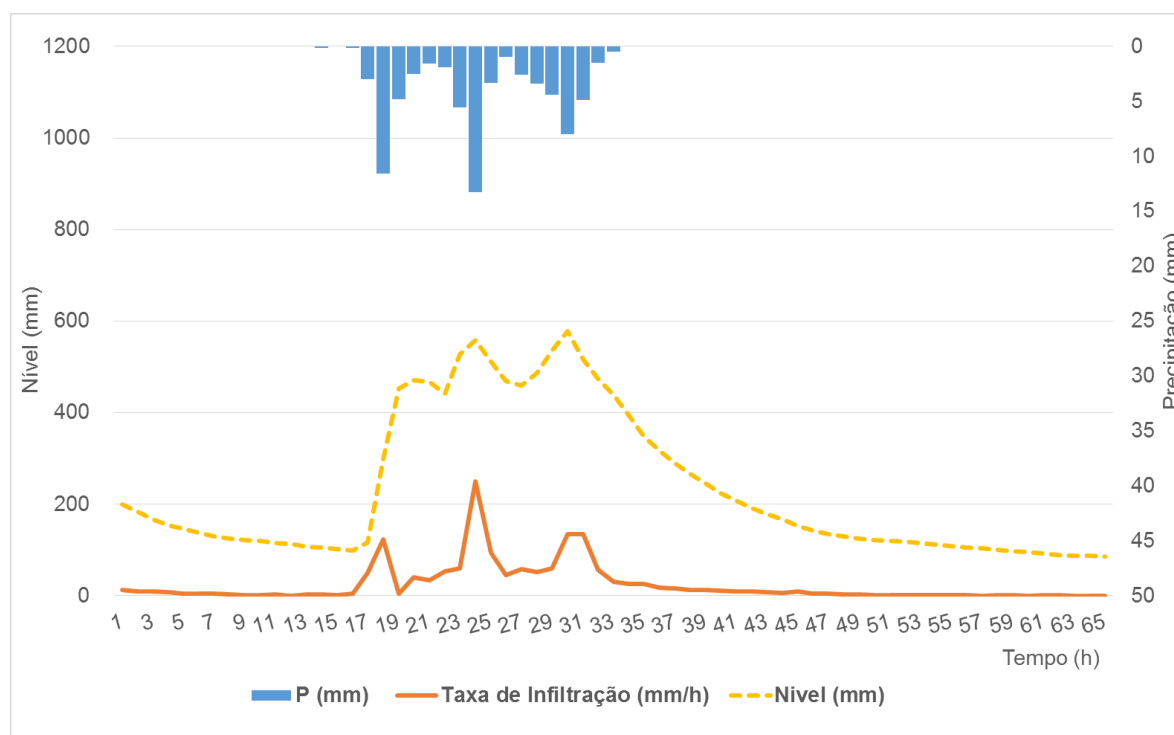
Figura 37 - Gráfico do comportamento da biorretenção para o E2.



Fonte: Autora.

O Evento 3 (Figura 38), de 29/09/2012, registrou uma chuva de 73,97mm e nos 5 dias anteriores não houve nenhum registro de precipitação, ou seja, o solo encontrava-se em condição seca. O nível máximo atingido foi de 57,85 cm e dentro de 15h baixou para aproximadamente 15 cm e esvaziou-se em 4 dias.

Figura 38 - Gráfico do comportamento da biorretenção para o E3.

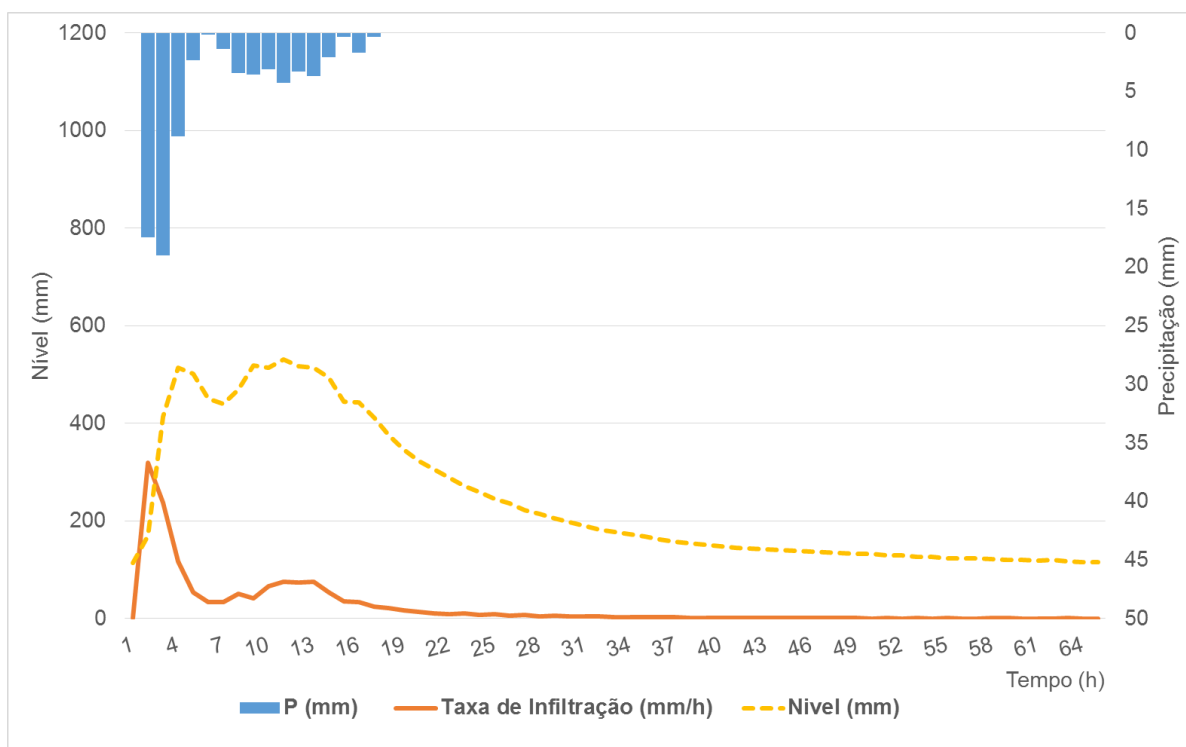


Fonte: Autora.

O Evento 4 (Figura 39), de 12/03/2013, registrou uma chuva de 74,95mm e nos 5 dias anteriores houve aproximadamente 47,6mm, portanto, o solo encontrava-se em condição úmida. O nível máximo atingido foi de 53,06 cm e dentro de 26h baixou para aproximadamente 15 cm. Não foi possível verificar o esvaziamento total pois houve uma falha na medição, entre 15/03/2013 a 02/04/2013, os equipamentos não registraram as medições.

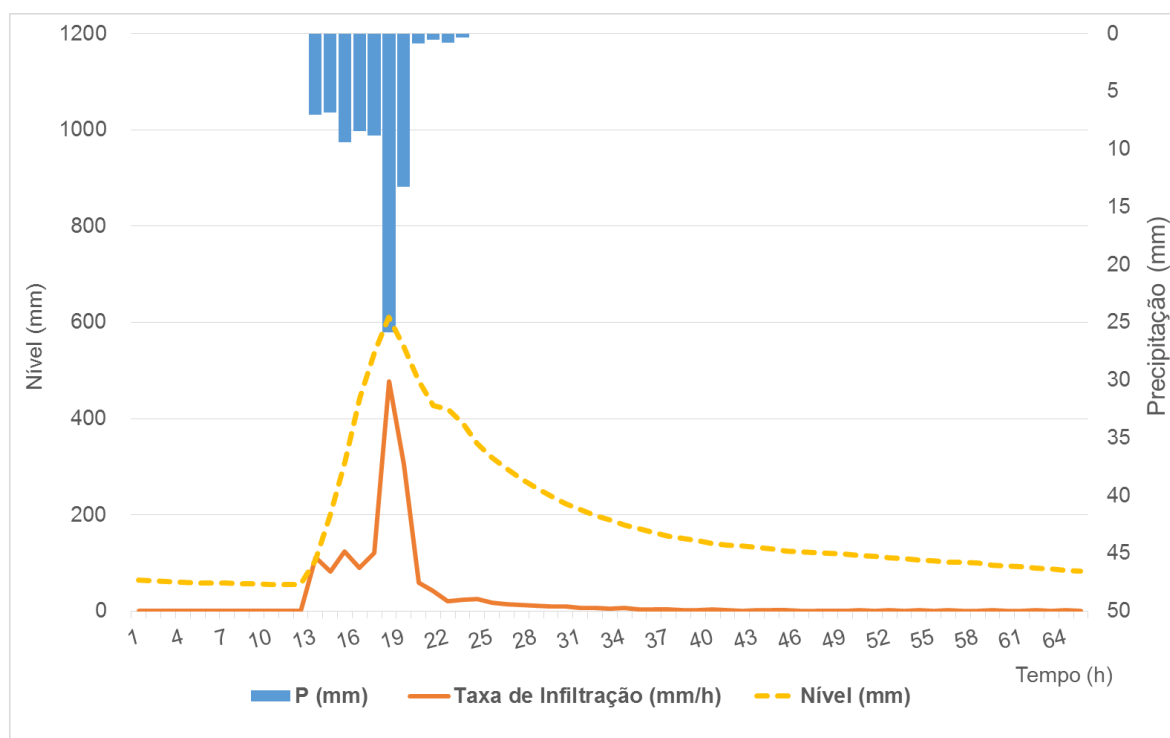
O Evento 5 (Figura 40), de 04/04/2013, registrou uma chuva de 82,22mm e nos 5 dias anteriores houve aproximadamente 14,7mm, logo, o solo encontrava-se em condição média. O nível máximo atingido foi de 61,10 cm e dentro de 20h baixou para aproximadamente 15 cm. Não foi possível verificar o esvaziamento total, pois houve uma falha na medição.

Figura 39 - Gráfico do comportamento da biorretenção para o E4.



Fonte: Autora.

Figura 40 - Gráfico do comportamento da biorretenção para o Evento 5.

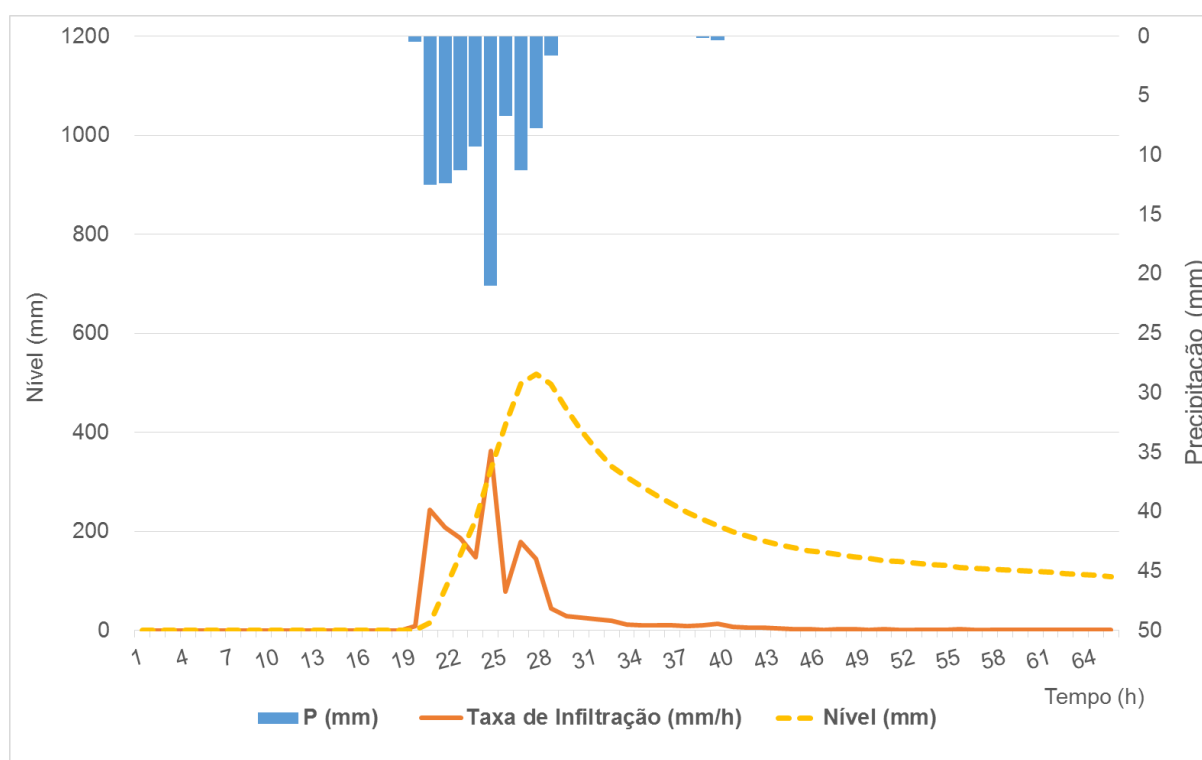


Fonte: Autora.

No Evento 6 (Figura 41), de 11/04/2013, registrou-se uma chuva de 94,26mm e nos 5 dias anteriores não houve nenhum registro de precipitação, ou seja, o solo encontrava-se em condição seca. O nível máximo atingido foi de 51,82 cm e dentro de 20h baixou para aproximadamente 15 cm. Não foi possível verificar o esvaziamento total, pois houve uma falha na medição.

Portanto, se conclui que a estrutura em termos gerais, no quesito armazenamento, trabalha de maneira esperada, durante grandes eventos, os níveis sobem conforme a precipitação ocorre e se esvaziam ao longo do tempo, aproximadamente em 24 horas. Os picos da taxa de infiltração coincidem com os dos níveis, indicando a influência da área lateral na eficiência do sistema.

Figura 41 - Gráfico do comportamento da biorretenção para o Evento 6.



Fonte: Autora.

4.3 ESTIMATIVA DA TAXA DE INFILTRAÇÃO E AJUSTES DA EQUAÇÃO DE HORTON

Para o dimensionamento de estruturas de infiltração, além, da importância da taxa de infiltração saturada (pior condição para o cálculo), o entendimento do

comportamento da água no solo (a evolução da condição seca para a saturada) é de grande interesse para os projetistas, para se aperfeiçoar e otimizar a utilização deste tipo de alternativa.

Assim, conforme descrito na metodologia, buscou-se estimar a taxa de infiltração, através dos ensaios realizados in loco conforme recomendado pela NBR 13969/97, representando os dados que o projetista teria a disposição.

Após, calculou-se a infiltração através de dados dos eventos selecionados (E1, E2, E3, E4, E5 e E6) para analisar a estrutura nas condições normais de funcionamento.

E ao final da pesquisa, para a análise em uma situação crítica, aferiu-se a taxa de infiltração através dos resultados do teste de estresse.

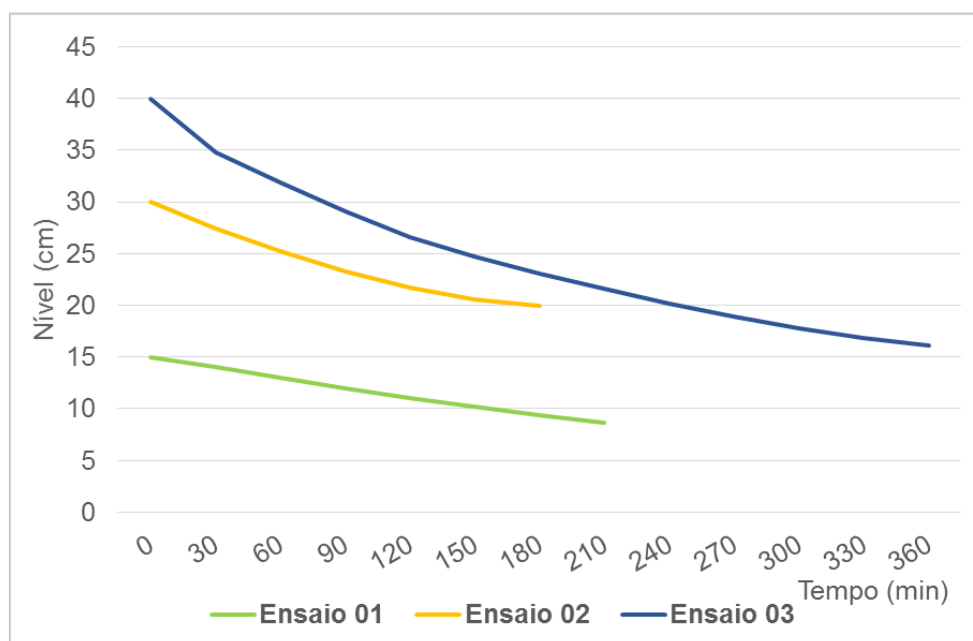
4.3.1. Análise dos níveis

Iniciou-se, primeiramente com a análise dos níveis para todas as situações e posteriormente com os ajustes da curva de Horton.

4.3.1.1. Níveis durante os ensaios de infiltração

Com os resultados obtidos dos ensaios realizados nas três cavas, confeccionou-se o gráfico Nível x Tempo para os mesmos (Figura 42). Onde se observa que, apesar de níveis iniciais diferentes dentro de cada cava (Ensaio 01, com 15 cm; Ensaio 02, com 30 cm e Ensaio 03, com 40 cm), as mesmas possuem comportamento semelhante e a inclinação de decréscimo das curvas é similar. Portanto, é possível uma posterior comparação de resultados entre si, para o cálculo de ajuste da curva de Horton.

Figura 42 - Comportamento dos níveis durante a realização dos ensaios.



Fonte: Autora.

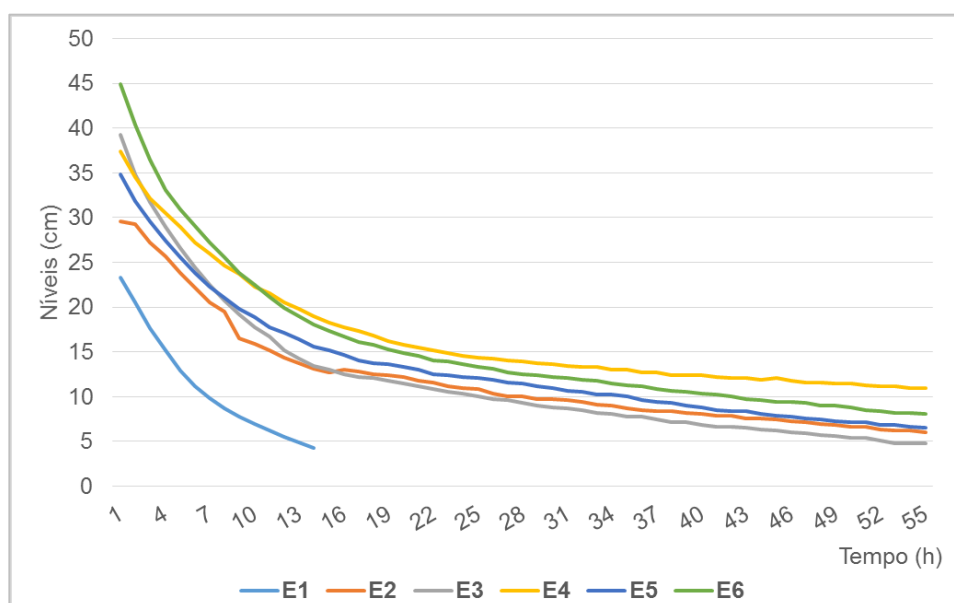
4.3.1.2. Níveis durante os eventos monitorados

A mesma análise feita nos ensaios de infiltração foi realizada para todos os 6 eventos selecionados (Figura 43). Constata-se um desempenho semelhante em todas as curvas, o grau de inclinação das linhas resultantes é semelhante, ou seja, a taxa de infiltração é bastante similar para todos, inclusive no caso do E1, que possui menos dados de nível em relação aos demais. A partir da Figura 43, quando os níveis começam a estabilizar (solo atingindo a saturação), aproximadamente com 10 cm, os valores oscilam. Para melhor visualização deste fenômeno, gerou-se outro gráfico de Nível x Tempo (Figura 44).

Verifica-se que após 24h, quando o solo já se encontra saturado, a variação do nível é muito pequena. Como as medidas foram feitas através do sensor de pressão, e com a possível presença de finos, acredita-se que dificultem o funcionamento do equipamento a partir deste ponto (10 cm). E também, a contar, desse nível, as perdas se dão praticamente só por evapotranspiração. Esta pequena variação acaba escalonando os dados, onde se tem, por exemplo, três medidas de nível consecutivas iguais, depois diminuem e assim por diante.

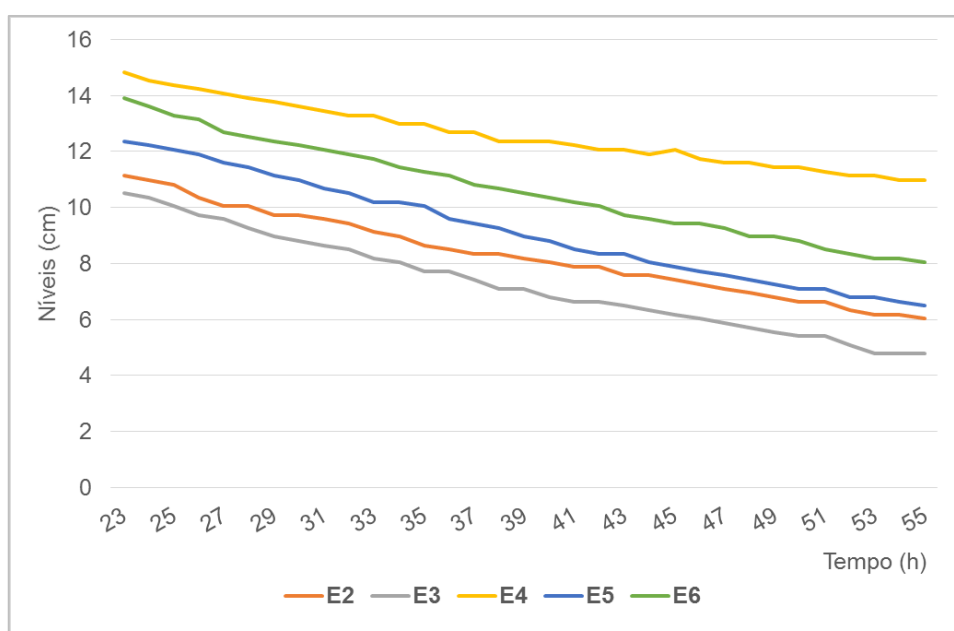
O experimento está localizado muito próximo de uma via de acesso aos prédios com grande fluxo de veículos causando trepidação, influenciando as medições dos sensores de pressão. Então, para fins de cálculo do balanço hídrico se optou considerar os níveis até aproximadamente 10 cm, para que essas variações não influenciassem os ajustes das curvas de Horton.

Figura 43 - Comportamento dos níveis durante os eventos selecionados.



Fonte: Autora.

Figura 44 - Comportamento dos níveis durante os eventos após 24h.



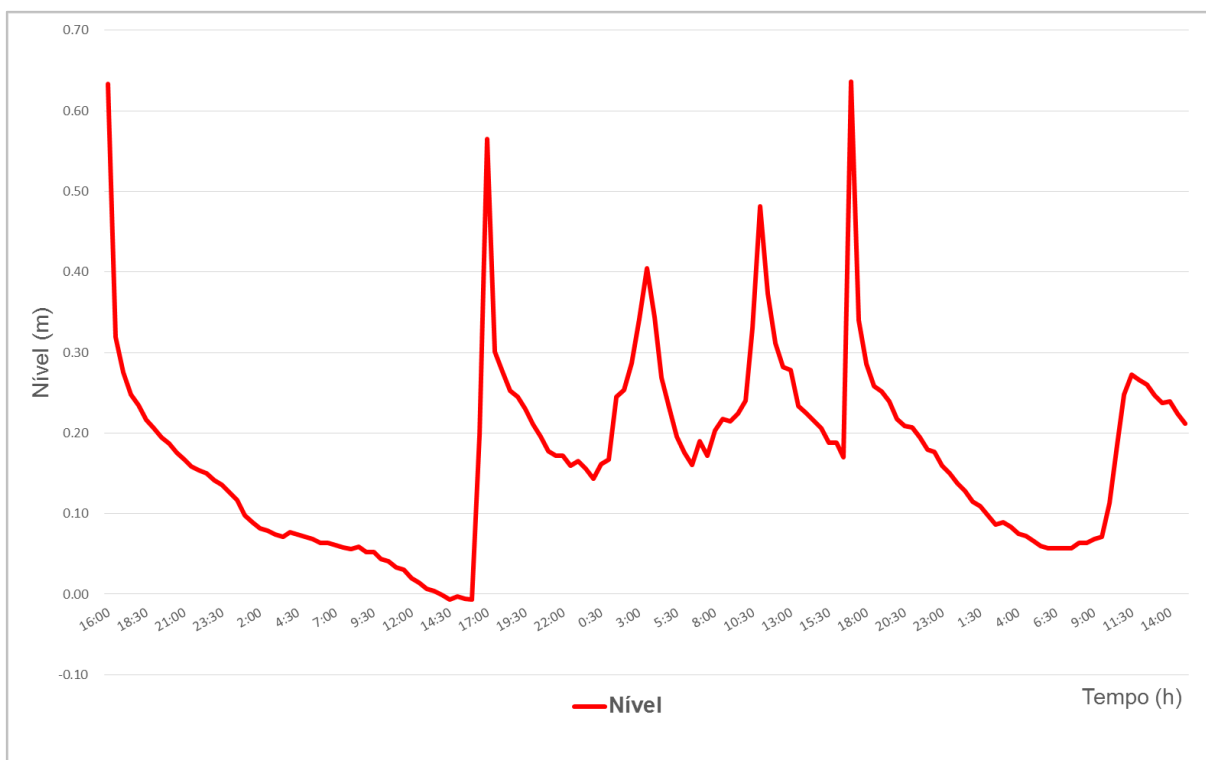
Fonte: Autora.

4.3.1.3. Níveis durante o teste de estresse

Na Figura 45, tem-se os níveis medidos durante os quatro dias do teste de estresse, nos quais a estrutura foi submetida ao enchimento total a cada 24 horas, totalizando três enchimentos (os picos mais altos no gráfico). Entre o segundo e terceiro enchimento ocorreram eventos de precipitação, os picos menores, totalizando 33,8mm. Após o último enchimento precipitou 13,2mm, e nos 5 dias anteriores foi observado mais 23,4mm. A partir destes resultados foram ajustadas 5 curvas de Horton.

No momento da instalação do sensor para realização do teste, foi constatado que o local de medição havia sofrido um desmoronamento, assim, o sensor foi colocado na profundidade de 65 cm, não estando no fundo da estrutura (1,20m). Como o foco do teste de estresse é a determinação do comportamento da taxa de infiltração e da eficiência da biorretenção após anos de uso, essa alteração na altura do sensor não é tão significativa.

Figura 45. Comportamentos dos níveis durante a realização do teste de funcionamento.



Fonte: Autora.

4.3.2. Ajustes dos parâmetros da Equação de Horton

Após as análises dos níveis e a partir dos resultados obtidos pelos ensaios de infiltração *in loco* segundo NBR 13969/97, do balanço hídrico da estrutura para os eventos monitorados e do teste de estresse determinou-se os parâmetros da Equação de Horton e os ajustes das curvas para as três situações.

4.3.2.1. Ajuste dos parâmetros de Horton para os ensaios de infiltração

Com base nos dados dos ensaios de infiltração, apresenta-se no Quadro 9 os parâmetros observados (f_b e f_o) e o ajustado (k) para cada ensaio. Na Figura 46, o ajuste das curvas para fins de utilização no dimensionamento, determinou-se uma curva média.

Quadro 9 - Parâmetros da Equação de Horton para os ensaios segundo a NBR 13969/97.

Eventos	Parâmetros da Equação de Horton		
	f_b (mm/h)	f_o (mm/h)	k
ENSAIO 01	16,00	20,00	0,3453
ENSAIO 02	12,00	60,00	0,6026
ENSAIO 03	8,90	130,00	0,6300
Média	12,30	70,00	0,5260
Desvio Padrão	3,56	55,68	0,16
Coefficiente de Variação	0,29	0,79	0,30

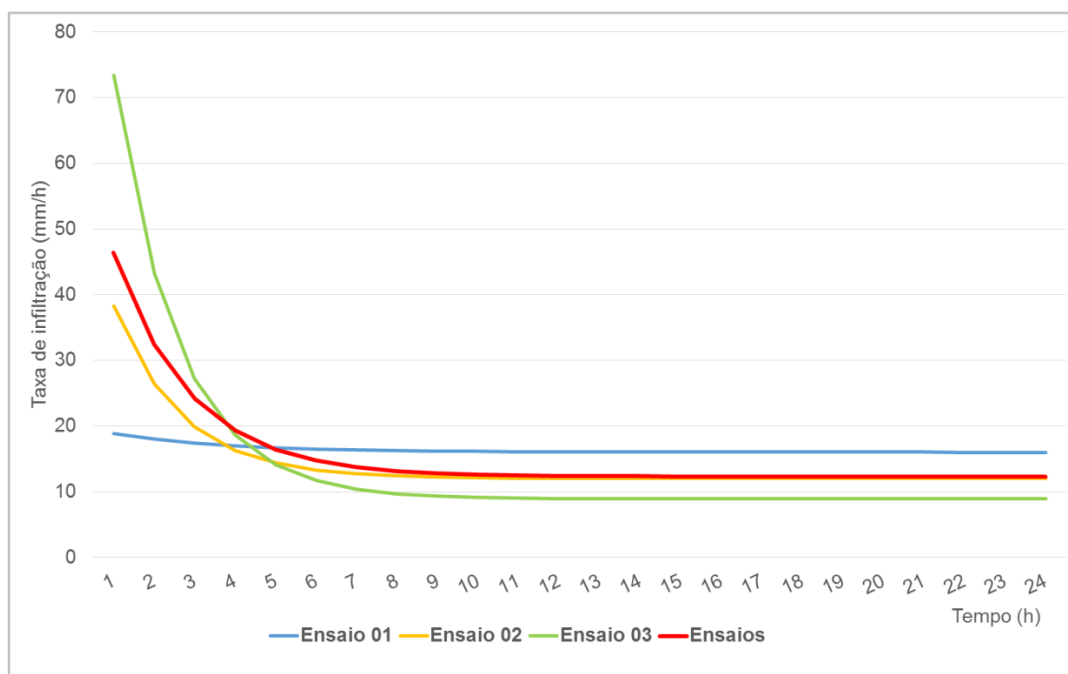
Fonte: Autora.

Observa-se uma grande variabilidade nos resultados, principalmente, ao se comparar o ensaio 01 com os demais, apresentando um coeficiente de variação alto de 0,79, acredita-se que se deva ao processo de saturação a que o solo foi submetido inicialmente. A variação entre os ensaios 02 e 03 ocorreu, provavelmente, devido à possível existência de macroporos no solo, os quais geram uma infiltração inicial (f_o) maior.

Essa oscilação nos valores mostra a grande heterogeneidade do solo encontrada nos resultados, visto que as distâncias entre as cavas eram em torno de 1,20m. É necessária uma padronização na realização dos ensaios, pois pequenas alterações levam a grandes diferenças no resultado final, e lembrando que os projetistas contam com no máximo um ensaio de infiltração, na maioria dos casos.

E em conjunto com o processo de colmatção (entupimento dos poros do fundo da estrutura por finos), verifica-se a necessidade de coeficientes de segurança no dimensionamento, para que as estruturas não tenham sua vida útil reduzida.

Figura 46 - Curvas de Horton ajustadas dos ensaios realizados *in loco*.



Fonte: Autora.

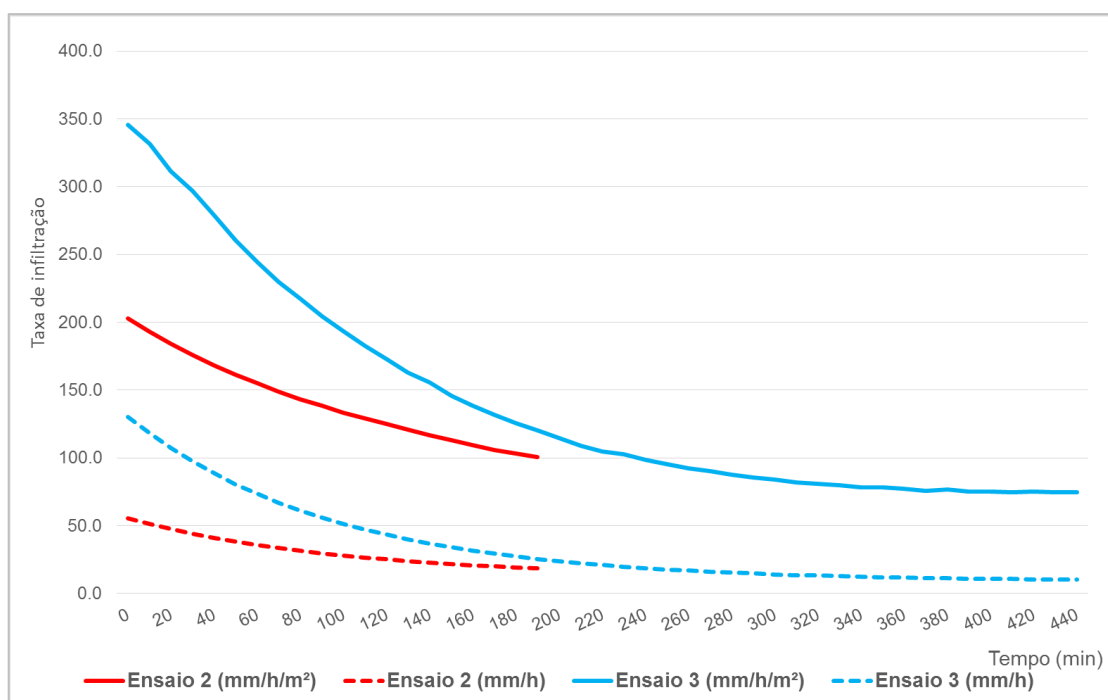
No entanto, os resultados anteriores desconsideram que a área de infiltração é variável ao longo do ensaio. Como a infiltração é realizada através das laterais da estrutura, assumindo a colmatção do fundo, já verificada e reconhecida na literatura, como, por exemplo, Baptista et al. (2005); Souza (2002) e Urbonas e Stahre (1993). Introduce-se um novo conceito que é a infiltração unitária. Neste conceito o valor da infiltração é dividido pela área lateral da cava que está molhada, obtendo assim um valor de infiltração unitária ou por metro quadrado de área.

Na Figura 47, pode-se observar a infiltração e a infiltração unitária para os ensaios 02 e 03. Se observa que ambos os ensaios convergem para praticamente o

mesmo valor ($75 \text{ mm.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$), embora o ensaio 02, aparentemente, termine antes de convergir para o valor final, isto significa, que a duração do mesmo pode ter sido pequena, sendo necessário um ciclo maior de enchimento e medição. Isto alerta para a necessidade de confiar que durante o ensaio se chega à saturação.

O ensaio 01 não foi incluído no gráfico, já que os valores de infiltração unitária foram crescendo, o que não tem sentido físico. Considerando as diferenças com os outros ensaios, as evidências apontam em algum tipo de erro na realização do ensaio.

Figura 47 - Valores de infiltração e infiltração unitária dos ensaios 2 e 3 realizados *in loco*.



Fonte: Autora.

4.3.2.2. Ajuste dos parâmetros de Horton para os dados monitorados

Determinada a infiltração dos eventos selecionados foram ajustados os parâmetros da Equação de Horton (Quadro 10). Pode-se observar que os valores tanto da taxa de infiltração saturada (f_b) e como da inicial (f_0) não sofreram grandes alterações ao longo dos 3 anos de monitoramento (2011-2013). Existe a hipótese de que a estrutura estaria em processo de colmatação, entupimento dos poros do fundo da estrutura, diminuindo a sua capacidade de infiltração.

Quadro 10 - Parâmetros da Equação de Horton para os eventos observados.

Eventos/Data	Parâmetros da Equação de Horton		
	fb (mm/h)	fo (mm/h)	k
Evento 1 – 30.09.2011	0,512	25,16	0,1542
Evento 2 – 17.09.2012	0,696	33,17	0,2011
Evento 3 – 29.09.2012	0,305	26,42	0,1283
Evento 4 – 12.03.2013	0,542	21,81	0,1421
Evento 5 – 04.04.2013	0,540	24,90	0,1585
Evento 6 – 11.04.2013	0,581	29,47	0,1272
Média	0,5293	26,82	0,1519
Desvio Padrão	0,13	3,98	0,027
Coefficiente de Variação	0,24	0,15	0,18

Fonte: Autora.

Entretanto, levando-se em consideração o tipo de preenchimento da estrutura (resíduos da construção civil, pneus, brita, areia e solo) e da sua cobertura vegetal (bananeira, taioba e espécies do gênero de *Canna*), que atualmente estão totalmente desenvolvidas. E também, que a presença de fendas, rachaduras e canais biológicos originados por raízes e pela fauna do solo, atuam como caminhos preferenciais por onde a água se movimenta com pouca resistência, aumentando a capacidade de infiltração da biorretenção.

Verifica-se, através da comparação entre a Figura 48 e Figura 49, o bom desenvolvimento das espécies vegetais plantadas, sendo que em nenhum momento houve manejo ou tratamentos culturais, nem mesmo irrigação.

Segundo Bassoi et al. (2001), o consumo médio diário da bananeira pode chegar até 4mm/dia. Levando em consideração que no experimento existem 5 bananeiras adultas (vegetação dominante), o consumo total fica em torno de 20 mm/dia, ou seja, uma taxa de 0,83 mm/h. Assim, relacionando com os níveis, constata-se que a partir de 10 cm, a diminuição dos níveis da biorretenção é em função da vegetação (evapotranspiração).

Então, tem-se de um lado um processo que diminui a capacidade de funcionamento da estrutura (colmatação do fundo) e de outro lado, um que atua de forma positiva (porosidade aumentada), assim, percebe-se que ocorre uma compensação nas ações, não alterando significativamente os parâmetros do solo.

Figura 48 - Plantio das mudas de bananeiras.



Fonte: (DANIEL JR., 2013).

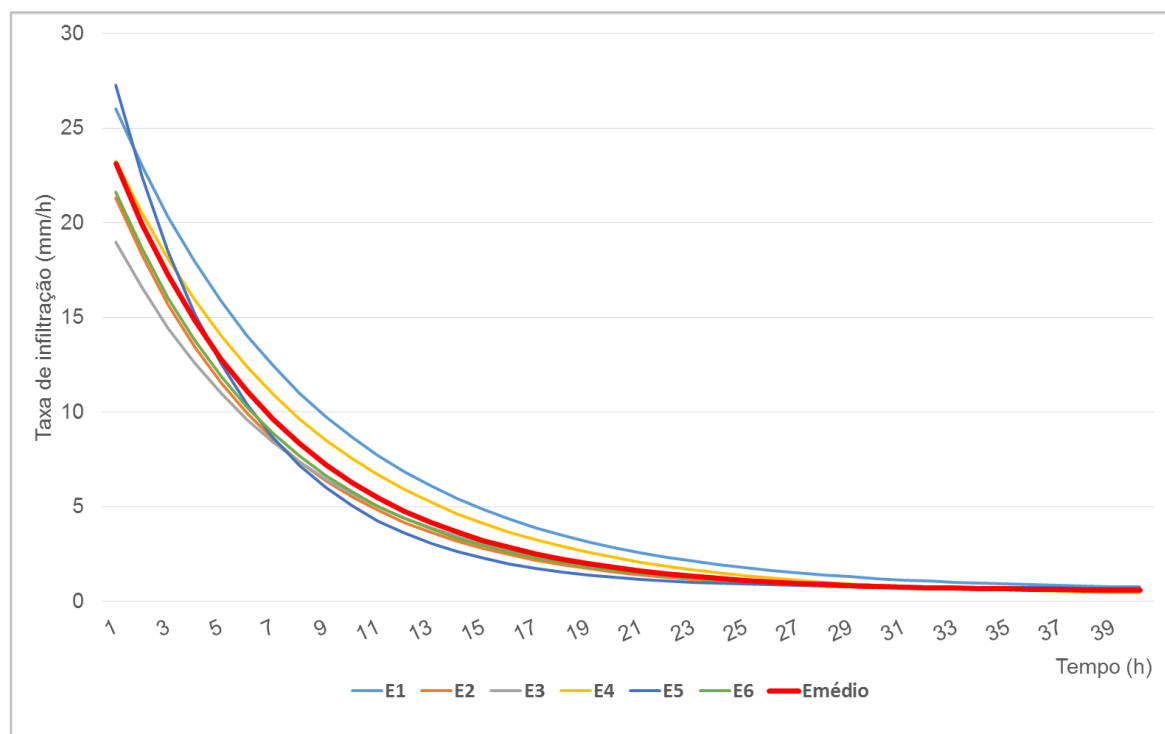
Figura 49 - Estádio atual das espécies vegetais plantadas.



Fonte: Autora.

E para fins de dimensionamento, determinou-se uma curva média (Figura 50) a partir das curvas individuais dos eventos.

Figura 50 - Curvas de Horton ajustadas dos eventos observados.

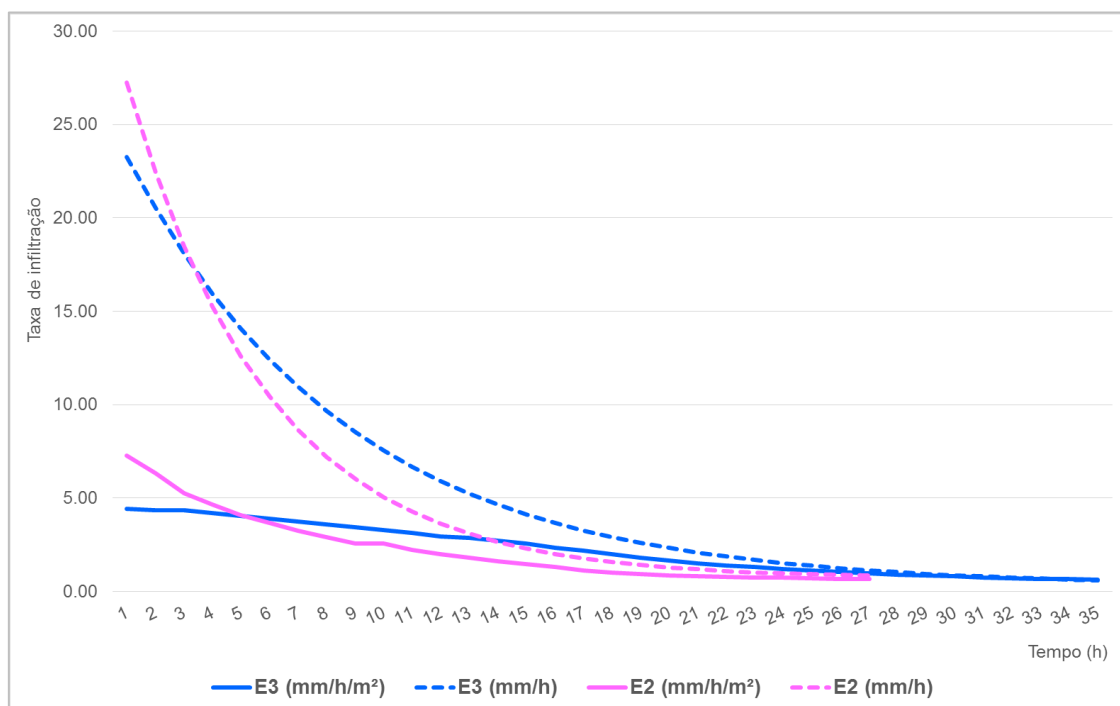


Fonte: Autora.

De forma semelhante ao realizado com os ensaios, foram estimados os valores da infiltração unitária (Figura 51 e Figura 52), sendo que para profundidades de água superiores a 10 cm, se mantiveram em valores superiores, entre 7 a 2 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$.

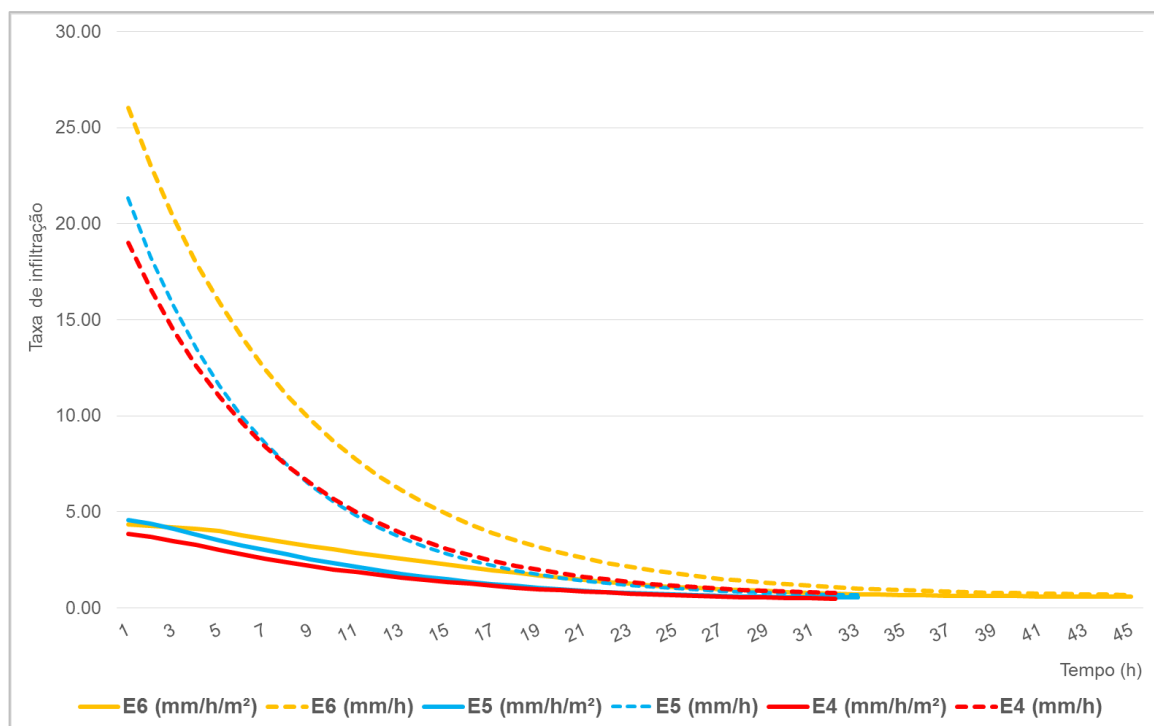
O E1 apresentou o mesmo comportamento do Ensaio 01, por isso, não foi representado nos gráficos. Os valores de infiltração unitária foram crescendo, o que não tem sentido físico. Comparando com os outros eventos, os níveis dentro da estrutura durante o E1, na sua maioria, ficaram abaixo dos 10 cm, ou seja, as perdas foram por evapotranspiração, justificando assim a taxa de infiltração unitária aumentar ao longo do tempo ao invés de diminuir.

Figura 51 - Valores de infiltração e infiltração unitária dos eventos E2 e E3.



Fonte: Autora.

Figura 52 - Valores de infiltração e infiltração unitária dos eventos E6, E5 e E4.



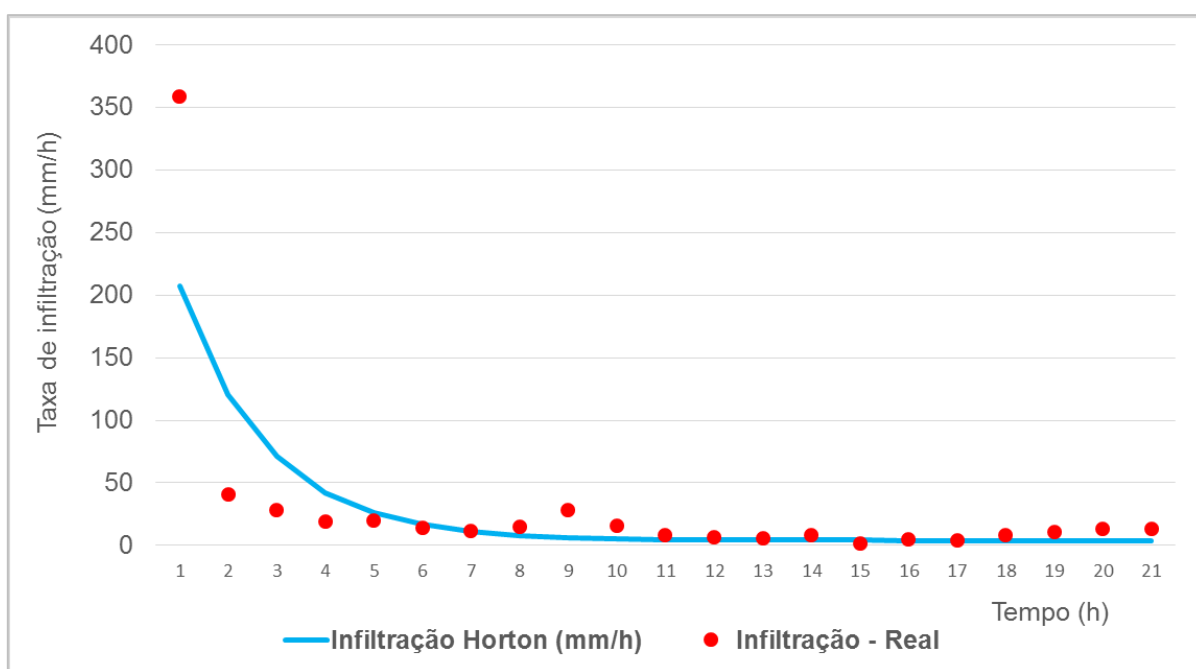
Fonte: Autora.

4.3.2.3. Ajuste dos parâmetros de Horton para os testes de estresse

Da Figura 53 a Figura 57, estão representadas todas as 5 curvas obtidas através do teste de estresse.

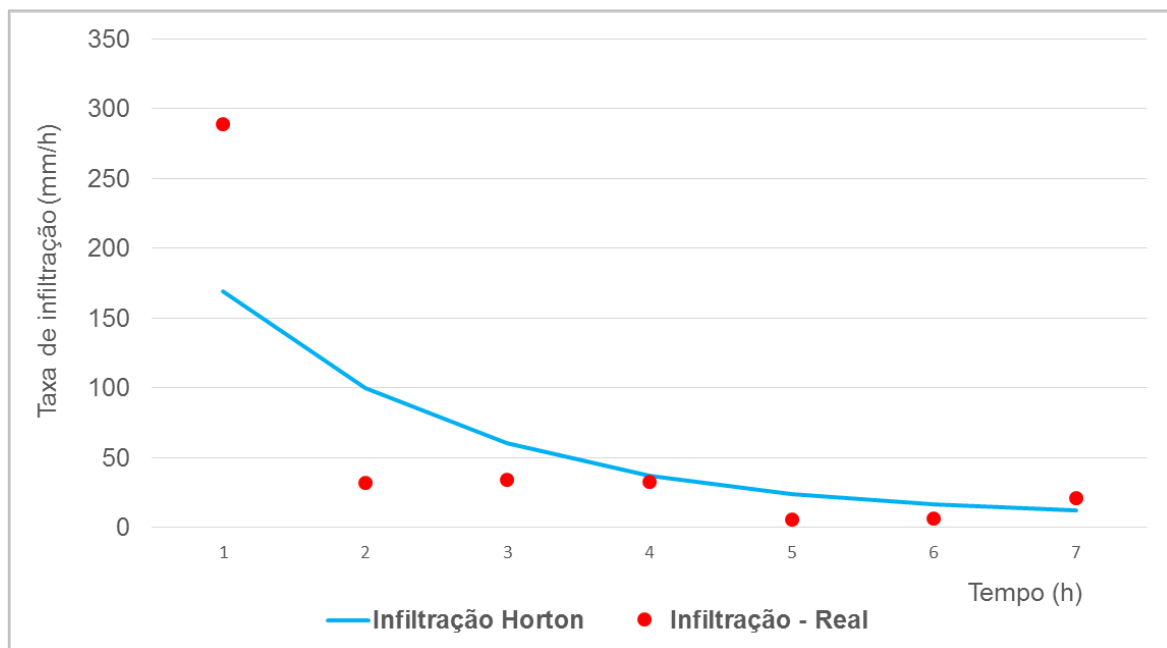
Observa-se, que os valores da taxa de infiltração inicial (f_0) são extremamente altos em relação aos valores encontrados nos ensaios e nos eventos monitorados. Uma das hipóteses seria a influência da área lateral da estrutura em ação conjunta com a pressão que a água exerce na mesma. Como durante o teste, o nível máximo da estrutura foi atingido, toda a área lateral contribui no processo de infiltração, portanto, têm-se altos valores nos primeiros minutos, diminuindo no decorrer do tempo, conforme diminui a influência da área lateral.

Figura 53 - Ajuste da curva de Horton - Teste 1.



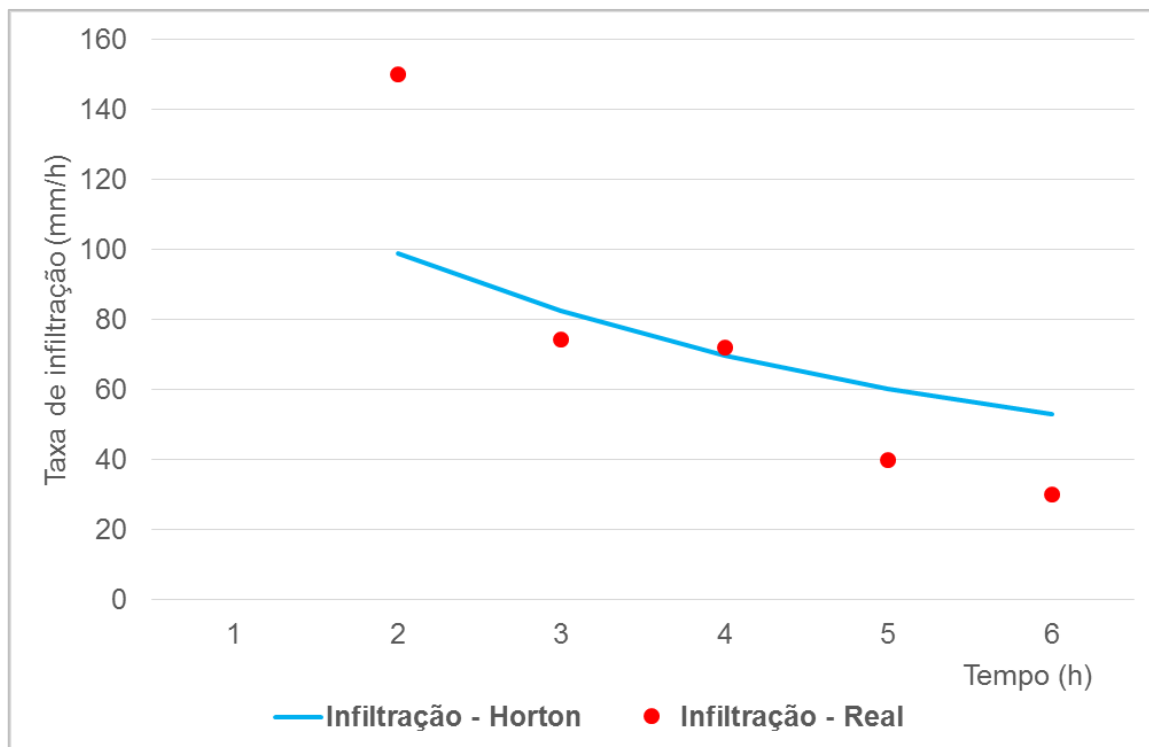
Fonte: Autora.

Figura 54 - Ajuste da curva de Horton - Teste 2.



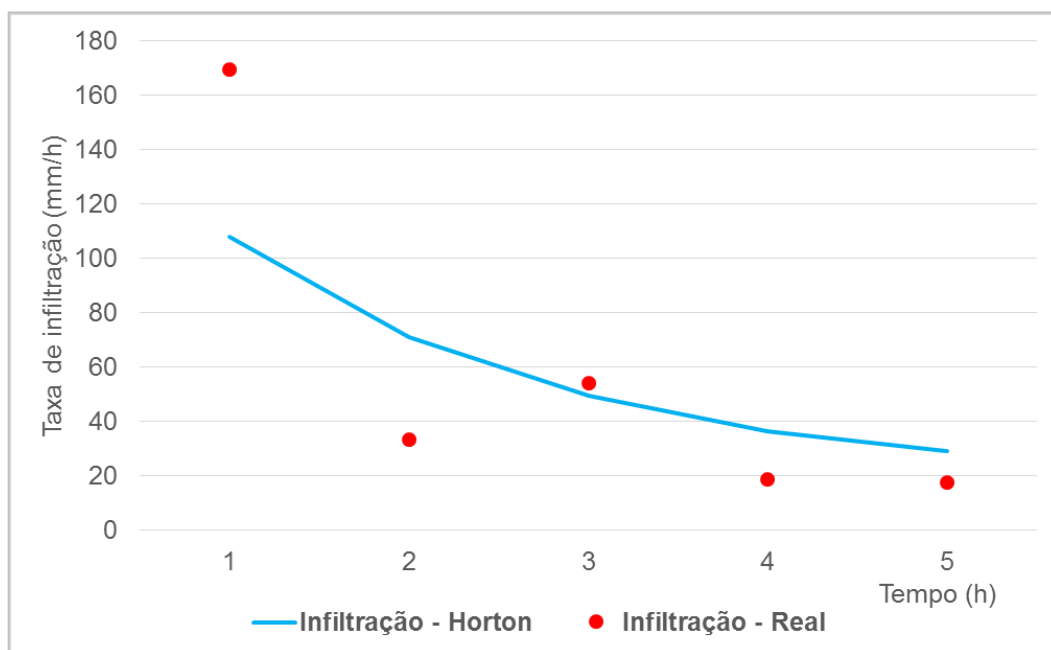
Fonte: Autora.

Figura 55 - Ajuste da curva de Horton - Teste 3.



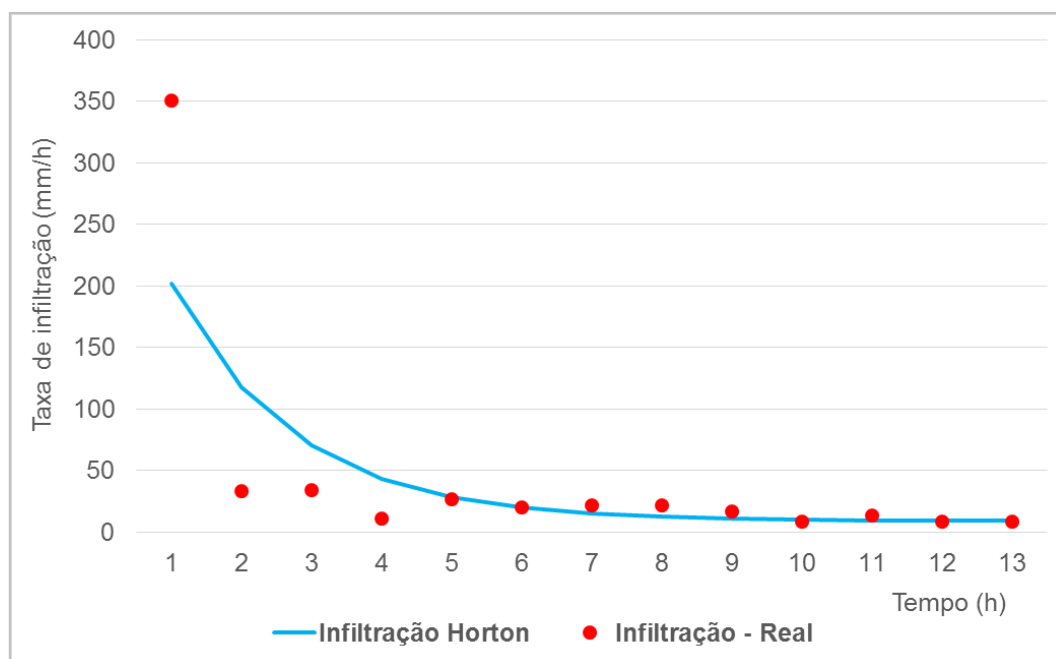
Fonte: Autora.

Figura 56 - Ajuste da curva de Horton - Teste 4.



Fonte: Autora.

Figura 57 - Ajuste da curva de Horton - Teste 5.



Fonte: Autora.

No Quadro 11, são apresentados os parâmetros ajustados de Horton para o teste de estresse, somente para os três melhores ajustes (Teste 1, 2 e 5). E na Figura

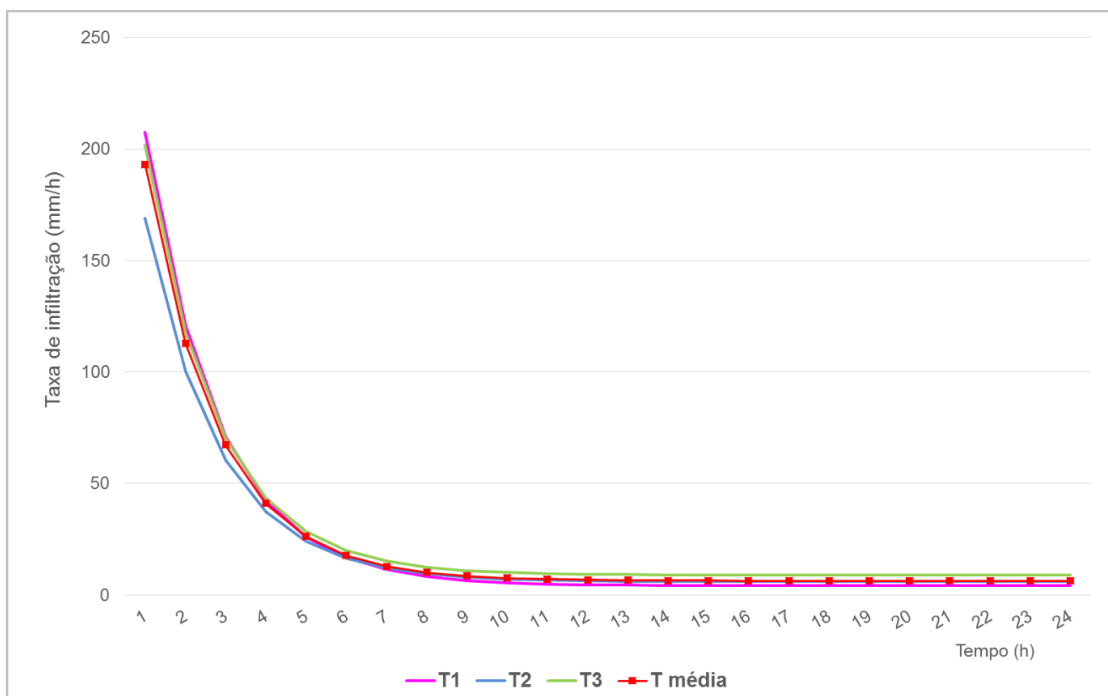
58, tem-se a curva média ajustada, que será utilizada no redimensionamento da biorretenção.

Quadro 11 - Parâmetros da Equação de Horton para o teste de funcionamento.

Eventos	Parâmetros da Equação de Horton		
	fb (mm/h)	fo (mm/h)	K
TESTE 1	4,08	358,86	0,5564
TESTE 2	6,00	288,90	0,5502
TESTE 5	8,94	351,00	0,5732
Média	6,34	332,92	0,5599
Desvio Padrão	2,44	38,32	0,119
Coefficiente de Variação	38,61	11,51	2,126

Fonte: Autora.

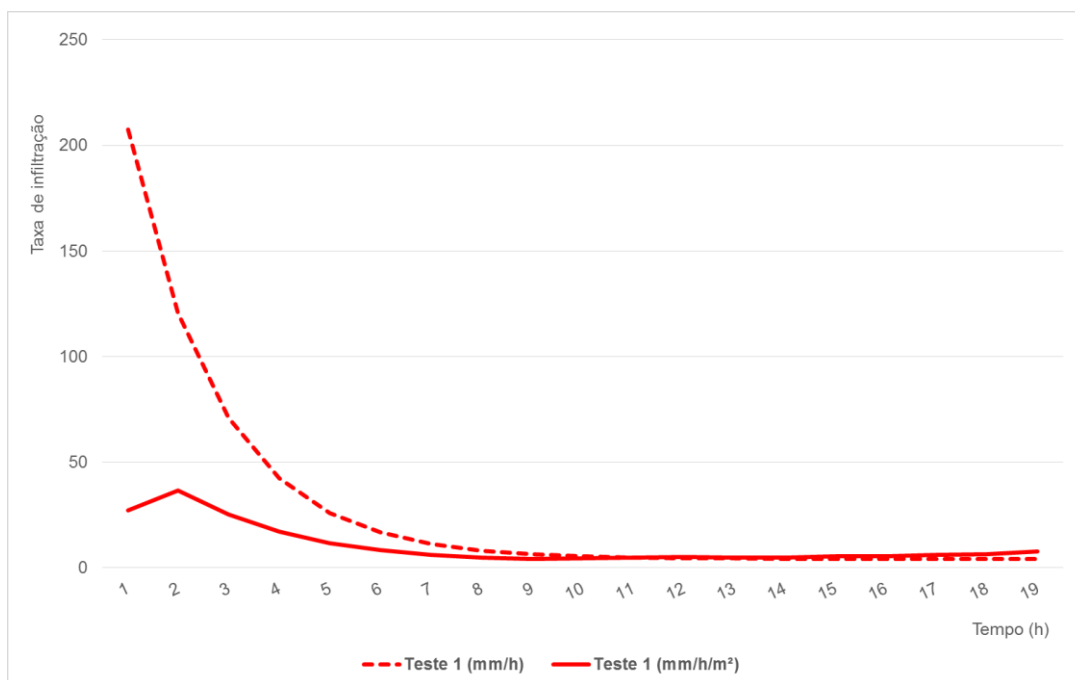
Figura 58 - Curvas ajustadas do teste de funcionamento.



Fonte: Autora.

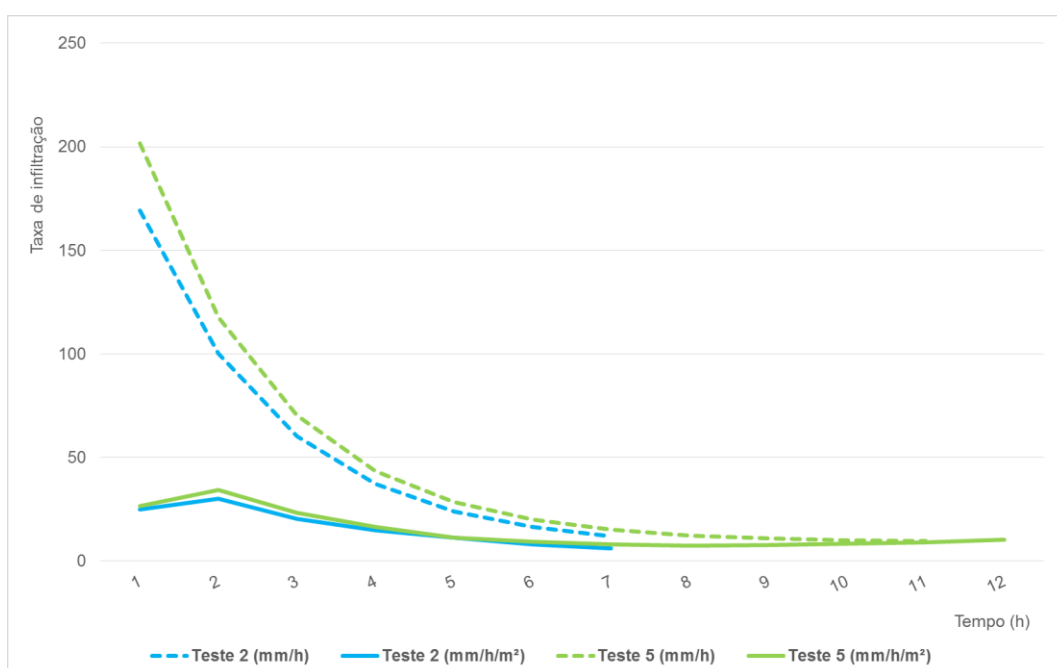
De forma semelhante aos casos anteriores, foi calculada a taxa de infiltração unitária (Figura 59 e Figura 60). Que após valores iniciais mais elevados, se manteve próxima de $10 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$, com algumas oscilações.

Figura 59 - Valores de infiltração e infiltração unitária para o teste 1.



Fonte: Autora.

Figura 60 - Valores de infiltração e infiltração unitária para os testes 2 e 5.



Fonte: Autora.

4.3.2.4. Análise comparativa das curvas médias

No Quadro 12 e na Figura 61 apresentam-se os valores médios para as três situações abordadas, obtidos através dos resultados individuais dos ensaios de infiltração, dos eventos monitorados e do teste de estresse, respectivamente.

Quadro 12 - Parâmetros Médios da Equação de Horton.

Ajustes das Médias	Parâmetros da Equação de Horton		
	fb (mm/h)	fo (mm/h)	k
ENSAIOS	12,30	70,00	0,5260
EVENTOS	0,5293	26,82	0,1519
TESTES	6,34	332,92	0,5599

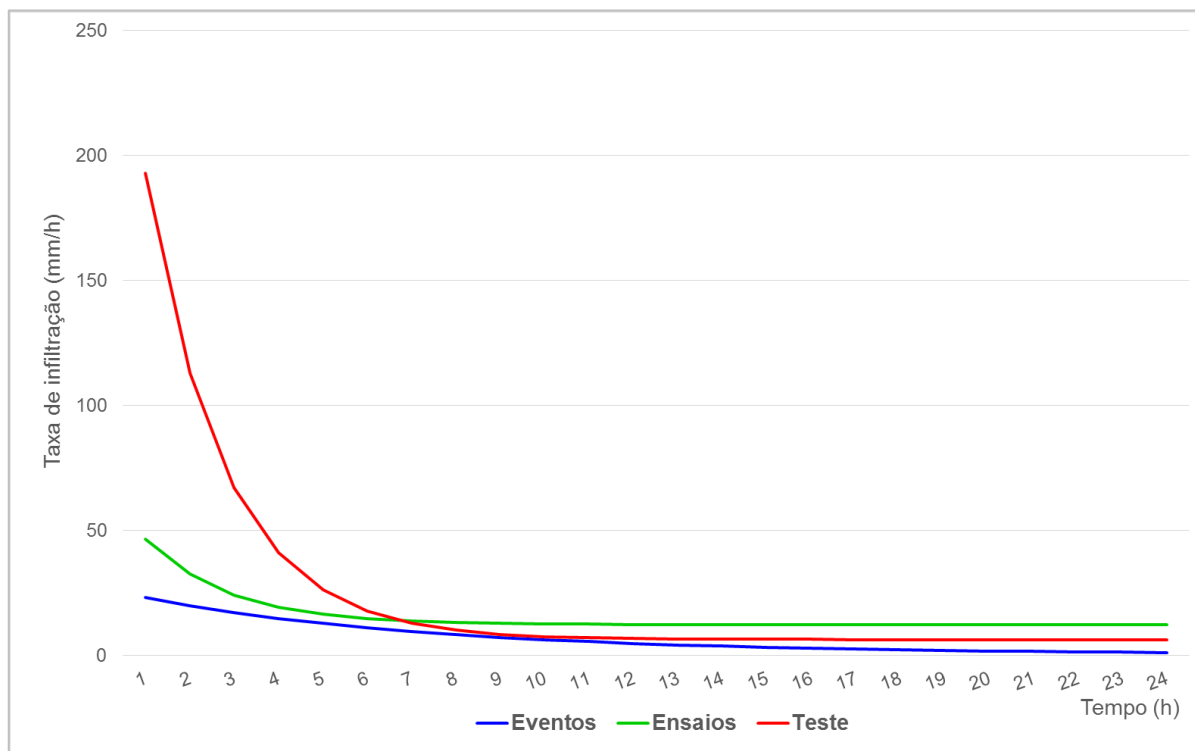
Fonte: Autora.

Comparando-se as curvas médias (Figura 61), verifica-se a grande variabilidade nos valores. Inicialmente, a taxa de infiltração saturada (fb) varia de 12,30 mm/h (resultado dos ensaios) para 0,5293 mm/h (resultado dos eventos), uma redução aproximada de 95%. E em relação ao teste de estresse é aproximadamente metade do valor (6,34 mm/h). Acredita-se que essa oscilação seja principalmente em função da duração do ensaio, pois, não se atingiu a saturação real do solo. Sendo necessário aumentar a duração do processo preliminar de saturação recomendado pela NBR 13969/97.

Há uma diferença entre os Eventos e os Testes, em relação ao tempo de observação, no primeiro têm-se os dados de níveis até 55 horas após o evento de precipitação e no segundo trabalhou-se com dados, de no máximo 24 horas de duração.

Mesmo com grande variação nos valores de fb, analisando-se as curvas, verifica-se que elas tendem a se estabilizarem juntas em torno de 8 a 10 horas após os eventos de precipitação.

Figura 61 - Curvas médias de Horton dos ensaios, eventos e teste de estresse.



Fonte: Autora.

Outra questão é relacionada a possível colmatção do fundo da estrutura. No teste de estresse, onde o sensor estava aproximadamente 40 cm acima do nível utilizado na medição dos eventos selecionados entre 2011 e 2013, portanto, não se mediu os centímetros finais da estrutura, provavelmente estejam colmatados. Observa-se este processo na variação do parâmetro k , que é por definição uma variável ajustada dependente das características do solo. Para os Ensaios e os Testes têm-se valores de k bastante próximos, mas há uma redução no valor para os Eventos, dando indícios de um processo de colmatção.

A infiltração básica saturada (f_b) dos eventos monitorados é 0,5293 mm/h e, conforme observado nas Figura 43 e Figura 44, após 24 horas há uma pequena infiltração, com valores em torno de 0,50mm/h. No entanto, este valor é mais compatível com a evapotranspiração do que com a infiltração.

Considerando um valor aproximado de 5mm/dia de evapotranspiração, e o coeficiente de 2,5 vezes a EVTP de referência, em função das plantas escolhidas e dos resultados de Galbiati (2009). A EVTP diária seria de 15mm, ou seja, 0,625mm/hora. E levando-se em consideração, uma maior dificuldade de extração de

água pelas plantas e uma diminuição do consumo, uma vez que durante o enchimento as plantas consomem bastante água, e uma possível menor insolação por estar nublado, o valor de 0,5293mm/hora é compatível com o consumo somente da EVTP.

O grande contraste de valores está na taxa de infiltração inicial (varia de 26,82mm/h a 332,92mm/h) e é a razão para a biorretenção estar funcionando tão bem após 5 anos de sua construção. Nas primeiras horas têm-se os maiores níveis dentro da estrutura, isto é, maior é a área de infiltração lateral e maior a pressão da água exercida sobre a mesma, assim, maior será o meu volume infiltrado.

Quando analisada a infiltração unitária, também se verificam diferenças significativas entre os testes realizados. Nos ensaios os valores convergiram para uma taxa mínima de $75 \text{ mm.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$, enquanto que os resultados dos eventos durante o funcionamento ficaram entre 7 e $2 \text{ mm.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$ e no teste de estresse se estabilizou em valores próximos de $10 \text{ mm.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$. Os motivos para estes comportamentos são os mesmos já expostos, no ensaio da NBR 13969/97, a saturação ensaio foi menor do que o necessário para atingir a saturação real. Além de que o ensaio não foi afetado por finos que colmatam a estrutura.

Durante o período monitorado (E1, E2, E3, E4, E5 e E6) os menores valores se devem também as menores alturas de água, o que diminui a pressão hidrostática, e por outro, coloca a região de funcionamento da biorretenção próxima da região de colmatação. Exatamente por isso, no teste de estresse, onde a saturação do solo está praticamente assegurada, os valores foram maiores, já que o teste se realizou em alturas mais elevadas da estrutura.

Estas diferenças indicam a dificuldade de se estabelecer um valor único de infiltração para o dimensionamento de uma estrutura de biorretenção. Considerando que a biorretenção esteja na metade de sua vida útil, para o dimensionamento seria importante considerar um fator de segurança de 15, com relação à infiltração unitária. Assim, os valores de infiltração unitária seriam da ordem de $5 \text{ mm.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$.

4.4 DIMENSIONAMENTO PELO MÉTODO DA CURVA-ENVELOPE

Na utilização do Método da Curva-Envelope foram utilizadas 3 abordagens, sendo a primeira a aplicação das etapas originais proposta por Urbonas e Stahre (1993); na segunda, os volumes de entrada são calculados pelo Método Racional,

sem o acréscimo de 25% ao volume e na terceira, além da alteração nos volumes de entrada, são utilizadas as equações ajustadas de Horton para a determinação dos volumes de saída.

Para cada uma das 3 abordagens do Método da Curva-Envelope utilizadas, foram realizados 6 dimensionamentos, sendo nos três primeiros com a taxa de infiltração média saturada obtida dos ensaios, dos eventos observados e do teste de estresse, respectivamente, e os demais com a taxa de infiltração unitária saturada obtida dos ensaios, dos eventos observados e do teste de estresse.

Os dados comuns utilizados em todas as abordagens foram o coeficiente de escoamento ($C=0,95$), o tempo de retorno ($TR = 2$ anos), a área de contribuição ($A=85,00 \text{ m}^2$), a porosidade ($\Phi=0,60$), o comprimento da estrutura ($L=4,00\text{m}$), a altura da estrutura ($h=1,20\text{m}$) e a largura da estrutura ($b=2,00\text{m}$). E para o cálculo da intensidade de precipitação (I_t) utilizou-se a IDF para Santa Maria apresentada por Roman (2015).

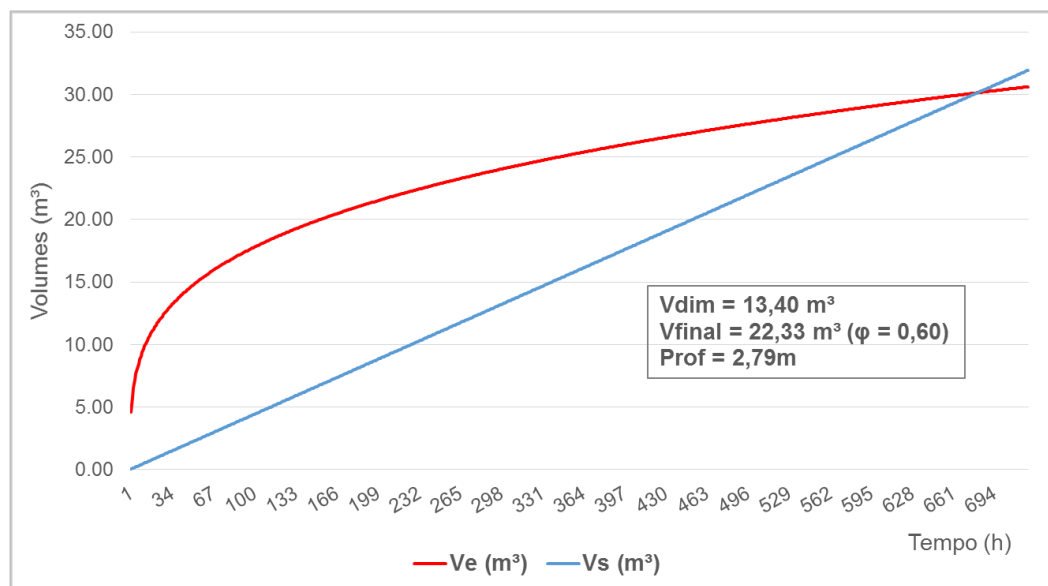
4.4.1 Dimensionamento 1ª abordagem – utilizando taxa de infiltração média saturada dos ensaios

Na abordagem, a taxa de infiltração média saturada dos ensaios utilizada foi de 12,3 mm/h (situação 1), sendo reduzida pelo coeficiente de segurança de 2. Chegou-se a um volume de dimensionamento igual a 22,33 m³. Somente aos 28 dias o volume de saída (V_s) começa a ser maior que o volume de entrada (V_e), sendo necessário uma profundidade de 2,79m (Figura 62).

Na situação 2, a taxa de infiltração média saturada dos eventos observados utilizada foi de 0,5293 mm/h, sendo este o único dado diferente em relação ao dimensionamento anterior. Chegando-se a um volume de dimensionamento igual a 57,10m³ e uma profundidade de 7,14m (Figura 63). Seguindo-se as instruções da metodologia tradicional, seria necessário, aumentar as dimensões da estrutura e recomeçar o cálculo, para ambas as situações.

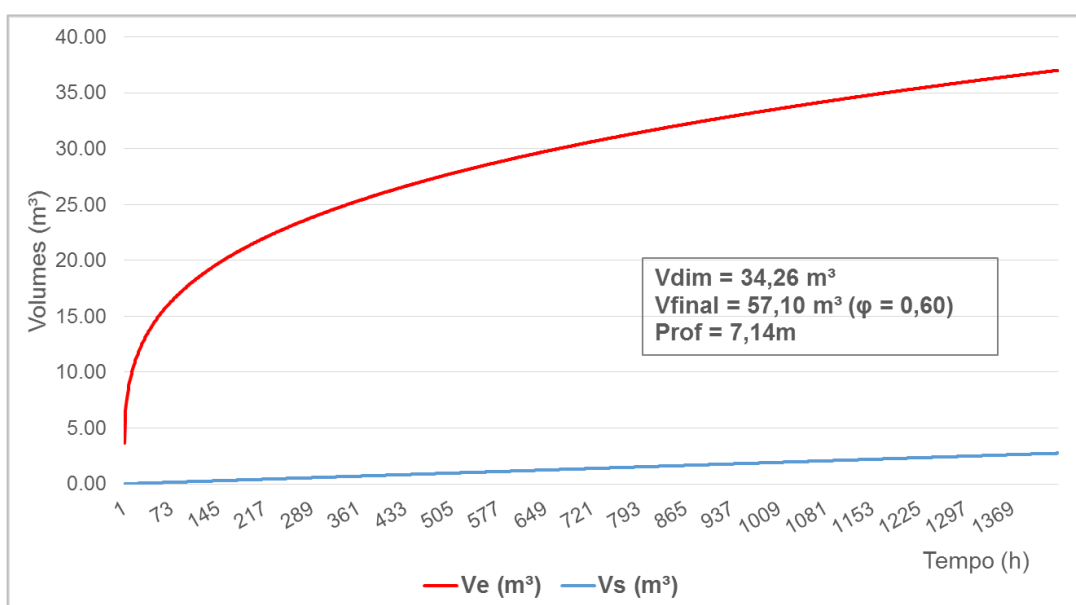
Na situação 3 a taxa de infiltração média saturada dos testes utilizada foi de 6,34 mm/h. Chegando-se a um volume de dimensionamento igual a 28,70m³ e uma profundidade de 3,59m (Figura 64). Também, seria necessário, aumentar as dimensões da estrutura e recomeçar o cálculo.

Figura 62 - Dimensionamento 1ª abordagem – situação 1 – taxa de infiltração dos ensaios.



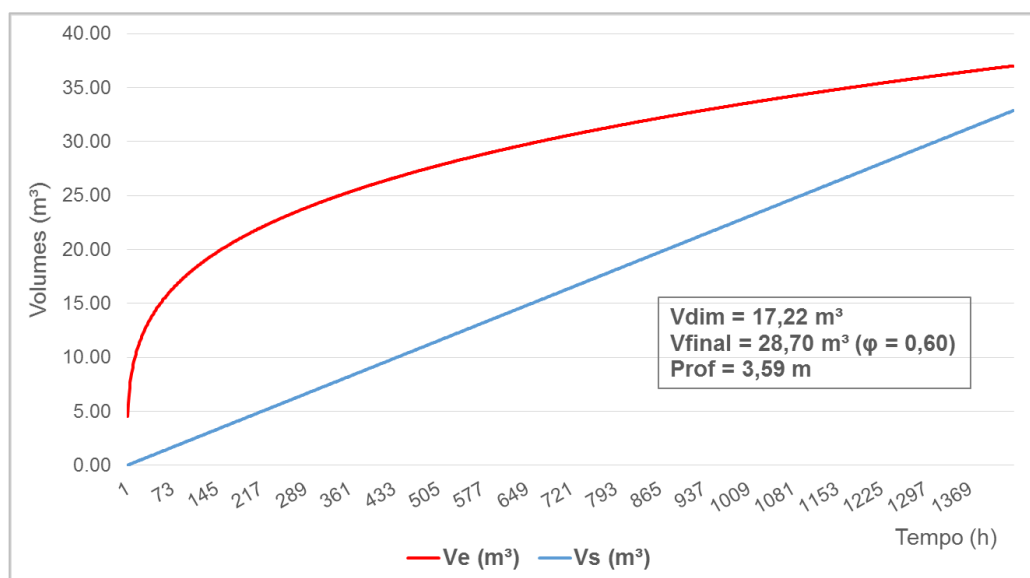
Fonte: Autora.

Figura 63 - Dimensionamento 1ª abordagem - situação 2 – taxa de infiltração dos eventos.



Fonte: Autora.

Figura 64 - Dimensionamento 1ª abordagem - situação 3 – taxa de infiltração do teste.



Fonte: Autora.

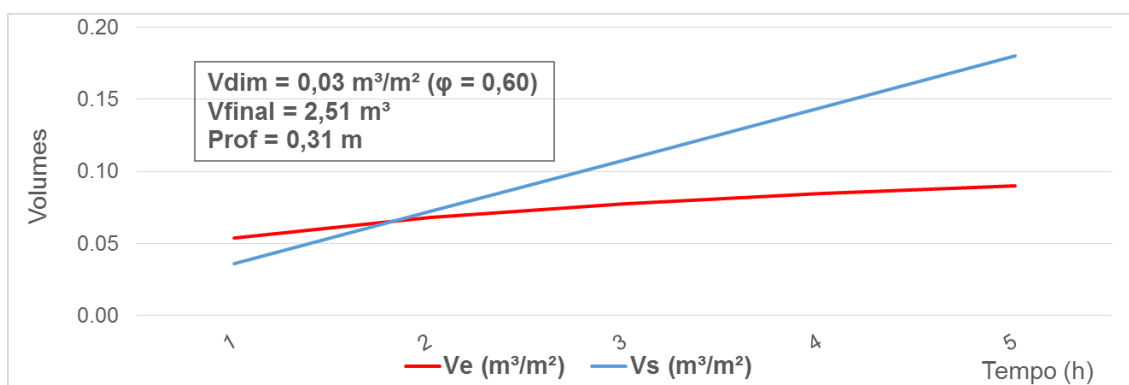
Em outra linha de pensamento, utilizou-se as taxas unitárias de infiltração para o dimensionamento de 1m² de área de contribuição com os valores dos ensaios, eventos e testes, obtendo-se um valor em m³.m⁻² e, posteriormente, multiplicou-se pela área total do telhado de 85 m².

Na Figura 65, tem-se o volume a ser armazenado pela biorretenção para 1 m² (Vdim = 0,03 m³.m⁻²), utilizando-se a taxa de infiltração unitária dos ensaios de 75 mm.h⁻¹.m⁻² dividida por um coeficiente de segurança de 15. Quando multiplicado pela área total do telhado o volume da estrutura é de 2,51m³.

Na Figura 66, procedeu-se da mesma forma para os eventos, porém com a taxa de infiltração unitária de 2 mm.h⁻¹.m⁻², obtendo-se o volume para 1m² de 0,21 m³.m⁻², ou seja, para o total o volume é 17,69m³. Na Figura 67, utilizou-se a taxa dos testes no valor 10 mm.h⁻¹.m⁻², o volume unitário calculado foi de 0,11 m³.m⁻² e o total de 9,38m³.

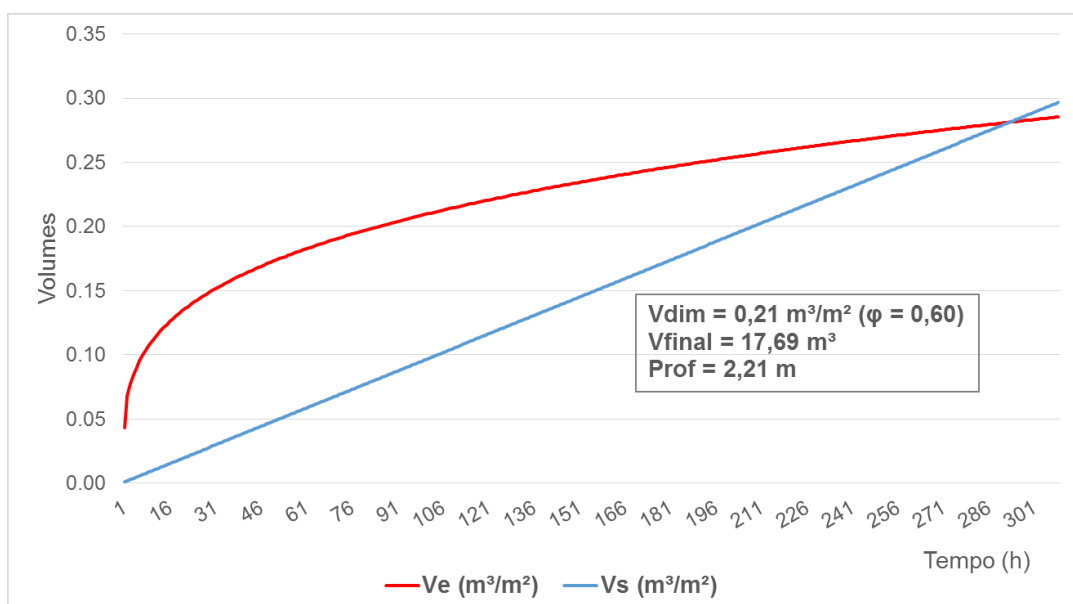
Comparando-se os valores dos dimensionamentos com os valores médios e com os dos valores unitários, verifica-se uma grande diferença. Isso se dá, porque quando se calcula para áreas de contribuição diferentes, os volumes de entrada variam proporcionalmente a área, porém, os volumes de saída continuam os mesmos, independentemente do volume de entrada.

Figura 65 – Dimensionamento 1ª abordagem – situação 1 – taxa de infiltração unitária dos ensaios.



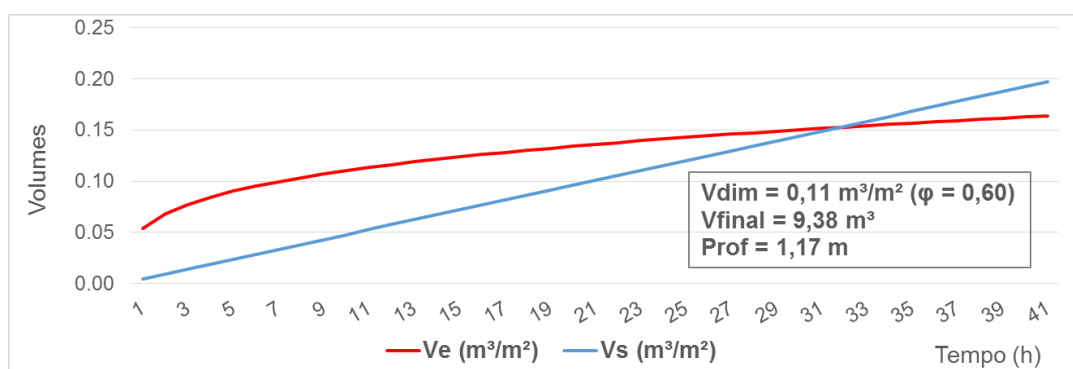
Fonte: Autora.

Figura 66 - Dimensionamento 1ª abordagem – situação 2 – taxa de infiltração unitária dos eventos.



Fonte: Autora.

Figura 67 - Dimensionamento 1ª abordagem – situação 3 – taxa de infiltração unitária dos testes.

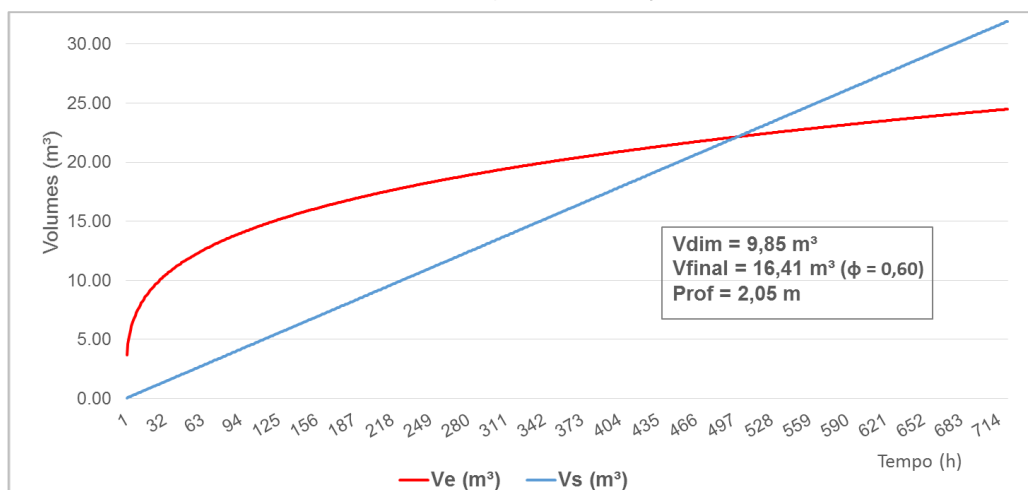


Fonte: Autora.

4.4.2 Dimensionamento 2ª abordagem - utilizando taxa de infiltração média saturada dos eventos

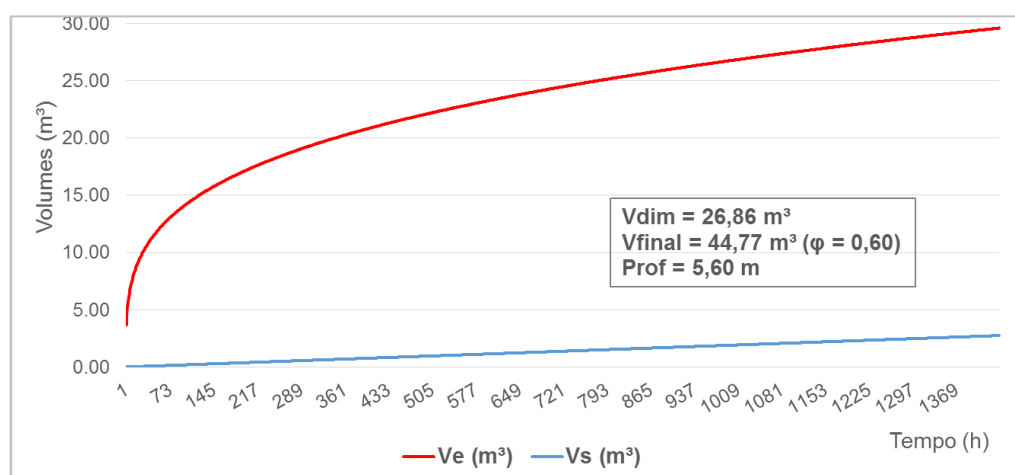
Para a execução da segunda abordagem, a única alteração em relação a metodologia original, é que não se considerou o acréscimo de 25% no cálculo do volume de entrada. Tanto na situação 1 (Figura 68), situação 2 (Figura 69) e situação 3 (Figura 70) foram utilizados os valores médios das taxas de infiltração. Obtiveram-se resultados menores em relação à primeira abordagem, porém, ainda seria necessário aumentar as dimensões da estrutura e recomeçar o cálculo, para ambas as situações.

Figura 68 - Dimensionamento 2ª abordagem - situação 1.



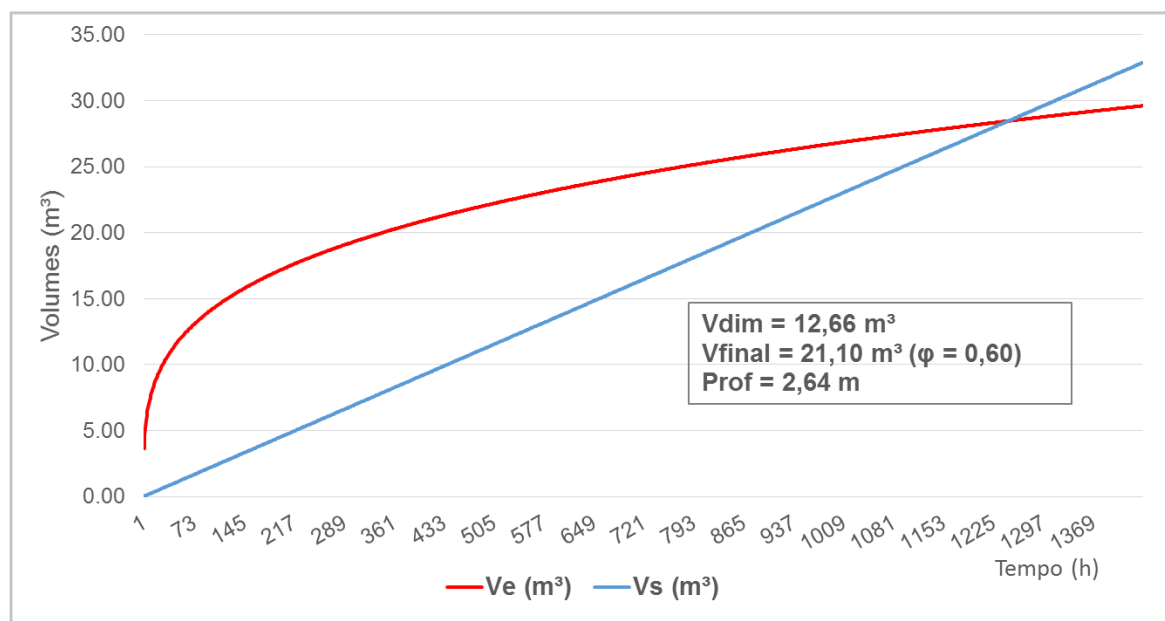
Fonte: Autora.

Figura 69 - Dimensionamento 2ª abordagem - situação 2.



Fonte: Autora.

Figura 70 - Dimensionamento 2ª abordagem - situação 3.

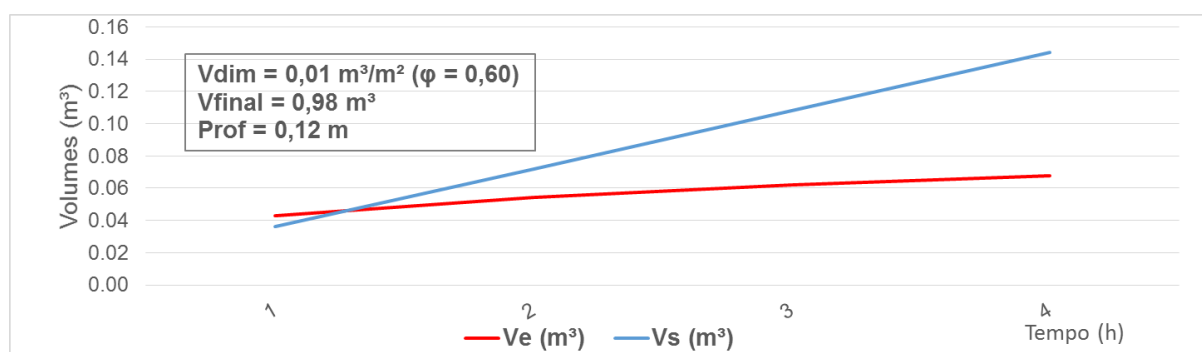


Fonte: Autora.

Na Figura 71, tem-se o volume a ser armazenado pela biorretenção para 1 m^2 ($V_{\text{dim}} = 0,01 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$), utilizando-se a taxa de infiltração unitária dos ensaios de $75 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ dividida por um coeficiente de segurança de 15. Quando multiplicado pela área total do telhado o volume da estrutura foi de $0,98 \text{ m}^3$.

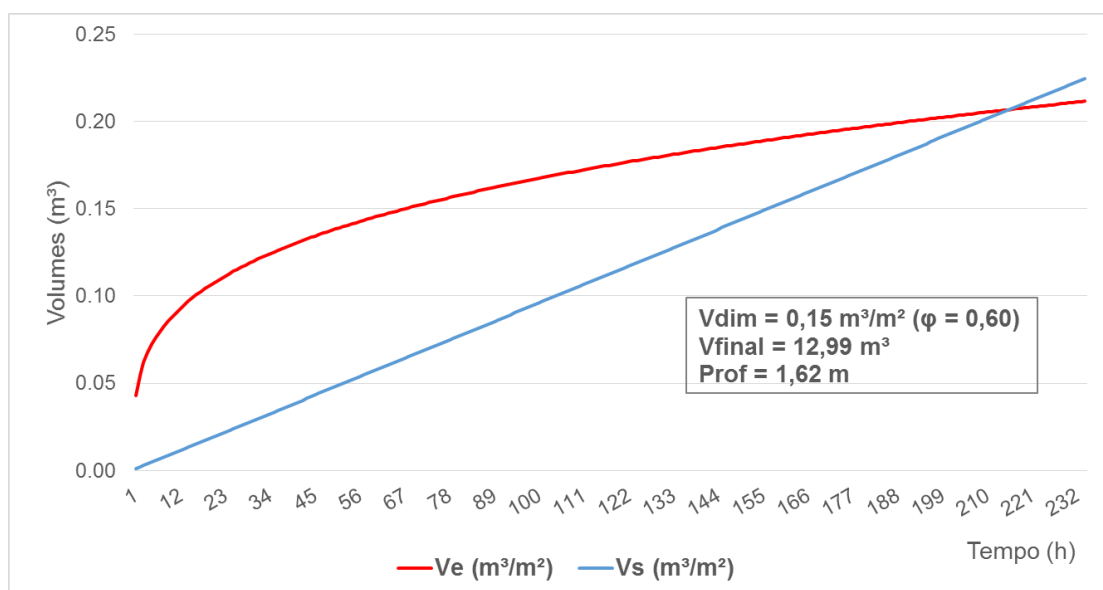
Na Figura 72, utilizou-se a taxa de infiltração unitária dos eventos de $2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, obtendo-se um volume para 1 m^2 de $0,15 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$, ou seja, para o total o volume foi $12,99 \text{ m}^3$. Na Figura 73, para a taxa dos testes de $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ o volume unitário calculado foi de $0,08 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$ e o total de $6,85 \text{ m}^3$.

Figura 71 - Dimensionamento 2ª abordagem - situação 1 - taxa de infiltração unitária dos ensaios.



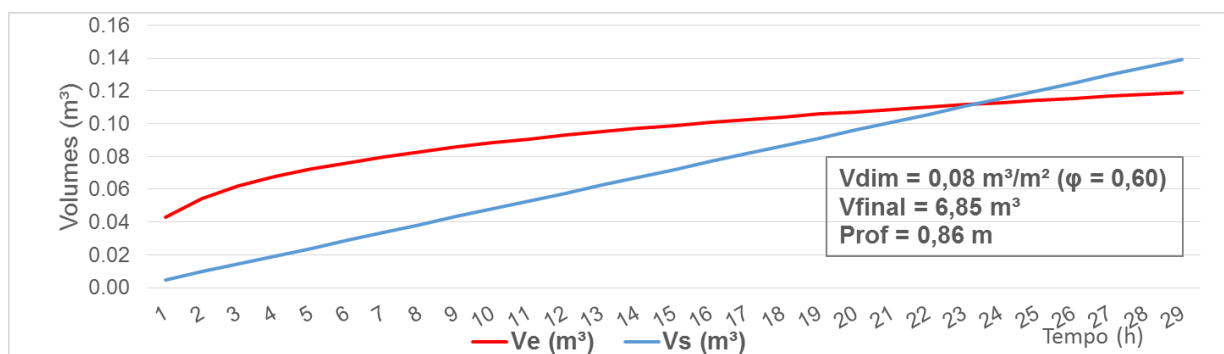
Fonte: Autora.

Figura 72 - Dimensionamento 2ª abordagem - situação 2 - taxa de infiltração unitária dos eventos.



Fonte: Autora.

Figura 73 - Dimensionamento 2ª abordagem - situação 3 - taxa de infiltração unitária dos testes.



Fonte: Autora.

4.4.3 Dimensionamentos 3ª abordagem utilizando taxa de infiltração média saturada dos testes

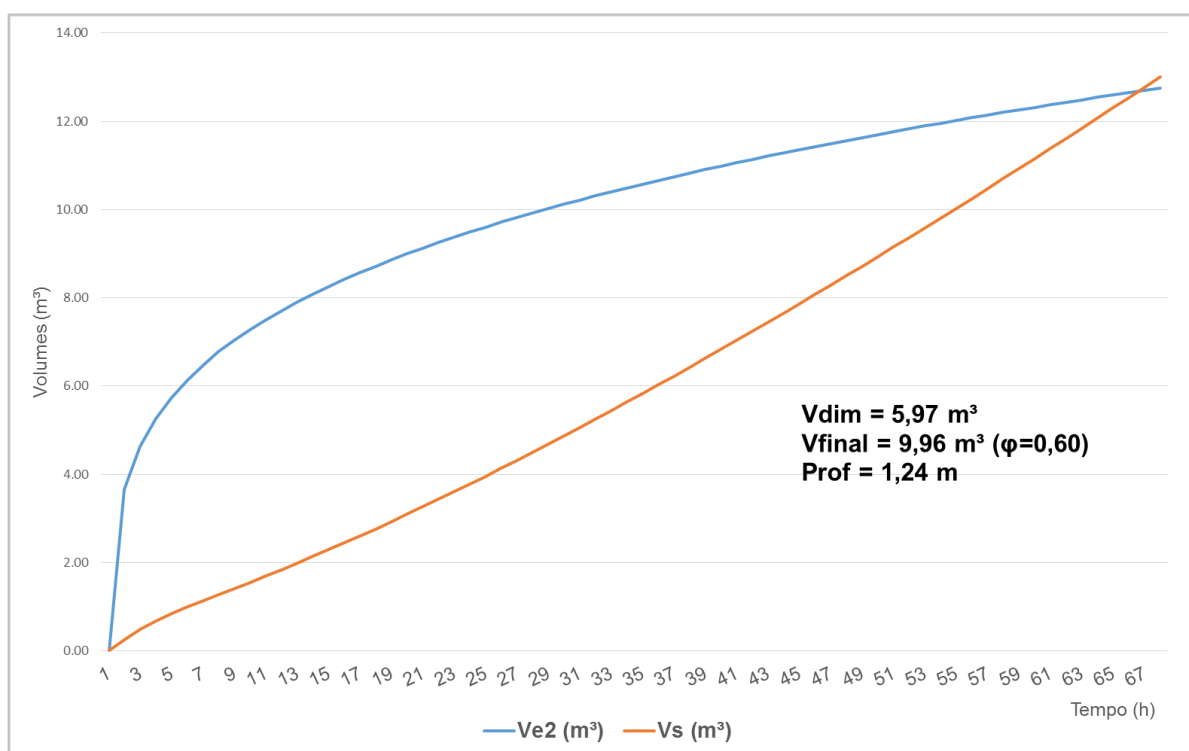
Mantendo-se as alterações já feitas na rotina de cálculo, a terceira abordagem propõe que o volume de saída da estrutura seja calculado através da equação de Horton e considerando somente a área lateral como superfície infiltrante.

Conforme Figura 74, utilizou-se a equação de Horton ajustada para os ensaios *in loco* (situação 1), obtendo-se um volume de dimensionamento de $9,96\text{m}^3$ e uma profundidade de $1,24\text{m}$, sendo estes valores muito próximos ao da estrutura existente, onde se tem uma profundidade de $1,20\text{m}$.

Na situação 2, utilizou-se a equação de Horton ajustada para os eventos observados. O comportamento (Figura 75) foi semelhante aos das abordagens anteriores; houve um aumento no volume de dimensionamento ($23,69\text{m}^3$) e conseqüentemente na profundidade ($2,96\text{m}$). Ainda, seria necessário aumentar as medidas e recomeçar o dimensionamento.

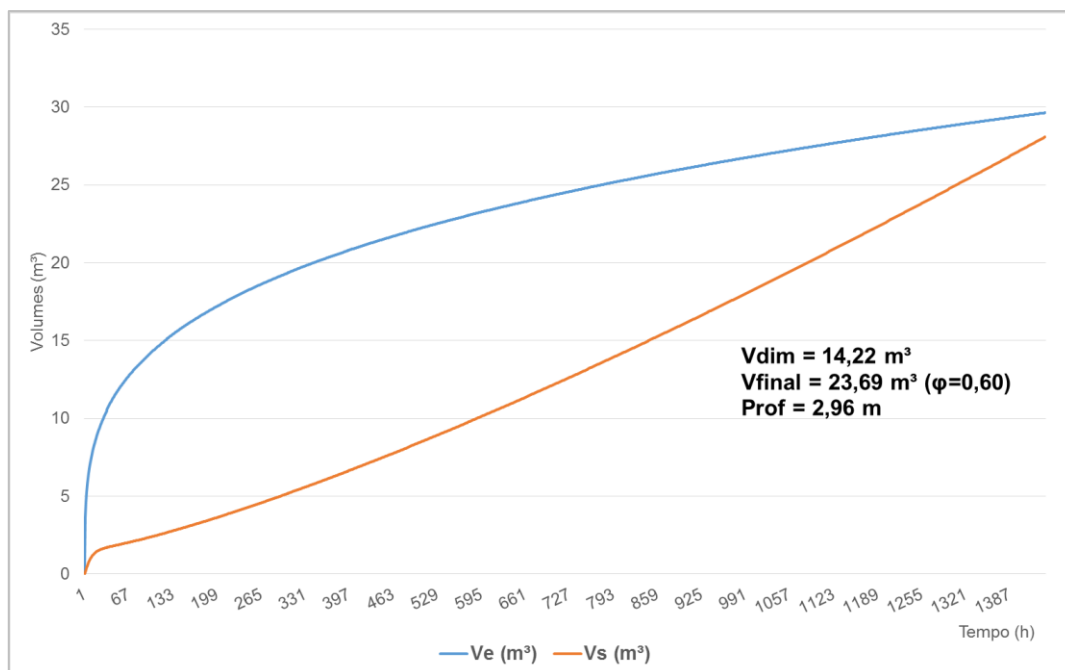
Para a situação 3 (Figura 76), utilizando-se da equação de Horton ajustada para os testes de estresse. Chega-se a um volume de dimensionamento de $8,18\text{m}^3$ e uma profundidade de $1,03\text{m}$, sendo valores menores que o construído.

Figura 74 - Dimensionamento 3ª abordagem - situação 1.



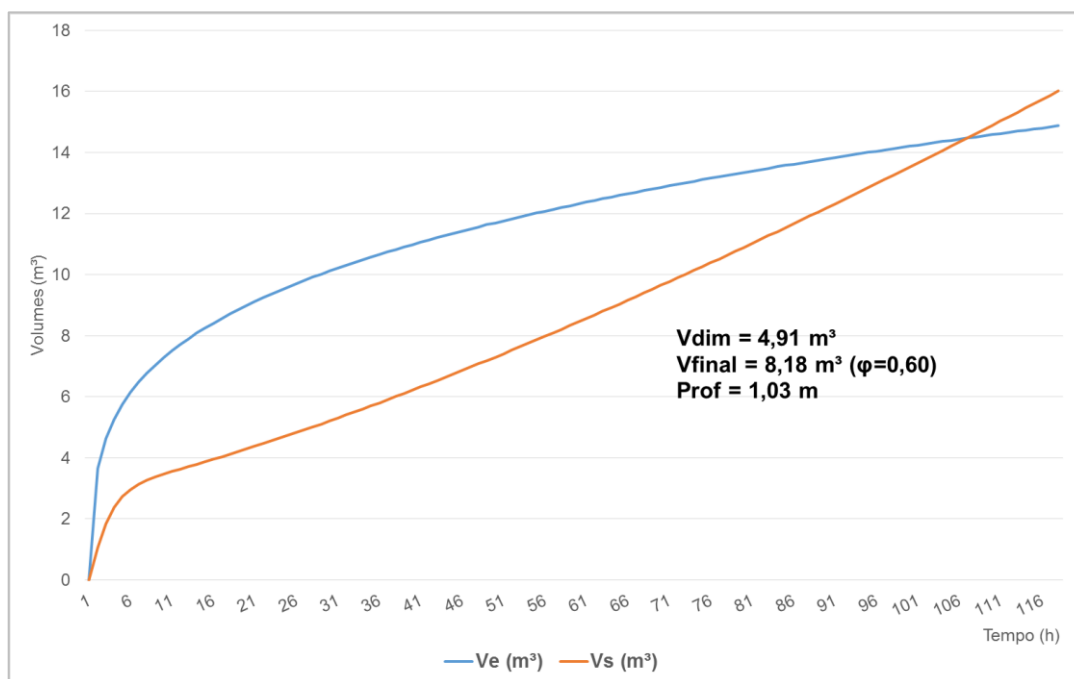
Fonte: Autora.

Figura 75 - Dimensionamento 3ª abordagem - situação 2.



Fonte: Autora.

Figura 76 - Dimensionamento 3ª abordagem - situação 3.



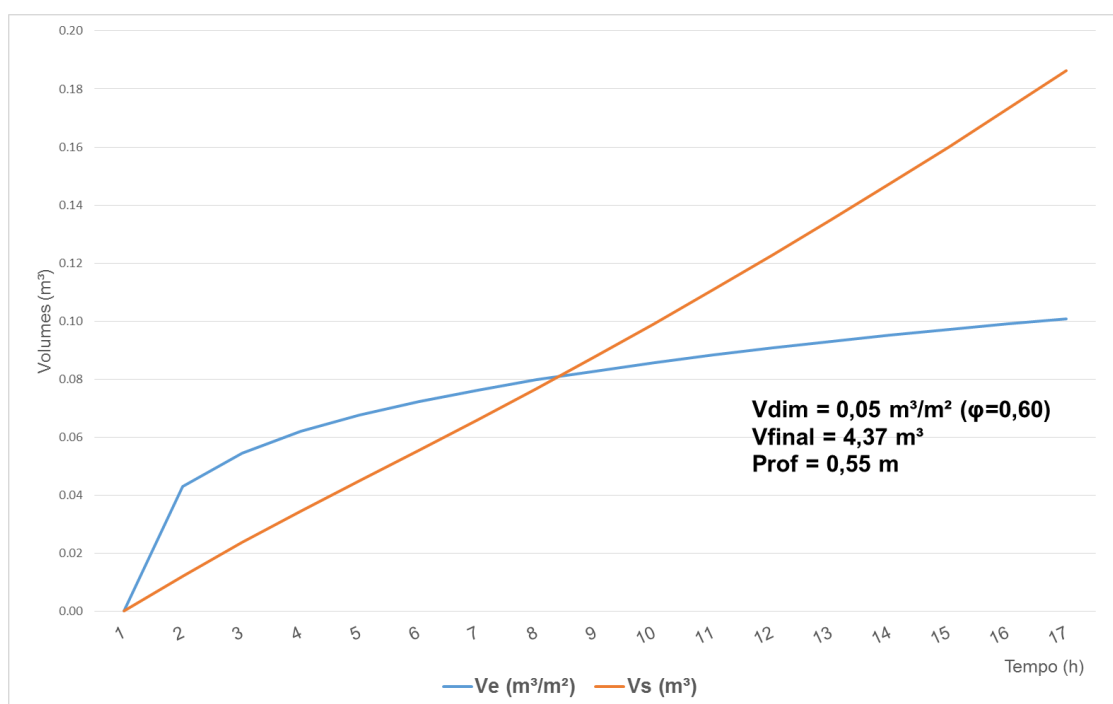
Fonte: Autora.

No Figura 77, ao invés de se utilizar a taxa de infiltração unitária dos ensaios, utilizou-se a curva de horton ajustada para a taxa unitária, obtendo-se o volume a ser armazenado pela biorretenção para 1 m² ($V_{dim} = 0,05 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$), quando multiplicado pela área total do telhado, o volume da estrutura foi de 0,98 m³.

Na Figura 78, procedeu-se da mesma forma, porém com a curva unitária ajustada dos eventos, obtendo-se um volume unitário de 0,31 m³·m⁻² e um volume total de 26,05m³. E na Figura 79, com os dados da curva ajustada para os testes, o volume unitário calculado foi de 0,15 m³·m⁻² e o volume total foi de 12,99 m³.

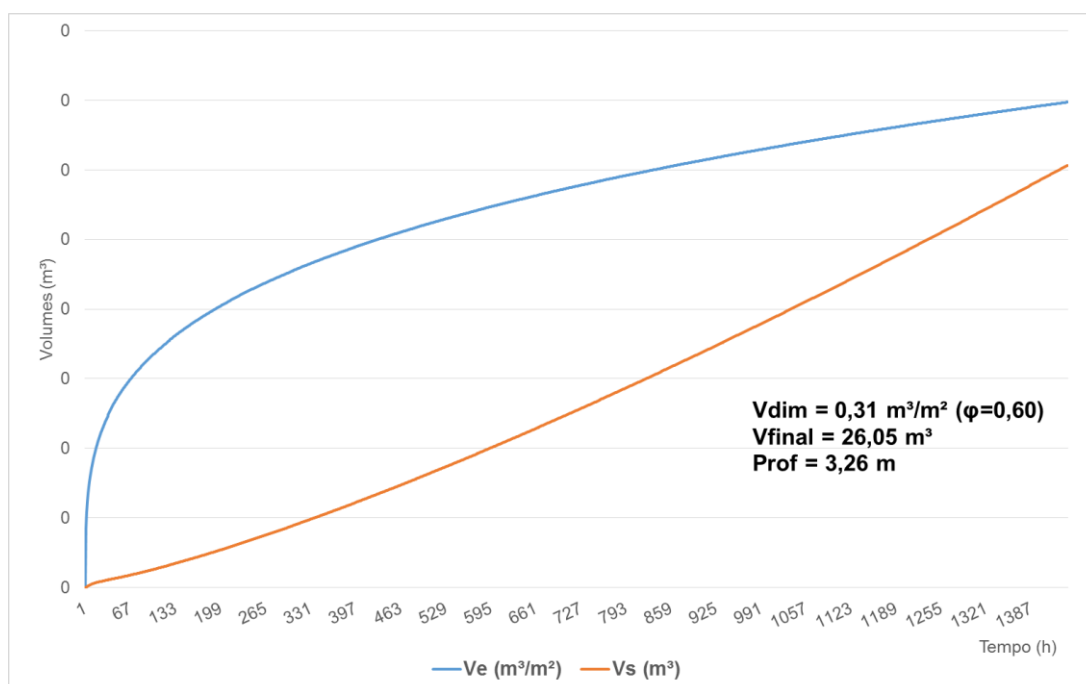
Observa-se que para os três últimos dimensionamentos os volumes encontrados são maiores, isso ocorre pois a terceira abordagem considera a área lateral variável, ou seja, considera a evolução da infiltração no solo.

Figura 77 - Dimensionamento 3^a abordagem - situação 1 - taxa de infiltração unitária dos ensaios.



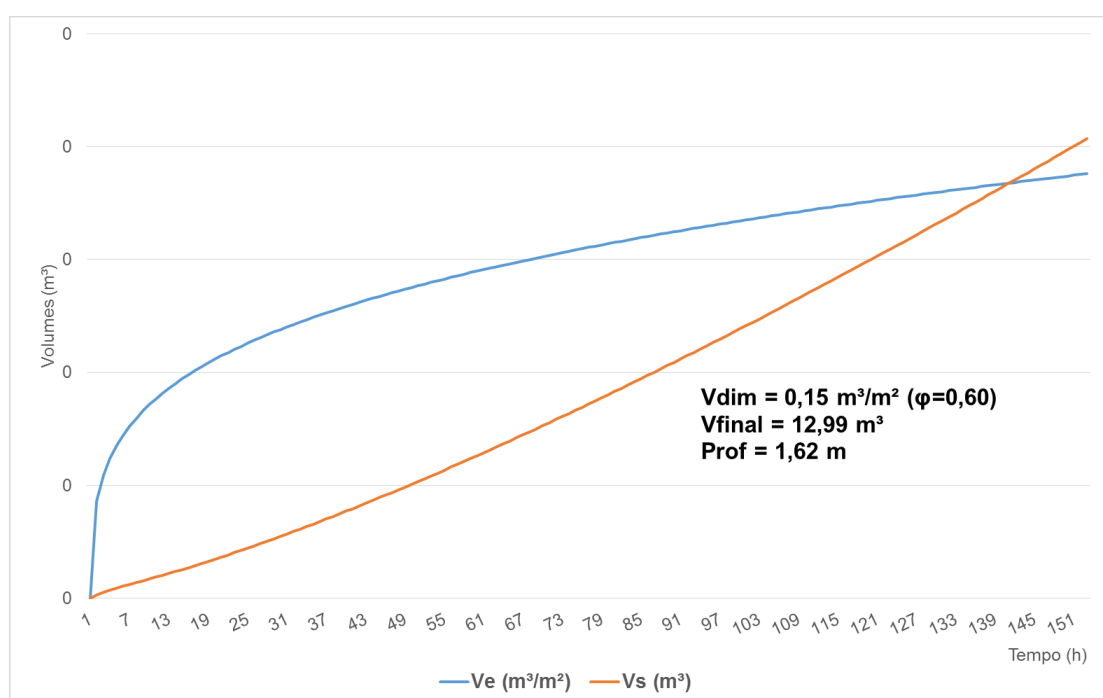
Fonte: Autora.

Figura 78 - Dimensionamento 3ª abordagem - situação 2 - taxa de infiltração unitária dos eventos.



Fonte: Autora.

Figura 79 - Dimensionamento 3ª abordagem - situação 3 - taxa de infiltração unitária dos testes.



Fonte: Autora.

4.4.4 Resultados gerais dos dimensionamentos

Conforme resultados obtidos em todas as abordagens (Quadro 13 e 14) nota-se grandes variações nos volumes, e conseqüentemente, nas profundidades necessárias para uma mesma área de captação.

Além das diferenças nas abordagens, se for analisado somente a alteração nos valores da taxa de infiltração básica, há diferenças significativas nos volumes resultantes, mostrando a importância da determinação in loco das características do solo, devido à grande variabilidade.

E a partir dos resultados de todos os dimensionamentos constata-se, apesar da variação entre os resultados, a grande influência da área lateral e da pressão hidrostática no funcionamento da estrutura, sendo necessário que o método da curva-envelope incorporasse esta análise na sua metodologia. Visto, também, que a estrutura existente, durante o todo período observado, nunca apresentou falhas de funcionamento (transbordamento) e a abordagem 3 foi a que mais se aproximou do construído, em ambas as situações (taxa de infiltração e taxa de infiltração unitária)

Quadro 13 - Resultados dos dimensionamentos pela Curva-Envelope.

Dados	Abordagem 1		Abordagem 2		Abordagem 3	
	Vol. (m ³)	Prof. (m)	Vol. (m ³)	Prof. (m)	Vol. (m ³)	Prof. (m)
Ensaíos (fb = 12,30mm.h ⁻¹)	22,33	2,79	16,41	2,05	9,96	1,24
Eventos (fb = 0,5293mm.h ⁻¹)	57,10	7,14	44,77	5,60	23,69	2,96
Testes (fb = 6,34 mm.h ⁻¹)	28,70	3,59	12,66	2,64	8,18	1,03
Média	36,04	-	24,61	-	13,94	-
Desvio Padrão	18,51	-	17,56	-	8,49	-
Coefficiente de Variação	0,51	-	0,71	-	0,61	-

Fonte: Autora.

Quadro 14 - Resultados dos dimensionamentos pela Curva-Envelope com os valores unitários.

Dados	Abordagem 1		Abordagem 2		Abordagem 3	
	Vol. (m ³)	Prof. (m)	Vol. (m ³)	Prof. (m)	Vol. (m ³)	Prof. (m)
Ensaio unitário (fb = 75 mm.h ⁻¹ .m ⁻²)	2,51	0,31	0,98	0,12	4,37	0,55
Eventos unitário (fb = 2 mm.h ⁻¹ .m ⁻²)	17,69	2,21	12,99	1,62	26,05	3,26
Testes unitário (fb = 2 mm.h ⁻¹ .m ⁻²)	9,38	1,17	6,85	0,86	12,99	1,62
Média	9,86	-	6,94	-	14,47	-
Desvio Padrão	7,60	-	6,01	-	10,92	-
Coefficiente de Variação	0,77	-	0,86	-	0,75	-

Fonte: Autora.

4.5 DIMENSIONAMENTO PELO MÉTODO DO LID

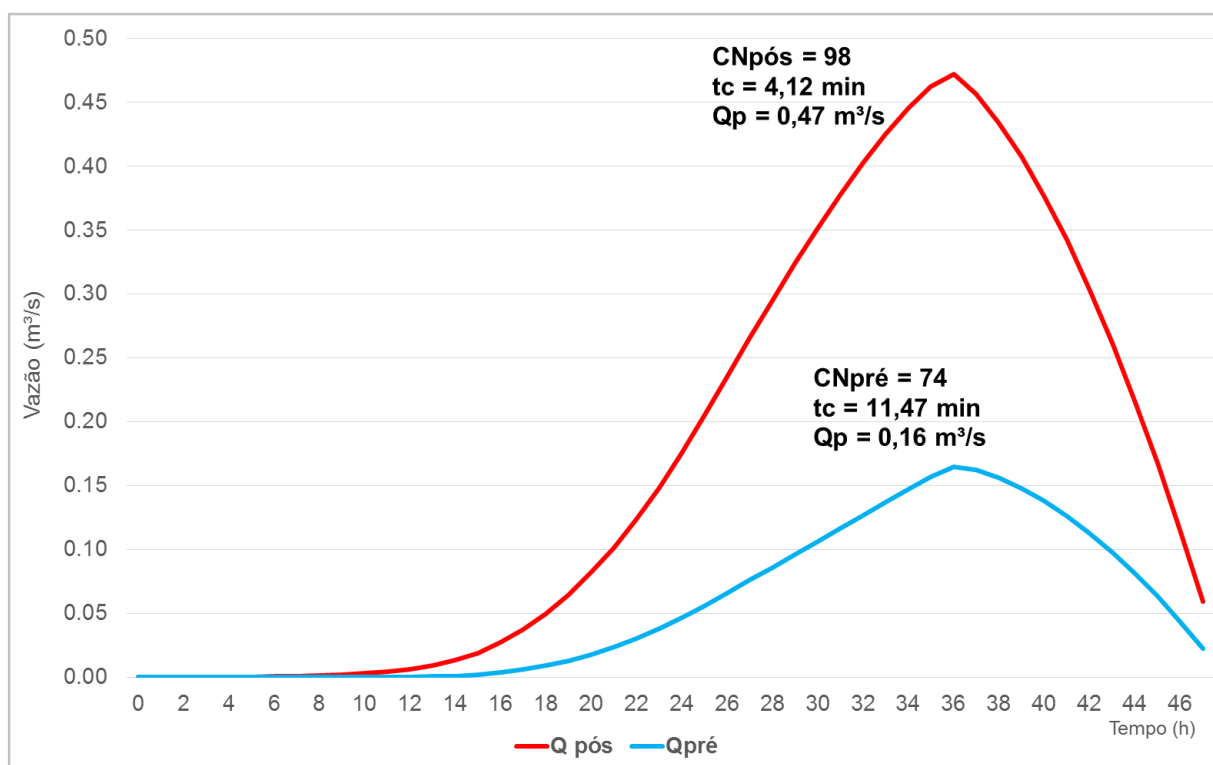
Para o dimensionamento da estrutura de biorretenção seguindo os princípios do LID, foi necessária a determinação dos hidrogramas de pré e pós-urbanização. Inicialmente determinou-se para ambas as situações, os tempos de concentração, os valores do CN, a chuva efetiva com duração de 1h discretizada em 24h e os hidrogramas triangulares unitários. A determinação dos hidrogramas unitários e da propagação do escoamento através da equação de convolução, resultou nos hidrogramas da Figura 80.

Verifica-se que a vazão de pico de pós-urbanização é aproximadamente 3 vezes maior que a de pré-urbanização. Assim, o volume da estrutura de biorretenção é a área entre as curvas mais a área até a vazão de pico de pré-urbanização.

Na determinação do volume, usou-se o Curve Expert para o cálculo da integral das curvas dos hidrogramas. Obteve-se o volume de 7,02m³, que dividido pela porosidade da biorretenção (0,60), resultou num volume final de 11,70m³ e na profundidade de 1,46m.

No cálculo do volume para melhorar a qualidade de água, onde se deve armazenar os primeiros 12,5mm de chuva efetiva, considerando a área de captação do telhado de 85m² e a porosidade da biorretenção de 0,60, resulta em um volume a ser armazenado de 1,77m³. Assim, o volume final a ser armazenado pela biorretenção é de 7,02 m³.

Figura 80 - Hidrogramas resultantes de pré e pós-urbanização.



Fonte: Autora.

5 CONCLUSÕES

É indiscutível a importância para os engenheiros e a sociedade em geral a confiança nos dados e nos métodos de dimensionamento de estruturas. Sendo, de vital importância o estudo e a revisão de conceitos e de metodologias, buscando sempre o aperfeiçoamento e a evolução das engenharias.

Ao final deste trabalho, após coleta de dados, cálculos, análise e comparações, verifica-se uma grande variabilidade de resultados para a taxa de infiltração na biorretenção, resultado de diferenças no processo de medição. E que a infiltração é dinâmica, sofre grande influência dos níveis (pressão hidrostática), da área das paredes laterais, e transforma-se ao longo do tempo, em função do crescimento da vegetação e da colmatação.

Em vista que o conhecimento do processo de infiltração é um dos dados mais importantes para as estruturas de biorretenção, recomenda-se a realização, de no mínimo, 3 ensaios de infiltração no local de desenvolvimento da estrutura e aumentar o processo de saturação em 8 e 10h. Tendo como pré-requisito a realização de um pré-dimensionamento para definição da profundidade da estrutura, e realizar o ensaio na profundidade adequada.

Outro ponto de destaque, durante o dimensionamento (ou elaboração do projeto), é a escolha da equação que representa a infiltração no solo. É interessante buscar um modelo que dê enfoque na relação solo-planta. Pois, conforme constatado, a partir do momento que o solo atinge a saturação total o processo de evapotranspiração retira mais água da estrutura do que está infiltrando.

Assim, é necessário aprofundar os estudos sobre a influência das raízes na taxa de infiltração e como incorporar este comportamento nas técnicas de dimensionamento.

Na questão das técnicas de dimensionamento, o método da Curva-Envelope não leva em consideração o processo de urbanização, nem a evolução da infiltração no solo ao longo do tempo. Após a aplicação da metodologia original, constatou-se que os resultados levariam a construção da biorretenção em dimensões maiores do que seria necessário. Pois ao realizar o teste de estresse, onde chegou-se a saturação total e atingiu-se o nível máximo da estrutura, ela funcionou perfeitamente. Como também na análise do monitoramento de 2011 a 2013, verificou-se que a biorretenção nunca extravasou apresentando um comportamento além do esperado.

Como o método é uma técnica bastante difundida e aplicada, necessita de uma adequação em relação aos volumes de saída para as condições da região. Assim, neste estudo, optou-se por utilizar a Curva de Horton (ajustada para 3 situações distintas) para a determinação dos volumes de saída e como esperado, apresentou valores mais próximos do real.

Também inseriu-se o conceito de infiltração unitária ($\text{mm.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$) e realizou-se os dimensionamentos para as mesmas três situações (ensaios, eventos e testes), e confirma-se a necessidade de considerar o nível dentro da estrutura para o cálculo dos volumes de saída do método da Curva-Envelope.

Por outro lado, o método do LID mostrou-se como uma metodologia de fácil aplicação, que leva em consideração o processo de urbanização, buscando compensar o impacto ambiental da construção no terreno. A limitação encontra-se na determinação dos tempos de concentração para áreas muito pequenas, como no experimento estudado (telhado) e da chuva de projeto. E, também, não leva em consideração a evolução da infiltração no solo. Contudo, apresentou bom resultado, com dimensões aproximadas as da biorretenção existente na UFSM.

Portando, é comprovada a necessidade de aperfeiçoamento destes dois métodos, aqui apresentados as condições brasileiras, visto que são metodologias de origem norte americana.

6 RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se:

- a) realização de novos estudos sobre adequação dos 2 métodos à realidade brasileira;
- b) continuar o monitoramento da biorretenção até o final da vida útil (10 anos) e, após;
- c) realizar o ensaio destrutivo para verificar a colmatação; e,
- d) realizar testes com outras biorretenções, para verificar se o comportamento encontrado aqui é padrão ou exclusivo para as condições encontradas em Santa Maria/RS.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 13969/97. **Norma técnica:** Tanques sépticos – Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos ..., [S.l.: s.n.], 1997.

BAE. STORMWATER ENGINEERING GROUP. **Biorretenção em um estacionamento** (figura). 2014. Disponível em <<https://www.bae.ncsu.edu/topic/swpathogens/BMPs.html>> Acesso em: 24 ago. 2014.

BAPTISTA, M. B.; NASCIMENTO, N. O.; BARRAUD, S. **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana**. 1. ed. Porto Alegre: ABRH, 2005.

BASSOI L.H. et al. **Consumo de Água e Coeficiente de Cultura em Bananeira Irrigada por Microaspersão**. Comunicado Técnico 108, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Petrolina, PE. [s.n.], dez. 2001.

BETTESS, R. **Infiltration drainage: manual of good practice**. Longon: CIRIA. 107p. (Construction Industry Research and Information Association. 1996, report 156).

BREDA, C.; DANIEL JR, J. J.; ALLASIA, D.; SANTOS, T. R. **Avaliação de diferentes espécies vegetais para trincheiras de evaporação**. 26ª Jornada Acadêmica Integrada da UFSM. Santa Maria, 2011.

BRANDÃO, V. et al. **Infiltração da Água no Solo**. Viçosa: UFV, 2009, 120 p.

CARAMORI, V.B.S. **Estudo experimental de trincheiras de infiltração no controle da geração do escoamento superficial**. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2002.

COMPANHIA ESTADUAL DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO BÁSICO E CONTROLE DE POLUIÇÃO DAS ÁGUAS. **Drenagem urbana**. Manual de projeto. 3.ed. São Paulo: CETESB/ASCETESB. 1986.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre: ABRH, 2013, 350 p.

DA SILVA, M. K. **Modelo de pré-dimensionamento de bacias de retenção para controle de poluição...** Porto Alegre: UFRGS, 2009. p.13.

DANIEL JR, J. J. **Avaliação de uma biorretenção como estrutura sustentável de drenagem urbana**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2013.

DARCY (1856). Les fontaines publiques de la ville de Dijon.

DAVIS, A. P. et al. **Laboratory Study of Biological Retention (Bioretention) for Urban Storm Water Management.** *Water Environ. Res.*, 2001, 73, 5.

_____. **Water Quality Improvement through Bioretention Media: Nitrogen and Phosphorus Removal,** *Water Environ. Res.*, 78(3), 2006, p. 284-293.

DIETZ, M.E.; CLAUSEN, J.C. **Saturation to improve pollutant retention in a rain garden.** *Environmental Science and Technology.* 2006, 40 (4), 1335–1340.

EPA. **Low-Impact Development Hydrologic Analysis.** 2000. Disponível em <http://www.lowimpactdevelopment.org/pubs/LID_Hydrology_National_Manual.pdf> Acesso em: 15 jul. 2014.

_____. **Esquema de implantação de uma biorretenção (figura).** 2014.

Disponível em <http://www.epa.gov/greeningepa/stormwater/constave_cells.htm> Acesso em: 24 ago. 2014.

ERMILIO, J.R. **Characterization Study of a Bio-Infiltration Stormwater BMP.** Tese de doutorado. Department of Civil and Environmental Engineering, Villanova University, Oct. 2005.

ERMILIO, J.R.; TRAVER, R. G. **Hydrologic and Pollutant removal Performance of a Bio-Infiltration BMP,** paper presented at the EWRI Water Congress, Omaha, Nebraska, May. 2006.

FACCO, R. et al. **Variabilidade de temperaturas médias mensais em Santa Maria/RS no período de 2004/2011.** *Revista Geonorte, Edição Especial, v.2, n.4,* 2012. p.1103 – 1110.

FAO. Organização das Nações Unidas para alimentação e Agricultura. **Irrigation and Drainage Paper Nº 56.** Disponível em: <http://www.kimberly.uidaho.edu/water/fao56/fao56.pdf> Acesso em: 20 mar. 2014.

FEDERAL INTERAGENCY STREAM RESTORATION WORK GROUP (FISRWG). **Stream corridor restoration: Principles, Processes, and Practices.** 1998.

FUJITA, S. **Measures to promote stormwater infiltration.** International Conference on Urban Storm Drainage, 7, 1996, Hannover. Proceedings.

GALBIATI, A. F. **Tratamento domiciliar de águas negras através de tanque de evapotranspiração.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Centro de Ciências Exatas e Tecnologia. Programa de pós-graduação em tecnologias ambientais Campo Grande, MS, 2009, 38 f.

GRACIOSA, M. C. P.; ANDRADE, J. P. M.; OHNUMA JÚNIOR, A. A.; MENDIONDO, E. M. **Monitoramento de uma trincheira de infiltração instalada em lote residencial para controle do escoamento superficial.** XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos / VIII Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos de Países..., 2007, Anais do XVII SBRH / VIII SHRHPLOP. São Paulo: Acquacon - ABRH, 2007.

HONG, E.; SEAGREN, E.A.; DAVIS, A.P. **Sustainable Oil and Grease Removal from Synthetic Storm Water Runoff Using Bench- Scale Bioretention Studies**, Water Environ. Res., 78(2), 2006, p. 141-155.

HORTON, R.E. **An Approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity**. Soil Science Society of America Proceedings, v.5, p.399-417, 1940

HUNT, W. F.; JARRETT, A. R.; SMITH, J. T.; SHARKEY, L. J. **Evaluating Bioretention Hydrology and Nutrient Removal at Three Field Sites in North Carolina**. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 2006. 132(6):600-608.

HUNT, W. F.; SMITH, J.T.; HATHAWAY, J.M. **Nutrient, Metal, and bacteria removal by an urban bioretention area in Charlotte, NC**. Journal of Environmental Engineering (submitted). 2007.

HSIEH, C.H.; DAVIS, A.P. **Multiple-Event Study of Bioretention for Treatment of Urban Storm Water Runoff**, Water Sci. Technol., 51(3-4), 2005. p.177-181.

HYAMS, D. G. **Curve Expert Professional Documentation**. Release 2.3.0. <http://www.curveexpert.net/> Acesso em: 15 dez. 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. BDMEP. Disponível em <http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/> Acesso em: 14 jan. 2014.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Dados climatológicos do município de Santa Maria <http://www.inmet.gov.br/portal/> Acesso em: 15 jan 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico Brasileiro de 2010**. Disponível em <http://censo2010.ibge.gov.br/noticiascenso?view=noticia&id=1&idnoticia=1766&t=censo-2010-populacao-brasil-190-732-694-pessoas> Acesso em: 14 jan. 2014.

_____. **Atlas de saneamento 2011**. Disponível em http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/atlas_saneamento/default_zip.shtm Acesso em: 14 jan. 2014.

KÖPPEN, apud AYOADE. **Introdução a Climatologia dos Trópicos**. São Paulo: Difel. 1986.

LEOPOLD, L.B. **Hydrology for Urban Planning: A Guide Book on the Hydrologic Effects on Urban Land Use**. USGS circ. 554, 1968.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba: Departamento de Física e Meteorologia (ESALQ/USP), 1995. 497 p.

LID. **Vala de infiltração** (figura). 2014. Disponível em: <http://www.lowimpactdevelopment.org/greenstreets/practices.htm> Acesso em: 24 ago. 2014.

LID, PRINCE GEORGE'S COUNTY. **Aplicação de uma biorretenção** (figura). Maryland 2010. Disponível em:
< http://www.lid-stormwater.net/biolowres_home.htm> Acesso em: 24 ago. 2014.

LOCAL ECOLOGIST. **Bacia de infiltração** (figura). 2009. Disponível em
<<http://localecologist.blogspot.com.br/2009/11/managing-stormwater-runoff-at-lake.html>> Acesso em: 24 ago. 2014.

MENDIONDO, E. M.; VALDES, J. B. **Strategies for sustainable development of water resources systems**. 2nd. Intern. Conf. of New Trends in Water & Environ. Eng. for Safety & Life: Eco-Compatible Solutions for Aquatic Ecosystems, 2002, Capri, Italia. New Trends in Water & Environ. Eng. for Safety & Life: Eco-Compatible Solutions for Aquatic Ecosystems. Rotterdam, Holanda: Balkema, 2002. v. 1. p. 1.

MELO, T. A.T. **Jardim de Chuva**: sistema de biorretenção como técnica compensatória no manejo de águas pluviais urbanas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, ago. 2011.

MONTEITH, J. L. **Principles of environmental physics**. Edward Arnold, London, 241p. 1973.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. NEH-4. **National engineering manual section 4 hydrology**, USDA, 1964 National Engineering Manual Part 630).

_____. NEH-4. **National engineering manual section 4 hydrology**, USDA, 2009.

PEITER, T. V.; POLETO, C., **Estudos dos efeitos das trincheiras de infiltração sobre o escoamento superficial**. Revista de Estudos Ambientais (Online), v. 14, p. 57-67, 2012.

PGDER. Prince George's County Department Of Environmental Resources. **Design manual for use of bioretention in storm water management**. Division of Environmental Management, Watershed Protection Branch. Landover, MD.1993.

_____. PGDER. **Manual of bioretention**. Division of Environmental Management, Watershed Protection Branch. Landover, MD. 2007.

PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE. **PDDUA - Plano diretor de Desenvolvimento urbano e ambiental de Porto Alegre**. Porto Alegre:UFRGS. 2000.

_____. **PDDU- Plano diretor de drenagem urbana**. Departamento de Esgotos pluviais. Ed. da UFRGS, Volume VI. Disponível no site:
http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/dep/usu_doc/manual_de_drenagem_ultima_versao.pdf. Acesso em: 18 jan. 2014.

_____. **PDDU- Plano Diretor de Drenagem Urbana**. Departamento de Esgotos pluviais. Porto Alegre:UFRGS, 2005.

REIS, R. P. A.; OLIVEIRA, L. H.; SALES, M. M., **Sistemas de drenagem na fonte por poços de infiltração de águas pluviais**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 8, n. 2, p. 99-117, abr./jun. 2008

REZENDE, R.; SILAS, M., **Quantificação da infiltração para diferentes tipos de solos**. Anais do XIX EAIC – 28 a 30 de outubro de 2010, UNICENTRO, Guarapuava –PR

ROSA, A.; MENDIONDO, E. M.; DE SOUZA, V. C. B. **Biorretenção da poluição difusa na drenagem urbana usando abordagem experimental adaptativa com base ecohidrológica** – XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Bento Gonçalves,RS. nov. 2013.

SECRETARIA MUNICIPAL DE DESENVOLVIMENTO URBANO. **Manual de drenagem e manejo de águas pluviais: aspectos tecnológicos; fundamentos**. São Paulo: SMDU, 2012.

SCS. **Urban Hydrology for Small Watersheds**. Technical Release 55, US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division, Washington, DC. 1969.

_____. **Urban Hydrology for Small Watersheds**. Technical Release 55, US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division, Washington, DC. 1975.

_____. **Urban Hydrology for Small Watersheds**. Technical Release 55, US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division, Washington, DC. 1986.

SHARKEY, L. J. **The Performance of Bioretention Areas in North Carolina: A Study of Water Quality, Water Quantity, and Soil Media**. Tese de doutorado. North Carolina State University. Raleigh, NC. 2006.

SOUZA, C. F. **Mecanismos técnico-institucionais para a sustentabilidade da drenagem urbana**. Dissertação submetida ao programa de pós-graduação em recursos hídricos e saneamento ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, abr. 2005.

SOUZA C. F. et al, 2012. **Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto: Planejamento e tecnologias verdes para a sustentabilidade das águas urbanas**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 17, p. 9-18, 2012.

SUDSWALES. **Bacias de infiltração** (figura). 2014. Disponível em: <<http://www.sudswales.com/types/source-control/infiltration-basins/>> Acesso em 24 ago. 2014.

SUSTAINABLE. **Vala de infiltração** (figura). 2007. Disponível em: <<http://sustainablestormwater.org/2007/05/23/infiltration-trenches/>> Acesso em 24 ago. 2014.

TASSI, 2002 apud PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE. **Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano e Ambiental de Porto Alegre**. Porto Alegre:UFRGS. 2005

TUBELIS, A., NASCIMENTO, F. J. L. **Meteorologia Descritiva: fundamentos e aplicações brasileiras**. São Paulo: Nobel, 1980, 374 p.

TUCCI, C. E. M. (org.) **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2 ed. Porto Alegre: UFRGS, 1997.

_____. C. E. M. **Impactos da variabilidade climática e uso do solo sobre os recursos hídricos**. Realizado para a Agência Nacional de Águas. 2002.

UNHSC. University of New Hampshire Stormwater Center. **2005 Data Report**, CICEET, Durham, NH. 2006.

URBONAS, B.; STAHR, P. **Stormwater best management practices and detention**, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.1993. 450 p.

VILLANUEVA, A. O. N.; TASSI, R.; ALLASIA, D. G.; BEMFICA, D.; TUCCI, C., **Gestão da drenagem urbana, da formulação à implementação**. Revista REGA. Vol.8, nº1, p. 5-18. 2011.

WEINSTEIN, N. **Personal Communication**, Director: Low Impact Development Center. 2000.

YAMADA, K. **Infiltration pitch for individual houses to mitigate storm water impact**. International conference on urban storm drainage, 6, Proceedings. Niagara Falls. 1993. p.110-114.

YU. S.L. et al. **Field Testing of Ultra-urban BMP's**. Proceedings of the ASCE Environmental Engineering Conference. 1999.