



Tássia dos Anjos Tenório de Melo

**AVALIAÇÃO HIDRODINÂMICA DE TRINCHEIRA DE  
INFILTRAÇÃO NO MANEJO DAS ÁGUAS PLUVIAIS URBANAS**

Tese de Doutorado



Universidade Federal de Pernambuco  
poscivil@ufpe.br  
<https://www.ufpe.br/poscivil/>

Recife  
2015



Universidade Federal de Pernambuco  
Centro de Tecnologia e Geociências  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

Tássia dos Anjos Tenório de Melo

**“Avaliação hidrodinâmica de trincheira de infiltração no  
manejo das águas pluviais urbanas”**

*Trabalho apresentado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.*

*Orientador: Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral*

Recife  
2015

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Valdicêa Alves, CRB-4 / 1260

M528a Melo. Tássia dos Anjos Tenório de.

Avaliação hidrodinâmica de trincheira de infiltração no manejo das águas pluviais urbanas/ Tássia dos Anjos Tenório de Melo - Recife: A Autora, 2015.

136folhas, il. e tab.

Orientador: Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação Engenharia Civil, 2015.  
Inclui Referências.

1. Engenharia Civil. 2 Drenagem urbana. 3. Técnicas compensatórias. 4. Infiltração. 5. Modelo de Bouwer. 6. Hydrus 2D. I. Cabral, Jaime Joaquim da Silva Pereira (Orientador). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2016- 40

Tese de doutorado apresentada por **Tássia dos Anjos Tenório de Melo** ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, sob o título **Avaliação hidrodinâmica de trincheira de infiltração no manejo das águas pluviais urbanas**, orientada pelo **Prof. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral** e aprovada pela banca examinadora formada pelos professores:

---

Prof. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral  
Orientador - CTG / UFPE

---

Prof. Laurent Lassabatere  
Examinador externo - ENTPE / Lyon, França

---

Profa. Simone Rosa da Silva  
Examinadora externa - POLI / UPE

---

Profa. Suzana Maria Gico Lima Montenegro  
Examinadora interna - CTG / UPE

---

Prof. Artur Paiva Coutinho  
Examinador interno - CAA / UFPE

*Dedico este trabalho aos meus pais Ederson Luiz Tenório de Melo e Sônia Maria dos Anjos Tenório de Melo que fizeram todo o esforço possível para educar seus filhos.*

# Agradecimentos

A Deus...por tudo.

Aos meus pais, Ederson e Sônia, e aos meus irmãos, Mirna, Eduardo e Glenda, por estarem sempre presente na minha caminhada, pelas palavras de incentivo, amor e carinho nos momentos mais difíceis. Ao meu noivo, George, por seu amor, paciência e por sempre me encorajar a superar qualquer adversidade.

Ao professor Jaime Cabral, pela orientação e confiança no desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas do Grupo de Recursos Hídricos / UFPE e do Departamento de Energia Nuclear / UFPE pelo ambiente de trabalho produtivo, colaborativo e alegre.

As amigas Tatiane, Rafaela e Dayana pela amizade, risos e carinho. Ao amigo Rodrigo pelos momentos de convívio e força. Ao amigo Albert pelas palavras de conforto e perseverança.

Ao amigo Artur Paiva Coutinho pela amizade, auxílio, confiança e pelo árduo trabalho em me guiar nessa jornada.

Ao professor Antônio Celso Dantas Antonino por sempre acreditar no meu trabalho e por me proporcionar a experiência profissional e pessoal de realizar um Estágio de Doutorado no Exterior.

Aos professores componentes da banca avaliadora, Simone Rosa e Suzana Montenegro, pelas críticas e sugestões apresentadas, as quais foram essenciais para o enriquecimento deste trabalho.

Ao professor Laurent Lassabatere pela orientação, colaboração e amizade.

A todos os colegas e professores do ENTPE/Lyon/França pelos excelentes 6 meses de convívio e aprendizado.

A todos os colegas do Instituto Federal da Paraíba / Cajazeiras por me proporcionarem um excelente ambiente de trabalho e pela compreensão nos momentos difíceis.

A FACEPE (Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco) pelo suporte financeiro concedido.

A Cooperação Internacional CAPES/COFECUB, projeto 821-14, pelo suporte financeiro concedido durante o Estágio de Doutorado no Exterior.

Por fim, a todos que comigo conviveram durante esse período, pois direta ou indiretamente, todos contribuíram para o sucesso desta conquista.

Obrigada!!! :)

# Resumo

Técnicas compensatórias são implantadas com a finalidade de resgatar os mecanismos naturais de escoamento, diminuir as vazões a jusante e maximizar o controle de escoamento na fonte. A fim de contribuir com os estudos sobre essas técnicas, este trabalho apresenta um estudo experimental de uma trincheira de infiltração instalada na cidade de Recife / PE nos primeiros meses de vida útil. Foram avaliadas as funções de armazenamento de água no interior do sistema e a função de infiltração, através de modelagens analítica e numérica sobre o processo de recessão. O modelo de Bouwer (1969) foi adotado para a modelagem analítica de dez curvas de recessão com dados reais. Os parâmetros de resistências hidráulicas da base e das paredes apresentaram valores elevados, representando a formação de uma camada de colmatção na interface trincheira de infiltração - solo natural. O Hydrus 2D foi utilizado para modelar numericamente doze curvas de recessões com dados artificiais, a fim de parametrizar o comportamento de trincheiras de infiltração quando implantadas em solos de diferentes classificações texturais. A modelagem mostrou melhor desempenho hidráulico da trincheira de infiltração instalada em solos de composição arenosa. Por fim, para as curvas de recessão artificiais, foi avaliada a relação entre os parâmetros obtidos analiticamente - resistências hidráulicas, e numericamente - curva de retenção e condutividade hidráulica, e os resultados mostraram que não é possível relacionar os parâmetros obtidos analiticamente com os parâmetros clássicos hidrodinâmicos obtidos numericamente.

**Palavras Chave:** Drenagem urbana. Técnicas compensatórias. Infiltração. Modelo de Bouwer. Hydrus 2D.

# Abstract

Compensatory techniques are implemented for the purpose of recovering the natural mechanisms flow, decrease the downstream flow and maximize the flow control at the source. In order to contribute to the studies on these techniques, this paper presents an experimental study of an installed infiltration trench in Recife / PE in the first months of life. They evaluated the water storage functions within the system and infiltration function, by analytical and numerical modeling of the recession process. The model Bouwer (1969) was adopted for the analytical modeling ten recession curves with real data. The parameters of hydraulic resistances of the base and the walls showed high values, representing the formation of a fouling layer infiltration trench interface - natural soil. 2D Hydrus numerically modeling was used to twelve curves recessions with artificial data, in order to parameterize the behavior of infiltration trenches when implemented in different soil conditions ratings. The modeling showed better hydraulic performance of the installed infiltration trench in sandy soil composition. Finally, for the artificial recession curves, it evaluated the relationship between parameters obtained analytically - hydraulic resistances, and numerically - retention curve and hydraulic conductivity, and the results showed that it is not possible to relate the parameters obtained analytically with the classic parameters hydrodynamic obtained numerically.

**Keywords:** Urban drainage. Compensatory techniques. Infiltration. Bouwer model. Hydrus 2D.

# Lista de Figuras

2.1	Alterações nos hidrogramas decorrentes do aumento das superfícies impermeáveis	19
2.2	Exemplo da composição estrutural básica de uma trincheira de infiltração.	24
2.3	Interferências da franja capilar e do lençol freático em uma trincheira de infiltração.	27
2.4	Estruturas de trincheiras de infiltração adotadas em alguns estudos.	32
2.5	Esquema da composição trifásica de um solo.	35
2.6	Exemplo de curva granulométrica.	36
2.7	Triângulo textural.	37
2.8	Potenciais gravitacional e de pressão, respectivamente.	39
2.9	Curva de condutividade hidráulica.	41
2.10	Curva de retenção da água no solo.	42
2.11	Hidrograma.	43
2.12	Curva de recessão composta por dois momentos de comportamentos turbulentos e dois laminares.	44
2.13	Métodos para determinação da curva de recessão mestra (CRM): correlação (a) e matching strip (b).	46
2.14	Três momentos de inflexão na curva de recessão em técnicas compensatórias de infiltração.	48
2.15	Efeitos da colmatação nas situações 1 e 2.	50
2.16	Representação gráfica do Modelo de Bouwer.	51
2.17	Curvas representativas da função $K_c(P)$ para cada tipo de solo.	52
2.18	Sequência de trabalho do Hydrus 2D/3D.	54
2.19	A. limites máximos para a geometria definidos na etapa de Informações gerais e; B. objeto inserido na etapa de Domínio da geometria. Ambiente 2D.	55
3.1	Localização da cidade de Recife.	60
3.2	Precipitação média anual acumulada e média mensal de Recife (1994 - 2014), respectivamente. Estação Curado.	61
3.3	Estrutura da trincheira de infiltração: Planta Baixa, Corte AA' e perspectiva. Representações sem escala.	63
3.4	Implantação e instrumentação.	64
3.5	Exemplo de superfície de busca em problemas de otimização.	67
3.6	Curva de Pareto para soluções de um problema envolvendo a minimização de dois objetivos simultaneamente.	68
3.7	Interface para otimização de Rcb e Rcp: dados de entrada e de saída, respectivamente.	69

3.8	Construção da geometria bidimensional da trincheira de infiltração. Medidas em centímetros. . . . .	73
3.9	Esquema das condições iniciais e de contorno da trincheira de infiltração. . . .	73
3.10	Etapas da estratégia de modelagem. . . . .	74
3.11	Indicação, em vista, do perfil da frente de umedecimento analisado em todos os casos simulados. . . . .	75
4.1	Monitoramento da precipitação, vazão de entrada e nível de água no interior da trincheira de infiltração no período de estudo, destacando os eventos selecionados.	76
4.2	Momentos importantes do comportamento da trincheira de infiltração em E1. . .	79
4.3	Detalhe de trecho de ocorrência de extravasamento da trincheira de infiltração em E1. . . . .	80
4.4	Detalhe do momento 3 - recessão. . . . .	81
4.5	Momentos importantes do comportamento da trincheira de infiltração em E2. . .	82
4.6	Detalhes dos momentos 3, 5 e 7 - recessões. . . . .	83
4.7	Momentos importantes do comportamento da trincheira de infiltração em E3. . .	84
4.8	Detalhes dos momentos 1, 3 e 5 - recessões. . . . .	85
4.9	Momentos importantes do comportamento da trincheira de infiltração em E4. . .	86
4.10	Detalhes dos momentos 2 e 4 - recessões. . . . .	86
4.11	Momentos importantes do comportamento da trincheira de infiltração em E5. . .	87
4.12	Oscilações do nível de água no interior da trincheira de infiltração em E5. . . .	88
4.13	Detalhe do momento 4 - recessão. . . . .	89
4.14	Volumes infiltrados em cada evento e a contribuição dos mesmos no volume de infiltração total de 18.788,81 L. . . . .	92
4.15	Alturas da camada de armazenamento para determinada duração da chuva de projeto (5, 15, 60, 90 e 120 min) e tempo de retorno (2, 5, 10 e 25anos). . . . .	94
4.16	Variação média do custo de construção quando aumentado o tempo de retorno de 2 para 5 anos, de 5 para 10 anos e de 10 para 25 anos. . . . .	95
4.17	Custo geral de construção, escavação, geotêxtil e brita para determinada duração da chuva de projeto e tempo de retorno. . . . .	96
4.18	Curvas de recessão da trincheira de infiltração. . . . .	99
4.19	Ajustes do modelo de Bouwer aos dados observados. . . . .	101
4.20	Variação dos valores médios de $R_{cb}$ e $R_{cp}$ , respectivamente. . . . .	102
4.21	Comparação entre os resultados de $R_{cb}$ , $R_{cp}$ e os erros gerados pelo Método OMOPSO para R1 e considerando $P_{cr} = 0$ . . . . .	104
4.22	Análise de sensibilidade de $R_{cb}$ e $R_{cp}$ à curva de ajuste de Bouwer aos dados observados. . . . .	106
4.23	Análise do coeficiente de massa residual para $P_{cr} = 0$ . . . . .	109
4.24	Análise da malha para modelagem no Hydrus 2D. . . . .	112

4.25	Malha de elementos finitos de 7 cm. . . . .	113
4.26	Comportamento da frente de molhamento e perfil de umidade para uma carga hidráulica de 50 cm e potencial matricial de $-1cmH_2O$ . . . . .	116
4.27	Comportamento da frente de molhamento e perfil de umidade para uma carga hidráulica de 50 cm e potencial matricial de $-100cmH_2O$ . . . . .	117
4.28	Comportamento da frente de molhamento e perfil de umidade para uma carga hidráulica de 80 cm e potencial matricial de $-1cmH_2O$ . . . . .	118
4.29	Comportamento da frente de molhamento e perfil de umidade para uma carga hidráulica de 80 cm e potencial matricial de $-100cmH_2O$ . . . . .	119
4.30	Comportamento da frente de molhamento e perfil de umidade para uma carga hidráulica de 150 cm e potencial matricial de $-1cmH_2O$ . . . . .	120
4.31	Comportamento da frente de molhamento e perfil de umidade para uma carga hidráulica de 150 cm e potencial matricial de $-100cmH_2O$ . . . . .	121

# Lista de Tabelas

2.1	Valores de condutividade hidráulica, segundo BOUWER (1999). . . . .	22
2.2	Taxas de infiltração recomendadas para implantação da trincheira de infiltração. . . . .	26
2.3	Custo de construção de trincheiras de infiltração. . . . .	33
2.4	Coefficientes adotados na relação entre $K_c$ e $P$ . . . . .	51
3.1	Classificação textural do solo natural onde foi implantada a trincheira de infiltração. . . . .	61
3.2	Equações adotadas para determinação do tempo de esvaziamento, volume e vazão de infiltração. . . . .	65
3.3	Descrição e valores dos serviços e materiais utilizados para a construção da trincheira de infiltração do estudo, com base em EMLURB (2013). . . . .	66
4.1	Caracterização dos eventos selecionados no estudo. . . . .	78
4.2	Comportamento da trincheira de infiltração em cada evento. . . . .	91
4.3	Taxas média de infiltração em cada momento de recessão e a média geral do estudo. Taxa em $cm/h$ . . . . .	93
4.4	Alturas da camada de armazenamento para determinada duração da chuva de projeto e tempo de retorno. . . . .	94
4.5	Variação média do custo individual do material ou serviço em detrimento do tempo de duração de chuva de projeto ( $t$ ). . . . .	95
4.6	Parâmetros $R_{cb}$ e $R_{cp}$ gerados. Valores em horas. . . . .	100
4.7	Comportamento geral de cada evento de recessão após ajuste do modelo de Bouwer. . . . .	102
4.8	Valores do coeficiente de determinação, considerando $P_{cr} = 0$ . . . . .	108
4.9	Parâmetros da curva de retenção e de condutividade hidráulica gerados pelo Rosetta/Hydrus para 12 tipos de solo. . . . .	113
4.10	Parâmetros de resistência hidráulica do modelo de Bouwer para 12 tipos de solo. . . . .	114
4.11	Alcances máximos da frente de umedecimento lateral e vertical. . . . .	123

# Sumário

<b>1</b>	<b>Considerações Iniciais</b>	<b>14</b>
1.1	Introdução . . . . .	14
1.2	Objetivos . . . . .	16
1.3	Hipótese . . . . .	17
1.4	Organização do Documento . . . . .	17
<b>2</b>	<b>Contextualização</b>	<b>19</b>
2.1	Técnicas Compensatórias . . . . .	19
2.1.1	Sistemas de infiltração . . . . .	21
2.1.2	Trincheira de infiltração . . . . .	24
2.2	Estudo do Solo . . . . .	35
2.2.1	Propriedades físicas . . . . .	36
2.2.2	Equações de fluxo em meio poroso saturado e não saturado . . . . .	38
2.2.3	Curva de condutividade hidráulica . . . . .	41
2.2.4	Curva de retenção da água no solo . . . . .	41
2.2.5	Curva de recessão . . . . .	43
2.3	Modelagem do processo de infiltração . . . . .	49
2.3.1	Modelo Analítico - Bouwer (1969) . . . . .	49
2.3.2	Modelo Numérico - Hydrus 2D . . . . .	53
2.4	Comentários Finais . . . . .	58
<b>3</b>	<b>Materiais e Métodos</b>	<b>60</b>
3.1	Descrição da área de estudo . . . . .	60
3.2	Avaliação da Trincheira de Infiltração . . . . .	63
3.2.1	Análise hidráulica . . . . .	63
3.2.2	Análise de custo . . . . .	65
3.3	Modelagem Analítica - Bouwer (1969) . . . . .	67
3.3.1	Otimização dos parâmetros $R_{cb}$ e $R_{cp}$ . . . . .	67
3.3.2	Análise dos ajustes de Bouwer aos dados observados . . . . .	70
3.3.3	Validação do modelo . . . . .	70
3.4	Modelagem Numérica - Hydrus 2D . . . . .	72
3.4.1	Equação de fluxo . . . . .	72
3.4.2	Geometria e distribuição dos materiais . . . . .	72
3.4.3	Condições de contorno e iniciais . . . . .	73
3.4.4	Estratégia de modelagem . . . . .	73

3.4.5	Estudo da frente de umedecimento . . . . .	74
<b>4</b>	<b>Resultados e Discussões</b>	<b>76</b>
4.1	Avaliação da Trincheira de Infiltração . . . . .	76
4.1.1	Seleção dos Eventos . . . . .	76
4.1.2	Análise dos Eventos . . . . .	79
4.1.3	Análise de custo . . . . .	93
4.1.4	Comentários Finais . . . . .	97
4.2	Modelagem Analítica - Bouwer (1969) . . . . .	99
4.2.1	Descrição dos eventos de recessão . . . . .	99
4.2.2	Análise geral . . . . .	100
4.2.3	Análise detalhada . . . . .	103
4.2.4	Validação do modelo . . . . .	108
4.2.5	Comentários Finais . . . . .	110
4.3	Modelagem Numérica - Hydrus 2D . . . . .	112
4.3.1	Análise da malha para simulações . . . . .	112
4.3.2	Estratégia de modelagem . . . . .	112
4.3.3	Estudo da frente de umedecimento . . . . .	115
4.3.4	Comentários Finais . . . . .	124
<b>5</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>126</b>
5.1	Conclusões . . . . .	126
5.2	Recomendações e trabalhos futuros . . . . .	128
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>130</b>

# 1

## Considerações Iniciais

### 1.1 Introdução

O manejo das águas em meio urbano ocorreu a partir da necessidade de sobrevivência do homem. Não bastando à ocupação de pequenos povoados próximos a cursos de água, o homem criou novos caminhos para as águas, trazendo-as para seu convívio, proporcionando conforto, bem estar, desenvolvimento e crescimento populacional e urbano.

Os processos de urbanização que ocorrem sobre as bacias hidrográficas geram uma forte pressão espacial sobre sua área de abrangência, tornando-a cada vez mais vulnerável às modificações de uso e ocupação do solo. Dois aspectos são diretamente sensíveis à impermeabilização das superfícies, decorrente da urbanização: a queda da recarga subterrânea, em razão da queda dos volumes de infiltração e, a elevação dos deflúvios urbanos (CHAHAR; GRAILLOT; GAUR, 2012).

O sistema de drenagem urbana é a infra-estrutura de saneamento ambiental que mais sofre com as alterações urbanas, principalmente, pelo avanço das áreas impermeáveis em detrimento das superfícies naturais. Esse processo de impermeabilização interfere nos processos hidrológicos, principalmente no balanço hídrico, diminuindo as taxas de infiltração e aumentando o escoamento superficial; no clima, em pequena escala, gerando ilhas de calor e; e nos aspectos sociais, pela vulnerabilidade da população, devido a ocorrência de alagamentos, cheias e inundações nas áreas urbanas.

O aumento das áreas impermeáveis interferem não só na dinâmica hidrológica, mas também na qualidade das águas. Ruas e estacionamentos geram elevados níveis de contaminantes como óleos, graxas, zinco, cobre, cádmio, além dos diversos tipos de sedimentos. As áreas residenciais também são responsáveis pela geração de contaminantes como pesticidas, nutrientes, fertilizantes, bactérias e vírus presentes nas fezes dos animais (SMMWW, 2014).

Os reflexos desse processo sobre o meio ambiente urbano têm evidenciado os limites das soluções tradicionais de drenagem urbana, por serem pouco flexíveis e adaptáveis às mudanças de uso e ocupação do solo, frequentes em processos de urbanização. Revelam-se onerosos e de rápida obsolescência, requerendo pesados investimentos do setor público em reconstrução e

manutenção, principalmente em espaços já consolidados.

Assim, o conceito dos sistemas tradicionais de drenagem urbana relacionado à prática do rápido escoamento das águas pluviais têm se mostrado insustentáveis quando inseridos na realidade atual de muitas cidades. Além disso, o custo de medidas que minimizem impactos locais, que muitas vezes não solucionam os problemas, é muito alto, chegando a custar dez vezes mais do que o processo de amortecimento na origem das inundações.

POMPÊO (2000) ressalta que é preciso considerar três aspectos para uma adequada articulação entre drenagem urbana e o crescimento urbano: econômico, social e ecológico. Após essa consideração é que algum modelo, estrutura ou proposta se tornará suficientemente eficaz, implicando em resultados multisetoriais positivos. A partir dessa idéia, o planejamento da drenagem urbana passa a ser pensado de maneira sustentável, através de um manejo adequado das águas em meio urbano, resgatando seu ciclo e fluxo naturais e convivendo de maneira harmoniosa e pacífica com a população.

O manejo e gestão das águas pluviais urbanas solicita uma ação multidisciplinar entre as áreas do Urbanismo, Engenharia hidráulica e hidrológica, Biologia, Geologia, entre outros. Estudos em conjunto já apresentam as técnicas compensatórias como soluções que auxiliam no manejo de águas pluviais e que são passíveis de implantação em diversos cenários.

As técnicas compensatórias em drenagem urbana visam preservar os mecanismos naturais de escoamento, diminuindo as vazões a jusante e maximizando o controle de escoamento na fonte. Pavimento permeável, sistemas de biorretenção, trincheiras de infiltração e telhados verde são alguns dos dispositivos que auxiliam no manejo sustentável das águas pluviais, onde o processo é realizado na escala do lote, evitando assim, a transferência de volumes e excessos para ruas e vias (SANTOS et al., 2013; MELO et al., 2014).

Estudos sobre o potencial desses sistemas como minimizadores dos volumes de escoamento superficial, principalmente, na escala dos lotes, vêm sendo desenvolvidos durante as últimas décadas em âmbito acadêmico e governamental.

O conhecimento do movimento da água na interface técnica - solo natural é fundamental para o esclarecimento da eficiência hidráulica do sistema. Por isso, deve-se evitar uma avaliação individual de uma técnica compensatória, principalmente quando o processo de infiltração é a função principal do sistema.

Um dos momentos do comportamento do sistema que refletem bem essa interação técnica - solo natural ocorre quando se inicia a drenagem livre. Ou seja, momento em que as contribuições advindas da precipitação e do escoamento superficial cessam, também caracterizado como processo de recessão.

A recessão é um processo que depende das características da técnica, como sua composição estrutural e geometria, e às condições a que a técnica é submetida, como eventos de precipitação, propriedades do solo, manutenção e condições de umidade inicial do solo.

A importância do estudo da recessão permite esclarecer informações relacionadas ao desempenho e vida útil do sistema. Primeiramente, o processo de recessão pode ser utilizado

como elemento para indicar se a técnica compensatória está preparada para receber eventos de precipitação sucessivos. Ou seja, uma conclusão quanto ao tempo de resposta referente ao desempenho da função de armazenamento e infiltração para eventos de precipitação diversos.

O processo de recessão também pode indicar se a técnica compensatória foi sub ou superdimensionada. A ocorrência de extravasamentos na técnica pode ocorrer, porém a preocupação é traduzida quando a frequência no transbordo é grande, mesmo submetida a pequenos eventos de precipitação.

Outro aspecto relevante retratado pelo comportamento da recessão é quanto a velocidade com que a água retida temporariamente no interior da camada de armazenamento é drenada. O tempo de drenagem de um determinado volume estocado reflete, de maneira simples, a capacidade da técnica de transformar escoamento superficial em água disponível no solo.

Por fim, o estudo da recessão pode indicar a necessidade de manutenção na técnica compensatória. Esses sistemas estão sujeitos à formação de uma camada colmatada sobre suas áreas de infiltração, podendo resultar no decaimento da taxa de infiltração e do aumento do tempo de esvaziamento da estrutura. Nesse aspecto, faz-se necessário um monitoramento contínuo e duradouro, para que esses aspectos inerentes ao comprometimento da saúde e vida útil da técnica sejam refletidos.

O estudo da recessão é realizado sob diferentes perspectivas, como pela avaliação do seu comportamento por meio do monitoramento contínuo e/ou pela criação de cenários para modelagens diversas. O estudo através do monitoramento é importante, resultando em uma abordagem geral do desempenho geral do sistema como taxa de drenagem e tempo de esvaziamento.

Já a modelagem do processo de recessão possibilita, além dessas informações, estudos de casos em que a técnica compensatória é submetida a variadas situações, permitindo criar hipóteses que investiguem situações antes não estudadas, ou seja, inovar.

Neste sentido, este trabalho propõe, além do monitoramento detalhado do comportamento de uma técnica compensatória, o estudo do processo de recessão através de modelagem analítica e numérica.

A metodologia adotada neste trabalho é geral, podendo ser aplicada em qualquer técnica compensatória, seja de pequeno porte - sistemas de biorretenção e trincheiras de infiltração, até as de grande porte - bacias de infiltração, com a condição de que o funcionamento básico do sistema seja a infiltração.

## **1.2 Objetivos**

### **Geral**

Analisar o desempenho hidrodinâmico de trincheira de infiltração, a partir do estudo da curva de recessão.

## **Específicos**

Avaliar a capacidade de infiltração e armazenamento de águas superficiais em uma trincheira de infiltração;

Determinar parâmetros hidráulicos para descrever a curva de recessão.

Parametrizar o comportamento de trincheiras de infiltração implantadas em solos de diferentes classificações texturais.

## **1.3 Hipótese**

É possível determinar parâmetros hidráulicos que representem a interação trincheira de infiltração - solo natural, através da análise da curva de recessão.

## **1.4 Organização do Documento**

Este trabalho é apresentado em cinco partes. A primeira, Considerações Iniciais, traz a problemática inerente à temática da drenagem urbana, abordando a necessidade de novos métodos e alternativas de armazenamento e infiltração que visem dar suporte a essa infraestrutura convencional. Não só há necessidade de novas alternativas de drenagem urbana, mas principalmente, estudos mais detalhados sobre o comportamento e capacidade dessas técnicas alternativas, justificando assim a proposta da tese.

A segunda parte, Contextualização, apresenta dois eixos temáticos de revisão de literatura. O primeiro disserta sobre as técnicas compensatórias de infiltração, enfocando a trincheira de infiltração, caracterizando-a e apresentando uma conjuntura de pesquisas e aplicações, seja em âmbito nacional ou internacional. O segundo eixo temático aborda conceitos, teorias e pesquisas direcionadas à física do solo, no que tange às propriedades e relações existentes no próprio solo e entorno. Apresenta também as equações utilizadas para a compreensão do estudo do solo e um enfoque sobre a curva de recessão e suas características. Uma conclusão sobre os aspectos mais relevantes tratados nesta parte são expostos.

A metodologia deste trabalho é apresentada na terceira parte, Materiais e Métodos. São descritos os métodos utilizados para analisar o desempenho hidráulico da trincheira de infiltração e os custos construtivos, bem como a instrumentação adotada no estudo. Também expõe, de maneira objetiva e clara, o roteiro traçado para a análise analítica do processo de recessão na trincheira de infiltração. A metodologia adotada na modelagem numérica da curva de recessão para 12 tipos de solos é brevemente descrita. Nesta parte também é apresentada uma conclusão resumida sobre os materiais e métodos empregados neste trabalho.

Os resultados da tese são apresentados na quarta parte, Resultados e Discussões. Primeiramente, a trincheira de infiltração é analisada como instrumento no manejo das águas pluviais urbanas, enfocando o desempenho hidráulico como sistema capaz de armazenar e infiltrar os

deflúvios superficiais e a avaliação de custo construtivo para diferentes tempos de duração de chuva de projeto e de retorno.

No que tange à modelagem analítica da curva de recessão, são analisados aspectos como o ajuste do modelo de Bouwer aos dados observados, comparações entre os resultados gerados e uma análise de sensibilidade do ajuste. Na modelagem numérica foi estabelecido um confronto entre os parâmetros gerados analiticamente com os parâmetros numéricos, a fim de identificar e estabelecer relações que justificassem o comportamento das curvas de recessões analisadas. Para cada bloco de resultados foi elaborada uma conclusão, enfocando os resultados mais relevantes de cada análise.

O último capítulo, Considerações Finais, faz o encerramento deste trabalho apresentando conclusões gerais de toda a pesquisa. Perspectivas de continuidade de estudos nessa temática são despertadas, assim como proposição de novos trabalhos englobando questões como, padrão de dimensionamento e projeto, modelagem integrada entre diferentes técnicas compensatórias em escala de bairro e modelagem integrada entre técnicas compensatórias e o sistema de macrodrenagem.

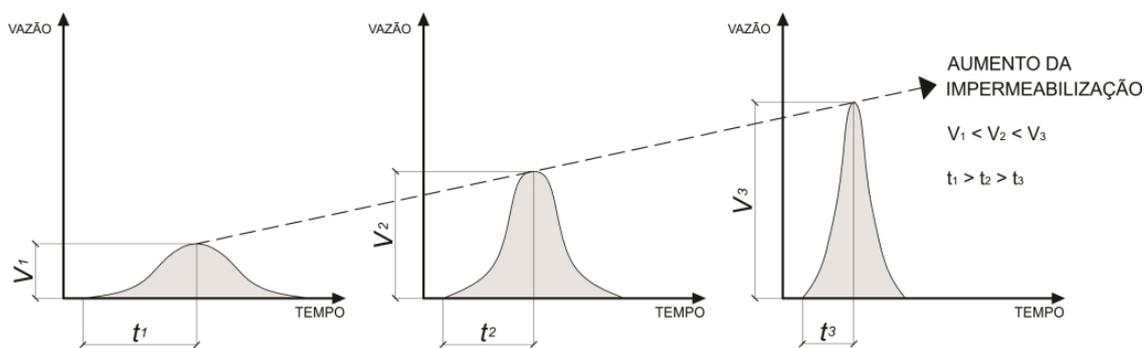
# 2

## Contextualização

### 2.1 Técnicas Compensatórias

Com o crescente processo de urbanização e o conseqüente aumento das superfícies impermeáveis, os padrões de escoamentos naturais são significativamente alterados. Os processos de infiltração, evapotranspiração e retenção das águas são reduzidos, enquanto os deflúvios superficiais, principalmente a jusante, aumentam rapidamente.

O avanço das superfícies impermeáveis interfere diretamente no comportamento do hidrograma de escoamento da área urbanizada (Figura 2.1). Concomitantemente ao avanço da urbanização, nota-se a elevação da vazão e do volume de escoamento, principalmente pela redução da capacidade de retenção e infiltração no solo e uma antecipação do pico do hidrograma. Essa impermeabilização também proporciona um aumento na velocidade do escoamento, agravando os impactos negativos à jusante das bacias urbanas.



**Figura 2.1:** Alterações nos hidrogramas decorrentes do aumento das superfícies impermeáveis

Fonte: Elaborado pela autora.

De acordo com RIGHETTO; MOREIRA; SALES (2009), as vazões de cheia produzidas na bacia hidrográfica ou localmente no espaço podem ser significativamente alteradas a partir de um adequado manejo das águas urbanas, através de medidas de controle dos deflúvios ou de pequenas estruturas de controle nas fontes geradoras.

Ferramentas para manejo de águas urbanas são empregadas, principalmente nos países

desenvolvidos, recebendo denominações como LID (*Low Impact Development*), nos Estados Unidos, ou WSUD (*Water Sensitive Urban Design*), na Austrália (TUCCI, 2012).

O desenvolvimento de baixo impacto (LID) é uma estratégia de manejo de águas pluviais que visa a conservação das características naturais locais existentes, integrando o desenvolvimento urbano com dispositivos de controle das águas pluviais em pequena escala no lote, a fim de imitar as condições hidrológicas naturais, mantendo as taxas de escoamento em níveis de pré-desenvolvimento. Ou seja, através da instalação de dispositivos de retenção e infiltração, os volumes gerados são controlados no próprio lote, evitando a transferência desse volume para jusante (HINMAN, 2005; COUNTY, 2007).

O desenvolvimento de baixo impacto maximiza a infiltração da água no solo, através da minimização ou desconexão das superfícies impermeáveis; cria zonas de transição e biorretenção, garantindo o armazenamento e infiltração das águas, preserva a flora existente, não suprimindo nenhuma vegetação e; aumenta as taxas dos processos do ciclo hidrológico, como a evapotranspiração e, diminui outras taxas, como o escoamento superficial. Um dos instrumentos adotados no desenvolvimento de baixo impacto são as técnicas compensatórias (RIGHETTO; MOREIRA; SALES, 2009; MDE, 2009; SMMWW, 2014).

Também denominadas de tecnologias alternativas ou sistemas não convencionais para a drenagem urbana, essas técnicas têm como foco minimizar os efeitos da urbanização sobre os processos hidrológicos, visando benefícios para a qualidade de vida e a preservação ambiental (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2005). Auxiliam no resgate dos processos envolvidos no ciclo hidrológico, diminuindo a geração dos volumes de escoamento e das vazões a jusante, maximizando o controle na fonte, potencializando o controle da qualidade das águas e a recarga de aquíferos, resgatando assim, as condições de pré-urbanização (CHAHAR; GRAILLOT; GAUR, 2012).

As técnicas compensatórias são classificadas em medidas não estruturais e estruturais. As medidas não estruturais utilizam meios naturais na redução do escoamento, não englobando obras civis, mas sim questões sociais, onde a participação popular é fundamental para um bom desempenho dessas medidas. Já as medidas estruturais envolvem obras de engenharia destinadas a minimizar os volumes gerados, destinando-se a armazenar, reter e infiltrar as águas escoadas superficialmente, permitindo o controle quali-quantitativo das vazões geradas (RIGHETTO; MOREIRA; SALES, 2009; ROY-POIRIER; CHAMPAGNE; FILION, 2010).

No âmbito técnico-científico de países desenvolvidos as técnicas compensatórias são estudadas e aplicadas no meio urbano em larga escala, inclusive por despertarem o interesse de muitos projetistas, órgãos e formuladores de políticas públicas que buscam encontrar soluções sustentáveis para as cidades (AHIABLAME; ENGEL; CHAUBEY, 2013).

Em países emergentes como o Brasil, os benefícios e resultados do uso dessas técnicas ainda não são bem disseminados para a sociedade e órgãos gestores do meio urbano. Algumas barreiras podem ser destacadas como a carência de normas específicas para o projeto destes sistemas e políticas públicas de incentivo à adoção dessas técnicas; a ausência de uma capacitação

técnica adequada dos profissionais envolvidos nas etapas de concepção, execução e manutenção dos dispositivos e; a existência de um grande número de variáveis e particularidades associadas aos parâmetros locais (REIS; ILHA; TEIXEIRA, 2013).

A partir do exposto, este capítulo apresenta uma abordagem quanto a aplicabilidade de um sistema de infiltração em específico, a trincheira de infiltração. A partir de uma revisão de literatura bem fundamentada, são expostos aspectos como composição estrutural, planejamento e projeto, controle quali-quantitativo e outros.

### 2.1.1 Sistemas de infiltração

A infiltração é considerada no urbanismo sob três fatores: externos - clima (precipitação e vento) e uso e ocupação do solo; internos - tipo de solo, condições hidrogeológicas; presença e variação do nível do lençol freático; fatores de superfície - geomorfologia e cobertura do solo (CARVALHO; LUIZ; GONÇALVES, 2012).

Entende-se que técnicas baseadas no processo de infiltração não podem ser inseridas no meio urbano de maneira isolada. As possíveis interações que a implantação dessas técnicas podem proporcionar seja com o solo natural, as edificações ou com a sociedade, devem ser consideradas.

É necessário compreender o comportamento dos fluxos de água nas técnicas compensatórias e os possíveis problemas que podem ser originados, tais como erosão interna e perda da capacidade de infiltração do solo. Assim, para a concepção das técnicas de infiltração é importante atentar para alguns aspectos (REIS; ILHA; TEIXEIRA, 2013; WINSTON et al., 2010; RESTREPO et al., 2012):

- Levantamento do uso e ocupação do solo → identificar as atividades desenvolvidas na região, quais são passíveis à poluição;
- Levantamento dos sistemas e infraestruturas existentes → evitar conflito entre os sistemas convencional e o alternativo e, se possível, propor a interação entre eles;
- Índices pluviométricos → conhecer o comportamento dos eventos (intensidade, duração e frequência);
- Estudo do solo e topografia → obter informações sobre as condições hidráulicas do solo e o caminho de escoamento das águas no meio urbano;
- Determinação e quantificação da carga poluidora das águas do escoamento superficiais;
- Profundidade e comportamento do lençol freático → manter uma margem de segurança de, no mínimo 1,50 m, para eventual contaminação;
- Levantamento das fundações das edificações existentes → não comprometer a estabilidade do terreno e entorno.

Os sistemas de infiltração que direcionam o escoamento da água superficial para a subsuperfície são comumente adaptados para melhor se adequarem ao meio urbano e devem ser projetadas para manter sua capacidade de infiltração pelo maior intervalo de tempo possível sem manutenção do dispositivo. A principal premissa aconselhada pela literatura, no que tange ao uso dos sistemas de infiltração, é que o solo deve ter média ou elevada capacidade de infiltração (REIS; ILHA; TEIXEIRA, 2013; CHAHAR; GRILLOT; GAUR, 2012; CREACO; FRANCHINI, 2012).

Os sistemas de infiltração são classificados em *in-channel* e *off-channel*, caracterizando-se como áreas construídas para armazenamento temporário das águas superficiais e posterior percolação até o lençol subterrâneo (AKAN, 2002; BOUWER, 2002).

Os sistemas *in-channel* são espaços localizados próximos a áreas alagadas ou riachos efêmeros, com a finalidade de aumentar a área molhada da área de inundação para que um maior volume superficial se infiltre no solo. Os sistemas do tipo *off-channel* são especialmente construídos para proporcionar uma infiltração direcionada das águas superficiais no solo. Ambos os sistemas são considerados sistemas artificiais para recarga subterrânea, pois modificam a superfície do solo e/ou a estrutura do subsolo para aumentar os níveis de água subterrânea (BOUWER, 2002).

A condutividade hidráulica é uma das propriedades essenciais dos solos e sua determinação é necessária a todos os estudos que envolvem o fluxo de água na superfície e na zona vadosa do solo. Ela se encontra associada às propriedades físico-químicas e mineralógicas do solo. Para fins de planejamento e manejo das águas superficiais urbanas esse parâmetro é um dos fatores preponderantes (CARVALHO; LUIZ; GONÇALVES, 2012).

Para sistemas de infiltração em que não haja colmatação sobre a base de infiltração, os valores de condutividade hidráulica se aproximam dos apresentados por BOUWER (1999) na Tabela 2.1, de acordo com o tipo de solo existente abaixo da camada de infiltração.

**Tabela 2.1:** Valores de condutividade hidráulica, segundo BOUWER (1999).

Tipo de solo	Condutividade hidráulica
Argiloso	< 0,1 <i>m/dia</i>
Franco	0,2 <i>m/dia</i>
Areia franca	0,3 <i>m/dia</i>
Franco arenoso	0,5 <i>m/dia</i>
Areia fina	1,0 <i>m/dia</i>
Areia média	5,0 <i>m/dia</i>
Areia grossa	> 10,0 <i>m/dia</i>

Técnicas compensatórias de infiltração são frequentemente aplicadas e estudadas em países desenvolvidos. No Brasil, essas técnicas vêm se disseminando, principalmente, por serem consideradas como uma alternativa que minimiza determinados impactos advindos da urbanização, principalmente em escala de lote urbano. Redução das vazões de pico, controle

dos volumes escoados e remoção de poluentes são alguns dos benefícios que essas técnicas proporcionam.

Com o objetivo de auxiliar nos estudos sobre essa temática, modelagens computacionais sobre os fenômenos e processos inerentes às técnicas de infiltração, como a dinâmica da água no solo, a capacidade de armazenamento e redução de vazões de escoamento, estão sendo ascendentemente aplicadas. Isso é justificável, pois através da modelagem do desempenho e funcionamento dessas técnicas, é possível prever ou estimar consequências e impactos de sua instalação (LUCAS; BARBASSA; MORUZZ, 2013).

Alguns aspectos podem interferir na interpretação e resultados obtidos do objeto ou fenômeno que se quer modelar, como a escolha inadequada do modelo, a insuficiência na qualidade e quantidade dos dados de entrada ou erros no ajuste e verificação dos parâmetros (TUCCI, 2005).

No estudo realizado por GRACIOSA; MEDIONDO; CHAUDHRY (2008a), foram simuladas as etapas de alimentação, recessão e redistribuição de duas trincheiras de infiltração com solos diferentes (argiloso e arenoso) e comparadas com os dados observados. Na etapa de alimentação houve uma superestimativa do processo de infiltração para o solo argiloso e uma subestimativa para o solo arenoso. Analisando a etapa de recessão, a capacidade de infiltração foi subestimada, já na redistribuição, ambos os solos atingiram rapidamente umidade de saturação, o que não ocorreu nos dados observados. Assim, através das simulações computacionais das trincheiras de infiltração foi possível obter resultados mais exatos e realizar uma análise mais criteriosa dos processos de alimentação, recessão e redistribuição de duas trincheiras de infiltração.

LUCAS; BARBASSA; MORUZZ (2013) aplicaram uma modelagem em um sistema filtro-vala-trincheira de infiltração utilizando o Método de PULS, por possibilitar adaptações e simplificações no método original. Os resultados mostraram que o desempenho dos sistemas, quando avaliados individualmente, foi bastante satisfatório, no que tange ao tempo de esvaziamento e altura máxima do nível de água observado no interior de cada estrutura. Já considerando a ação conjunta dos três sistemas, o método apresentou erros consideráveis nos resultados da simulação, principalmente decorrente das simplificações matemáticas adotadas no estudo.

GRACIOSA; MEDIONDO; CHAUDHRY (2008b) utilizaram o programa BIDISUL para realizar a modelagem de uma trincheira de infiltração, baseada na equação bidimensional de Richards. O modelo apontou bons resultados, possibilitando a abordagem de diferentes configurações, ao adotar perfis de umidade e volumes precipitados diferentes. O programa adotado configura-se como uma ótima ferramenta para o objetivo proposto.

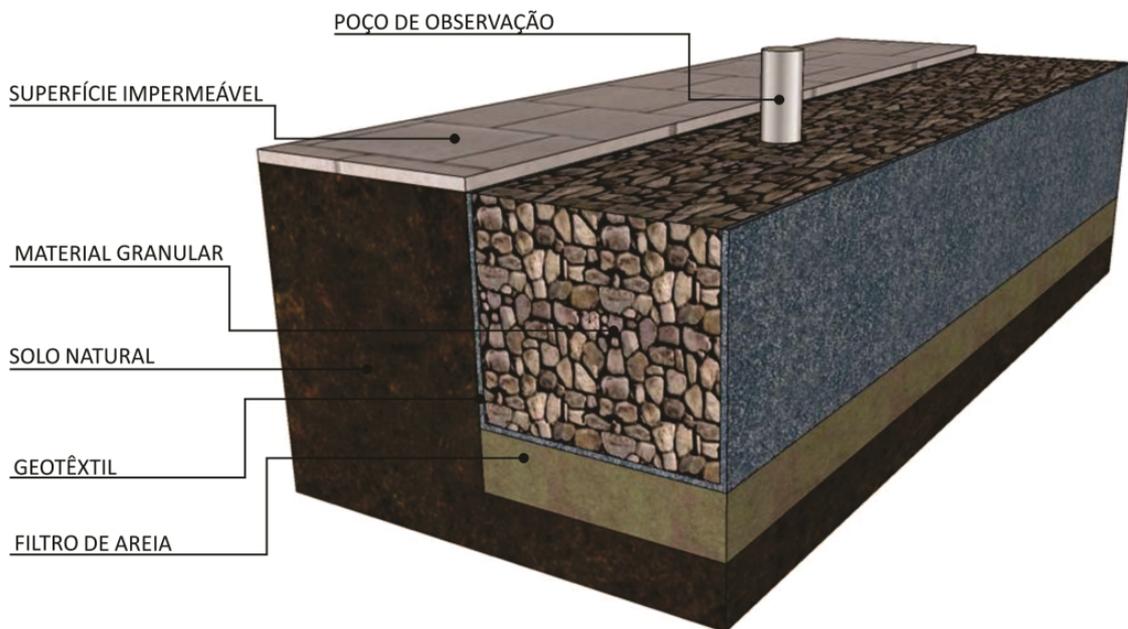
A partir dessa busca por informações e conhecimentos sobre o desempenho das técnicas compensatórias de infiltração e dos processos envolvidos na interação sistema-meio urbano, a modelagem computacional mostra-se como uma eficiente ferramenta para tal propósito. DUCHENE; MCBEAN; THOMSON (1994) afirmam que o uso de modelos unidimensionais não descrevem com clareza o real comportamento de uma trincheiras de infiltração, sendo a modelagem 2D

mais apropriada.

### 2.1.2 Trincheira de infiltração

As trincheiras de infiltração são projetadas ao longo de superfícies impermeáveis destinadas a amortecer os volumes superficiais. É caracterizada como uma técnica linear, no qual a dimensão de comprimento é superior aos de largura e profundidade. Trata-se de um sistema de infiltração do tipo controle na fonte, podendo ser implantado em diversos locais, pois se integram facilmente ao ambiente através de suas propostas de design (CHAHAR; GRAILLOT; GAUR, 2012; HEILWEIL; BENOIT; HEALY, 2015; DUCHENE; MCBEAN; THOMSON, 1994).

São áreas escavadas preenchidas por material granular do tipo brita ou seixos rolados, considerados sistemas do tipo *off-channel*. Geralmente são protegidas e separadas do solo natural por um geotêxtil, a fim de evitar a entrada de partículas finas e elementos contaminantes (Figura 2.2).



**Figura 2.2:** Exemplo da composição estrutural básica de uma trincheira de infiltração.

Fonte: Elaborado pela autora.

Não existe um padrão estrutural e de dimensionamento das trincheiras de infiltração. Podem ser adicionados, por exemplo, uma camada de areia ou de material orgânico sobre a superfície da estrutura, a fim de potencializar a retenção de possíveis poluentes através do processo de adsorção proporcionado pela matéria orgânica (EPA, 1999; CHAHAR; GRAILLOT; GAUR, 2012).

Apesar de serem caracterizadas como técnicas de infiltração, as trincheiras são projetadas principalmente para armazenamento das águas superficiais e então, posterior percolação da água no solo e a recarga das águas subterrâneas, concomitantemente à retenção de sólidos e partículas poluentes advindas do escoamento superficial. São implantadas em áreas com espaços limitados,

a exemplo de calçadas, rodovias, lotes residenciais e estacionamentos (DUCHENE; MCBEAN; THOMSON, 1994).

É importante atentar que, quando instaladas em rodovias ou estacionamentos, as trincheiras de infiltração devem ser locadas onde não estejam sujeitas ao tráfego veicular, como em margens de rodovias ou canteiros centrais de estacionamentos. Essa medida evita a compactação e a redução da permeabilidade da superfície do sistema e do solo superficial adjacente (SWMM, 2014).

A implantação de uma trincheira de infiltração requer análises prévias sobre os aspectos urbanos de uso e ocupação, infraestrutura existente, topográficos, hidrogeológicos, entre outros. É na fase de planejamento que se obtém essas informações gerais sobre a realidade do local onde será implantado o sistema.

CHAHAR; GRAILLOT; GAUR (2012) comparam o uso de técnicas compensatórias na França. Os autores constataram que os sistemas de retenção são mais utilizados do que os sistemas de infiltração, sendo 68% e 32% respectivamente. Isso se deve ao fato de que os sistemas de infiltração necessitam de dados mais precisos para seu projeto e dimensionamento, principalmente no que tange ao estudo do solo e suas propriedades hidráulicas como condutividade hidráulica, capacidade de armazenamento e caracterização textural do solo.

No que tange aos aspectos urbanos, a escolha do local de implantação é essencial na fase de planejamento. Por se tratar de uma estrutura que visa o controle quantitativo dos volumes escoados, a implantação em áreas densamente urbanizadas e onde o sistema de drenagem tradicional não acompanhou o crescimento urbano, a trincheira de infiltração torna-se uma opção viável (SMMWW, 2014).

O Plano Diretor pode ser uma ferramenta guia no planejamento de áreas passíveis para implantação da trincheira de infiltração. MELO; ARAÚJO; CABRAL (2012) fizeram um breve levantamento do Plano Diretor da cidade de Recife, indicando a técnica compensatória mais viável a ser implantada com base na caracterização de cada área, como sua consolidação e uso. A trincheira de infiltração foi escolhida como um sistema a ser utilizado para o controle de escoamento na fonte em áreas já consolidadas e densamente ocupadas, principalmente em locais como estacionamentos de edifícios.

Uma restrição para implantação de uma trincheira de infiltração é que esses sistemas não devem ser implantados em áreas aterradas, em razão das alterações já realizadas no solo (URBONAS; STAHR, 1993).

Além do levantamento de espaços urbanos passíveis para implantação dessa técnica, é necessário adquirir informações topográficas. Estudos não aconselham o uso da trincheira de infiltrações em terrenos com declividades superiores a 5%, pois quanto maior a declividade, maior será a velocidade do escoamento superficial e menor será a captura desses volumes pela superfície do experimento (EPA, 1999).

Além da declividade do terreno, áreas que propiciem o acúmulo de água e uma posterior infiltração, depressões fechadas ou valas de drenagem superficial, também devem ser

consideradas no estudo topográfico (SMMWW, 2014).

No que tange ao estudo do solo ou aspectos geológicos, deve-se atentar para informações relevantes. RESTREPO et al. (2012) afirmam que é necessário compreender o comportamento dos fluxos de água nas técnicas compensatórias e os possíveis problemas que podem ser originados, tais como erosão interna e perda da capacidade de infiltração do solo.

Os solos naturais devem conter baixos teores de silte e argila, a fim de proporcionar taxas de infiltrações consideravelmente eficientes. Alguns estudos apontam valores para taxas de infiltrações dos solos naturais que receberão trincheiras de infiltração (Tabela 2.2).

**Tabela 2.2:** Taxas de infiltração recomendadas para implantação da trincheira de infiltração.

Estudo	Taxa de Infiltração
URBONAS; STAHRE (1993)	> 0,80 cm/h
EPA (1999)	> 1,30 cm/h
MDE (2009)	> 1,32 cm/h
SWMM (2014)	> 2,16 cm/h

Taxas de infiltrações mais elevadas do que as determinadas para implantação das trincheiras de infiltração podem ser identificadas em alguns estudos, como o de SOUZA; GOLDENFUM; BARRAUD (2002) onde a taxa de infiltração foi de 3,00 cm/h.

EPA (1999) aconselha a implantação em solos de classes texturais com predominância de frações de areia, ou seja, solos constituintes dos grupos hidrológicos A e B, de acordo com a classificação do *Soil Conservation Service*. Já solos dos grupos hidrológicos C e D devem ser evitados, em razão do alto teor de argila em sua composição. MDE (2009) afirma que solos que contenham mais de 30% de argila em sua composição, não são propícios à instalação de uma trincheira de infiltração.

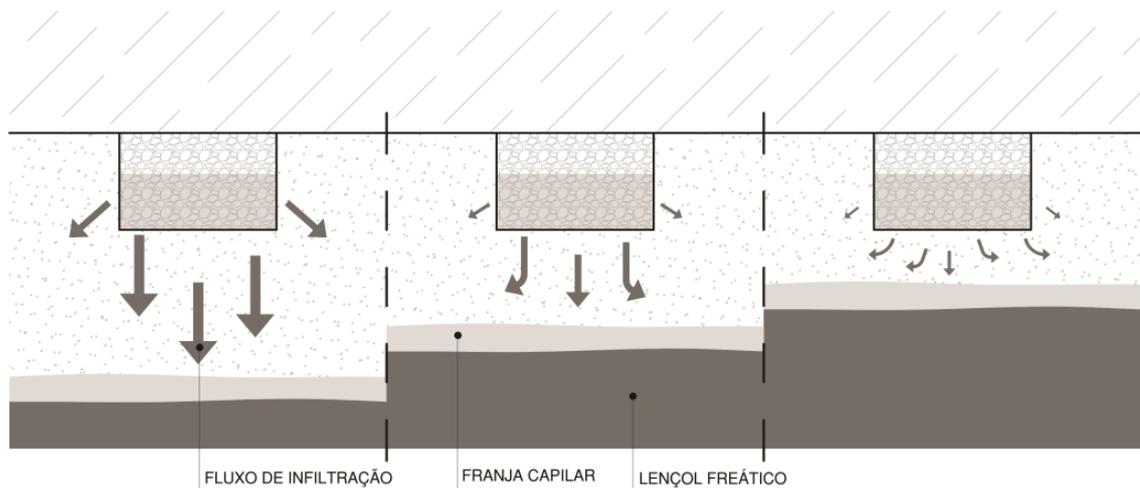
A distância que existe entre a base da trincheira de infiltração e o lençol freático também deve ser considerada no momento de planejamento do sistema, por duas principais razões: evitar uma potencial contaminação do lençol freático e não comprometer a capacidade hidráulica da trincheira de infiltração. Essa condição e o tipo de solo abaixo do sistema são os principais determinantes de um maior potencial de infiltração e proteção contra a contaminação das águas subterrâneas (DUCHENE; MCBEAN; THOMSON, 1994).

O potencial de contaminação do lençol freático deve ser considerado, principalmente se o mesmo for utilizado para abastecimento humano ou uso agrícola. Em áreas industriais ou com elevados usos de materiais químicos e metais pesados, não é aconselhável a implantação de trincheiras de infiltração (EPA, 1999). Mesmo que haja um estudo efetivo sobre as condições ambientais existentes na área para implantação de uma trincheira de infiltração, outras técnicas compensatórias que não possuam a infiltração como prioridade podem ser utilizadas, a exemplo das bacias de detenção (CHAHAR; GRAILLOT; GAUR, 2012).

Segundo BOUWER (2002), a franja capilar possui uma espessura média de 30 cm para

areias médias, e aproxima-se da base da trincheira de infiltração concomitante a elevação do nível do lençol freático. À medida que a distância entre a base e franja capilar diminui, há um movimento decrescente na taxa de infiltração do sistema e do volume infiltrado, comprometendo a capacidade hidráulica da trincheira de infiltração.

A franja capilar funciona como uma barreira hidráulica para o fluxo descendente das águas, diminuindo assim o espaço disponível para infiltração. Ao mesmo tempo em que essa distância diminui, o fluxo de infiltração se torna menos vertical. Ou seja, as águas infiltradas buscam poros vazios para serem preenchidos, tendo um comportamento mais horizontal do que vertical. Esse quadro se torna mais evidente quando há ocorrência de eventos chuvosos consecutivos e a trincheira de infiltração é bastante requisitada, dificultando que o mesmo e o solo natural retornem às condições anteriores ao evento, ou seja, às condições não saturadas (Figura 2.3).



**Figura 2.3:** Interferências da franja capilar e do lençol freático em uma trincheira de infiltração.

Fonte: Elaborado pela autora.

Outra preocupação acerca do planejamento da trincheira de infiltração é referente ao tempo de vida útil da estrutura. Um estudo apresentado pela EPA (1999) já constatava que 50% dos sistemas tinham seu desempenho reduzido parcialmente ou totalmente em apenas 5 anos. Os principais fatores estão relacionados as falhas no planejamento e execução da estrutura, a colmatação na base do sistema e a queda na capacidade de infiltração.

Realizado o planejamento, ou levantamento da realidade e características atuais do local, é realizado o projeto da trincheira de infiltração. É nessa etapa que são realizados o dimensionamento e a definição da composição estrutural do sistema, por serem ações que requerem atenção mais particular em razão da interação direta entre o sistema e o solo natural.

Segundo CREACO; FRANCHINI (2012), o projeto de uma trincheira de infiltração deve ser elaborado de maneira minuciosa, para que os fluxos superficiais sejam atenuados antes da ocorrência de um próximo evento de precipitação. O dimensionamento pode ser baseado na camada de armazenamento do sistema, sendo o mesmo projetado para reter temporariamente as

águas superficiais, mesmo que o solo abaixo do sistema esteja saturado.

Esse tipo de dimensionamento adota o princípio do balanço hídrico entre as vazões de entrada e saída de água na camada de armazenamento (Equação 2.1):

$$\frac{\Delta V_a}{\Delta t} = Q_{ent(t)} - Q_{said(t)} \quad (2.1)$$

Onde:  $\Delta V_a$  é a variação do volume de armazenamento ( $L^3T^{-1}$ );  $\Delta t$  é o intervalo de tempo ( $T$ );  $Q_{ent(t)}$  é a vazão de entrada ( $L^3T^{-1}$ );  $Q_{said(t)}$  é a vazão de saída ( $L^3T^{-1}$ ).

$\Delta V_a$  é resultado do produto entre a porosidade do material constituinte da camada de armazenamento ( $\eta$ ), a área da base do sistema ( $A_b$ ) e a altura do nível de água no interior do sistema em determinado momento ( $h(t)$ ). O volume de saída ocorre por infiltração e/ou por extravasamento do sistema. Assim, o volume de saída é dado por  $Q_{said(t)} = Q_{inf(t)} + Q_{ext(t)}$ , sendo  $Q_{ext(t)}$  existente apenas quando a altura do nível de água supera a altura da camada de armazenamento ( $h > H$ ).

A vazão de infiltração ( $Q_{inf(t)}$ ) depende da capacidade de infiltração do solo ( $cap_{inf}$ ) e da área de infiltração da trincheira de infiltração ( $A_{inf}$ ). A área de infiltração, geralmente é determinada em função da área de base e fração da área das paredes do sistema. Não há uma equação que determine tal valor, sendo adotadas algumas considerações, de acordo com alguns fatores, principalmente a colmatagem.

AKAN (2002) afirma que a infiltração através das paredes do sistema geralmente é negligenciada, em razão do elevado gradiente hidráulico que ocorre na direção vertical. Já no estudo realizado por GRACIOSA; MEDIONDO; CHAUDHRY (2008b), a base do sistema é considerada totalmente colmatada e as paredes de menor dimensão (largura) não são consideradas como áreas de infiltração, mas somente as paredes de maiores dimensões (comprimento).

BROWNE et al. (2013) esclarecem a importância em considerar a infiltração em duas dimensões, através da base e paredes da trincheira de infiltração. E conclui que o que vai importar na análise é a proporção de volumes infiltrados entre essas áreas de infiltração.

HEILWEIL; BENOIT; HEALY (2015) realizaram uma modelagem em trincheiras de infiltração e os resultados mostraram uma maior tendência à infiltração nas paredes do sistema. Essa informação é útil no momento de planejamento do sistema, indicando que trincheiras com comprimentos maiores que as dimensões de largura e profundidade são mais aconselháveis no projeto, concebendo áreas com elevado potencial de recarga subterrânea.

Nas simulações realizadas por DUCHENE; MCBEAN; THOMSON (1994), os resultados apontaram uma maior tendência de infiltração na base, sendo infiltrado um total de  $\frac{3}{4}$  do volume de entrada na trincheira de infiltração.

CREACO; FRANCHINI (2012) otimizaram a metodologia de dimensionamento considerando os eventos de precipitação e a área de infiltração com intensidades constantes, uma relação linear entre a área da bacia e o tempo de concentração e, a capacidade de infiltração é constante e igual a condutividade hidráulica saturada. Porém, os autores esclarecem que essas

considerações diferem das condições reais, utilizando-as para simplificar equações e relações que regem a hidrologia urbana e sugerem a aplicação de simulações numéricas para obter um dimensionamento mais detalhado e exato.

O trabalho de GRACIOSA; MEDIONDO; CHAUDHRY (2008b) propõe uma metodologia de dimensionamento de uma trincheira de infiltração baseada no cálculo do volume de armazenamento de uma trincheira de infiltração, a partir da estimativa do volume de infiltração pelo modelo de infiltração unidimensional de Philip (1957) e do modelo bidimensional de Richards (1930), utilizando o programa BIDISUL. Os modelos apresentaram boas dimensões para o sistema, com destaque para melhores valores quando adotado o modelo de Philip. Porém, os autores ressaltam que o modelo de Philip pode subestimar o volume infiltrado, pois não considera a área da base como área de infiltração.

Em relação a constância adotada para a capacidade de infiltração, AKAN (2002) afirma que essa proposição pode conduzir a resultados de dimensionamento errôneos, subestimando o volume máximo de água na camada de armazenamento.

A Equação de Green-Ampt também é adotada para dimensionar uma trincheira de infiltração, estabelecendo a equação de armazenamento para estruturas de infiltração (CHAHAR; GRAILLOT; GAUR, 2012; CREACO; FRANCHINI, 2012; AKAN, 2002). Descrevendo-a de maneira generalizada, essa equação monodimensional considera o início do processo de infiltração após o empoçamento da superfície e simplifica o processo no momento em que interrompe abruptamente a frente de molhamento, sem qualquer transição ou diminuição da umidade ao longo da profundidade.

Um dos principais parâmetros no dimensionamento de uma trincheira de infiltração é o período ou tempo de esvaziamento do sistema. Tempo de esvaziamento, tempo de drenagem ou tempo de recessão que indica o intervalo de tempo necessário para que a água armazenada no interior do sistema seja drenado na interface sistema-solo natural, após cessada a precipitação e o escoamento superficial (CREACO; FRANCHINI, 2012; AKAN, 2002; BROWNE et al., 2013).

O tempo de esvaziamento de uma trincheira de infiltração pode ser descrito pela Equação 2.2, respectivamente.

$$\Delta t = \frac{\eta (Per_{base} + 2dh_0)h_f}{q_{inf}} \quad (2.2)$$

Onde:  $\Delta t$  é a variação do tempo de esvaziamento ( $T$ );  $\eta$  é a porosidade do material da camada de armazenamento;  $Per_{base}$  é o perímetro da base do sistema;  $d$  é a declividade das paredes do sistema, no caso de trincheira retangular esse valor é 1;  $h_0$  é o nível de água inicial ( $L$ );  $h_f$  é o nível de água final ( $L$ );  $q_{inf}$  é o fluxo de infiltração ( $L^2T^{-1}$ ).

Para que o sistema readquira sua total capacidade, retornando ao seu estado inicial, antes do próximo evento de precipitação, é necessário não só uma considerável área de infiltração, mas também o tempo de esvaziamento da trincheira de infiltração. O ideal é que esse tempo seja pequeno e quanto menor a frequência entre os eventos de precipitação, mais difícil é a

mensuração desse tempo.

Estudos apontam tempos de esvaziamento ou drenagem diferentes, a exemplo de SMMWW (2014), que determina um tempo máximo de esvaziamento da trincheira de infiltração de até 48 h, e de DUCHENE; MCBEAN; THOMSON (1994) que aconselham um tempo de 72 h .

Do ponto de vista qualitativo, o tempo de esvaziamento deve ser suficiente para garantir a remoção e/ou retenção de poluentes de maneira satisfatória no sistema antes do contato com o lençol freático (EPA, 1999).

CHAHAR; GRAILLOT; GAUR (2012) afirmam que, caso o intervalo entre uma precipitação e outra seja curto e que as mesmas tenham intensidades consideráveis, é necessário solicitar outra técnica compensatória para receber o excesso superficial da trincheira de infiltração. Nesse trabalho, os autores comparam o tempo de esvaziamento de duas trincheiras de infiltração, sendo uma trapezoidal e outra retangular. O estudo apontou que, para níveis de água de 90, 75, 60, 45 e 30 cm, o tempo de esvaziamento da trincheira retangular foi sempre menor que a de formato trapezoidal.

Outros autores utilizam métodos de dimensionamento baseados na classe textural do solo e na máxima profundidade admissível com base nos níveis do lençol freático (MDE, 2009). Quanto menor a capacidade de infiltração do solo natural, maior deve ser a porosidade do material granular da camada de armazenamento. Quanto mais próximo da superfície estiver o lençol freático, menor será a profundidade do sistema e maiores serão as dimensões de largura e comprimento.

O Método da Chuva Envelope (Rain-envelope Method) foi utilizado em alguns estudos para o dimensionamento de trincheiras de infiltração (LUCAS; BARBASSA; MORUZZ, 2013). Esse método foi adotado porque os sistemas de infiltração respeitavam os seguintes critérios: a camada impermeável do solo a mais de 1,20 m de profundidade em relação à base da trincheira; o solo pertencer as classes A ou B; a taxa de infiltração do solo saturado é maior do que 0,8 cm/h (URBONAS; STAHR, 1993).

Metodologias de dimensionamento que utilizam modelagem hidráulica sobre o comportamento de trincheiras de infiltração podem ser utilizadas como ferramentas para estudos de concepção e viabilidade de implantação dos sistemas (LUCAS; BARBASSA; MORUZZ, 2013). Isso é possível através de informações adquiridas *in loco*, sendo utilizadas como dados de entrada do modelo, a exemplo de taxa de infiltração, classificação textural, curva de retenção da água no solo.

HEILWEIL; BENOIT; HEALY (2015) afirmam que, trincheiras de infiltração muito profundas ou grandes áreas não necessariamente aumentam a infiltração. Sendo assim, a melhor opção é reproduzir um número maior de sistemas, implantando-os paralelamente entre si.

O escoamento superficial acarreta elevados níveis de sedimentos, óleos, graxas e metais pesados, principalmente em áreas próximas a rodovias e estacionamentos. Aconselha-se que, na etapa de planejamento da estrutura de infiltração, seja projetada uma área de pré-tratamento da água, a fim de reduzir o volume de poluentes e nutrientes carregados pelas águas superficiais e

evitar a colmatagem da trincheira de infiltração (BOUWER, 2002; EPA, 1999).

Além da implantação de trincheiras de infiltração em contato com a superfície do terreno, trincheiras de infiltração subterrâneas também podem ser utilizadas. Geralmente são conectadas aos sistemas de drenagem tradicional, a fim de proporcionar uma infiltração na porção mais inferior do solo quando há cobertura impermeável sobre elas.

DUCHENE; MCBEAN; THOMSON (1994) afirmam que, mesmo a trincheira de infiltração sendo subterrânea, deve haver algum sistema de filtragem ou retenção de finos antes do volume superficial entrar no sistema, a fim de evitar a colmatagem do sistema.

Segundo SWMM (2014), é indicado que o material granular tenha uma porosidade de, no mínimo, 30%. A maioria dos estudos adotam materiais com porosidade mais elevada do que o indicado anteriormente, como DUCHENE; MCBEAN; THOMSON (1994) - 40%; SOUZA; GOLDENFUM; BARRAUD (2002) - 43% e WARNAARS et al. (1999) - 47%. Dentre as referências verificadas neste trabalho, apenas um estudo apresentou material granular com porosidade inferior a 30%, sendo de 27% (EMERSON; WADZUK; TRAVER, 2010).

Como exposto anteriormente, não há uma estrutura padrão de projeto para a trincheira de infiltração. Como as inúmeras maneiras de dimensionamento do sistema, assim também adotado para a estrutura. A Figura 2.4 apresenta algumas estruturas adotadas em trincheiras de infiltração.

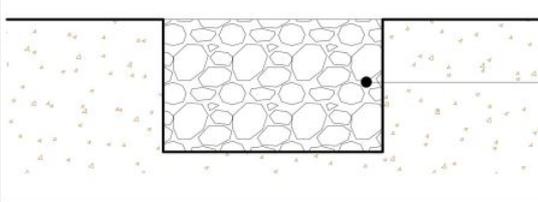
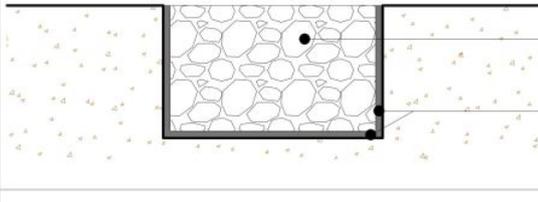
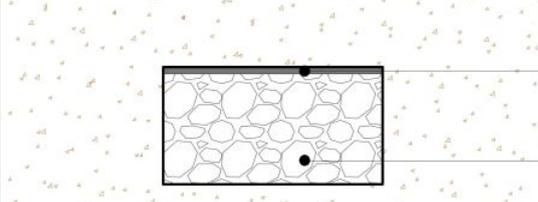
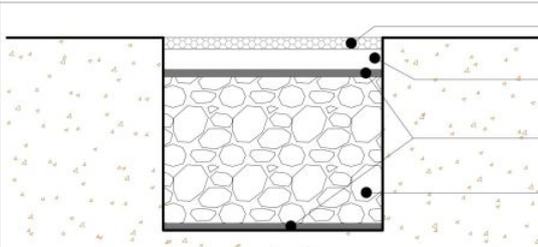
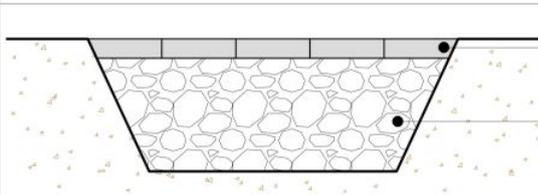
GRACIOSA; MEDIONDO; CHAUDHRY (2008a) constataram que, em condições de saturação, as trincheiras de infiltrações são capazes de infiltrar 40% da chuva de projeto.

A eficiência da trincheira de infiltração foi comprovada por SOUZA; GOLDENFUM; BARRAUD (2002). Mesmo após dois anos de funcionamento de duas trincheiras de infiltração instaladas no Rio Grande do Sul/Brasil, os sistemas foram capazes de controlar todo o volume de escoamento superficial gerado nesse tempo. A trincheira de  $8 m^3$  controlou volumes advindos de uma área de contribuição de  $600 m^2$ , enquanto a outro sistema de  $7,2 m^3$  respondeu bem a uma área de  $450 m^2$ .

Caso o local da implantação do dispositivo seja passível de poluição e contaminantes em excesso, pode-se adicionar à estrutura, uma camada de areia abaixo do material granular, reforçando a segurança das águas subterrâneas e do solo (SOUZA, 2002). O mesmo pode ocorrer na adição de uma camada de material orgânico, o qual potencializa a remoção de metais pesados e nutrientes através do processo de adsorção (EPA, 1999).

DUCHENE; MCBEAN; THOMSON (1994) ressaltam a importância da trincheira como elemento de controle qualitativo do fluxo superficial, porém com a ressalva de que, possíveis volumes de poluentes carregados na infiltração não sejam maiores do que a capacidade de atenuação e absorção natural do solo. A preocupação existe, principalmente, na zona não saturada do solo abaixo do sistema ou em solos com elevados valores de condutividade hidráulica.

Na trincheira de infiltração analisada por EMERSON; WADZUK; TRAVER (2010), o sistema mostrou ser uma ótima solução, retendo 93% do volume produzido por uma área impermeável de 0,19 ha. Já na função de remoção de poluentes, foi monitorado o nível de sólidos suspensos totais, obtendo uma remoção de 36%, que equivale a 18 kg de sedimentos removidos

	MATERIAL GRANULAR	DUCHENE; McBEAN & THOMSON (1994) AKAN (2002)
	MATERIAL GRANULAR GEOTÊXTIL	SOUZA (2002) EMERSON; WADZUK & TRAVER (2010)
	GEOTÊXTIL MATERIAL GRANULAR	WARNAAS <i>et al.</i> (1999)
	SEIXO ROLADO AREIA GROSSA GEOTÊXTIL MATERIAL GRANULAR	LUCAS; BARBASSA & MORUZZI (2013)
	PAVIMENTO PERMEÁVEL MATERIAL GRANULAR	CHAHAR; GRILLOT & GAUR (2012)

**Figura 2.4:** Estruturas de trincheiras de infiltração adotadas em alguns estudos.  
Fonte: Elaborado pela autora.

durante todo o estudo.

A construção das técnicas compensatórias de infiltração, se comparada com a do sistema de drenagem convencional, mostra-se menos onerosa (HEILWEIL; BENOIT; HEALY, 2015). Isso se deve, principalmente, a importância que esses dispositivos têm em manter o contato direto com o solo natural, evitando o uso de elementos para vedação e isolamento, geralmente utilizados nos sistemas de drenagem urbana tradicional. Outro aspecto que minimiza o custo é a manutenção dessas técnicas compensatórias, pois não necessitam de manutenção frequente e de muitos equipamentos.

A Tabela 2.3 apresenta o custo de construção de trincheiras de infiltração desenvolvidas em alguns estudos.

É evidente o avanço dos estudos acerca dos benefícios advindos das técnicas compensa-

**Tabela 2.3:** Custo de construção de trincheiras de infiltração.

Estudo	Área de Contribuição ( $m^2$ )	Dimensão ( $m^3$ )	Custo* (R\$)
SOUZA (2002)	600	8,00	450,00
SOUZA (2002)	450	7,20	700,00
GRACIOSA (2008b)	250	4,50	394,67

\*O custo não engloba equipamentos de monitoramento como pluviômetro e sensor de nível.

tórias a nível local. Porém, os aspectos positivos dessas técnicas quando implantadas em larga escala no ambiente urbano e integradas, ainda são escassos (REIS; ILHA; TEIXEIRA, 2013).

Trincheiras de infiltração podem ser utilizadas em conjunto com outras técnicas compensatórias, promovendo um pré-tratamento e/ou a diminuição do fluxo de escoamento superficial, pois são facilmente associadas a outras técnicas compensatórias seja de infiltração ou retenção (MDE, 2009).

DUCHENE; MCBEAN; THOMSON (1994) e CHAHAR; GRAILLOT; GAUR (2012) confirmam a importância de um sistema associado a trincheira de infiltração projetada para possíveis extravasamentos no sistema e que a combinação entre técnicas compensatórias é um aspecto de grande relevância a ser considerado na drenagem urbana sustentável .

Alguns estudos informam sobre a importância dessa integração entre trincheiras de infiltração e pavimentos permeáveis e; trincheiras de infiltração e bacias de detenção, sendo as últimas posicionadas como sistemas de segurança caso haja extravasamento (DUCHENE; MCBEAN; THOMSON, 1994; CHAHAR; GRAILLOT; GAUR, 2012).

Na simulação realizada por HEILWEIL; BENOIT; HEALY (2015), os autores afirmam que duas trincheiras de infiltração podem ser implantadas próximas, desde que mantenham um espaçamento mínimo para que o processo de infiltração de uma não comprometa o da outra. Neste estudo, o afastamento mínimo foi de 10 m, já em WARNAARS et al. (1999) de 7 m. Nenhum dos estudos identificou o comprometimento da função de infiltração pela proximidade dos sistemas.

No estudo realizado por WARNAARS et al. (1999), foi verificado um decréscimo do valor da condutividade hidráulica entre 30 e 70%. Os autores afirmaram que essa queda pode ser justificada pelo lento processo de colmatção ocorrido durante o período de  $2\frac{3}{4}$  anos de monitoramento. Esse aspecto poderia ser prevenido ou retardado, pela existência de um sistema de pré-tratamento ou a manutenção no experimento.

O principal objetivo da manutenção é evitar o acúmulo de sedimentos na base da trincheira de infiltração, os quais formam a camada de colmatção. Isso garante o contínuo e regular desempenho do sistema e o prolongamento de sua vida útil. Para tal, é aconselhável prever algum tipo de pré-tratamento das águas superficiais antes da entrada no sistema, seja através de filtros, tanques de decantação ou outras técnicas compensatória como uma bacia de detenção (EPA, 1999; CHAHAR; GRAILLOT; GAUR, 2012; SMMWW, 2014).

Se o material continua a se acumular, eles devem ser periodicamente removidos ao final de cada período chuvoso (SMMWW, 2014). Essa remoção é feita mecanicamente ou manualmente. Trincheiras de infiltração com longas vidas úteis quando muito colmatadas podem ser refeitas ou, mesmo que abandonadas, ainda há a vantagem do armazenamento das águas superficiais, da infiltração e da recarga do lençol freático, mesmo que em pequenas quantidades (BOUWER, 2002).

Geralmente, trincheiras de infiltração implantadas em áreas com elevadas cargas de metais pesados e sólidos suspensos, como estacionamentos, devem prever uma área de acesso à manutenção do sistema (EPA, 1999).

Porém a manutenção da camada de colmatação em trincheiras de infiltração é de difícil realização. Por se tratar de uma estrutura que possui uma camada de material granular sobre a base da estrutura, a retirada do mesmo para limpeza da base requer atenção, dependendo das dimensões adotadas. Caso a manutenção seja feita de maneira manual, pode proporcionar a compactação da base do solo pela presença humana na retirada do material dentro da estrutura, resultando na diminuição da capacidade de infiltração da trincheira de infiltração.

Em outras estruturas de infiltração, como bacia de infiltração, a manutenção é realizada de maneira mais direta, por não haver uma camada de material granular sobre a base do sistema (BARRAUD; LE COUSTOMER, 2006).

O uso de equipamentos como retroescavadeiras podem causar danos à estrutura na retirada do material, como por exemplo, atingir as paredes e provocar alteração na estrutura natural do solo. Porém, quanto aos métodos de execução das obras de construção das trincheiras de infiltração, a retroescavadeira pode ser utilizada por evitar a compactação do solo da base da estrutura (EPA, 1999).

Porém, o uso do maquinário para a construção do sistema deve considerar o solo do entorno. O trânsito das máquinas podem proporcionar a compactação do solo e reforçar a acumulação de finos levando a colmatação, como observado de LUCAS et al. (2015).

Pela colmatação ser um elemento de difícil determinação, alguns estudos admitem que a trincheira de infiltração está em constante estado de funcionamento regular, ou seja, com manutenção regular de limpeza de filtros e remoções de sedimentos (AKAN, 2002). Essa consideração simplifica os cálculos e análise do desempenho do sistema de infiltração, porém pode não responder com total veracidade à situação real do sistema.

## 2.2 Estudo do Solo

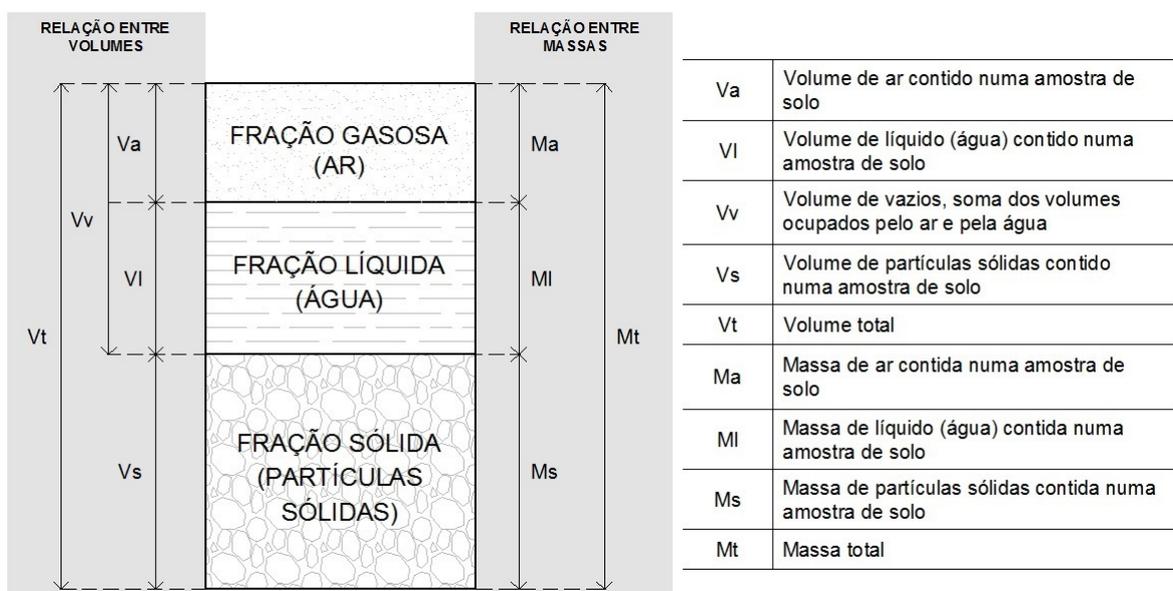
Quando estudamos os aspectos relacionados ao crescimento urbano, o solo é um dos principais elementos a serem considerados, principalmente no que tange ao uso e ocupação do mesmo. Porém, o estudo sobre o uso e ocupação do solo é realizado de maneira superficial, não enfocando características e relações importantes que acontecem na porção superficial e subterrânea.

Assim, o estudo do solo em áreas urbanas requer um enfoque mais específico sobre sua estrutura e as relações inerentes a ele, principalmente quando ações antrópicas visam implantar sistemas de infraestruturas relacionados ao solo, a exemplo de técnicas compensatórias de infiltração.

Para a instalação de um dispositivo de infiltração é essencial o estudo do solo local, pois o processo de passagem da água da superfície para o interior do sistema de infiltração, bem como sua redistribuição no solo, depende diretamente de suas características e propriedades físicas, químicas e mineralógicas.

O solo pode ser definido como material poroso formado através de processos físicos, químicos e biológicos resultantes da interação entre o material formador (rocha), o tempo, o clima, a topografia e os organismos vivos. Dessa maneira, o solo possui características peculiares, devido às variáveis que compõem sua formação (REICHARDT; TIMM, 2004).

O solo é constituído por frações sólida, líquida e gasosa. Cada fração possui suas características próprias, assim como também estabelecem relações entre si, as quais são essenciais para a compreensão das dinâmicas e fenômenos que ocorrem no solo, a exemplo da relação massa e volume. A Figura 2.5 apresenta, proporcionalmente, as frações constituintes do solo e seus componentes de massa e volume.



**Figura 2.5:** Esquema da composição trifásica de um solo.

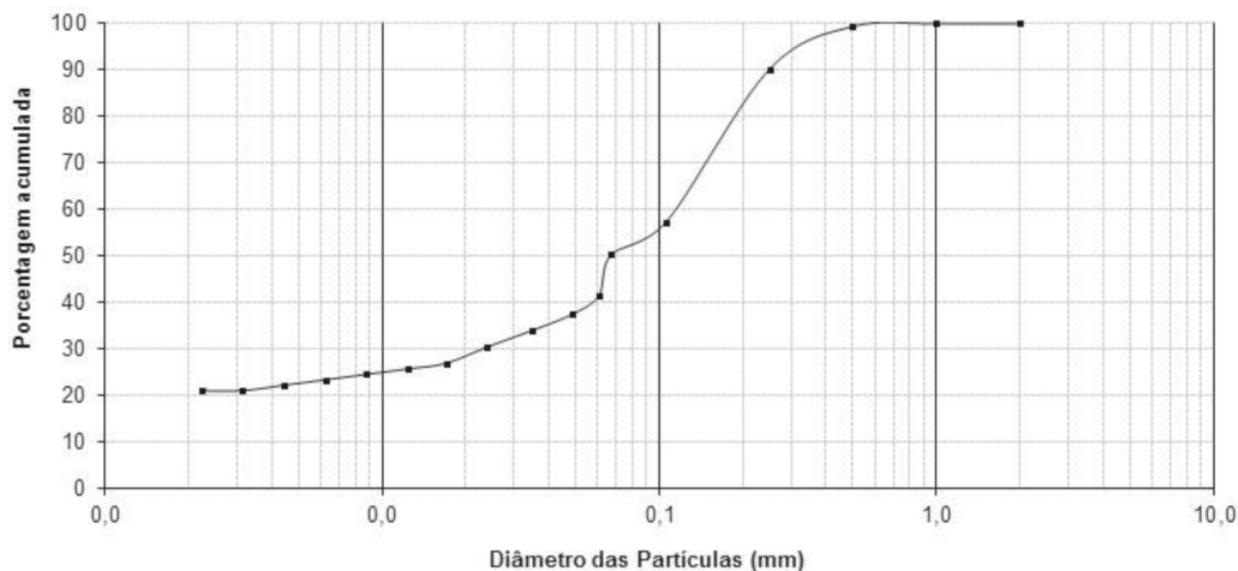
Fonte: Adaptado de HILLEL (1998).

### 2.2.1 Propriedades físicas

#### Textura

É uma propriedade restrita à fração sólida do solo e refere-se ao tamanho das partículas ou grãos que o constituem. As partículas são divididas de acordo com o tamanho médio dos grãos, sendo classificadas em areia, silte e argila. Não há um consenso na classificação granulométrica dos solos, porém as mais adotadas são propostas pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) e pela Sociedade Internacional de Ciência do Solo (ISSC).

Essa distribuição das partículas é determinada através da análise mecânica do solo, onde o mesmo recebe uma designação específica de acordo com a proporção na distribuição de areia, silte e argila, denominada de classe textural. A dimensão das partículas ou dos grãos que compõem a fração sólida do solo é apresentada através da curva granulométrica. A curva exibe a relação entre o diâmetro das partículas e a porcentagem acumulada de cada diâmetro (Figura 2.6). A partir daí, determina-se a classe textural do solo utilizando o triângulo textural proposto pela USDA, classificação textural adotada pela Sociedade Brasileira de Ciências do Solo (SBCS) (Figura 2.7) (LEMOS; SANTOS, 1996).



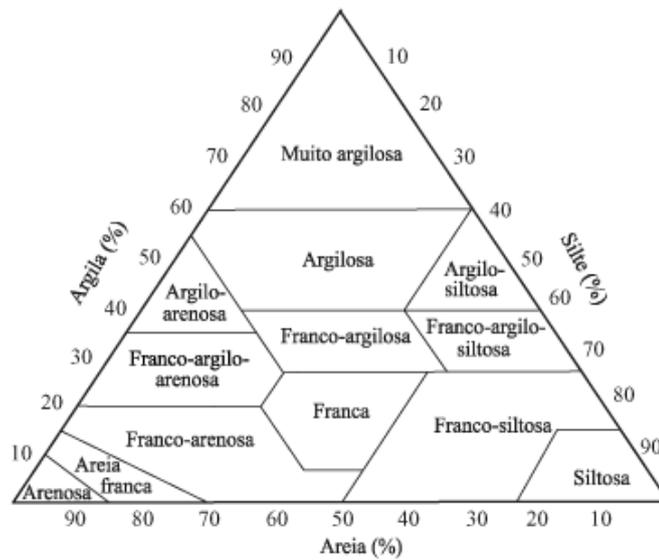
**Figura 2.6:** Exemplo de curva granulométrica.

Fonte: Elaborado pela autora.

#### Porosidade

É a razão entre o volume de vazios ou poros no solo e o volume total do solo (Equação 2.3).

$$\eta = \frac{V_v}{V_t} \quad (2.3)$$



**Figura 2.7:** Triângulo textural.  
Fonte: LEMOS; SANTOS (1996).

Onde:  $\eta$  é a porosidade do solo (%);  $V_v$  é o volume de vazios do solo ( $L^3$ );  $V_t$  é o volume total do solo ( $L^3$ ).

### Massa específica das partículas e do solo

A massa específica das partículas é a razão entre a massa da fração sólida e seu volume (Equação 2.4).

$$\rho_p = \frac{M_s}{V_s} \quad (2.4)$$

Onde:  $\rho_p$  é a massa específica das partículas ( $ML^{-3}$ );  $M_s$  é a massa da fração sólida do solo ( $M$ );  $V_s$  é o volume da fração sólida do solo ( $L^3$ ).

A massa específica do solo é a razão entre a massa da fração sólida e o volume total do solo (Equação 2.5).

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_t} \quad (2.5)$$

Onde:  $\rho_s$  é a massa específica do solo ( $ML^{-3}$ );  $M_s$  é a massa da fração sólida do solo ( $M$ );  $V_t$  é o volume total do solo ( $L^3$ ).

### Umidade gravimétrica e volumétrica

A umidade gravimétrica, umidade mássica ou à base de peso é a razão entre a massa da água e a massa da fração sólida do solo (Equação 2.6).

$$u = \frac{M_l}{M_s} \quad (2.6)$$

Onde:  $u$  é a umidade gravimétrica ( $MM^{-1}$ );  $M_l$  é a massa da fração líquida do solo ( $M$ );  $M_s$  é a massa da fração sólida do solo ( $M$ ).

A umidade volumétrica ou à base de volume é a razão entre o volume de água e o volume total do solo (Equação 2.7). Também pode ser expressa em função da densidade do solo e da umidade gravimétrica (Equação 2.8).

$$\theta = \frac{V_l}{V_t} \quad (2.7)$$

$$\theta = \frac{u \cdot \rho_s}{\rho_a} \quad (2.8)$$

Onde:  $\theta$  é a umidade volumétrica ( $L^3L^{-3}$ );  $V_l$  é o volume de água contido no solo ( $L^3$ );  $V_t$  é o volume total de solo ( $L^3$ );  $u$  é a umidade gravimétrica ( $MM^{-1}$ );  $\rho_s$  é a massa específica do solo ( $ML^{-3}$ );  $\rho_a$  é a massa específica da água ( $ML^{-3}$ ).

## 2.2.2 Equações de fluxo em meio poroso saturado e não saturado

### Definições

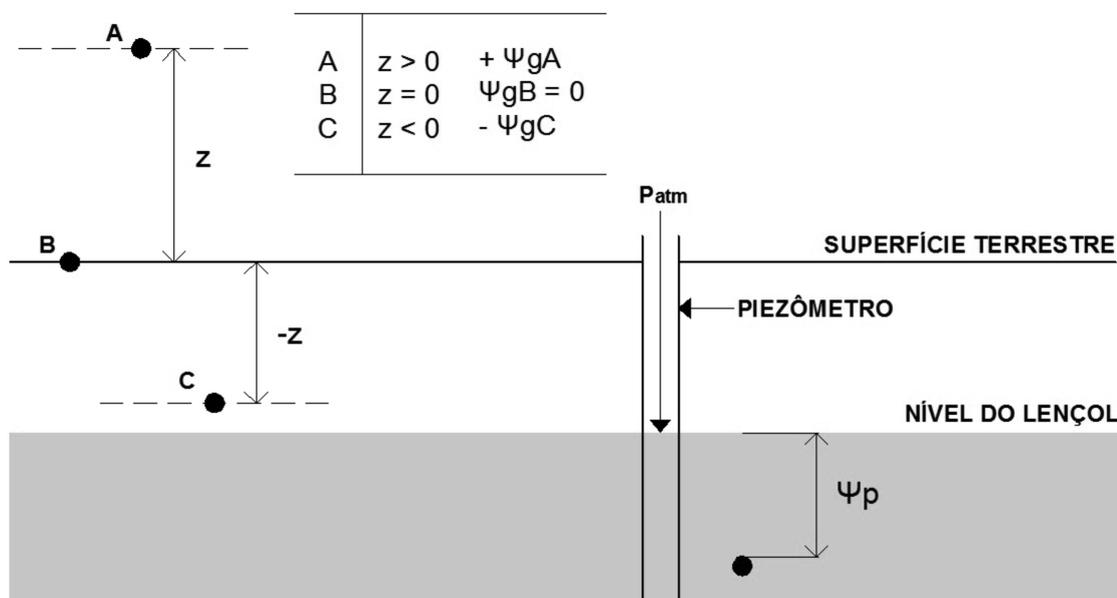
Grau de saturação de um solo corresponde à porcentagem de poros do solo que estão preenchidos por água. O conhecimento do grau de saturação de um solo é relevante no processo de passagem e redistribuição da água no solo, pois quanto maior o grau de saturação do solo, menor será essa passagem. Dessa maneira, a porosidade do solo é considerada uma relevante propriedade no processo de infiltração, sendo por esse motivo, estudada em seus diferentes estados: saturado e não saturado.

Um solo é considerado saturado quando seus poros estão totalmente preenchidos por água. Assim, em um solo saturado, o grau de saturação é 100%, enquanto que em um solo totalmente seco, o grau de saturação é 0%. Quando os poros de um solo estão preenchidos parcialmente por água e ar, a condição do solo é considerada não saturada. É nessa condição que acontece a maioria dos processos referentes ao movimento e dinâmica da água no solo (LEMOS; SANTOS, 1996).

Quando os poros são preenchidos por água, em detrimento do ar, ocorre a retenção da água no solo, através das forças capilares e de adsorção. As forças capilares ocorrem na retenção de água por microporos, as quais deslocam o líquido para uma determinada área. As forças de adsorção retêm o líquido nas superfícies das partículas do solo, formando um filme no entorno das mesmas. Após a saturação do solo, a água no seu interior se distribui, principalmente pela atuação das forças capilares (drenagem livre). Porém, à medida que o solo seca, as forças de adsorção tornam-se mais presentes, retendo a água na superfície das partículas (LIBARDI, 2005).

Quando combinadas, as forças capilares e de adsorção originam o potencial mátrico ou matricial do solo ( $\Psi_m$ ). O potencial matricial depende da quantidade de água no solo, pois quanto menor o conteúdo de água em seu interior, maior será a energia necessária para movimentar a água no solo.

O potencial matricial é uma propriedade dependente da fração líquida do solo. Porém, o solo também é composto pelos potenciais gravitacional e de pressão. O potencial gravitacional ( $\Psi_g$ ) está relacionado à variação de altura ( $z$ ) entre a superfície terrestre e um corpo no interior do solo. O potencial de pressão ( $\Psi_p$ ) representa a altura da coluna de água contida em um perfil de solo, podendo ser denominado também de carga hidráulica (Figura 2.8).



**Figura 2.8:** Potenciais gravitacional e de pressão, respectivamente.  
Fonte: Adaptado de LIBARDI (2005).

Assim, nas condições de saturação, a umidade do solo é constante e igual à porosidade ( $\theta = \eta$ ). A condutividade hidráulica também é constante, denominada de condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ). Nessa condição do solo, apenas os potenciais gravitacional ( $\Psi_g$ ) e de pressão ( $\Psi_p$ ) são considerados.

Já, na condição não saturada, o teor de umidade está abaixo da saturação ( $\theta < \eta$ ) e, apenas os potenciais matricial ( $\Psi_m$ ) e gravitacional ( $\Psi_g$ ) são considerados. A resolução dos problemas para esse caso é mais complexa em razão da variabilidade da umidade, interferindo assim, em propriedades como a condutividade hidráulica e os potenciais matricial e gravitacional.

### Equação de Darcy

Darcy (1856), quantificou o fluxo de água no meio poroso saturado sob condições isotérmicas do solo. Ele considerou que o movimento da água no solo é escalar, ou seja, ocorre somente em uma direção. A equação proposta depende da condutividade hidráulica ( $K$ ), da

taxa de variação do potencial total de água no solo ( $\partial\psi$ ), representado pela soma dos potenciais matricial e gravitacional e, do comprimento da coluna de solo ( $\partial_z$ ) (Equação 2.9).

$$q = -K \frac{\partial\psi}{\partial z} \quad (2.9)$$

Onde:  $q$  é o fluxo ( $LT^{-1}$ );  $K$  é a condutividade hidráulica do solo ( $LT^{-1}$ );  $\partial\psi$  é o potencial total de água no solo ( $L$ );  $\partial_z$  é a variação de potencial entre a superfície terrestre e um corpo no interior do solo ( $L$ ).

A equação de Darcy só é válida caso haja diferença de potencial, onde o movimento ocorre do local de maior potencial para o de menor potencial, gerando um potencial decrescente, o que justifica o sinal negativo da equação. A equação descreve de maneira macro o fluxo de água no solo e deve ser aplicada em condições de escoamento laminar, quando as forças viscosas do fluido são desprezíveis e a permeabilidade intrínseca ( $k$ ) permaneça constante, mesmo ocorrendo mudança de potencial (TUCCI, 2012).

### Equação de Darcy-Buckingham

A equação matemática que quantifica o movimento de água sob condições não saturadas foi adaptada da equação de Darcy, sendo denominada Equação de Darcy-Buckingham (1907) (Equação 2.10).

$$q = -K(\theta) \left[ \frac{\partial\psi}{\partial x} + \frac{\partial\psi}{\partial y} + \frac{\partial\psi}{\partial z} \right] \quad (2.10)$$

Onde:  $q$  é o fluxo ( $LT^{-1}$ );  $K(\theta)$  é a condutividade hidráulica do solo ( $LT^{-1}$ );  $\partial\psi$  é o potencial total de água no solo ( $L$ );  $x, y$  e  $z$  são as direções de fluxos tridimensionais ( $L$ ).

### Equação de Richards

A equação de Richards descreve o fluxo de água em solos não saturados (Equação 2.11). É uma equação diferencial não linear, onde as soluções analíticas são de difícil obtenção, principalmente por necessitar das curvas de retenção de água no solo e de condutividade hidráulica saturada na determinação das características hidráulicas do solo. Outras informações importantes na aplicação da equação são o conhecimento da geometria do solo e do conteúdo de água no solo.

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K(\theta) \left( \frac{\partial h(\theta)}{\partial x} + \cos\gamma \right) \right] - S \quad (2.11)$$

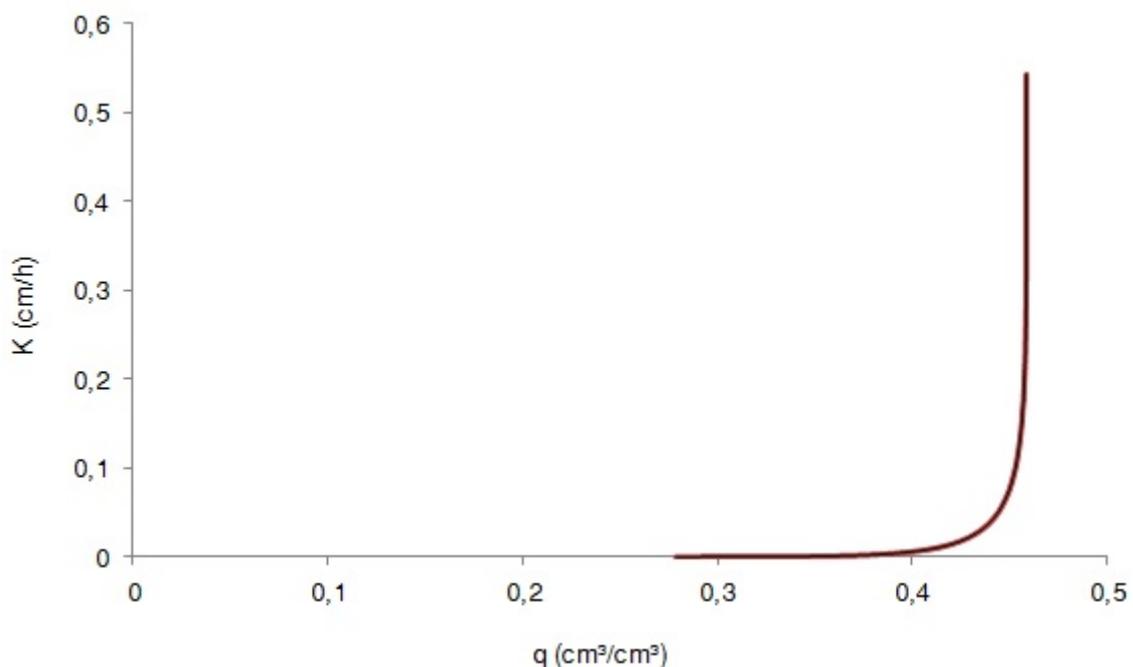
Onde:  $\partial\theta$  é o potencial matricial de água no solo;  $t$  é o tempo;  $\partial_x$  é a coordenada espacial;  $S$  é a sorvidade do solo ( $LT^{-0,5}$ );  $\gamma$  é o ângulo entre a direção de fluxo e a coordenada vertical ( $\gamma = 0^\circ$  para fluxo vertical,  $90^\circ$  para fluxo horizontal e  $0^\circ < \gamma < 90^\circ$  para fluxo inclinado);  $K(\theta)$  é a condutividade hidráulica.

### 2.2.3 Curva de condutividade hidráulica

Condutividade hidráulica é a capacidade que o solo tem para conduzir água através de seus poros. Quanto maior o diâmetro das partículas do solo, mais facilmente o líquido será conduzido nesse material do que em um, cuja textura seja mais fina. Essa relação é descrita na Equação 2.12 e pela curva de condutividade hidráulica representada pela Figura 2.9.

$$K = k \frac{\rho_a g}{\mu} \quad (2.12)$$

Onde:  $K$  é a condutividade hidráulica ( $LT^{-1}$ );  $k$  é a permeabilidade intrínseca ( $L^2$ ), a qual depende do arranjo geométrico das partículas e da umidade do solo;  $\rho_a$  é a massa específica da água ( $ML^{-3}$ );  $g$  é a aceleração da gravidade ( $LT^{-2}$ );  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido ( $ML^{-1}T^{-1}$ ).



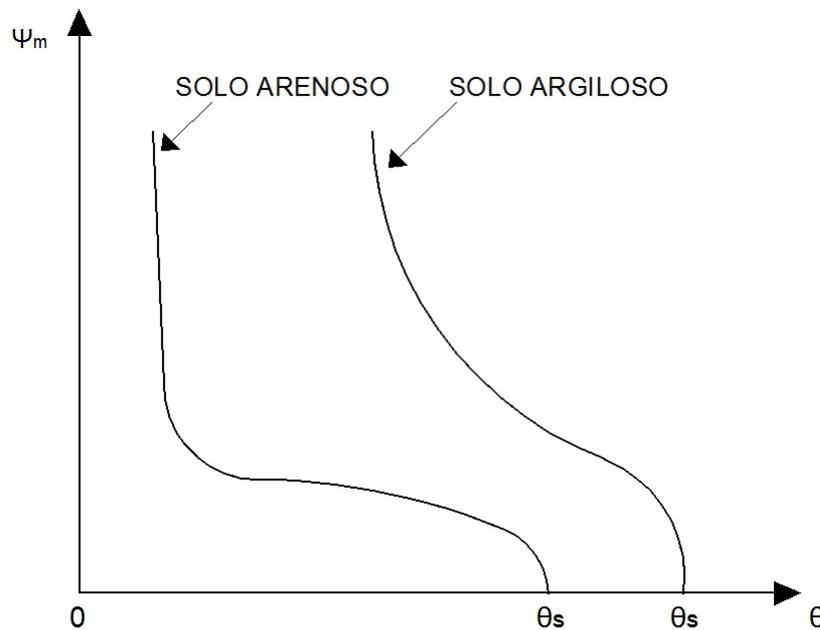
**Figura 2.9:** Curva de condutividade hidráulica.

### 2.2.4 Curva de retenção da água no solo

A principal relação que ocorre entre a fração líquida e o solo é representada pela curva de retenção ou curva característica de água no solo. Ela relaciona o teor de umidade ( $\theta$ ) com o potencial matricial do solo ( $\Psi_m$ ), e depende diretamente do arranjo e das dimensões dos poros. A curva de retenção é fundamental na modelagem numérica do fluxo de água em solos, principalmente em não saturados.

O solo arenoso apresenta poros maiores que os do solo argiloso. Sendo assim, um solo do tipo arenoso armazena menos água em seu interior e apresenta uma elevada variação da umidade. Já em solos argilosos, a variação da umidade é gradual em razão do elevado armazenamento

de água em seu interior (REICHARDT; TIMM, 2004; SILVEIRA; LOUZADA; BELTRAME, 2012) (Figura 2.10).



**Figura 2.10:** Curva de retenção da água no solo.  
Fonte: Adaptado de REICHARDT; TIMM (2004) .

Van GENUCHTEN (1980) utilizou dados da curva de retenção de água no solo como parâmetros de ajuste em uma equação que quantifica o movimento de água no solo a variadas profundidades. Essa equação é baseada em propriedades que são determinadas mais facilmente, como a umidade e o potencial matricial (Equação 2.13).

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \Psi_m)^n]^m} \quad (2.13)$$

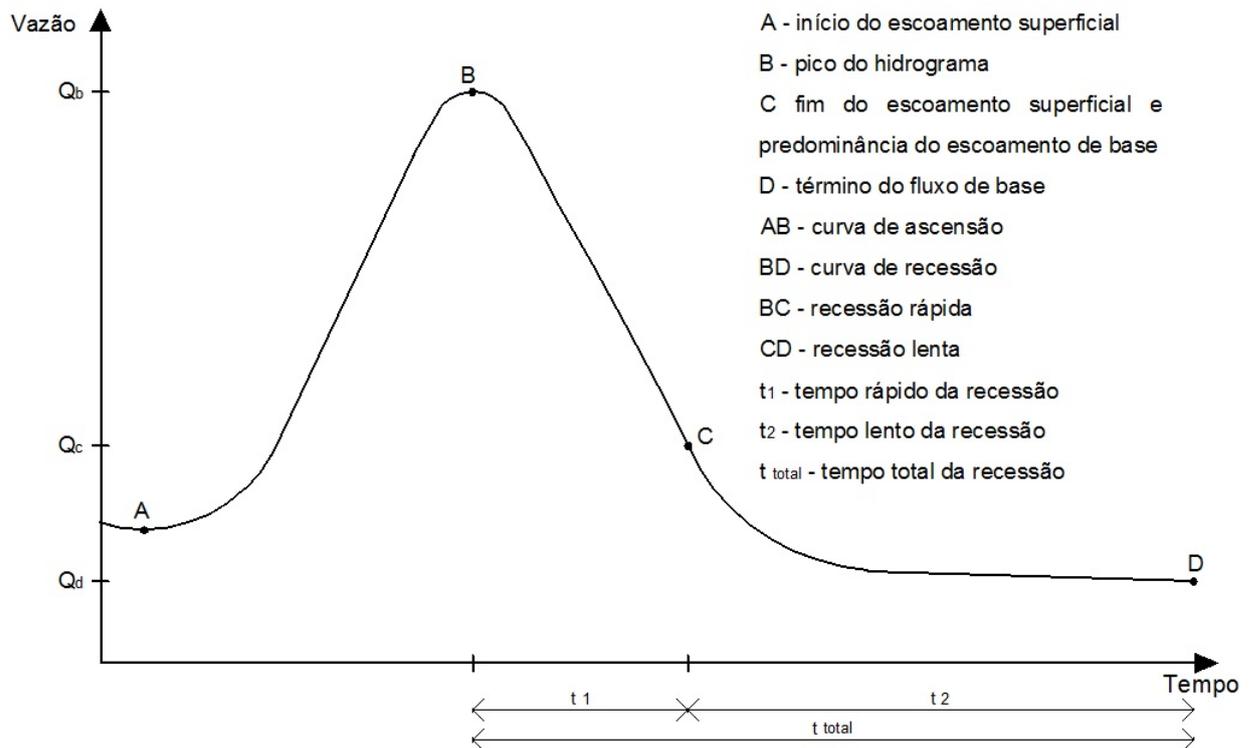
Onde:  $\theta$  é a umidade volumétrica ( $L^3L^{-3}$ );  $\theta_r$  é a umidade volumétrica residual ( $L^3L^{-3}$ );  $\theta_s$  é a umidade volumétrica saturada ( $L^3L^{-3}$ );  $\Psi_m$  é o potencial matricial ( $L$ );  $n$  e  $m$  são parâmetros de forma;  $\alpha$  é o parâmetro de normalização.

Os valores das unidades da equação podem ser determinados em laboratório, através das características texturais do solo (umidade) e, em campo, pelo monitoramento do solo através de equipamentos como tensiômetros (mede o potencial matricial do solo). Diferentemente, os parâmetros de forma ( $n$  e  $m$ ) são de difícil determinação, sendo necessário o uso de modelos matemáticos para predição de seus valores (LOYOLA; PREVEDELLO, 2003; MELLO et al., 2005).

### 2.2.5 Curva de recessão

#### Curva de recessão em rios

Os principais processos envolvidos no ciclo hidrológico são representados no hidrograma, refletindo o comportamento da vazão pelo tempo. Na Figura 2.11 são representados os processos de precipitação, escoamento superficial e escoamento de base ou subterrâneo.



**Figura 2.11:** Hidrograma.

Fonte: Adaptado de TUCCI (2012).

É importante observar que o hidrograma possui dois momentos: ascensão e recessão. A ascensão inicia no ponto A e cessa no pico do hidrograma (B). A partir desse ponto o movimento é de recessão. O momento de recessão é representado por uma curva descendente composta por dois instantes: um mais rápido, onde a vazão diminui em um curto espaço de tempo ( $t_1$ ), caracterizando o final do escoamento superficial (BC) e; outro mais lento ( $t_2$ ), onde a vazão é distribuída de maneira mais uniforme no tempo, representando o escoamento de base (CD) (TUCCI, 2012).

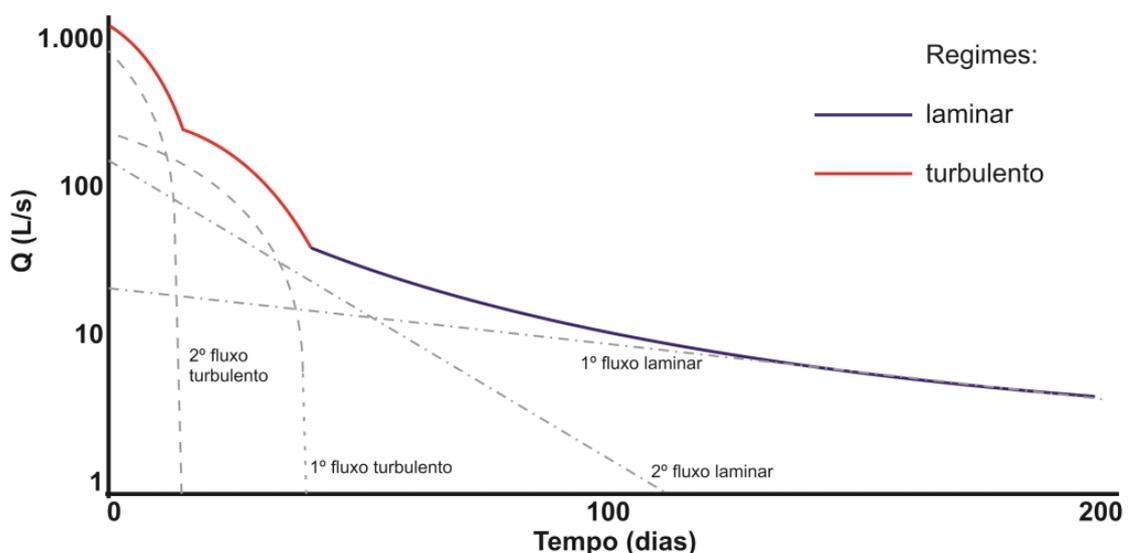
A curva de recessão tem seu final quando o hidrograma torna a ascender pela ocorrência de uma nova precipitação ou por uma aparente variação não justificada na curva. Assim, o comportamento da curva de recessão é alterado em fator da precipitação e de acordo com a variação do armazenamento da água no solo. Mesmo com o término da precipitação, o solo ainda pode ser alimentado externamente, através do acúmulo de água em depressões, elementos de detenção ou canais de armazenamento; e internamente, através de fendas, rochas e poros do solo (GRIFFITHS; CLAUSEN, 1997; MOORE, 1997; FIORILLO, 2014).

Os períodos de recessão podem durar dias ou semanas entre os eventos de precipitação, mas são nos períodos de seca ou estiagem que os eventos de recessão são mais longos (FIORILLO, 2014). Em épocas de baixa frequência de precipitações e elevadas temperaturas, a curva de recessão tende a ter sua forma menos acentuada em detrimento do aumento dos processos de evaporação e evapotranspiração, tornando a curvatura mais próxima de um comportamento linear (NUTBROWN; DOWNING, 1976; TALLAKSEN, 1995; MOORE, 1997).

A curva de recessão no solo tem sido amplamente estudada, principalmente nas áreas da hidrologia, hidrogeologia, planejamento, manejo e gestão de águas subterrâneas, irrigação e abastecimento de água. A curva de recessão pode expressar importantes características da geometria e estrutura do subsolo, das características hidráulicas de aquíferos e do comportamento da água na matriz solo (TALLAKSEN, 1995; MOORE, 1997; AMIT et al., 2002; FIORILLO, 2014).

Baseado em GRIFFITHS; CLAUSEN (1997), CHEN et al. (2012) e FIORILLO (2014), a recessão no solo pode ser dividida em duas zonas. A primeira ocorre na zona vadosa do solo, que se estende da superfície até o nível do lençol freático e é caracterizada pelo movimento vertical da água na fração não saturada do solo. A segunda zona se estende através da zona freática e é caracterizada pelo movimento horizontal do fluxo.

Os momentos de recessões ocorrem em diferentes escalas temporais, os quais estão relacionados com as condições de umidade inicial do solo. Assim, cada tempo da curva de recessão possui características diferentes, as quais podem ser identificadas através do comportamento dos segmentos de recessão em laminar ou turbulento (Figura 2.12). O modelo exponencial descrito na Equação 2.14 é utilizado para análise de segmentos que possuem comportamento linear, já para fluxos considerados turbulentos, a Equação 2.15 pode ser utilizada (NUTBROWN; DOWNING, 1976; NATHAN; MCMAHON, 1990; MALÍK; VOJTKOVÁ, 2012).



**Figura 2.12:** Curva de recessão composta por dois momentos de comportamentos turbulentos e dois laminares.

Fonte: Adaptado de MALÍK; VOJTKOVÁ (2012).

$$Q_{(t)} = Q_0 e^{-\alpha t} \quad (2.14)$$

$$Q_{(t)} = Q_0 (1 - \beta t) \quad (2.15)$$

Onde:  $Q_t$  é a vazão no tempo  $t$  ( $LT^{-1}$ );  $t$  é o tempo ( $T$ );  $Q_0$  é a vazão inicial ( $LT^{-1}$ );  $\alpha$  e  $\beta$  são os coeficientes de recessão para fluxos laminar e turbulento, respectivamente.

Na Equação 2.14,  $e^{-\alpha}$  pode ser substituído por uma constante de recessão ou fator de esgotamento ( $k_r$ ). Assim, essa equação passa a ser escrita da seguinte forma (Equação 2.16):

$$Q_{(t)} = Q_0 k_r^t \quad (2.16)$$

TALLAKSEN (1995) destaca a importância do conhecimento prévio sobre as características de cada segmento de recessão antes da aplicação de algum modelo (equação) para identificação dos coeficientes de recessão e de parâmetros hidráulicos. A variabilidade encontrada em cada segmento de recessão pode representar uma adversidade no estudo da curva.

Através da análise da curva de recessão, alguns parâmetros hidráulicos podem ser indiretamente estimados, como a condutividade hidráulica saturada ( $K$ ), a difusividade ( $D$ ) e a transmissividade ( $T$ ) (CHEN et al., 2012). Difusividade é a maneira com que a umidade avança no espaço e no tempo, e pode ser descrita pela relação entre a transmissividade e o coeficiente de armazenamento ( $D = T/S_a$ ) (NUTBROWN; DOWNING, 1976).

CHEN et al. (2012) averiguou que a constante de recessão pode ser relacionada com a área da bacia. A constante de recessão diminui significativamente quanto maior a área da bacia, no caso de bacias menores do que  $1.000 \text{ km}^2$ .

FIORILLO (2011) apresenta uma relação matemática entre a área da bacia e a constante de recessão. Para tal, é necessário ter informações sobre a área do lençol freático ( $A_l$ ) e a porosidade do material constituinte do aquífero ( $\eta$ ) (Equação 2.17).

$$k_r = \frac{c_h}{\eta \cdot A_l} \quad (2.17)$$

Na equação acima,  $c_h$  representa uma constante hidráulica específica para as condições de cada fluxo de recessão e independe da área da bacia, sendo condicionada à geometria e às características hidráulicas do aquífero. Se o decréscimo de  $k_r$  é observado durante o período de recessão e a área do lençol freático permanece constante, assume-se a hipótese de que houve um aumento na porosidade do material. Sendo assim, se há mudança na estrutura e geometria do aquífero, há alterações no valor de  $k_r$ , constatando o sentido físico dessa constante (FIORILLO, 2011).

A análise do comportamento de variados segmentos de recessão pode ser representada por uma única curva denominada curva de recessão mestra (CRM). Plotando-se a CRM, a constante de recessão  $k_r$  é dada pela própria forma da curva e conseqüentemente, obtém-se o

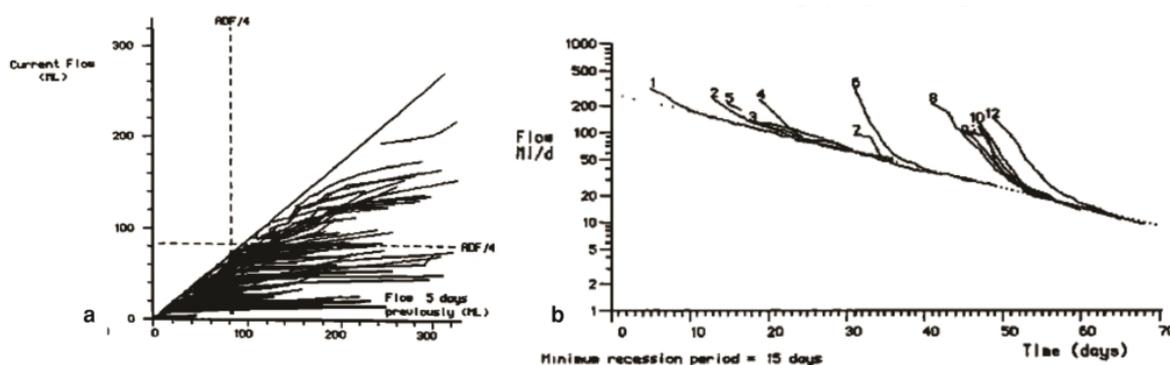
valor do coeficiente de recessão  $\alpha_r$ . A curva é plotada num gráfico relacionando o logaritmo natural da vazão pelo tempo ( $\ln Q$  vs  $t$ ). Os métodos para identificação da CRM são consolidados na literatura (NATHAN; MCMAHON, 1990; TALLAKSEN, 1995; MOORE, 1997; COSTA; BACELLAR, 2010; BERHAIL; OUERDACHI; BOUTAGHANE, 2012; CHEN et al., 2012), sendo os mais usuais:

- Correlação - são utilizados valores decrescentes de vazão, relacionando graficamente a vazão de um tempo previamente definido com a vazão inicial. Nesse método, a CRM é plotada com tendência a uma reta, onde o valor da constante de recessão  $k_r$  é dada pela própria inclinação da curva (Figura 2.13) e pela Equação 2.18. Assim o coeficiente de recessão pode ser calculado pela Equação 2.19.

$$k_r = \left( \frac{Q_t}{Q_0} \right)^{\frac{1}{t}} \quad (2.18)$$

$$\alpha = \frac{-\log k_r}{0,4343} \quad (2.19)$$

- Matching Strip - envolve vários segmentos de recessão (entre 5 e 10), os quais são sobrepostos e ajustados horizontalmente até que se forme uma linha comum entre todas as curvas (Figura 2.13). Essa linha comum representa a CRM, na qual o coeficiente de recessão pode ser expresso pela formulação básica da curva de recessão (Equação 2.14).



**Figura 2.13:** Métodos para determinação da curva de recessão mestra (CRM): correlação (a) e matching strip (b).

Fonte: NATHAN; MCMAHON (1990).

### Curva de recessão em técnicas de infiltração

Pesquisas que analisam o comportamento da curva de recessão em técnicas compensatórias são baseadas no princípio da infiltração são pouco difundidas. Alguns motivos podem ser apontados: por serem soluções inovadoras no cenário do manejo de águas pluviais; pela

necessidade de um monitoramento e compreensão detalhada do comportamento quantitativo das técnicas; e a falta de informações sobre as características hidráulicas dos sistemas ou do subsolo natural. Alguns estudos podem ser referenciados, como o de LUCAS; BARBASSA; MORUZZ (2013) e SOUZA; GOLDENFUM; BARRAUD (2002).

Dessa maneira, o estudo da recessão em sistemas de infiltração pode ser reportado de maneira análoga ao estudo da recessão em rios e águas subterrâneas. Isso é possível pelos seguintes fatores:

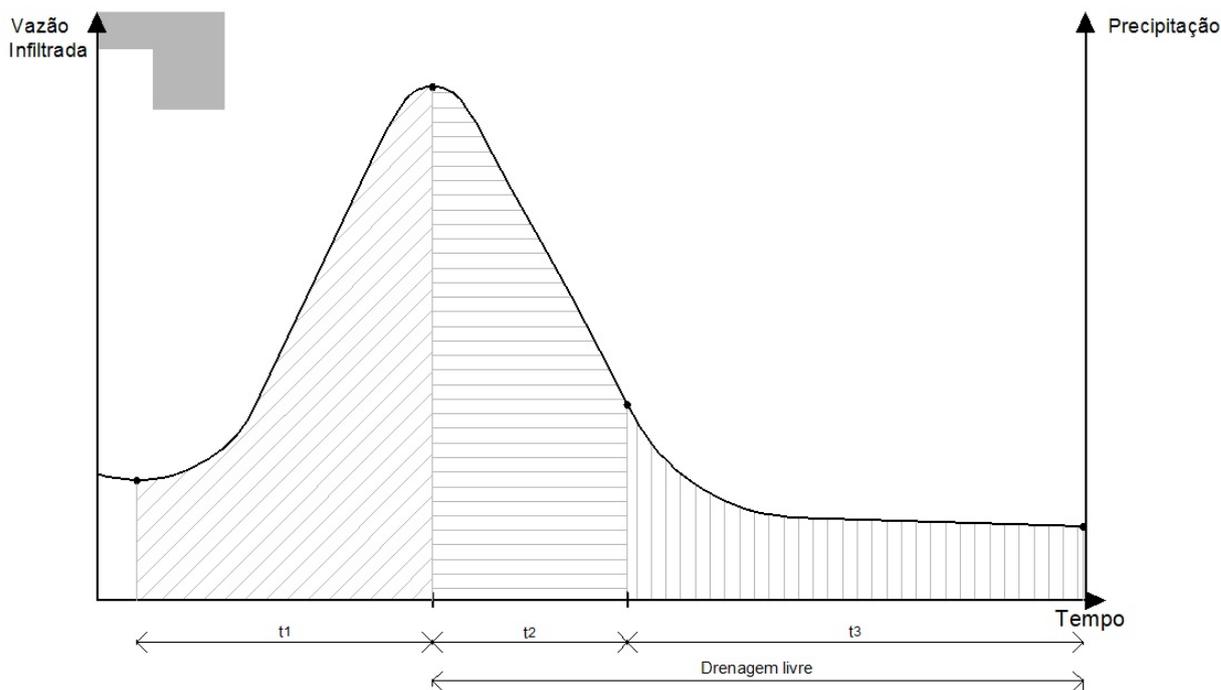
- São movimentos que acontecem no subsolo, possuindo velocidades de fluxos bem menores do que a porção da curva de recessão que representa o escoamento superficial (trecho BC da Figura 2.11);
- Necessitam do conhecimento das características do solo e parâmetros hidráulicos;
- São passíveis de utilização de mesmas equações de fluxo, como a Equação de Darcy (Equação 2.9).

A recessão em técnicas compensatórias de infiltração pode ser caracterizada por três momentos de inflexão na curva, como apresentado na Figura 2.14. O primeiro ocorre na interface superfície-técnica ( $t_1$ ), caracterizado pela rápida infiltração vertical, considerando a não ocorrência de precipitação antecedente. No segundo momento de inflexão ( $t_2$ ), quando a precipitação já cessou, o fluxo é caracterizado por um comportamento tridimensional e de velocidade mais lenta. O terceiro momento é caracterizado pelo fluxo de menor velocidade de toda a curva ( $t_3$ ), isso porque o fluxo ocorre agora na matriz do solo, até o momento dele se estabilizar, atingindo o valor da condutividade hidráulica saturada do solo.

Assim como as curvas e os parâmetros de recessão são usados para caracterizar o tipo e propriedades hidráulica dos aquíferos (MALÍK; VOJTKOVÁ, 2012), o mesmo pode ser feito para estimar as características hidráulicas das técnicas compensatórias de infiltração, bem como o entendimento da interface técnica-solo natural.

A análise da curva de recessão também pode fornecer valores de volumes infiltrados no solo em determinado intervalo de tempo. Sendo assim, é possível obter informações sobre o desempenho da técnica compensatória de infiltração no que tange ao seu objetivo principal, auxiliar no manejo das águas superficiais através do processo de infiltração. Além disso, outras informações podem ser obtidas, como o conhecimento do tempo necessário para que um poluente carregado superficialmente atinja o lençol freático, de maneira a prever ou prevenir passíveis contaminantes nas águas subterrâneas advindos do funcionamento desses sistemas.

Uma das dificuldades que podem ocorrer na análise da curva de recessão na trincheira de infiltração em estudo é imposta pelas próprias condições climáticas do período analisado. São nos períodos de março a agosto que as precipitações são mais frequentes na Região Metropolitana do Recife. Esse fato torna a análise da curva de recessão mais complexa, devido a dificuldade na separação dos eventos de precipitação e na identificação do início e fim entre um evento e outro.



**Figura 2.14:** Três momentos de inflexão na curva de recessão em técnicas compensatórias de infiltração.

Fonte: Elaborado pela autora.

Além disso, em regiões com elevadas frequências pluviométricas, as recessões são interrompidas pela ocorrência de uma nova precipitação, tornando-as curtas e de difícil análise (MOORE, 1997; HAMMOND; HAN, 2006; COSTA; BACELLAR, 2010).

Outro dado importante derivado do estudo da curva de recessão em técnicas compensatórias de infiltração é informação sobre o solo local e suas características hidráulicas. A porosidade do solo pode ser observada se tiver alguma alteração no formato da curva, a exemplo de uma queda brusca em um segmento de recessão, podendo representar a presença de alguma fenda ou uma zona de macroporos no solo. A condutividade hidráulica do solo também pode ser conhecida, quando for observado um comportamento constante no final da curva, após a precipitação cessar e a não existir interferências de qualquer recarga remanescente.

## 2.3 Modelagem do processo de infiltração

### 2.3.1 Modelo Analítico - Bouwer (1969)

Alguns modelos como o de Horton (1940), Philip (1957) e de Talma e Parlange (1972) são utilizados para avaliar o comportamento da infiltração em técnicas compensatórias. A limitação desses modelos está no comportamento unidimensional do movimento da água no solo e por não considerarem uma possível camada de colmatagem na estrutura.

Neste trabalho será utilizado o modelo desenvolvido por BOUWER (1969) para a análise do processo de infiltração representado pela curva de recessão.

BOUWER (1969), em seus estudos sobre canais de infiltração, constatou três hipóteses do processo de infiltração na interface sistema-solo natural:

- A - o sistema está implantado em um solo com elevada permeabilidade;
- B - o sistema está implantado em um solo pouco permeável;
- C - o sistema possui uma camada semipermeável.

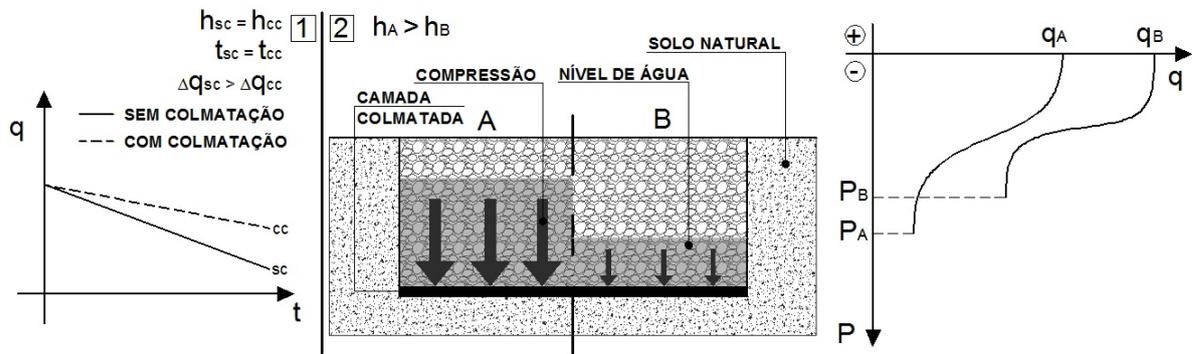
BOUWER (1969) constatou que na base dos canais ou bacias que reabastecem o lençol freático pode haver formação de uma camada que altere a condutividade hidráulica e diminua a capacidade de infiltração do sistema ao longo de sua vida útil. Essa camada é formada pelo processo de colmatagem, fenômeno em que ocorre a obstrução da camada superficial de um meio poroso de maneira progressiva, lenta e longa, podendo ser de origem artificial ou natural.

A colmatagem artificial é realizada através da vedação da base por forros semi ou impermeabilizante, geralmente utilizados para controle do volume de infiltração. Já a colmatagem natural ocorre através da sedimentação de partículas finas ou ação biológica advindos do processo de infiltração. Geralmente se forma um biofilme sobre a superfície de infiltração advindos das ações físico, químico e biológico, principalmente de algas e bactérias que agravam o fenômeno (BARRAUD; LE COUSTOMER, 2006).

Vários problemas são advindos da existência de uma camada colmatada nos sistemas de infiltração. A permeabilidade entre a área de infiltração e o solo natural é minimizada criando um efeito "gargalo" nessa interface. Mesmo com o comprometimento do fluxo de infiltração, duas situações podem ocorrer pela presença da colmatagem (BOUWER, 2002):

1. Fluxo de infiltração aumenta com a elevação do nível de água → mesmo com a diminuição do fluxo de infiltração devido a colmatagem, ele é diretamente proporcional a quantidade de água existente no interior do sistema de infiltração.
2. Fluxo de infiltração diminui com o aumento do nível de água → o nível de água no interior do sistema pode comprimir a camada colmatada, diminuindo o fluxo de infiltração e aumentando a pressão nessa camada. Assim, quanto maior o nível de água, maior a compressão e menor será o fluxo de infiltração.

Essas relações podem ser constatadas nas Equações 2.20 e 2.23, as quais serão descritas adiante e, na Figura 2.15.



**Figura 2.15:** Efeitos da colmatação nas situações 1 e 2.

Fonte: Elaborado pela autora.

Os equipamentos de monitoramento disponibilizam dados de maneira bruta, tornando essencial o uso de alguma ferramenta computacional para refinamento das informações. O tempo de recessão, também denominado de tempo de esvaziamento ou de drenagem livre, é explanado através da Equação 2.2, a qual estabelece a relação entre o nível de água e o tempo  $e$ , onde é necessário o auxílio de programas como EXCEL, MATLAB e SCILAB para um aprimoramento desses dados.

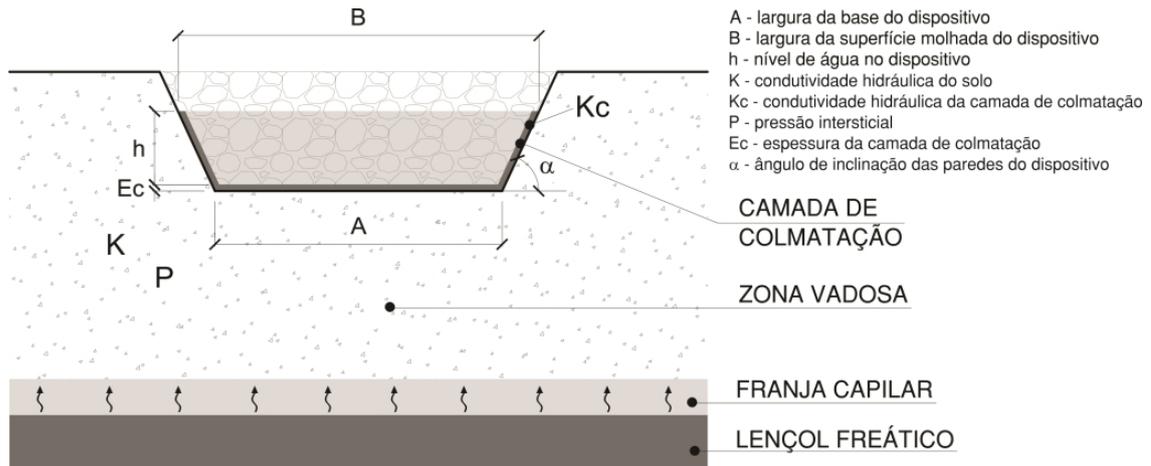
No modelo idealizado por BOUWER (1969), duas variáveis são consideradas e inerentes à camada de colmatação: pressão intersticial ( $P$ ) e resistência hidráulica ( $R_c$ ). A pressão intersticial é definida pelo tipo de solo natural. A resistência hidráulica corresponde a duração necessária para que uma quantidade de água atravesse a camada colmatada e está diretamente ligada à sua espessura.

A Figura 2.16 apresenta as variáveis existentes no Modelo de Bouwer desenvolvidos para canais trapezoidais. Apesar disso, o modelo se expande para outras geometrias como a triangular (sendo  $A = 0$ ) e retangular ( $A = B$  e  $\sin \alpha = 1$ ).

Para a aplicação do modelo é necessário que algumas condições sejam impostas (BOUWER, 1969; SOUZA; GOLDENFUM; BARRAUD, 2002; GONZALEZ-MERCHAN et al., 2012):

- A colmatação seja de origem natural, pela deposição de sedimentos sobre as superfícies de infiltração;
- Se  $K_c$  tiver um valor muito inferior a  $K$ , então o sistema está em condições não saturada, para tal a base do sistema deve estar acima da franja capilar e distância do lençol freático;
- Nas condições de não saturação, a vazão de infiltração é regida unicamente pela força gravitacional, sendo assim, o coeficiente hidráulico tem valor unitário e a pressão intersticial é uniforme.

Assim, o fluxo de infiltração pode ser descrito para qualquer ponto na base do dispositivo pela Equação 2.20, baseada na Equação de Darcy (Equação 2.9).



**Figura 2.16:** Representação gráfica do Modelo de Bouwer.

Fonte: Adaptado de BOUWER (1969).

$$q = K_c \frac{h + E_{cb} - P}{E_{cb}} \quad (2.20)$$

Onde:  $q$  é o fluxo de infiltração ( $LT^{-1}$ );  $K_c$  a condutividade hidráulica da camada colmatada ( $LT^{-1}$ );  $h$  é o nível de água no dispositivo ( $L$ );  $E_{cb}$  é a espessura da camada colmatada da base ( $L$ );  $P$  é a pressão intersticial ( $L$ ).

No solo natural há uma relação entre a condutividade hidráulica e a pressão intersticial. À medida que há uma queda no valor da condutividade hidráulica, a pressão no interior do solo torna-se mais negativa. Essa relação pode ser dada numericamente pela Equação 2.21, onde  $a$ ,  $b$  e  $c$  são coeficientes determinados para cada tipo de solo, definida por Gardner em BOUWER (1969) (Tabela 2.4). Vale ressaltar que no momento da saturação do solo natural, o valor de  $P$  se iguala a zero, sendo o valor de  $K_c$  igual a  $a/b$ .

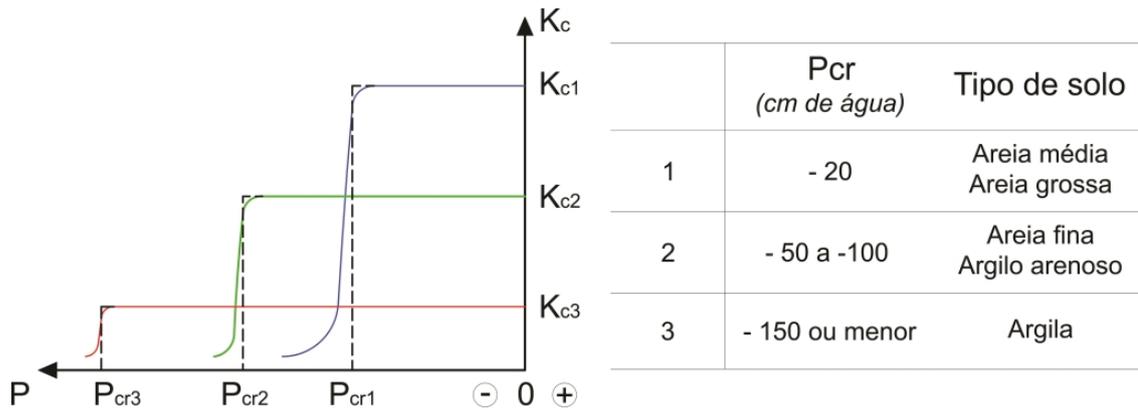
$$K_c = \frac{a}{(-P)^n + b} \quad (2.21)$$

**Tabela 2.4:** Coeficientes adotados na relação entre  $K_c$  e  $P$ .

Tipo de solo	$K$ (cm/dia)	a	b	n
Areia média	500	$5 \cdot 10^9$	$10^7$	5
Areia fina e argilo arenoso	50	$5 \cdot 10^6$	$10^5$	3
Argila	1	$5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	1,5

Graficamente, a relação entre  $K_c$  e  $P$  é plotada em um gráfico de formato sigmóide. O centro dessa curva é denominado de pressão crítica ( $P_{cr}$ ), representando o alcance máximo da frente de umedecimento da água infiltrada a partir da base do sistema de infiltração. Sua ordem de grandeza é definida para cada tipo de solo, sendo expressa em  $cmH_2O$  e de valor negativo (BOUWER, 1969)(Figura 2.17).

Há uma relação entre  $K_c$ ,  $P_{cr}$  e  $E_c$  (espessura da camada colmatada). Essa espessura é de



**Figura 2.17:** Curvas representativas da função  $K_c(P)$  para cada tipo de solo.

Fonte: Adaptado de BOUWER (1969).

difícil mensuração, principalmente por não ser distribuída uniformemente sobre as superfícies (BARRAUD; LE COUSTUMER, 2006).

O valor de  $E_c$  pode ser simplificado por uma resistência hidráulica da camada colmatada  $R_c$ , para que a camada colmatada seja considerada na modelagem da infiltração.  $R_c$  representa o tempo em que a água atravessa a camada colmatada, sendo descrita pela Equação 2.22 e utilizada na Equação 2.23, baseada na Equação 2.20.

$$R_c = \frac{E_c}{K_c} \quad (2.22)$$

$$q = \frac{h + P_{cr}}{R_c} \quad (2.23)$$

A vazão de infiltração determinada por BOUWER (1969) é dada pela Equação 2.24.

$$Q_{inf.Bouwer} = \frac{S_{inf} \cdot (h - P_{cr})}{R_c} \quad (2.24)$$

Segundo BOUWER (1969) e reforçado por DECHESNE; BARRAUD; BARDIN (2005) e PROTON (2008), a pressão intersticial ( $P$ ) pode ser substituída pela pressão crítica ( $P_{cr}$ ), por ser uma variável de difícil mensuração, pois varia a cada evento chuvoso em função do conteúdo inicial de água no solo.

A equação da vazão de infiltração proposta por BOUWER (1969) não considera a diferença existente entre a resistência hidráulica da base e das paredes do sistema de infiltração. A colmatagem sobre a base ocorre de maneira mais rápida e intensa do que nas paredes do sistema, devido à força gravitacional.

SOUZA (2002), em seu estudo sobre trincheiras de infiltração, constatou a necessidade de adotar valores diferentes de resistência hidráulica para a base e paredes dos sistemas de infiltração. Cada uma das superfícies possui contribuição diferente no processo infiltração e, conseqüentemente na colmatagem do sistema, devendo ser tratadas de maneira distinta.

A equação para a vazão de infiltração pelo fundo é praticamente a mesma que a Equação

2.24, porém com a especificação dos termos para a base (Equação 2.25).

$$Q_{infb}(h) = \frac{S_{infb} \cdot (h - P_{cr})}{R_{cb}} \quad (2.25)$$

Onde:  $Q_{infb}(h)$  é a vazão de infiltração na base em função de uma altura de água ( $L^3T^{-1}$ );  $S_{infb}$  é a superfície de infiltração da base ( $L^2$ );  $h$  é o nível de água no dispositivo ( $L$ );  $P_{cr}$  é a pressão crítica ( $L$ );  $R_{cb}$  é a resistência hidráulica da base ( $T$ ).

A vazão de infiltração das paredes não ocorre de maneira uniforme, principalmente se a geometria do sistema de infiltração for retangular, onde há um maior acúmulo de água no fundo do dispositivo, constatando que na porção inferior das paredes a resistência hidráulica é superior. Mesmo assim, é necessário simplificar a equação, para que o valor da vazão possa ser contabilizado (SOUZA, 2002) (Equação 2.26).

$$Q_{infp}(h) = \frac{Per_{infp}}{R_{cp}} \cdot \left[ \frac{h^2}{2} - P_{cr} \cdot h \right] \quad (2.26)$$

Onde:  $Q_{infp}(h)$  é a vazão de infiltração nas paredes em função de uma altura de água ( $L^3T^{-1}$ );  $Per_{infp}$  é o perímetro de infiltração das paredes ( $L$ );  $R_{cp}$  é a resistência hidráulica das paredes ( $T$ );  $h$  é o nível de água no dispositivo ( $L$ );  $P_{cr}$  é a pressão crítica ( $L$ ).

Assim, a vazão total de infiltração no sistema é a soma das vazões de base e das paredes, sendo descrita pela Equação 2.27.

$$Q_{inftotal}(h) = \frac{Per_{infp} \cdot h^2}{2R_{cp}} + h \cdot \left[ \frac{S_{infb}}{R_{cb}} - \frac{Per_{infp} \cdot P_{cr}}{R_{cp}} \right] - \frac{S_{infb} \cdot P_{cr}}{R_{cb}} \quad (2.27)$$

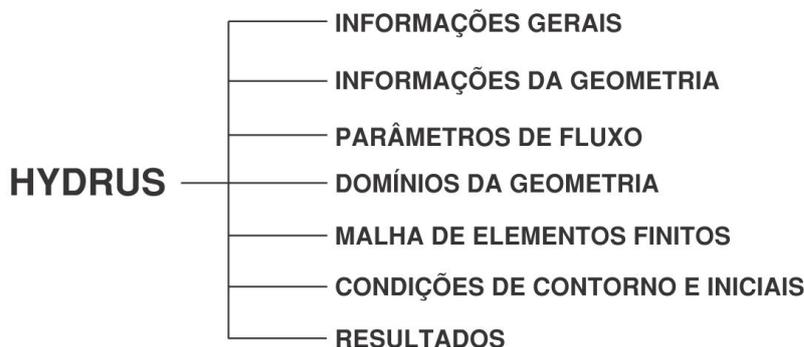
Algumas modificações já foram realizadas no modelo proposto por BOUWER (1969), a fim de simplificar sua utilização para determinado objetivo. O estudo desenvolvido por HEILWEIL; BENOIT; HEALY (2015) exemplifica essa situação, quando realizaram uma simulação numérica da taxa de infiltração de uma trincheira de infiltração utilizando o método de Bouwer, porém adaptando-o ao objetivo de recarga subterrânea em aquíferos de rochas firmes.

### 2.3.2 Modelo Numérico - Hydrus 2D

O Hydrus é um software que resolve numericamente a Equação de Richards (Equação 2.11) para fluxos de água no solo em condições saturadas e não saturadas, convecção e dispersão de calor e transporte de soluto no solo. A técnica matemática para resolver a equação diferencial de Richards é a dos elementos finitos. Podem ser determinadas condições de contornos prévias, assim como o estudo dos fluxos de maneira uni, bi ou tridimensional (SIMUNEK; VAN GENUCHTEN; SEJNA, 2012).

Apesar de estudos apresentarem soluções unidimensionais para a dinâmica da água no solo, é fato que esse processo não ocorre em apenas uma direção. Versões bi e tridimensionais podem apresentar resultados mais fieis à realidade e o Hydrus é propício a essas modelagens. A

Figura 2.18 apresenta a sequência de trabalho do Hydrus 2D/3D para cenários de fluxo de água.



**Figura 2.18:** Sequência de trabalho do Hydrus 2D/3D.

As Informações gerais são características básicas do projeto, como nome do arquivo, descrição, local de salvamento e se é um arquivo de uso temporário ou permanente. Aqui, é possível criar um novo projeto, acessar algum arquivo já existente ou ainda importar ou converter projetos e dados da versão 1D para serem utilizados nas versões do Hydrus 2D/3D.

Na etapa de Informações da geometria são fornecidos dados sobre a dimensão em que as simulações ocorrerão, se na dimensão bi ou tridimensional. Neste trabalho será utilizado somente a versão 2D do Hydrus, sendo enfocados, a seguir, somente a sequência de trabalho dessa dimensão.

Para a simulação no ambiente 2D são definidos limites máximos para a geometria, ou seja, um espaço bidimensional máximo em que ocorrerão as simulações. Todo esse espaço é definido por uma malha de elementos finitos no formato retangular. Caso fosse utilizado o ambiente tridimensional, a malha seria hexagonal.

Os Parâmetros de Fluxo são definidos de acordo com o tipo de processo adotado para a simulação. Os processos que podem ser simulados são o fluxo de água, transporte de solutos, transporte de calor e extração de água pelo sistema radicular. A solução inversa pode ser adota na determinação dos parâmetros hidráulicos do solo ou de transporte de soluto.

Nesta etapa também são fornecidas informações sobre o tempo de simulação como unidade, tempo de desratização (tempos inicial e final) e se há variabilidade temporal das condições de contorno da simulação. Nessas informações, ainda são determinados os intervalos de tempo das simulações que serão plotadas como resultados.

Há uma opção para definir informações relacionadas ao processo de interação utilizado para resolver a Equação de Richards. Em detrimento da natureza não linear da equação, é necessário definir os processos de interatividade (interpolação, número máximo de interações, medidas de tolerância, etc.) para cada intervalo de tempo previamente determinados.

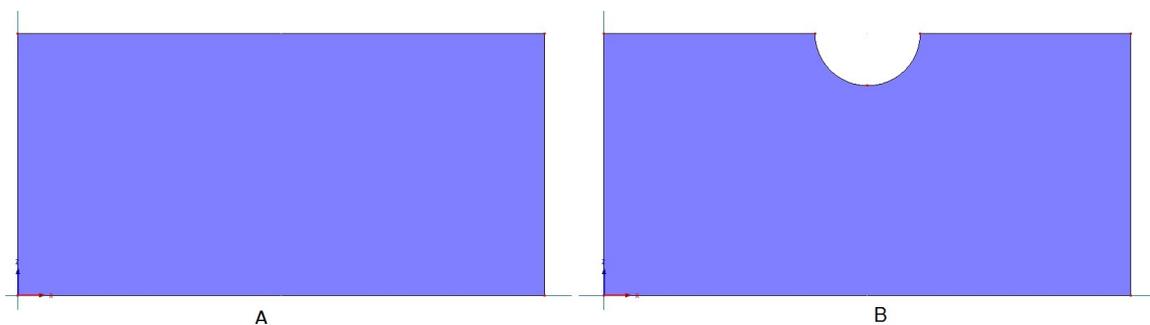
Os parâmetros de fluxo são dependentes do tipo de processo adotado na simulação. Em resumo, seguem as descrições para a determinação dos parâmetros a partir do tipo de processo:

- Fluxo de água no solo - os modelos hidráulicos adotados no Hydrus 2D descrevem as propriedades hidráulicas do solo, fornecendo a opção da presença do fenômeno de

histerese na simulação. O programa permite o uso dos seguintes modelos hidráulicos do solo: van Genuchten com a hipótese de distribuição dos poros de Mualem (GENUCHTEN, 1980), modificado de van Genuchten (VOGEL; CÍSLEROVÁ, 1988), equação de Brooks e Corey (BROOKS; COREY, 1964), modelo de Kosugi (KOSUGI, 1996) e o modelo de dupla porosidade (DURNER, 1994). Caso deseje simular algum cenário e desconheça os parâmetros do solo, o programa fornece os valores médios dos parâmetros para 12 classes texturais do solo, segunda a classificação do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos. Outra opção para determinação dos parâmetros é inserir as porcentagens de areia, silte e argila e, a partir disso o programa resulta os valores dos parâmetros.

- Transporte de soluto no solo - nesse processo são inseridas informações sobre a quantidade de solutos que serão simulados, dados de temperatura do solo, condições iniciais (conteúdo de água no solo, massa do soluto, concentração, etc.) e se há algum processo de filtração. Pode-se utilizar o modelo UNSATCHEM para simulação desse processo, onde são inseridas informações adicionais como presença ou não do processo de tortuosidade na simulação.
- Transporte de calor - a principal informação para determinar os parâmetros de fluxo de calor é a temperatura. São necessárias informações de temperatura relacionadas ao tipo de material utilizado na simulação, amplitude e condutividade térmica.
- Extração de água pelo sistema radicular - o programa permite o uso dos modelos de Feddes (FEDDES; KOWALIK; ZARADNY, 1978) ou o modelo proposto por van Genuchten (GENUCHTEN, 1985).

O tipo de malha e os limites máximos para o desenho do objeto a ser simulado foram previamente definidos em Informações da geometria. Na etapa de Domínio da geometria é construído o objeto da simulação propriamente dito, através de ferramentas como linha, ponto, polilinhas e círculos. A diferença entre essas duas etapas pode ser representada pela Figura 2.19.



**Figura 2.19:** A. limites máximos para a geometria definidos na etapa de Informações gerais e; B. objeto inserido na etapa de Domínio da geometria. Ambiente 2D.

Na etapa de Malha de elementos finitos são definidos aspectos como o tamanho e tipo dos elementos da malha (tamanho em centímetros e o tipo pode ser alterado para elementos

triangulares), quantidades máximas de elementos e de nós.

Assim como na etapa de Parâmetros de Fluxo, as Condições de contorno e iniciais dependem do tipo de processo adotado para a simulação. Essas condições dependem dos tipos de materiais componentes da simulação e para cada material é necessário impor as condições iniciais e de Contorno. Podem ser adotadas, como exemplo, as condições iniciais de potencial matricial e concentração de  $CO_2$  e, de condição de contorno com ou sem fluxo de água e transporte de solutos. Também há a opção da presença ou não de anisotropia.

Por fim, o Hydrus 2D fornece, na etapa de Resultados, uma gama de informações em formato de imagem, gráfico e de texto. Há possibilidade de escolher os eixos componentes dos gráficos, dependendo do objetivo do usuário. A dinâmica visual que o programa fornece torna a compreensão e o estudo dos processos mais próximos das condições reais, sendo um diferencial em relação aos modelos analíticos.

KANDELOUS; SIMUNEK (2010) realizaram um estudo sobre o avanço da frente de molhamento de uma área agrícola irrigada por gotejamento e compararam os dados observados do avanço da umidade no solo com dados simulados no Hydrus 2D . A simulação apresentou resultados bem próximos aos observados em campo, constando a precisão do processo e do software, recomendando ainda o mesmo como ferramenta nesse tipo de estudo.

A mesma conclusão foi adquirida no estudo realizado por CHEN et al. (2015), onde compararam os dados observados do fluxo de água com uma modelagem desse processo no Hydrus 2D. Apesar de algumas diferenças entre os dados observados e modelados do fluxo de água, as simulações foram muito boas, principalmente na fase de redistribuição da água no solo, apresentando resultados instantâneos do processo.

AKBAR; RAINE; MCHUGH (2015) utilizou o Hydrus 2D para avaliar o comportamento lateral da infiltração em três processos de irrigação e para dois tipos de solo. Os resultados foram satisfatórios, onde foram comparados os tempos de infiltração e o avanço da frente de molhamento no sentido lateral de cada processo, fundamentando e justificando de maneira mais adequada a escolha do melhor processo de irrigação.

ALLETTO et al. (2015) realizaram uma modelagem bidimensional sobre interferência da variação dos parâmetros hidráulicos do solo no fluxo de água no solo. Diferentemente dos trabalhos citados anteriormente, esse trabalho concluiu que o Hydrus 2D pode não reproduzir fielmente o comportamento da dinâmica da água no solo quando os parâmetros hidráulicos são mantidos constantes na simulação. A modelagem foi harmoniosa aos valores observados quando os parâmetros variaram no tempo, em razão do comportamento diverso que pode acontecer no processo de redistribuição de água no solo.

Outro aspecto ressaltado por outros autores, além da consideração da variabilidade dos parâmetros ao longo da simulação, é considerar a heterogeneidade do solo nas simulações. Autores afirmam que a heterogeneidade do solo pode criar fluxos preferenciais, tornando mais rápidos os fluxos de água e de poluentes até às águas subterrâneas (COUTINHO et al., 2015; SLIMENE et al., 2015).

No estudo desenvolvido por SLIMENE et al. (2015), os autores afirmam que os fluxos preferenciais proporcionados pela heterogeneidade do solo podem desempenhar uma função de "gargalo" no fluxo, tornando diferenciada a redistribuição da água no solo se comparada ao solo homogêneo. Os autores ainda ressaltam que, considerar a heterogeneidade do solo promove uma análise melhor do comportamento dos fluxos, a partir do conhecimento da condutividade hidráulica saturada de cada material ( $K_s$ ).

COUTINHO et al. (2015) compararam o fluxo de água em um solo saturado considerando os cenários de perfil homogêneo e heterogêneo. Observou-se um comportamento horizontal e uma redistribuição uniforme da água no solo para o cenário homogêneo. Já no cenário de solo heterogêneo foram identificados fluxos preferenciais proporcionados não só pela mudança de material, mas também pela própria geometria do material.

## 2.4 Comentários Finais

Este capítulo abordou a temática das técnicas compensatórias, com destaque para técnica compensatória de infiltração, a trincheiras de infiltração. Relatou também a importância de um estudo mais particular do solo e das relações existentes quando se tem por objetivo a avaliação do comportamento do fluxo de água em seu interior.

Apesar das trincheiras de infiltração serem estruturas que se adequam a pequenos espaços e de fácil construção, é necessário um estudo do local para que não haja comprometimento das funções de controle quantitativo e qualitativo do sistema. Aspectos urbanos, estudo geológico e topográfico são alguns dos pontos a serem determinados e conhecidos na fase de planejamento de uma trincheira de infiltração.

Após o planejamento, o projeto da estrutura deve se adequar ao objetivo definido. O dimensionamento deve seguir uma metodologia definido pelo projetista, a fim de determinar as medidas de base e altura do sistema. Após a determinação da altura do sistema, sendo comumente relacionada à área de armazenamento da trincheira de infiltração composta por um material granular, devem-se definir as camadas estruturais.

Não há uma estrutura padrão para as técnicas compensatórias. A estrutura depende da finalidade com que a técnica será utilizada como retenção e filtração de poluentes, recarga subterrânea ou redução do escoamento superficial. A composição estrutural também pode variar segundo a escala de estudo, podendo ter dimensões relacionadas à escala do lote ou à escala de laboratório.

Estruturas implantadas em escala no lote, onde o desempenho seja monitorado e os dados analisados, são essenciais para que sirvam de base para que outros exemplos sejam adotados em larga escala nas áreas urbanas. A criação, por exemplo, de um banco de dados sobre determinado bairro pode ser uma maneira de aumentar as pesquisas sobre o tema, divulgar o estado real do local e, principalmente, a participação de atores públicos e privados, população, entre outros.

Propriedades físicas como textura e porosidade são relevantes no que tange a um estudo prévio, pois apresentam influência na formação e composição estrutural dos caminhos do fluxo de água no solo. Além disso, são aspectos que causam efeito nos processos hidrológicos externos ao solo, por intensificarem ou minimizarem a evaporação e o escoamento superficial, por exemplo.

Outro aspecto importante está relacionado à análise da curva de recessão ou de drenagem. Ela representa o momento descendente do hidrograma, onde há predominância do fluxo subterrâneo. Através de sua interpretação é possível conhecer a quantidade de água drenada no solo para fins, por exemplo, de recarga das águas subterrâneas. Diferentes análises da curva de recessão podem ser realizadas em épocas distintas, mostrando que, apesar das diferenças climáticas existentes entre as estações, principalmente verão e inverno, as propriedades do solo também podem interferir no formato da curva.

Como citado, em épocas de temperaturas elevadas, o processo de evaporação se intensifica resultando num comportamento menos acentuado da curva de recessão. Porém, se o

solo for mais arenoso, a quantidade de água evaporada no solo será maior, tendo a curva, um comportamento linear em um período menor de tempo. Já se a composição do solo for composta por uma função de retenção maior, a exemplo de um solo argiloso, a curva de recessão necessitará de um período maior para apresentar um comportamento mais linear.

O estudo da dinâmica da água no solo apresenta a modelagem como uma aliada. Modelos analíticos ou numéricos são adotados em variados estudos, a fim de planejar e prever comportamentos de fluxo de água ou compreender a diversidade de relações e processos que existem no interior do solo, com propósito de aprimorar os estudos e conhecimentos sobre o processo de infiltração.

Por fim, o estudo do solo, suas propriedades, relações existentes e equações que podem ser adotadas dependem do objetivo proposto. Como esse trabalho visa a avaliação do comportamento de uma trincheira de infiltração como instrumento para o manejo de águas pluviais, é importante o estudo do solo no que tange ao processo de infiltração, bem como as leis de fluxos que regem os movimentos tridimensionais e a análise do sistema de infiltração nos períodos de recessão ou drenagem livre.

# 3

## Materiais e Métodos

### 3.1 Descrição da área de estudo

A trincheira de infiltração está localizada na cidade de Recife, Pernambuco (Figura 3.1). Alagamentos, desmoronamentos de barreiras e sobrecarga no sistema de drenagem urbana existente são alguns dos impactos que ocorrem na cidade após um evento de precipitação. Esse quadro é resultado de fatores como: o aumento de superfícies impermeáveis, principalmente para abertura de novas vias para transportes; supressão da cobertura vegetal em áreas ambientalmente frágeis e; pela topografia da cidade, sendo localizada um pouco acima do nível do mar (2 m a 10 m) e rodeada por morros e elevações topográficas, proporcionando o acúmulo de água em seu interior.

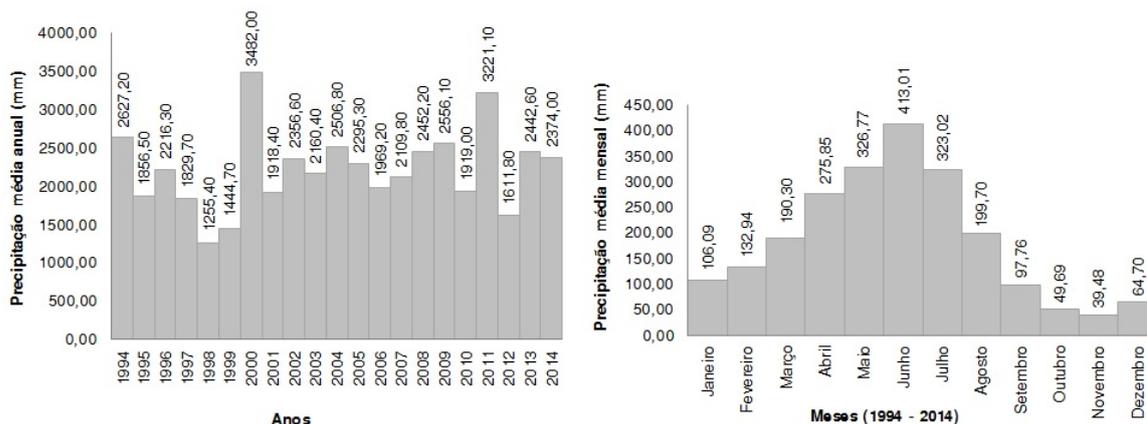


**Figura 3.1:** Localização da cidade de Recife.

Fonte: Elaborado pela autora.

Recife é uma cidade litorânea com elevadas ocorrências de precipitações, principalmente nos meses de abril a julho. Possui um clima tropical quente e úmido do tipo As, de acordo com a classificação climática de Köppen, com precipitação média acumulada de 2.219,29 mm (APAC, 2014) e distribuição média mensal apresentada na Figura 3.2.

A trincheira de infiltração, utilizada neste estudo, foi instalada no Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e projetada para uma área de contribuição de  $250 \text{ m}^2$ . O sistema foi dimensionado por meio do método da curva-envelope (rain-envelope method), utilizando a equação de chuva de Recife e adotando um tempo de retorno



**Figura 3.2:** Precipitação média anual acumulada e média mensal de Recife (1994 - 2014), respectivamente. Estação Curado.

Fonte: Elaborado pela autora com dados da APAC (2014).

e 5 anos. Detalhes sobre o dimensionamento e processo construtivo podem ser encontrados em SANTOS (2014).

A caracterização do solo natural foi feita mediante amostras de solos coletadas até a profundidade de 1,50 m, com base na NBR 7181 (1984) e na classificação textural da Embrapa (EMBRAPA, 1999) (Tabela 3.1).

**Tabela 3.1:** Classificação textural do solo natural onde foi implantada a trincheira de infiltração.

Fonte: SANTOS (2014).

Camada (cm)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Classificação textural
20 - 30	11,72	13,27	74,58	Areia franca
30 - 40	14,07	22,69	63,24	Franco arenoso
40 - 50	23,45	29,31	47,24	Franco
60 - 70	17,59	20,98	61,43	Franco arenoso
110 - 120	23,45	19,93	56,62	Franco argilo-arenoso
130 - 140	21,11	12,90	65,99	Franco argilo-arenoso
140 - 150	26,97	21,10	51,93	Franco argilo-arenoso

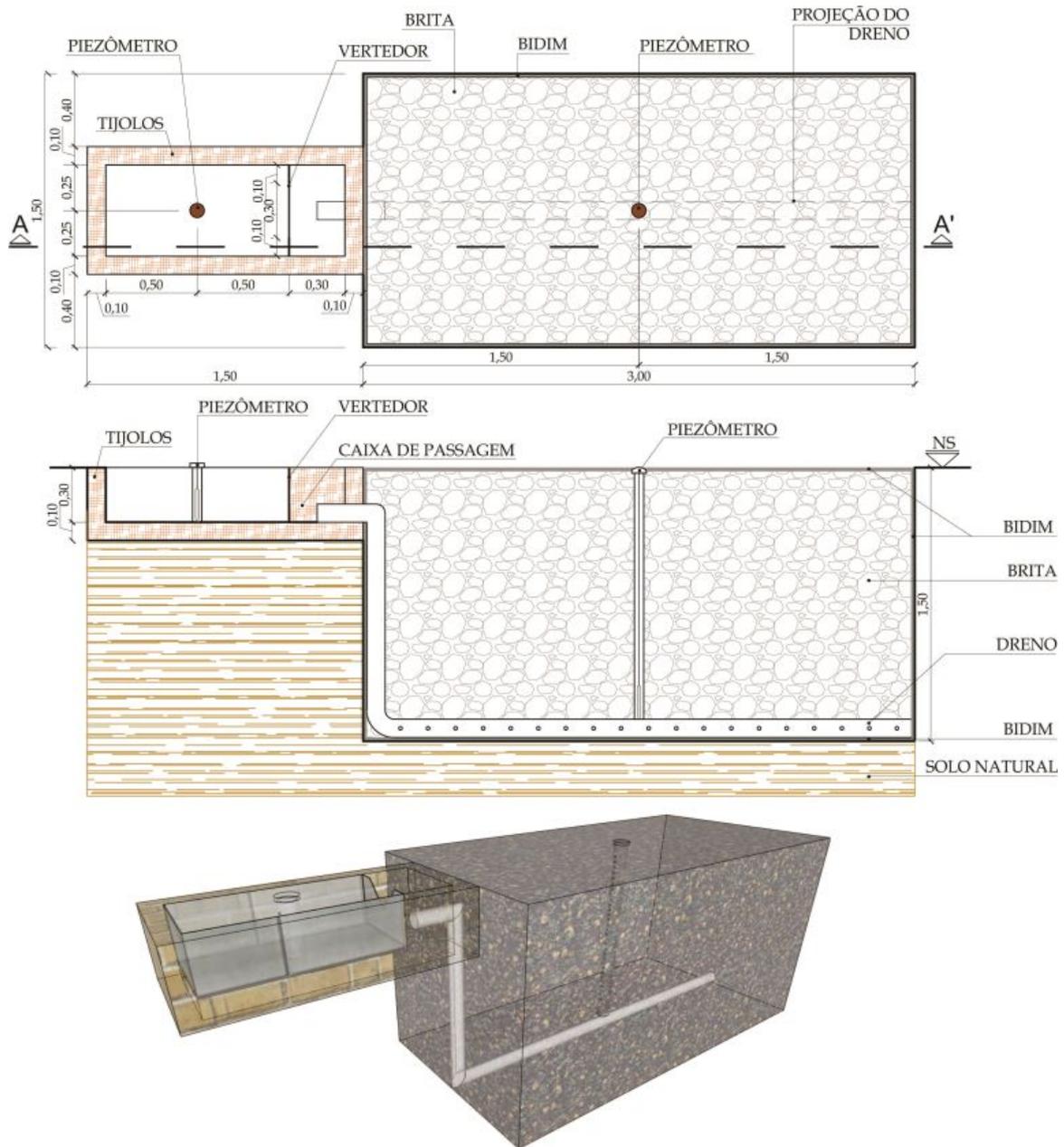
A trincheira de infiltração foi instalada a 1,5 m de profundidade e é formada pela seguinte estrutura: manta geotêxtil, fazendo o envelopamento de toda a trincheira de infiltração, auxiliando na retenção de possíveis finos e; uma camada de material granular, do tipo brita 19 e com porosidade de 33%, funcionando como camada de armazenamento do experimento. A fim de direcionar o escoamento superficial para a trincheira, foi instalada uma caixa de entrada com um vertedor triangular, sendo ligada através de um dreno ao interior da trincheira.

O monitoramento da precipitação foi registrado por um pluviômetro automático, durante o período de 04/06/2014 a 30/09/2014. O monitoramento da vazão de entrada foi realizado por um sensor de nível instalado dentro de um piezômetro na caixa de entrada.

Para monitoramento do nível de água no interior do experimento foi instalado um

piezômetro e um sensor de nível a 1,5 m de profundidade. O piezômetro é constituído por um tubo de PVC revestido por uma tela e um geotêxtil, evitando que finos carreados pela água infiltrada penetrem no tubo, ocasionando alterações nas leituras da coluna d'água ou danos ao equipamento. Os sensores de níveis são automáticos e possuem registros a cada minuto. Os detalhes construtivos e a instrumentação instalada podem ser observados nas Figuras 3.3 e 3.4.

Após a implantação do experimento foram obtidas as seguintes informações: a capacidade máxima de armazenamento do sistema é de 2.227,5 L ( $2,22 m^3$ ) e; que só é possível a entrada de água na trincheira de infiltração pela caixa de entrada quando o sensor de nível instalado na caixa de entrada registrar alturas de coluna de água superiores a 15 cm, acima da crista do vertedor.



**Figura 3.3:** Estrutura da trincheira de infiltração: Planta Baixa, Corte AA' e perspectiva. Representações sem escala. Fonte: Elaborado pela autora.

## 3.2 Avaliação da Trincheira de Infiltração

### 3.2.1 Análise hidráulica

Foram adotadas algumas condições iniciais para avaliação do desempenho hidráulico da trincheira de infiltração no período do estudo, 04/06/2014 a 31/09/2014.

Para as condições iniciais de umidade do solo foram consideradas as precipitação ocorridas em até cinco dias antes dos eventos analisados (MCCUEN, 1998). Isso porque, as condições iniciais do solo podem afetar consideravelmente a direção, volume e velocidade do movimento



**Figura 3.4:** Implantação e instrumentação.

Fonte: Elaborado pela autora.

do fluxo de água. As condições de umidade antecedentes foram classificadas como: (I) condições de solo seco, com período chuvoso menor que 12,7 mm; (II) condições médias, com período chuvoso entre 12,7 e 27,94 mm e; (III) condições de solo úmido, com período chuvoso maior que 27,94 mm.

A função de infiltração foi avaliada a partir da capacidade de drenagem das águas da camada de armazenamento para o solo natural, ou seja, pelo movimento de decaimento denominado de recessão, que também corresponde ao tempo de esvaziamento do sistema.

O tempo inicial de infiltração é de difícil determinação, pois acontece concomitantemente ao processo de armazenamento no interior da estrutura. Sendo assim, o tempo inicial de infiltração foi considerado no instante em que ocorre o movimento descendente do nível de água.

Segundo DECHESNE; BARRAUD; BARDIN (2004) e BARRAUD; CHERQUI (2009), o processo de decaimento representa a duração de drenagem do sistema e figura um indicador da performance hidráulica do sistema que pode ser calculado pela Equação 3.1.

$$%T = \frac{N_{T \leq 72h}}{N} \quad (3.1)$$

Onde:  $%T$  é o indicador da duração de drenagem;  $N_{T \leq 72h}$  é o número de recessões em que o

tempo de esvaziamento foi menor ou igual a 72 h;  $N$  é o número total de recessões.

Para essa análise foi adotado o tempo de esvaziamento máximo de 72 h como proposto por DUCHENE; MCBEAN; THOMSON (1994). A performance ideal é que  $\%T = 100\%$ , ou seja, todos as ocorrências de recessão obtenham tempo menor ou igual a 72 h.

A partir disso, foi possível obter informações como o volume e a vazão de infiltração para cada evento. Devido ao curto intervalo entre as precipitações, a intensidade média dos eventos também foi determinada. As equações utilizadas para a determinação de tais informações são apresentadas na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2:** Equações adotadas para determinação do tempo de esvaziamento, volume e vazão de infiltração.

Informação	Equação
Intensidade média ( $LT^{-1}$ )	$i = (H_{fp} - H_{ip}) / (t_{fp} - t_{ip})$
Tempo de retorno* (anos)	$T_r = ((i \cdot (t + 21))^{0,7721}) / 1423,97)^{1/0,1124}$
Volume de entrada ( $L^3$ )	$V_{ent} = H_p \cdot A_{pluv}$
Volume de armazenamento ( $L^3$ )	$V_{arm} = \Delta h_a \cdot a \cdot b \cdot \eta$
Volume infiltrado ( $L^3$ )	$V_{inf} = \Delta h_r \cdot a \cdot b \cdot \eta$
Volume de perdas ( $L^3$ )	$V_{per} = V_{ent} - V_{arm}$
Vazão de infiltração ( $L^3T^{-1}$ )	$Q_{inf} = \Delta V_{inf} / \Delta t_r$
$H_{fp}$ é a altura final da precipitação na recessão (L)	$H_{ip}$ é a altura inicial da precipitação na recessão (L)
$t_{fp}$ é o tempo final da precipitação na recessão (T)	$t_{ip}$ é o tempo inicial da precipitação na recessão (T)
$i$ é a intensidade média do evento ( $LT^{-1}$ )	$t$ é o tempo (T)
$H_p$ é a altura de precipitação (L)	$A_{pluv}$ é a área de base do pluviômetro ( $L^2$ )
$\Delta h_a$ é a variação do nível de água na ascensão (L)	$a$ é a largura da trincheira (L)
$b$ é o comprimento da trincheira (L)	$\eta$ é a porosidade do material granular (-)
$\Delta h_r$ é a variação do nível de água na recessão (L)	$\Delta V_{inf}$ é a variação do volume infiltração ( $L^3$ )
$\Delta t_r$ é a variação do tempo na recessão (T)	
* Tempo de retorno extraído da equação idf para a cidade de Recife obtida por RAMOS; AZEVEDO (2010)	

Foram desprezadas as perdas por interceptação vegetal e evapotranspiração, mesmas considerações adotadas nos estudos realizados por e HERRADA; GUTIÉRREZ-MARTIN; MONTANERO (2014).

### 3.2.2 Análise de custo

A análise de custo descreve os recursos e materiais necessários para a construção da trincheira de infiltração. O detalhamento dos custos foi realizado com base na descrição de serviços e materiais apresentados na Tabela de Preços para Contratação de Obras e Serviços de Engenharia da Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana da Prefeitura de Recife para 2013 (EMLURB, 2013). A Tabela 3.3 apresenta a descrição e os valores dos materiais e serviços utilizados na construção deste experimento.

Foi realizada uma análise de sensibilidade do preço de implantação do experimento em função dos tempos de duração da chuva de projeto (5, 15, 60 e 120 min) e de tempos de retorno

**Tabela 3.3:** Descrição e valores dos serviços e materiais utilizados para a construção da trincheira de infiltração do estudo, com base em EMLURB (2013).

Item	EMLURB (2013)		Trincheira de infiltração	
	Unidade	Valor unitário	Quantidade	Custo
Escavação	$m^3$	15,29	6,95	106,26
Alvenaria*	$m^2$	61,18	1,73	105,84
Brita	$m^3$	68,00	6,75	459,00
Geotêxtil	$m^2$	5,26	22,50	118,35
Tubulações	—	—	—	102,00
Valor total da construção da trincheira de infiltração				891,79

Notas: Valores dados em reais; \*Tijolo maciço assentado com argamassa de cimento e areia, incluindo material e mão de obra.

geralmente adotados em projetos de microdrenagem (2, 5 e 10 anos) (MELO et al., 2014). A Equação 3.2 foi adotada para o cálculo do custo total da trincheira de infiltração.

$$C_t = C_A abh_A + C_E abh_A + C_{GE}(2ah_A + 2bh_A + 2ab) + C_{AL}(2ch_C + 2dh_C + cd) + C_{TUB} \quad (3.2)$$

Onde:  $C_t$  é o custo total da trincheira de infiltração associado a uma duração  $t$  e um tempo de retorno  $T_r$  (R\$);  $C_A$  é o custo do material da camada de armazenamento ( $R\$/m^3$ );  $a, b$  e  $h_A$  são o comprimento, largura e altura da camada de armazenamento, respectivamente ( $L$ );  $C_E$  é o custo da escavação ( $R\$/m^3$ );  $C_{GE}$  é o custo do geotêxtil ( $R\$/m^3$ );  $C_{AL}$  é o custo da alvenaria ( $R\$/m^2$ );  $c, d$  e  $h_C$  são o comprimento, largura e altura da caixa de entrada, respectivamente ( $L$ );  $C_{TUB}$  é o custo do conjunto de tubulações ( $R\$/uni$ ).

### 3.3 Modelagem Analítica - Bouwer (1969)

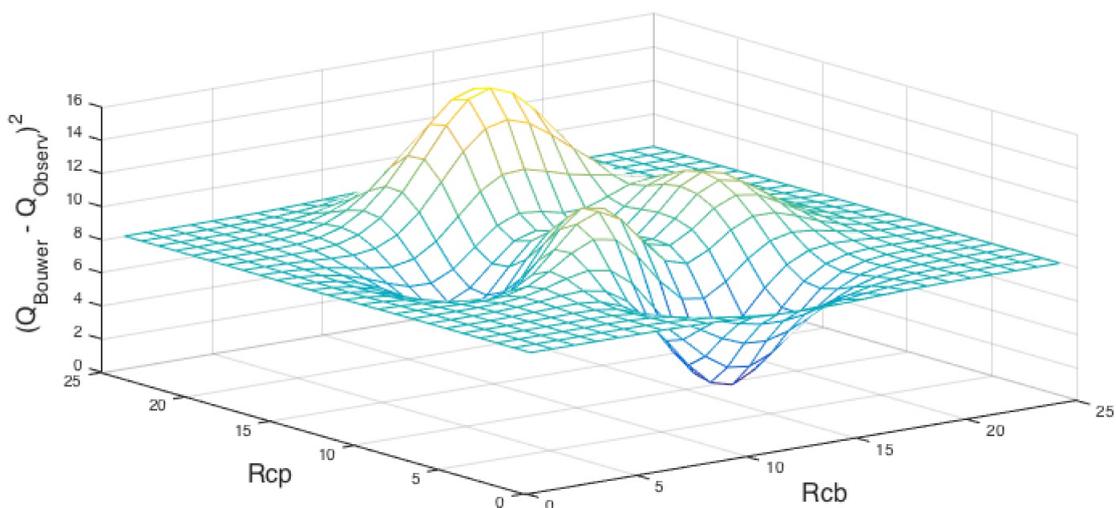
#### 3.3.1 Otimização dos parâmetros $R_{cb}$ e $R_{cp}$

Muitos estudos utilizam ferramentas computacionais para realizar a otimização de determinadas variáveis ou pré-processamento dos dados monitorados durante o estudo. Neste trabalho, foi desenvolvida uma interface de programação para a determinação dos valores de resistência hidráulica da base ou resistência à colmatção da base da trincheira de infiltração -  $R_{cb}$  e, resistência hidráulica das paredes ou resistência à colmatção das paredes da trincheira de infiltração -  $R_{cp}$ .

O algoritmo PSO (*Particle Swarm Optimization*), desenvolvido por KENNEDY; EBERHART (1995), utiliza uma estratégia que emprega um enxame de partículas que se deslocam em um espaço de busca hiperdimensional de soluções caçando a solução ótima para determinado problema. A estratégia na busca pela solução ótima se assemelha ao comportamento social de pássaros em uma revoada.

No PSO, os indivíduos são denominados partículas e, mudanças em suas posições são guiadas por tendências sociais de indivíduos reconhecerem o sucesso de outros indivíduos. O enxame consiste em um conjunto de partículas, sendo cada partícula uma solução em potencial do problema a ser resolvido, de acordo com sua experiência e a experiência de partículas vizinhas.

A Figura 3.5 ilustra um exemplo onde se tenta encontrar os valores das variáveis  $R_{cb}$  e  $R_{cp}$ , através da minimização da soma da distância entre a vazão de infiltração calculada pela função de Bouwer e a observada ao quadrado (Equação 3.3). Nesse exemplo, existe um único valor mínimo. Caso o PSO fosse aplicado para resolver esse problema, várias partículas se deslocariam nessa superfície em busca do ponto de mínimo global.



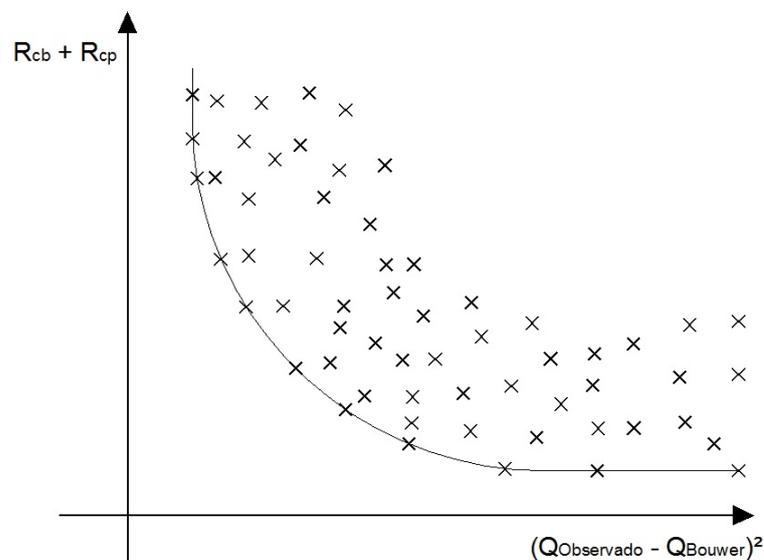
**Figura 3.5:** Exemplo de superfície de busca em problemas de otimização.

$$F.O. = \sum_1^n [Q_{inf.Bouwer} - Q_{inf.Observadas}]^2 \quad (3.3)$$

A aplicação do PSO canônico em inúmeros problemas envolvendo a otimização de um único objetivo comprova a efetividade da técnica. Porém, no intuito de se considerar múltiplos objetivos, o PSO deve ser modificado. As variações do PSO capazes de otimizar vários objetivos de forma simultânea podem ser genericamente chamadas de *Multiple-objective Particle Swarm Optimization* (MOPSO).

As funções objetivo a serem otimizadas nos MOPSOs são geralmente conflitantes entre si. Isso significa que a minimização da função objetivo  $f_1$  pode causar a maximização da função objetivo  $f_2$ . Geralmente, algoritmos MOPSO se guiam na dominância de Pareto que é capaz de gerar um compromisso entre os vários objetivos a serem otimizados.

A Figura 3.6 ilustra uma curva de Pareto onde várias soluções são dominadas pelas soluções que se encontram sobre a curva. Dessa forma, um algoritmo MOPSO, diferentemente de um algoritmo PSO padrão, retorna várias soluções com várias combinações de valores de objetivos.



**Figura 3.6:** Curva de Pareto para soluções de um problema envolvendo a minimização de dois objetivos simultaneamente.

A Figura 3.6 representa exatamente a aplicação do MOPSO neste trabalho. Os experimentos realizados nesse trabalho tentaram minimizar simultaneamente duas funções: a soma da diferença das vazões observadas e calculadas (Bouwer) ao quadrado (Equação 3.3), e a minimização da soma de  $R_{cb}$  e  $R_{cp}$ .

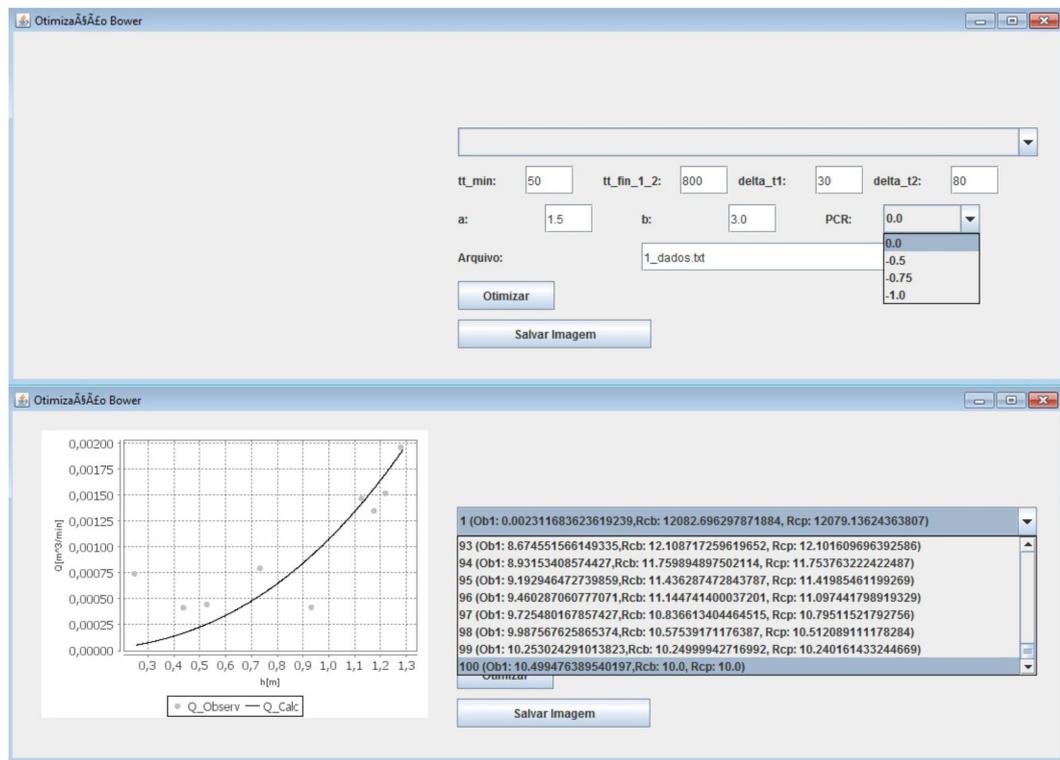
O fato de um MOPSO resultar em várias soluções é importante frente ao uso de um PSO canônico ou outro algoritmo, como o Levenberg-Marquardt. Isso acontece, por exemplo, no caso onde para duas soluções diferentes a piora entre os erros quadráticos é muito baixa enquanto que a melhora nos valores de  $R_{cb}$  e  $R_{cp}$  é muito significativa. Nesse trabalho, foi utilizado o

algoritmo Optimized MOPSO (OMOPSO) (SIERRA; COELLO, 2005).

Para aplicação do MOPSO foi criada a interface na linguagem de programação JAVA, onde foram fornecidas as seguintes informações de entrada: arquivo .txt com os valores dos níveis de água no interior da trincheira de infiltração a cada minuto; os intervalos de tempo para realizar a interpolação dos dados observados; os valores de largura (a) e comprimento (b) do sistema e; o valor da pressão crítica -  $P_{cr}$  (0,00; - 0,50; - 0,75 ou - 1,00).

Foi necessário impor um valor para as máximas resistências hidráulicas, a fim de limitar o ajuste. O valor máximo foi de 50.000 minutos (aproximadamente 833,33 horas) para ambas as resistências.

Como dados de resposta são fornecidas 100 opções de ajustes dos parâmetros, ou seja, os valores do erro, de  $R_{cb}$  e de  $R_{cp}$ . Concomitantemente é fornecido um gráfico mostrando o ajuste para cada opção, sendo mas uma ferramenta para escolher o ajuste mais adequado aos dados observados(Figura 3.7).



**Figura 3.7:** Interface para otimização de  $R_{cb}$  e  $R_{cp}$ : dados de entrada e de saída, respectivamente.

A equação para a determinação da vazão total de infiltração por Bouwer (Equação 2.27) apresenta os parâmetros de resistências hidráulicas ( $R_{cb}$  e  $R_{cp}$ ) e de pressão crítica ( $P_{cr}$ ) como indefinidos. Para efeitos de simplificação, assim como realizado por PROTON (2008), os valores de  $P_{cr}$  foram fixados.

O valor de  $P_{cr}$  é determinado em função do tipo de solo em estudo, sendo aqui classificado como argilo arenoso e estando os valores de  $P_{cr}$  no intervalo entre -50 e -100 cm de água. Assim, foram determinados  $R_{cb}$  e  $R_{cp}$  ótimos para os seguintes valores de  $P_{cr}$ : 0 m; -0,5 m; -0,75 m e -1

m.

### 3.3.2 Análise dos ajustes de Bouwer aos dados observados

A análise dos ajustes de Bouwer aos valores observados foi realizada das seguintes formas:

- Diferença entre os valores de  $R_{cb}$  e  $R_{cp}$  para um mesmo evento → analisar a proximidade ou não entre os valores dos parâmetros para um mesmo evento e sua relação com o comportamento da curva de ajuste;
- Valores de  $R_{cb}$  e  $R_{cp}$  para um mesmo evento → investigar a influência individual de cada parâmetro na curva de ajuste e realizar uma análise de sensibilidade fixando um dos parâmetros, enquanto que o outro tem variação de 30, 50 e 70% para mais e para menos;
- Comportamento da curva de ajuste de Bouwer aos dados observados → foi analisada a relação da carga hidráulica, vazão e fluxo de infiltração com o comportamento da curva de ajuste.

Por serem etapas que desdobram muitos resultados, algumas análises foram realizadas na recessão que obteve o melhor ajuste de Bouwer aos dados observados, o qual será explicado nos resultados.

### 3.3.3 Validação do modelo

A fim de validar os resultados obtidos para a modelagem de Bouwer aos dados observados, foram utilizadas as seguintes ferramentas estatísticas: coeficiente de massa residual, razão de desvios e coeficiente de determinação (WILLMOTT et al., 1985; LOAGUE; GREEN, 1991; TUCCI, 2005).

O coeficiente de massa residual ( $CMR$ ) reflete a superestimativa ( $CMR < 0$ ) ou subestimativa ( $CMR > 0$ ) com relação aos valores obtidos experimentalmente, sendo calculado pela Equação 3.4. Na ausência de desvios sistemáticos entre os valores observados e calculados, o valor esperado tende a zero.

$$CMR = \frac{\sum O_i - \sum P_i}{\sum O_i} \quad (3.4)$$

A razão de desvios ( $RD$ ) é definida como a razão entre a dispersão dos valores observados e os calculados pelo modelo (Equação 3.5), e tende a 1 (um) quando há igualdade entre os valores observados e calculados.

$$RD = \frac{\sum (O_i - \bar{O})^2}{\sum (P_i - \bar{O})^2} \quad (3.5)$$

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) indica a proporção da variância nos valores calculados no modelo (Equação 3.6). Quanto mais próximo da unidade for esse coeficiente, maior será a validade da regressão.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(O_i - P_i)^2}{\sum(O_i - \bar{O})^2} \quad (3.6)$$

Onde:  $O_i$  são os valores observados no experimento;  $P_i$  são os valores calculados pelo modelo;  $n$  é a quantidade de valores obtidos no experimento;  $\bar{O}$  é a média dos valores observados.

## 3.4 Modelagem Numérica - Hydrus 2D

### 3.4.1 Equação de fluxo

Neste trabalho foi considerado somente o fluxo de água no solo bidimensional e aximétrico, sem influência do fenômeno da histerese, meio isotrópico e condições saturadas e não saturadas.

Para a modelagem do fluxo de água na trincheira de infiltração foi utilizada a equação de Richards para condições bidimensionais (Equação 3.7), resolvida pelo Hydrus 2D.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K(\theta) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\theta) \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (3.7)$$

Onde:  $\theta$  é o conteúdo de água no solo;  $t$  é o tempo;  $x$  e  $z$  são coordenadas espaciais;  $K(\theta)$  é a condutividade hidráulica.

O modelo utilizado para determinar os parâmetros da curva de retenção e de condutividades hidráulica foi o de van Genuchten com a hipótese de distribuição de poros de Mualem (Equação 3.8 - curva de retenção e Equação 3.9 - curva de condutividade hidráulica).

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)(1 + |\alpha h|^n)^{-m} \quad (3.8)$$

$$K(h) = K_s K_r(h) = K_s S_e^L \left( 1 - \left( 1 - S_e^{1/m} \right)^m \right)^2 \quad (3.9)$$

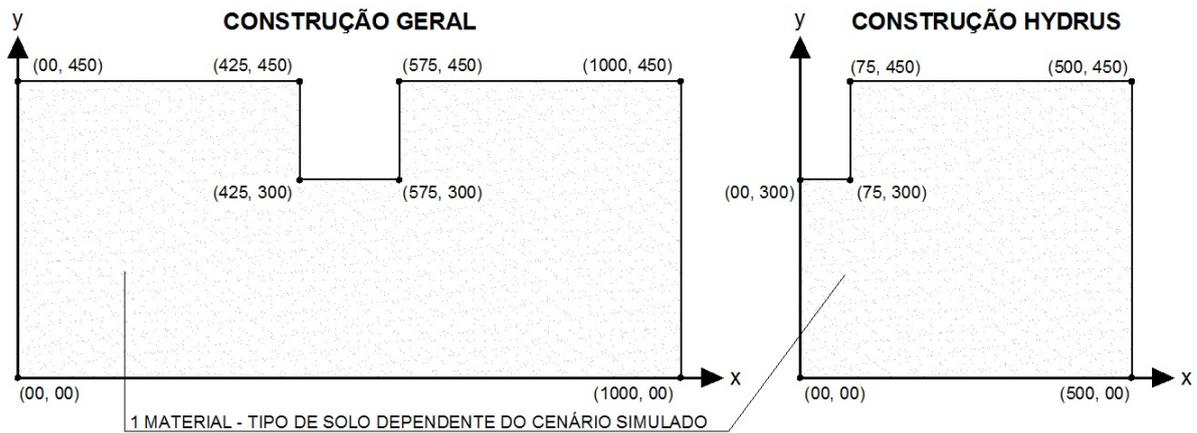
Onde:  $\theta_r$  é a umidade residual;  $\theta_s$  é a umidade saturada;  $K_s$  é a condutividade hidráulica saturada;  $K_r$  é a condutividade hidráulica residual.

### 3.4.2 Geometria e distribuição dos materiais

As características geométricas da trincheira de infiltração são regulares, devido ao seu formato retangular (1,50 m de largura e 1,50 m de altura). Os aspectos geométricos e de distribuição do material podem ser resumidos através da Figura 3.8.

Foi construído um esquema geométrico axissimétrico de 5,00 x 5,00 m sendo a geometria da trincheira de infiltração de 0,75 x 1,50m. O programa considera que o fluxo de água ocorre de maneira uniforme no solo adjacente para casos em que a geometria seja simétrica, não sendo necessária a construção total da largura do objeto.

No que tange a distribuição do material, a trincheira de infiltração foi representada apenas pela presença de água em seu interior, visto que na análise de recessão há uma carga hidráulica existente no sistema, já o solo natural foi representado por um único tipo de solo. O tipo de solo foi alterado de acordo com o cenário de modelagem pré-determinado, sendo melhor detalhado no tópico 3.4.4. (Estratégia de modelagem).

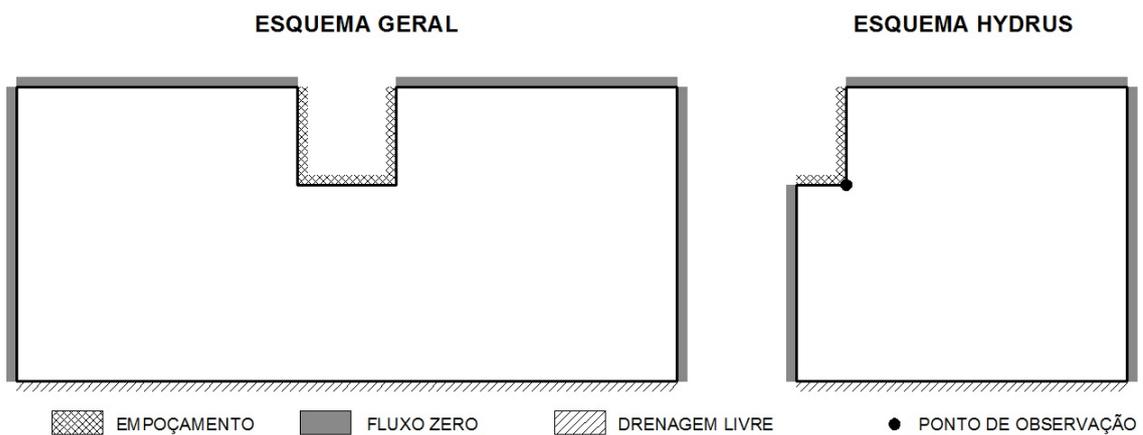


**Figura 3.8:** Construção da geometria bidimensional da trincheira de infiltração. Medidas em centímetros.

### 3.4.3 Condições de contorno e iniciais

As condições de contorno e iniciais são descritas a seguir e representadas pela Figura 3.9. Não há alterações das condições de contorno nos diversos cenários de modelagem, apenas nos valores da carga hidráulica inicial e nas condições de potencial matricial inicial.

- Superior - fluxo zero, sem interferência de eventos de precipitação;
- Inferior - drenagem livre;
- Iniciais - fluxo zero nos limites laterais;
  - empoçamento, pois há presença de uma carga hidráulica no interior da trincheira de infiltração, possibilitando a análise do processo de recessão.



**Figura 3.9:** Esquema das condições iniciais e de contorno da trincheira de infiltração.

### 3.4.4 Estratégia de modelagem

O objetivo dessa estratégia de modelagem é gerar uma base de dados sobre o comportamento do processo de recessão em 12 solos de classificações texturais diferentes, a partir do

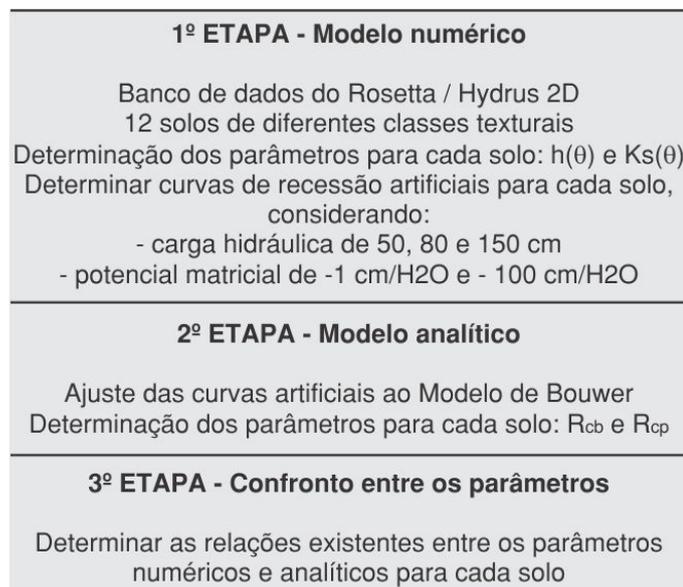
estudo e relação entre os parâmetros hidráulicos obtidos analiticamente ( $R_{cb}$  e  $R_{cp}$ ) e numericamente ( $h(\theta)$  e  $K(\theta)$ ). Com essa base de dados é possível ter um conhecimento prévio sobre o desempenho de uma trincheira de infiltração quando implantada em um dos 12 tipos de solo. Essa estratégia seguiu 3 etapas de desenvolvimento.

Na 1ª etapa foram determinadas os parâmetros hidráulicos e de forma para 12 tipos de solos, a partir da base de dados do Rosetta / Hydrus. O Rosetta é um programa inerente ao software Hydrus, o qual gera parâmetros hidráulicos e de forma do solo a partir de dados texturais do solo (SCHAAP; LEIJ; GENUCHTEN, 2001).

Após a determinação dos parâmetros, foi realizada uma simulação para cada tipo de solo, a fim de gerar as curvas de recessão artificiais. As condições iniciais adotadas foram a de carga hidráulica de 50, 80 e 150 cm e, de potencial matricial de solo próximo à saturação ( $\psi_m = -1\text{cmH}_2\text{O}$ ) e de solo seco ( $\psi_m = -100\text{cmH}_2\text{O}$ ). Essa etapa gerou 72 curvas artificiais, sendo 6 curvas para cada tipo de solo.

Na 2ª etapa, as curvas artificiais foram ajustadas ao modelo de Bouwer, a fim de determinar os parâmetros das resistências hidráulicas da base ( $R_{cb}$ ) e das paredes ( $R_{cp}$ ) para cada solo. Foram gerados 144 valores de resistências hidráulicas.

Na 3ª etapa, os valores de  $R_{cb}$  e  $R_{cp}$  foram confrontados com os parâmetros  $h(\theta)$  e  $K(\theta)$ , a fim de investigar se há relação entre os parâmetros do modelo analítico de Bouwer e do modelo numérico Hydrus 2D. As etapas a modelagem podem ser resumidas pela Figura 3.10.



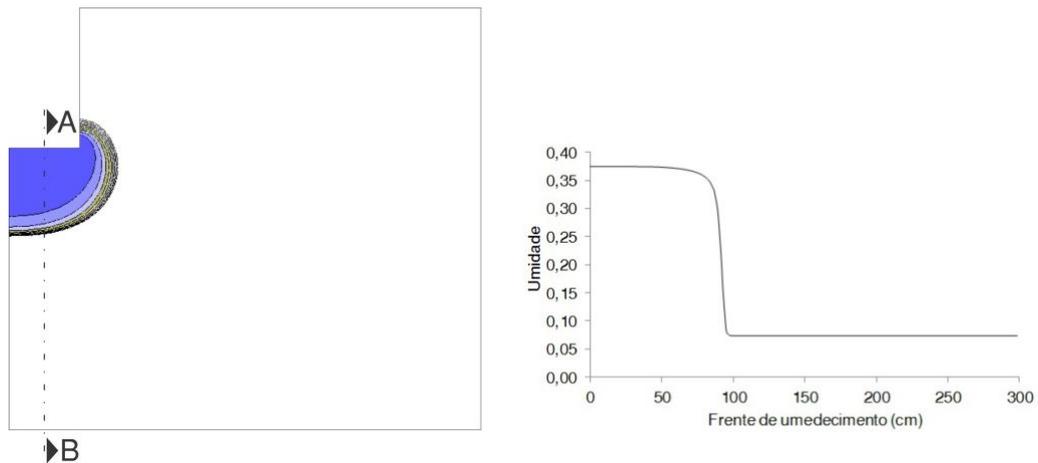
**Figura 3.10:** Etapas da estratégia de modelagem.

### 3.4.5 Estudo da frente de umedecimento

Nesta sessão foi avaliado, mais detalhadamente, o movimento da água na interface trincheira de infiltração - solo natural, considerando os solos do tipo arenoso, fanco e franco

arenoso. Esses solos foram escolhidos por possuírem uma predominância de frações de areia em sua composição textural, sendo passíveis de implantação de sistemas de infiltração como a trincheira de infiltração (EPA, 1999; MDE, 2009).

Foi analisado o movimento da água em cada solo considerando cargas hidráulicas de 50, 80 e 150 cm e condições de potencial matricial de  $= -1\text{cmH}_2\text{O}$  e  $-100\text{cmH}_2\text{O}$ . A partir disso foram extraídas cartas de umidade de alguns tempos de simulação e extraídos perfis da frente de umedecimento a partir do centro da base da geometria elaborada no Hydrus 2D (Figura 3.11).



**Figura 3.11:** Indicação, em vista, do perfil da frente de umedecimento analisado em todos os casos simulados.

A frente de umedecimento foi analisada a partir de um tempo comum aos três solos e para ambas condições de potencial matricial e também o comprimento e tempo do alcance máximo da frente de umedecimento <sup>1</sup>. Vale ressaltar que o contexto geral das simulações no Hydrus 2D, como geometria e condições de contorno foram mantidas.

<sup>1</sup> Alcance máximo - considerada a distância máxima que a frente de umedecimento pode atingir ainda quando há fluxo de água entre a trincheira de infiltração - solo natural.

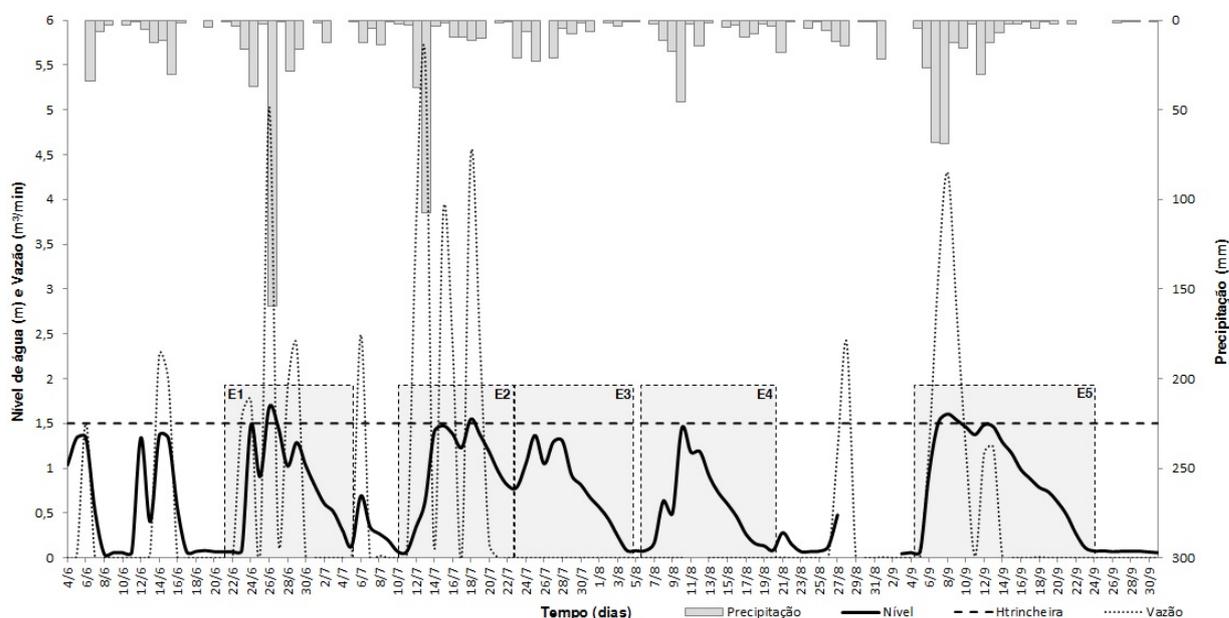
# 4

## Resultados e Discussões

### 4.1 Avaliação da Trincheira de Infiltração

#### 4.1.1 Seleção dos Eventos

A avaliação da trincheira de infiltração como técnica compensatória no manejo de águas pluviais foi realizada nos quatro primeiros meses de funcionamento do dispositivo (junho a outubro de 2014), considerando o conjunto de eventos de maiores alturas de precipitação. A Figura 4.1 apresenta o comportamento da precipitação, da vazão de entrada e do nível de água no interior do sistema, destacando os eventos selecionados para a avaliação.



**Figura 4.1:** Monitoramento da precipitação, vazão de entrada e nível de água no interior da trincheira de infiltração no período de estudo, destacando os eventos selecionados.

O intervalo entre os dias 20/08 e 02/09 não são apresentados, em detrimento de uma falha no equipamento de monitoramento do nível de água. A linha horizontal tracejada demarcada ao

longo do gráfico representa a profundidade máxima da trincheira de infiltração, considerando que uma elevação do nível de água superior a 1,50 m representa o extravasamento do sistema.

Observa-se na figura que as variações da coluna de água ocorrem quase que simultaneamente às precipitações, destacando o rápido tempo de resposta que o sistema pode apresentar na minimização do escoamento superficial.

Foram selecionados cinco eventos para este estudo, sendo caracterizados da seguinte forma: intervalo de ocorrência (datas e horas), valor da precipitação dos cinco dias anteriores ao evento para determinação das condições iniciais do solo (I, II ou III), precipitação acumulada no evento, intensidade média do evento e vazão máxima de entrada (Tabela 4.1).

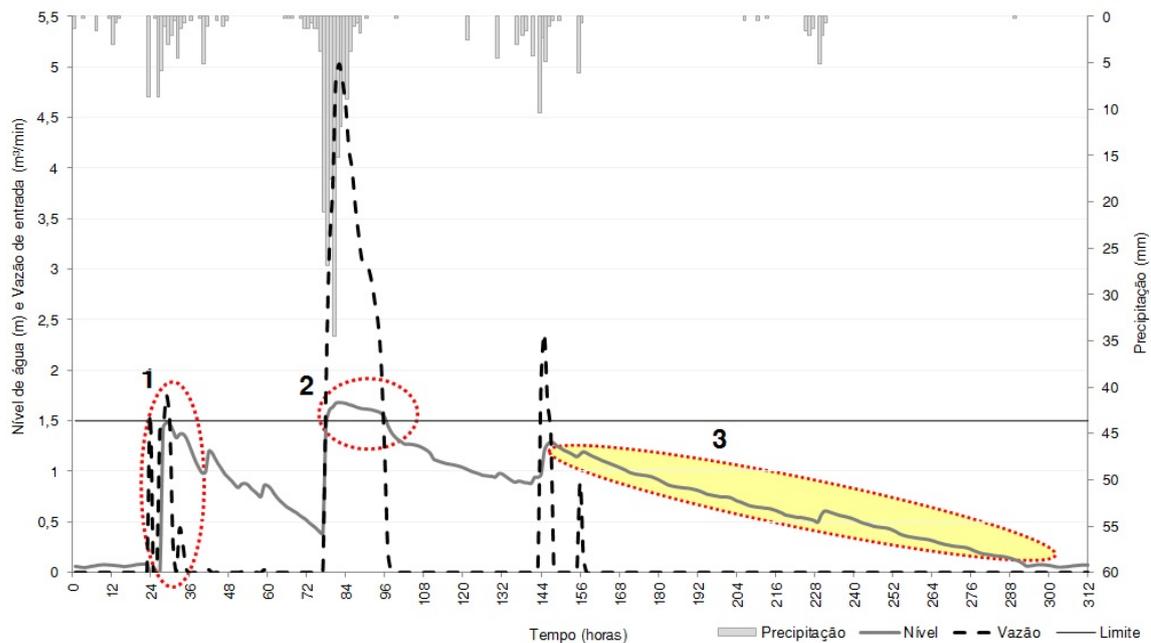
Tabela 4.1: Caracterização dos eventos selecionados no estudo.

Evento	Duração do evento (h)	Precipitação antecedente (mm)	Condições iniciais do solo	Precipitação do evento (mm)	Intensidade média do evento (mm/h)	Vazão máxima de entrada ( $m^3/min$ )
E1	23/06 a 05/07	8,06	I	273,81	45,32	5,03
E2	12/07 a 22/07	24,13	II	192,29	38,29	5,60
E3	23/07 a 03/08	23,38	II	95,25	24,38	0,00
E4	09/08 a 18/08	14,22	II	104,90	39,05	0,00
E5	05/09 a 22/09	21,84	II	262,38	36,58	4,30

## 4.1.2 Análise dos Eventos

### Evento 1 - E1 (23/06 a 05/07)

O comportamento da trincheira de infiltração no Evento 1 (E1) e os momentos destacados para análise são apresentados na Figura 4.2. Pode-se observar o baixo nível de água no interior do experimento no início do evento, resultado da baixa precipitação acumulada nos cinco dias antecedentes ao evento (8,06 mm), caracterizando uma condição inicial de solo seco (I).



**Figura 4.2:** Momentos importantes do comportamento da trincheira de infiltração em E1.

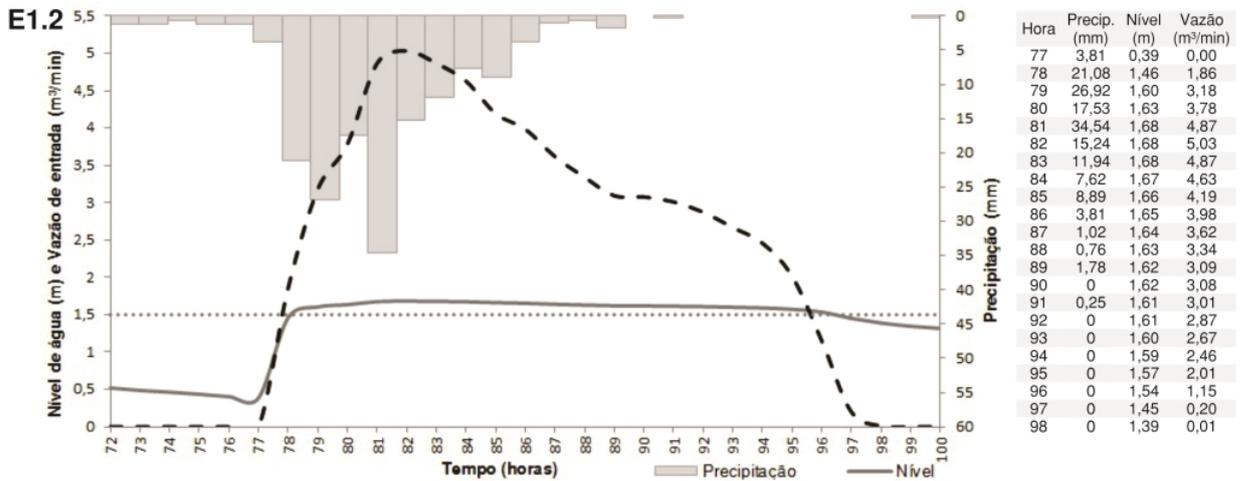
O somatório das precipitações antecedentes com a precipitação do primeiro dia do evento foi suficiente para provocar o rápido aumento da vazão de escoamento superficial e uma elevação brusca do nível de água (momento 1). O nível de água ascendeu 1,48 m em 2 horas, decorrente de uma precipitação de 17,52 mm, proporcionando um volume de 2.197,80 L na camada de armazenamento.

Nesse caso, mesmo com o movimento de infiltração no solo natural ocorrendo concomitantemente ao processo de enchimento da trincheira de infiltração, a velocidade de enchimento é muito superior ao da infiltração, deixando o sistema no limite da altura máxima da camada de armazenamento (1,50 m).

Após o momento 1, o nível de água diminuiu, apresentando oscilações na altura de água, caracterizando a descontinuidade no processo de recessão no trecho.

O segundo momento importante de E1 pode ser observado no dia 26/06, em razão da ocorrência de um bloco de precipitação de 159,76 mm, caracterizando o maior bloco de precipitação analisado no estudo. Essas precipitações ocorreram no intervalo entre 77 e 91 h, resultando em um aumento súbito da vazão de entrada, com pico de  $5,03 \text{ m}^3/\text{min}$ . Em resposta, o nível de água supera o limite da camada de armazenamento, provocando primeiro o

extravasamento da estrutura. O detalhe desse extravasamento e os valores de precipitação, vazão de entrada e nível de água durante o momento são apresentados na Figura 4.3.



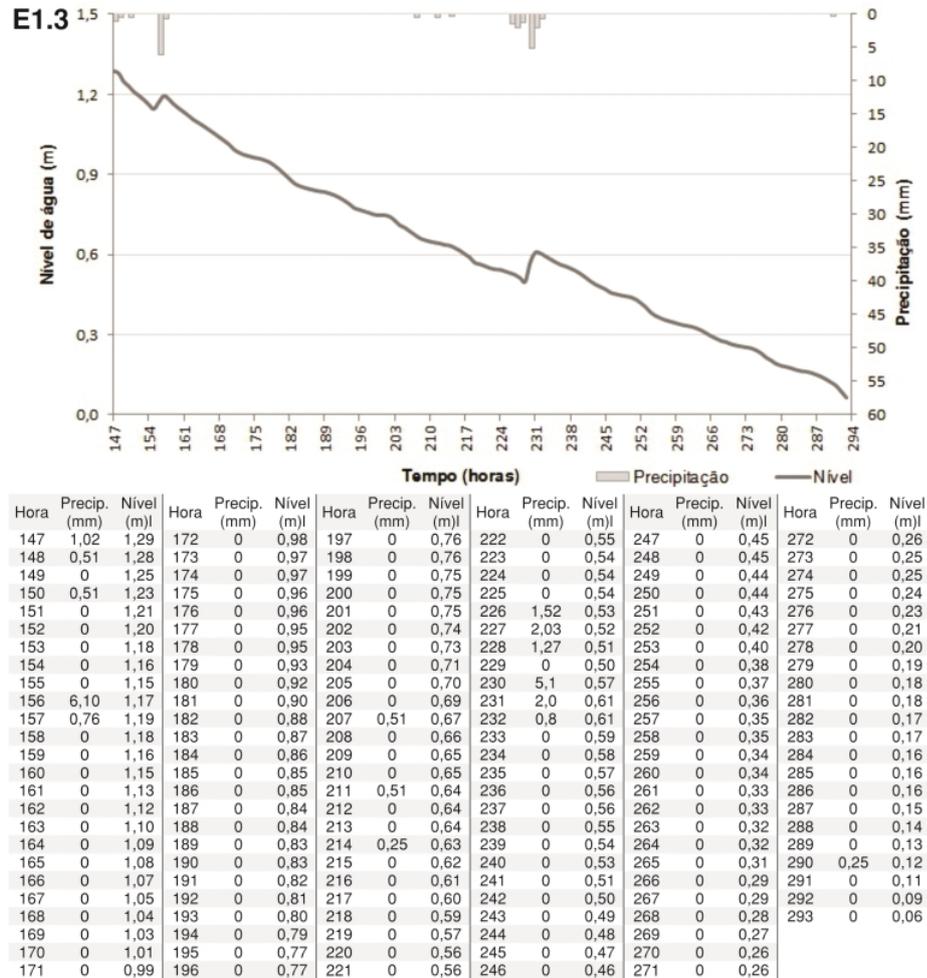
**Figura 4.3:** Detalhe de trecho de ocorrência de extravasamento da trincheira de infiltração em E1.

Discretizando a precipitação do dia 26/06, a maior altura de precipitação (31,54 mm) ocorre na hora 81, desencadeando uma resposta na hora seguinte com o pico da vazão no evento. A partir desse momento a vazão diminui à medida que a precipitação também decresce, porém o nível se mantém relativamente constante por um intervalo de 18 horas. Nesse espaço de tempo, pode-se considerar que a infiltração permaneceu estável, atingindo seu momento de saturação com uma taxa de infiltração média de  $3,11 \cdot 10^{-3} \text{ mm/h}$ . O volume extravasado nesse intervalo foi de 2.347,29 L, correspondendo a 90% do volume total precipitado nesse espaço de tempo.

As últimas ocorrências de vazões no evento não foram suficientes para provocar extravasamento na estrutura. A vazão de entrada foi resposta das precipitações acumuladas até a hora 145, fazendo com que o nível de água na camada de armazenamento retornasse a ascender. A partir da hora 147 a trincheira inicia o processo de recessão (momento 3), apresentando dois momentos descontínuos, devido às precipitações acumuladas dos intervalos entre 156 e 157 h (6,86 mm) e, 230 e 232 h (7,87 mm) (Figura 4.4).

O primeiro segmento de recessão contribuiu com um volume infiltrado de 1.033,30 L e, o segundo segmento proporcionou uma infiltração de 803,53 L em um processo total de 140 h. A primeira elevação de nível adicionou um volume de 72,91 L e a segunda 161,57 L na camada de armazenamento.

Esse comportamento revela que os eventos de baixa precipitação foram suficientes pra provocar uma alteração no processo de drenagem livre da trincheira de infiltração. Esse fato foi consequência do conjunto de eventos anteriores, os quais acarretaram a saturação momentânea da estrutura no intervalo de extravasamento e aos curtos intervalos de tempo entre um evento e outro, impedindo que o sistema retornasse ao estado inicial de solo seco (I).



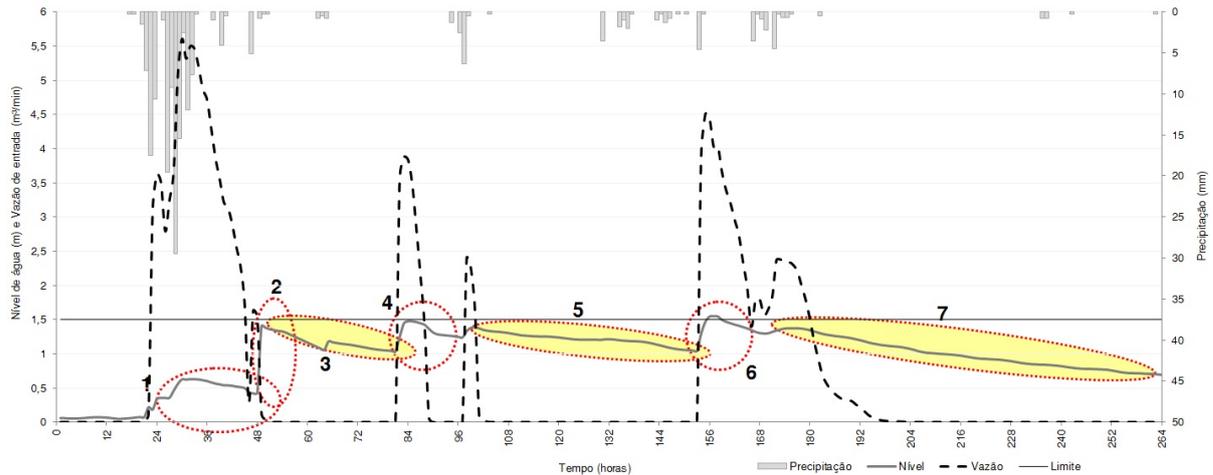
**Figura 4.4:** Detalhe do momento 3 - recessão.

### Evento 2 - E2 (12/07 a 22/07)

O comportamento da trincheira de infiltração no Evento 2 (E2) e os sete momentos mais relevantes são apresentados na Figura 4.5. Este evento apresenta uma condição inicial de solo diferente de E1. Apesar dos baixos valores do nível de água no início do evento, a precipitação acumulada antecedente (24,13 mm) enquadrava o estado inicial do solo em uma condição média (II).

E2 apresenta frequências e valores de vazões de entrada maiores do que E1, apesar da maior altura pluviométrica do estudo ter ocorrido no evento anterior. Apesar das condições iniciais do solo, nas primeiras horas de E2 não ocorreram precipitações, garantindo, possivelmente, o retorno da estrutura ao estado não saturado. Isso assegurou que no momento 1 a trincheira de infiltração armazenasse e drenasse águas sem quaisquer perturbações na camada de armazenamento.

No momento 2 acontece uma elevação brusca no nível de água na trincheira em um curto período de tempo (0,98 m em 2 horas), resultado da precipitação acumulada nas horas antecedentes (145,03 mm em 29 horas) e uma vazão de entrada de  $5,60 \text{ m}^3/\text{min}$ . Essa ocorrência



**Figura 4.5:** Momentos importantes do comportamento da trincheira de infiltração em E2.

não foi suficiente para provocar o extravasamento da estrutura, mas proporcionou um aumento no volume armazenado de 1.460,20 L.

O momento 4 foi enquadrado como um caso particular, pois há um aumento no nível de água na camada de armazenamento e na vazão de entrada mesmo sem a ocorrência de precipitação.

GRIFFITHS; CLAUSEN (1997) afirmam que o processo de recessão pode ter alterações que não são contabilizadas na análise do processo, mas que influenciam diretamente na sua avaliação real, como o armazenamento temporário de água em depressões, canais de armazenamento ou nos poros do solo.

Acredita-se que a elevação do nível de água não corresponde a nenhum fluxo de água remanescente nos poros do solo natural (paredes ou base da trincheira), em razão da existência de uma vazão de entrada máxima de  $2,37 \text{ m}^3/\text{min}$ . A consideração por uma contribuição consequente de escoamentos residuais previamente armazenados em depressões também é descartada, devido ao elevado valor registrado na vazão de entrada.

Sendo assim, possivelmente, essa elevação na camada de armazenamento é proveniente da lavagem de alguma área próxima ao sistema, onde o controle e monitoramento dessas externalidades são de difícil incumbência. Essa contribuição foi de 627,86 L em 5 horas.

No momento 6, a elevação do nível superou o limite da trincheira de infiltração, resultando no segundo extravasamento da estrutura, porém de magnitude inferior ao observado em E1.2. O extravasamento ocorreu entre as horas 156 e 158, produzindo um volume de escoamento superficial de 88,74 L.

Os períodos de recessão de E2 (3,5, e 7) são detalhados na Figura 4.6.

O momento 3 é caracterizado por um breve aumento no nível de água em pleno processo de recessão como consequência de um acúmulo de 2,03 mm de precipitação. Apesar de ser considerado um pequeno valor de altura de precipitação, ela foi suficiente para provocar um distúrbio no movimento descendente, visto que as condições anteriores já eram de solo úmido na trincheira de infiltração (precipitação do momento 2). O primeiro segmento de recessão durou

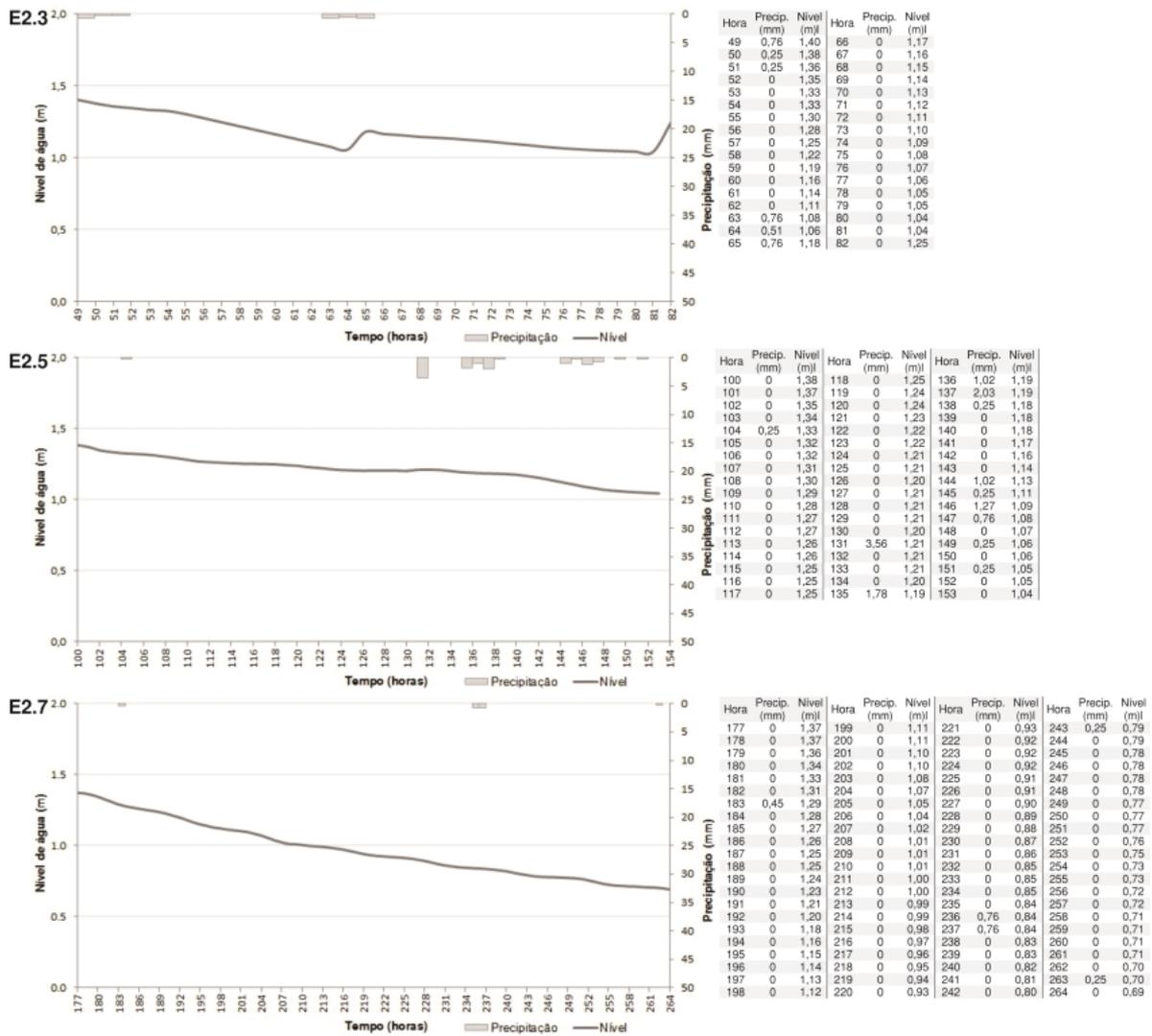


Figura 4.6: Detalhes dos momentos 3, 5 e 7 - recessões.

16 horas e infiltrou um volume de 515,59 L, já o segundo segmento proporcionou uma infiltração de 303,98 L em 16 horas. O volume de armazenamento advindo da precipitação foi de 183,25 L em 1 hora.

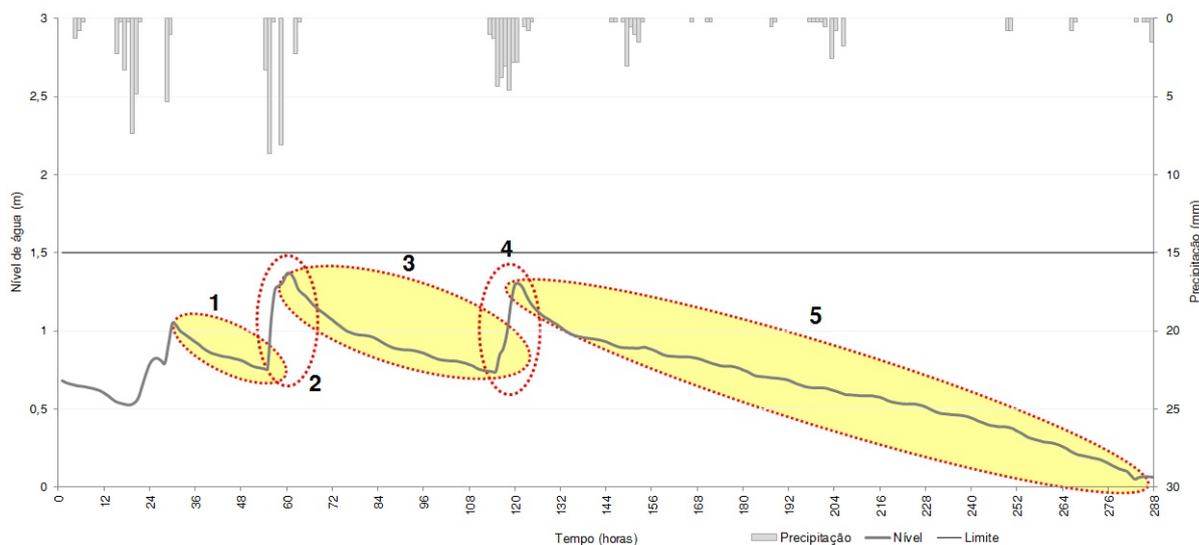
O momento 5 apresenta um comportamento mais discreto da recessão, resultante da pouca variação no nível de água em um longo período de tempo (0,34 m em 53 horas), mantendo o nível constante em determinados momentos. A precipitação acumulada foi de 12,69 mm e a contribuição por infiltração foi de 504,45 L.

O momento 7 apresenta uma recessão com inclinação mais acentuada do que no momento anterior. Esse momento durou 88 horas e infiltrou um volume de 1.012,03 L. A precipitação acumulada do momento foi de 2,47 mm.

**Evento 3 - E3 (23/07 a 03/08)**

O Evento 3 (E3) pode ser caracterizado por três momentos de recessão e duas elevações de níveis (Figura 4.7). Possui uma condição inicial de solo média (II) e precipitação antecedente

de 23,38 mm.



**Figura 4.7:** Momentos importantes do comportamento da trincheira de infiltração em E3.

E3 apresenta elevados níveis de água na camada de armazenamento e blocos de precipitações que intensificam esse armazenamento. Apesar disso, não houve extravasamento na estrutura, graças aos consideráveis intervalos entre um bloco de precipitação e outro, o que resultou em longos períodos de recessão.

Como consequência de um conjunto de precipitações (20,32 mm) ocorre a primeira elevação de destaque no nível de água (momento 2). A elevação foi de 0,61 m em um tempo de 7 horas, gerando um aumento de 904,22 L na camada de armazenamento.

O momento 4 apresenta um crescimento de 0,56 m no nível de água em 6 horas, proporcionando uma contribuição de 837,99 L na camada de armazenamento, consequente da precipitação acumulada de 22,61 mm.

Os momentos 1, 3 e 5 são caracterizados pelo movimento descendente do nível de água, sendo destacados na Figura 4.8.

O momento 1 pode ser caracterizado por um comportamento laminar, ou seja, o processo ocorre de maneira contínua sem qualquer interferência, assim como observado no trabalho de MALÍK; VOJTKOVÁ (2012). O período total do processo de recessão durou 26 horas, tendo o valor de 1,01 mm de precipitação na primeira hora do processo, a qual não provocou alteração no movimento descendente do período. Os níveis máximo e mínimo atingidos na camada de armazenamento foram de 1,05 m e 0,76 m, respectivamente, representando um volume de infiltração de 431,69 L.

O momento 3 apresenta alguns ocasiões onde o nível de água permanece constante, gerando um movimento visualmente uniforme no segmento. O total precipitado durante esse período foi de 4,87 mm, porém sem provocar o aumento do nível, mas que pode ter justificado o valor estável do nível de água por tempos de até 5 horas (101h a 105h). A variação do nível de água foi significativa, 0,63 m, correspondendo a um volume infiltrado de 932,88 L no tempo de

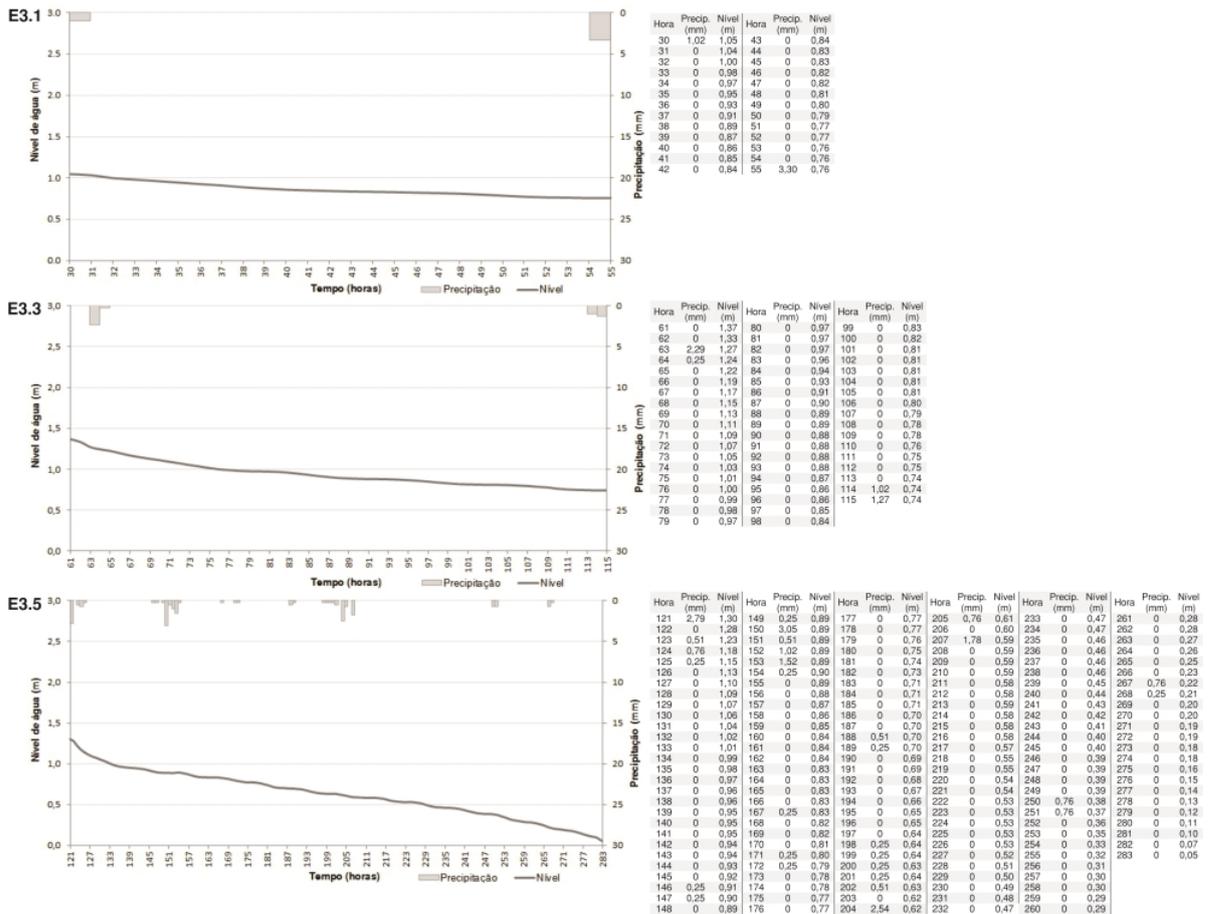


Figura 4.8: Detalhes dos momentos 1, 3 e 5 - recessões.

55 horas.

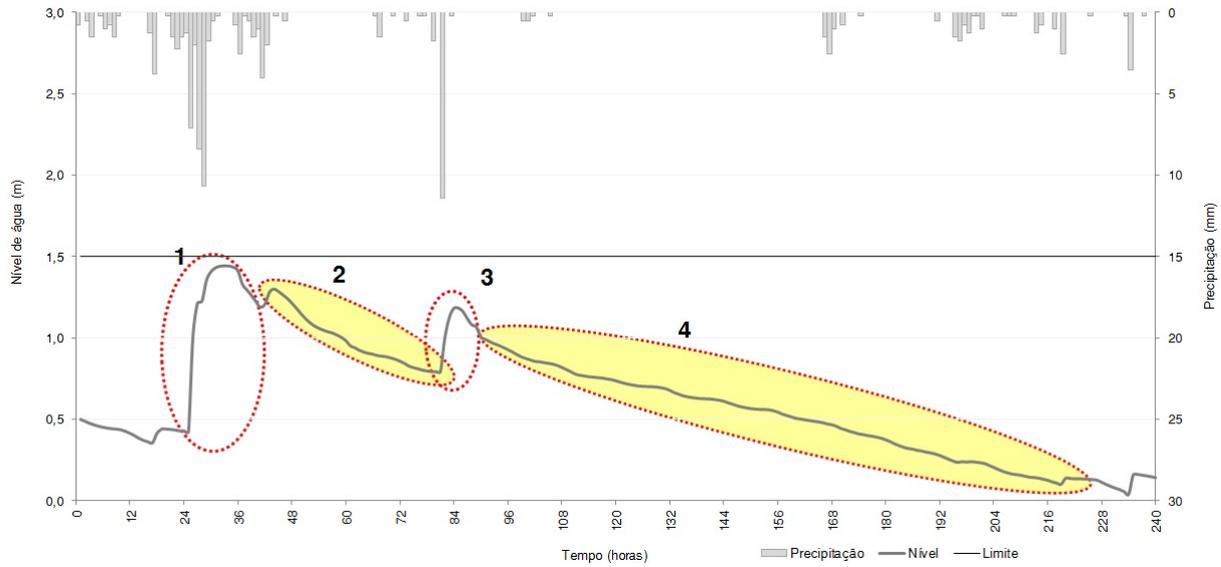
O período 5 foi o mais longo de E3, com 163 horas de duração. Nesse tempo a precipitação acumulada foi de 24,38 mm, distribuída de maneira irregular no tempo, desencadeando duas breves oscilações no processo de recessão. Após isso, o movimento torna a decrescer de maneira contínua até a última hora desse evento, 288 h. Nesse período ocorreu a maior variação do nível de água na camada de armazenamento do estudo, 1,25 m, e o maior volume de infiltração dos períodos analisados, 1.859,37 L.

**Evento 4 - E4 (09/08 a 18/08)**

Ocorrendo em um intervalo de 240 horas, foram considerados quatro momentos importantes no Evento 4 (E4): duas elevações bruscas no nível de água e dois movimentos de recessão (Figura 4.9).

Assim como no evento anterior, este evento não apresenta vazão de entrada. O início do evento é caracterizado por uma condição inicial de solo média (II), com uma precipitação antecedente de 14,22 mm. Mesmo com um nível de água inicial de 0,50 m, os volumes de entrada não provocaram extravasamento da estrutura.

Os momentos 1 e 3 são caracterizados pelo aumento do nível de água no interior da

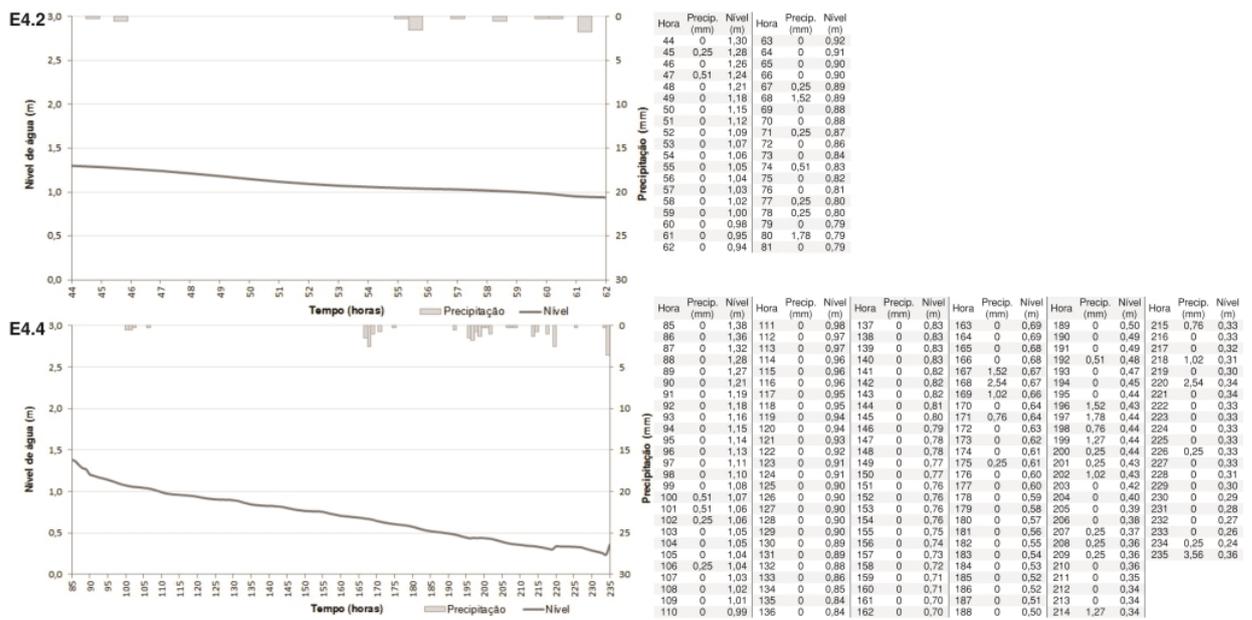


**Figura 4.9:** Momentos importantes do comportamento da trincheira de infiltração em E4.

trincheira de infiltração. O momento 1 apresenta a maior elevação de nível em E4, sendo de 1,02 m em 8 horas, decorrente de um conjunto de precipitações de 37,60 mm, aumentando 1.514,70 L o volume de armazenamento.

O momento 3 apresenta uma ascensão menor que o anterior, em razão de um valor de precipitação acumulada inferior (13,46 mm). O volume de contribuição foi de 579,15 L, equivalendo a uma variação de altura de 0,39 m em 6 horas.

A Figura 4.10 apresenta o comportamento das recessões nos períodos 2 e 4.



**Figura 4.10:** Detalhes dos momentos 2 e 4 - recessões.

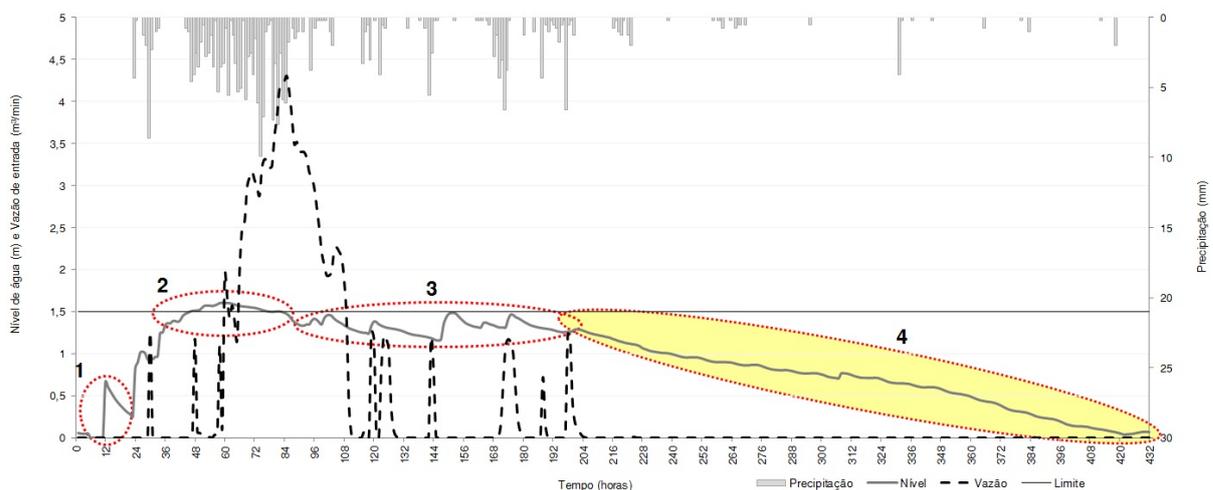
O período 2 apresenta um comportamento contínuo de recessão mesmo com uma precipitação acumulada de 5,59 mm. A variação do nível de água foi de 0,51 m em 38 horas,

correspondendo a um volume de infiltração de 753,34 L.

O período 4 apresenta discretas oscilações no nível de água durante o processo e um breve aumento de nível, resultado da ocorrência de pequenos blocos de precipitações que ocorrem no final do processo descendente. O período acumula um total de 18,80 mm de precipitação, distribuídos em 151 horas. O aumento do nível de água iniciou na hora 219, permanecendo contínuo durante as próximas 3 horas, decorrente dos 3,56 mm precipitados. A recessão variou 1,08 m e infiltrou 1.607,81 L.

### Evento 5 - E5 (05/09 a 22/09)

O evento 5 (E5) é o mais longo (480 horas) e o mais complexo do estudo, em razão da sucessão de perturbações que ocorreram na altura limite da trincheira de infiltração, 1,50 m, provocando o terceiro extravasamento da estrutura em determinado momento. A Figura 4.11 mostra os momentos mais importantes de E5.



**Figura 4.11:** Momentos importantes do comportamento da trincheira de infiltração em E5.

Apesar de o solo apresentar uma condição inicial média (II), em consequência de 21,84 mm de precipitação acumulada, é a ocorrência diária e em alturas consideráveis de precipitações que proporcionam o movimento oscilatório do nível de água até, aproximadamente, metade do evento.

Assim como o momento E2.4, o momento E5.1 representa um caso particular do comportamento do nível de água no experimento. Não há registros da ocorrência de precipitações durante e nas 72 horas que antecedem a elevação de 0,67 no nível (equivalente a 990,35 L) que possam justificar tal reação.

Esse fato pode ser alguma externalidade advinda de deflúvios de lavagens do entorno do sistema, como ocorrido em E2.4. Porém, como em E5.1 não há registro de vazão de entrada, essa suposição pode não se adequar. No entorno da trincheira de infiltração há vários jardins, sendo essa elevação, uma possível contribuição pela rega dos jardins locais.

O momento 2 é caracterizado pelo extravasamento da estrutura por 32 horas (46 a 77h). A precipitação acumulada foi de 106,87 mm, porém um bloco de precipitações de 16 mm, ocorrido 10 horas antes do extravasamento, contribuiu provavelmente, para a saturação da estrutura, para o aumento do nível e posterior excesso de água na trincheira de infiltração. O volume total extravasado foi de 2.347,29 L, correspondendo a 91,82% do volume total precipitado nesse momento.

O maior pico de vazão ocorreu após o extravasamento na estrutura,  $4,30 \text{ m}^3/\text{min}$ , porém não intensificou o extravasamento. Após esse pico, vazões menores foram resultadas das frequentes precipitações, desencadeando oscilações no comportamento do nível de água (Figura 4.12). Esse efeito deixou a estrutura funcionando no limite máximo da camada de armazenamento, podendo gerar um novo extravasamento.

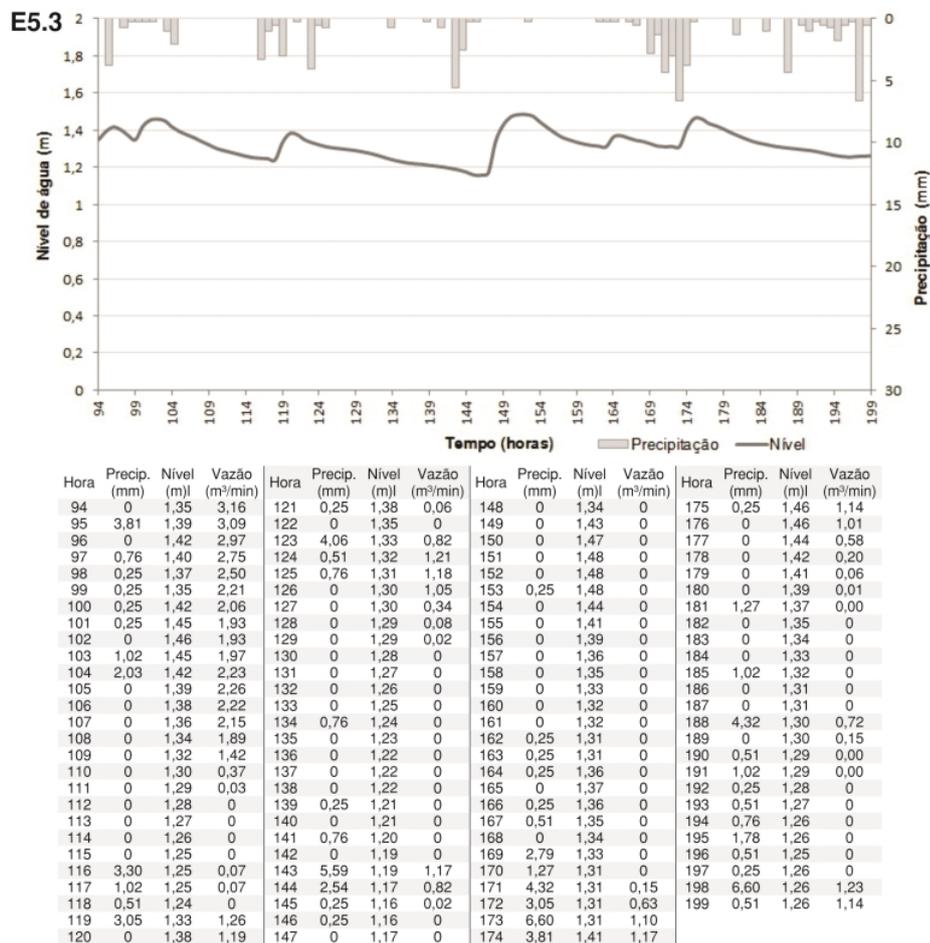


Figura 4.12: Oscilações do nível de água no interior da trincheira de infiltração em E5.

Isso representou a dificuldade que o sistema teve de permanecer em condições seguras por um longo período e de consequentes eventos chuvosos, ou seja, o risco eminente de seguidos efeitos de extravasamentos.

A Figura 4.13 detalha o movimento de recessão que ocorre no momento 4. Este momento é caracterizado por uma elevação do nível de água, gerando uma quebra no movimento

descendente. É importante observar que, essa alteração não foi antecedida por uma precipitação.

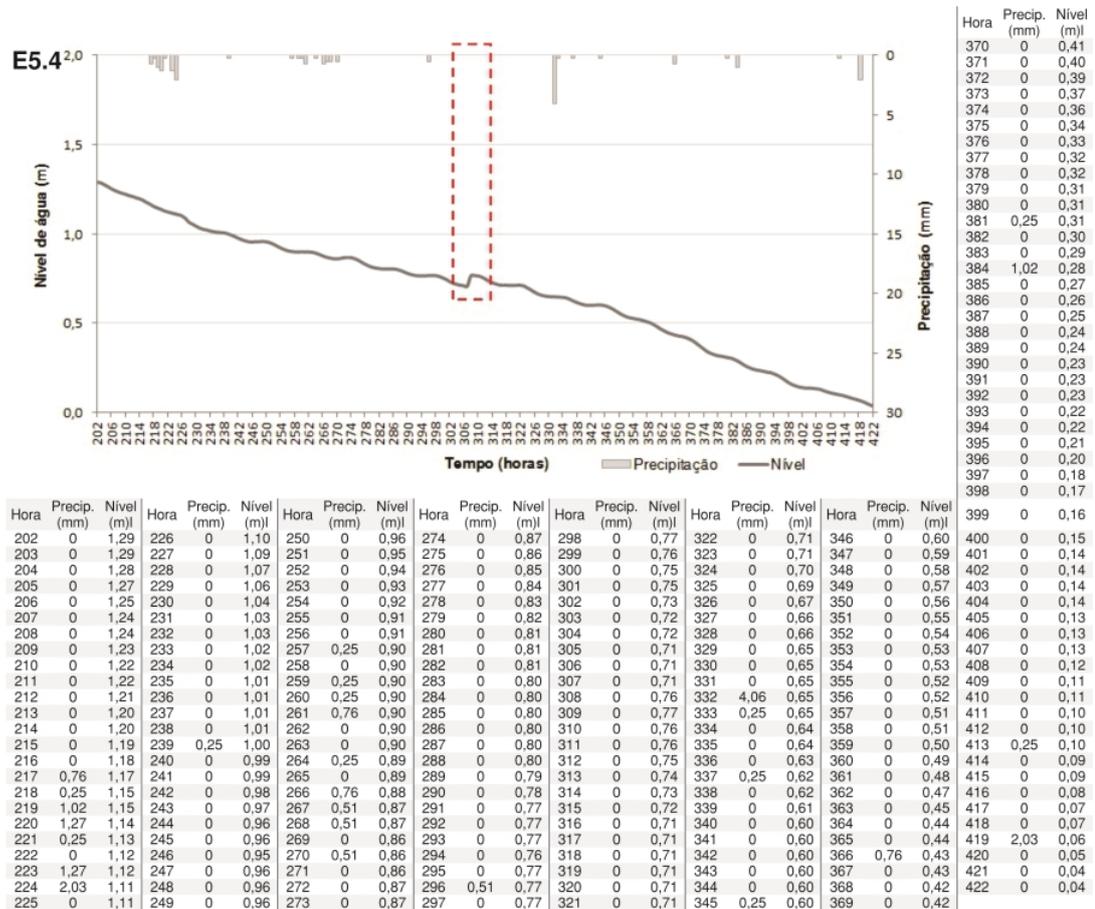


Figura 4.13: Detalhe do momento 4 - recessão.

Esse fato pode ser consequência de volumes de água remanescentes dos poros do solo natural ou da própria estrutura da trincheira de infiltração, como despertado por GRIFFITHS; CLAUSEN (1997).

Diferente de E2.4, em que há registro de vazão de entrada e pode-se afirmar que houve uma contribuição externa ao sistema, E5.4 não apresenta registros de vazões de entrada, principalmente por ser um evento de recessão. A contribuição por regas dos jardins pode ter proporcionado essa elevação, assim como em E5.1. Porém, ressalta-se a dificuldade no monitoramento e controle dessas externalidades.

O primeiro segmento de recessão durou 106 horas contribuindo com um volume infiltrado de 859,52 L e, o segundo segmento proporcionou uma infiltração de 1.085,40 L em um intervalo de 113 horas. O volume gerado pela ascensão do nível de água na recessão foi de 90,14 L em 3 horas. A precipitação acumulada foi de 75,69 mm.

### Análise geral dos eventos

A Tabela 4.2 apresenta o desempenho geral da trincheira de infiltração para cada evento analisado. Em E3 e E4 não foram registrados extravasamentos na estrutura.

A trincheira de infiltração deste estudo apresentou 3 (três) momentos em que o volume de entrada superou a capacidade hidráulica do sistema (armazenamento e infiltração), resultando em extravasamentos.

WARNAARS et al. (1999), em um período de estudo de  $2\frac{3}{4}$  anos registraram a ocorrência de sete extravasamentos na trincheira de infiltração, correspondendo a uma média de extravasamento anual de 2,6 e um tempo de retorno de 0,38 anos. Os resultados apontaram que, o tempo de retorno de 2 anos adotado no projeto do sistema foi subestimado, refletindo nos extravasamentos.

Uma analogia pode ser feita com os resultados deste estudo, no momento em que a trincheira de infiltração não foi capaz de suportar a sequência de eventos chuvosos, mesmo com a condição inicial de solo seco, como ocorrido em E1. Dessa maneira, algumas hipóteses são levantadas: se o sistema foi subestimado e a capacidade de armazenamento comprometida ou se há algum indício de colmatção na base ou paredes da trincheira de infiltração, levando a diminuição do volume e velocidade de infiltração na interface sistema - solo natural.

No que tange ao esvaziamento total do sistema, EMERSON; WADZUK; TRAVER (2010) observaram que o tempo máximo de esvaziamento de uma trincheira de infiltração com capacidade de armazenamento de  $5,7 m^3$  e monitorado por três anos foi de, aproximadamente, 8 dias.

Este trabalho não apresentou eventos de esvaziamento total da estrutura. Porém, realizando uma aproximação do tempo de esvaziamento a partir dos eventos de recessão analisados, verificou-se que o tempo máximo de esvaziamento foi de 9 dias e o tempo médio de 6 dias.

Considerando o indicador de drenagem adotado por DECHESNE; BARRAUD; BARDIN (2004) e BARRAUD; CHERQUI (2009), os tempos de esvaziamento foram considerados razoáveis, apresentando uma duração de drenagem inferior a 72 h em 50% dos movimentos de recessões analisados.

Após essas análises, verifica-se que o processo de infiltração foi fundamental para o bom desempenho da trincheira de infiltração. GRACIOSA; MEDIONDO; CHAUDHRY (2008a) afirmaram que mesmo em condições de saturação o sistema é capaz de infiltrar 40% da chuva de projeto, sendo constatada para a trincheira de infiltração deste estudo uma capacidade máxima para infiltrar 63,57% dos volumes de entrada.

A trincheira de infiltração recebeu uma elevada carga de material argiloso, consequência da lavagem de um reservatório próximo ao local de implantação. Esse material argiloso pode ter comprometido parcela do funcionamento da função de infiltração na interface sistema – solo natural. Possivelmente houve a formação de uma camada de colmatção em decorrência da deposição do material argiloso.

**Tabela 4.2:** Comportamento da trincheira de infiltração em cada evento.

Evento	Volume de entrada (L)*	Volume de armazenamento (L)	Volume infiltrado (L)	Volume extravasado (L)	Vazão máxima de infiltração (L/h)	Capacidade de armazenamento (%)	Perdas (L)**	Eficiência da estrutura (%)***
E1	7.823,49	5.301,45	5.197,50	2.347,29	14,22	extr.	174,75	67,95
E2	3.934,54	3.118,50	2.197,80	88,74	10,81	extr.	727,3	55,86
E3	3.202,55	2.508,91	3.202,55	-	11,82	78,34	-	100
E4	2.916,09	2.499,40	2.916,09	-	14,41	85,71	-	100
E5	7.155,54	4.310,36	4.209,68	1.907,94	12,71	extr.	937,24	58,83

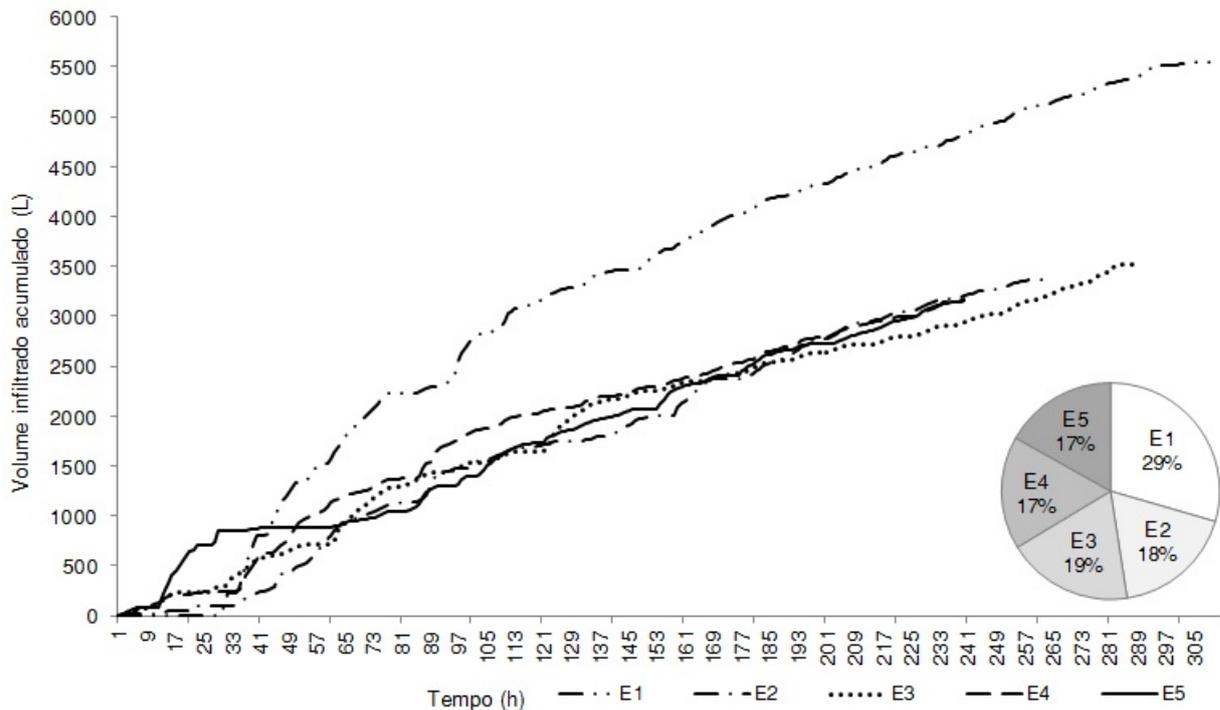
\*Soma dos volumes de precipitação direta e escoamento superficial.

\*\*Possíveis perdas por interceptação, evapotranspiração ou retenção em depressões.

Diferença entre o volume de entrada e os volumes infiltrado e escoado.

\*\*\*Eficiência do sistema em infiltrar o volume de entrada no sistema.

A Figura 4.14 representa essa influência do material argiloso nos volumes infiltrados, apresentando também o volume infiltrado em cada evento e a porcentagem de contribuição individual no valor do volume total infiltrado durante todo o período deste estudo (18.788,81 L). Os eventos E2, E3, E4 e E5 apresentaram menores volumes infiltrados se comparados a E1. Esse fato mostra que a presença do material argiloso ocorreu após E1, comprometendo assim, o desempenho do sistema nos demais eventos, derivando uma queda na contribuição do volume total infiltrado entre 10 e 12%.



**Figura 4.14:** Volumes infiltrados em cada evento e a contribuição dos mesmos no volume de infiltração total de 18.788,81 L.

No estudo realizado por LUCAS et al. (2015) o processo de colmatção é avaliado minuciosamente, sendo objetivo principal do mesmo. Para tal, foram realizados ensaios específicos de análise da capacidade de infiltração do solo, taxa de infiltração, transporte de finos e permeabilidade do geotêxtil.

Apesar do indício da presença de uma possível camada colmatada apresentada na Figura 4.14, não é possível afirmar com exatidão tal questão, como realizado no estudo de LUCAS et al. (2015). O estudo da colmatção não é o principal objetivo do presente estudo. As trincheiras de infiltração, assim como qualquer técnica compensatória, estão sujeitas às externalidades e, mesmo que a mesma não possa ser mensurada ou avaliada minuciosamente por não ser objeto principal de um estudo, deve-se considerar e abordar tal ocorrência.

Não foi possível afirmar se houve uma maior infiltração através das paredes, base ou em ambas as áreas de infiltração do experimento, visto que não houve monitoramento do perfil de umidade do solo neste estudo e nem testes de permeabilidade e capacidade de infiltração do solo como realizado em LUCAS et al. (2015).

Porém, o presente trabalho apresentou uma boa análise com base no nível de água no interior do sistema, permitindo bons resultados e o conhecimento minucioso sobre o funcionamento hidráulico da trincheira de infiltração, como realizado em EMERSON; WADZUK; TRAVER (2010).

O estudo realizado por EMERSON; WADZUK; TRAVER (2010) apresentou uma queda na taxa de infiltração durante o processo de recessão de 10 cm/h para 0,10 cm/h após três anos de monitoramento de uma trincheira de infiltração. Eles observaram que as resistências hidráulicas das paredes permaneceram praticamente constantes, sendo essa redução da infiltração em função da base do sistema.

Na trincheira de infiltração deste estudo, a taxa média de infiltração nas recessões foi de 0,83 cm/h, correspondente a menos de 10% da taxa mínima encontrada inicialmente no trabalho de EMERSON; WADZUK; TRAVER (2010). Já a vazão média de infiltração foi de 12,79 L/h.

Esse baixo valor da taxa média de recessão no período inicial da vida útil do sistema pode ter sido comprometida pela compactação do solo, em decorrência da escavação manual na etapa de implantação do sistema, como suposto no trabalho de SOUZA (2002) ou pela existência de colmatação, em decorrência do acúmulo de material argiloso consequente de uma lavagem de reservatório no entorno.

A Tabela 4.3 apresenta os valores médios das taxas e vazões de drenagem em cada momento de recessão analisado e os valores médios de ambos durante todo o estudo.

**Tabela 4.3:** Taxas média de infiltração em cada momento de recessão e a média geral do estudo. Taxa em *cm/h*.

E1.3	E2.3	E2.5	E2.7	E3.1	E3.3	E3.5	E4.2	E4.4	E5.4	Média
0,83	0,46	0,63	0,77	1,11	1,14	0,77	1,34	0,68	0,57	0,83

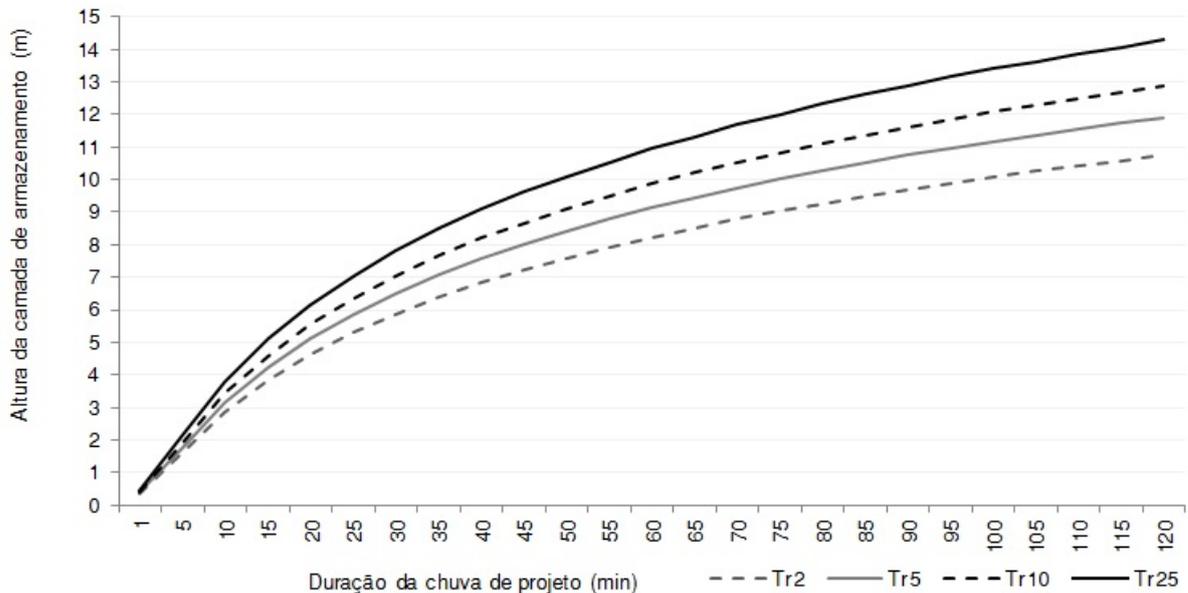
Um ensaio destrutivo da trincheira de infiltração deste estudo pode indicar se esses fatores foram comprometedores. No caso da compactação do solo, podem ser realizado ensaios de infiltração na base do experimento e, no que tange a colmatação, pode ser retiradas amostras do material acumulado sobre as superfícies de infiltração, a fim de obter resultados quanto a composição desse material como realizado em DECHESNE; BARRAUD; BARDIN (2005) e BARRAUD; LE COUSTOMER (2006).

### 4.1.3 Análise de custo

Foi realizado um estudo sobre os valores da camada de armazenamento baseado nos tempos de duração da chuva de projeto (5, 15, 60 e 120 minutos) e de retorno (2, 5, 10 e 25 anos), visto que o dimensionamento da estrutura depende diretamente dessas condicionantes temporais ( $t$  e  $T_r$ ).

As dimensões de base da trincheira de infiltração foram mantidas (1,50 X 3,00 m), em razão da limitação espacial na implantação. Sendo assim, a variabilidade foi realizada somente

na altura da camada de brita. A Figura 4.15 apresenta o aumento da altura dessa camada e, na Tabela 4.4 têm-se os valores em função dos  $t$  e  $T_r$  definidos.



**Figura 4.15:** Alturas da camada de armazenamento para determinada duração da chuva de projeto (5, 15, 60, 90 e 120 min) e tempo de retorno (2, 5, 10 e 25anos).

**Tabela 4.4:** Alturas da camada de armazenamento para determinada duração da chuva de projeto e tempo de retorno.

Duração da chuva ( <i>min</i> )	Tempo de retorno ( $T_r$ )			
	2	5	10	25
5	1,62	1,80	1,95	2,16
15	3,83	4,25	4,60	5,10
60	8,23	9,13	9,88	10,95
120	10,75	11,92	12,89	14,29

Os dados da Figura 4.15 apresentam altos valores de altura na camada de armazenamento quando há o aumento dos tempos, sendo justificável, pois as dimensões de base não foram alteradas, compensando na altura da estrutura. A profundidade máxima para tempos extremos (120 min e 25 anos) foi de 14,29 m, sendo inviável uma técnica compensatória de infiltração com essa dimensão. Para haver a possibilidade de implantação é necessário modificar as dimensões da base do sistema, sendo difícil pela limitação de espaço.

De acordo com a Tabela 4.4, a altura da camada de brita de 1,50 m adotada neste trabalho corresponde a uma duração de chuva de projeto menor que 5 min e um tempo de retorno de 2 anos. Se considerar os tempos mínimos adotados para microdrenagem (tempo de retorno de 2 anos e tempo de chuva de projeto de 5 min), a altura da camada de brita deveria ser de 1,62 m.

Os custos gerais de construção da trincheira de infiltração são apresentados na Figura 4.17, bem como os custos individuais do serviço de escavação, do geotêxtil e do material da

camada de armazenamento (brita). Ressalta-se que, como não foram alteradas as dimensões de base para essa análise, os custos individuais só se referem aos materiais/serviços que dependem diretamente da altura da camada de armazenamento.

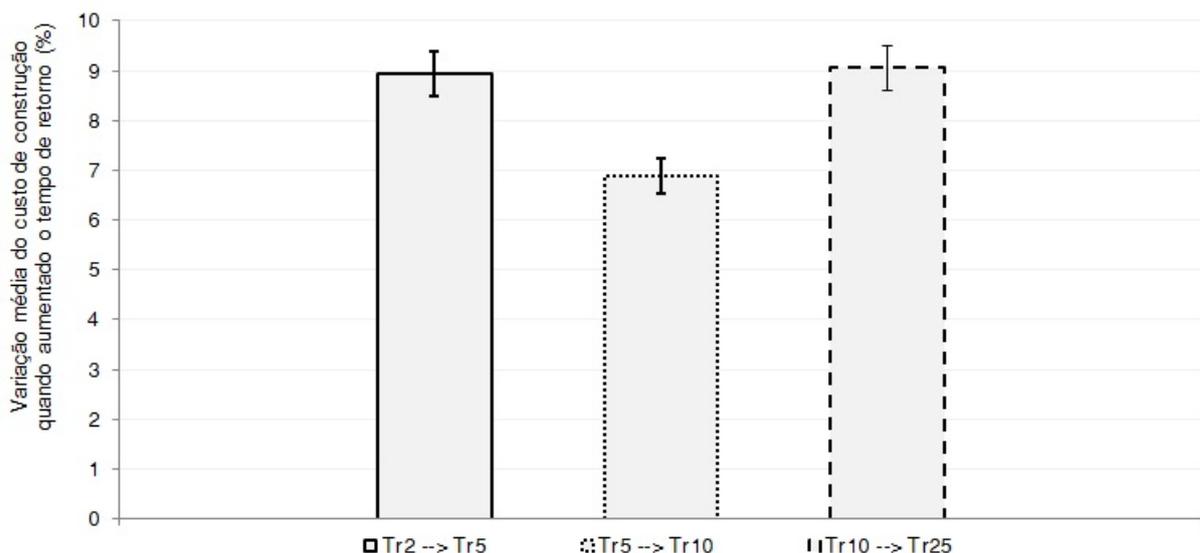
A figura mostra uma pequena variação no custo geral de construção para  $t_5$  e  $t_{15}$ , mesmo quando ocorre o aumento dos tempos de retorno. O aumento médio do custo foi de R\$ 76,60 para  $t_5$  e R\$ 178,73 para  $t_{15}$ . Já para os tempos de  $t_{60}$  e  $t_{120}$  min, há um aumento mais significativo no custo geral, variando em média R\$ 382,23 e R\$ 498,30, respectivamente.

Analisando os custos individuais, o material utilizado no preenchimento da camada de armazenamento possui o maior adicional de custo se comparado com o serviço de escavação e o geotêxtil. A Tabela 4.5 apresenta os custos médios adicionados para cada  $t$  em relação a um  $T_r$ .

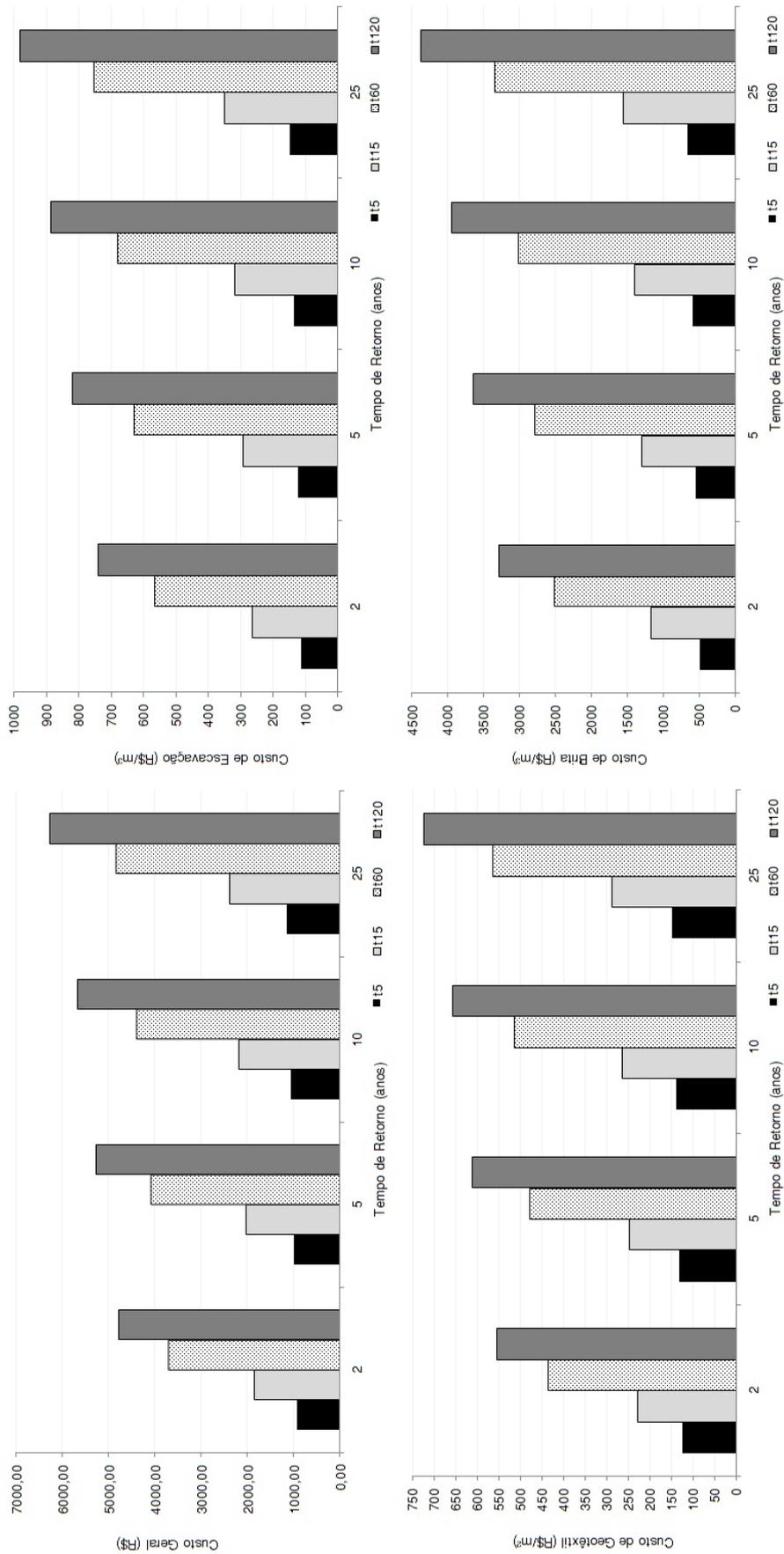
**Tabela 4.5:** Variação média do custo individual do material ou serviço em detrimento do tempo de duração de chuva de projeto ( $t$ ).

Material ou serviço	Tempo de duração da chuva de projeto ( $min$ )			
	$t_5$	$t_{15}$	$t_{60}$	$t_{120}$
Escavação	12,48	29,13	62,30	81,22
Geotêxtil	8,59	20,04	42,86	55,88
Brita	55,52	129,55	277,07	361,20

Também foi realizada uma análise do custo de construção quando se aumenta o tempo de retorno para o superior seguinte. A Figura 4.16 apresenta o percentual de aumento médio do custo de construção, com uma variação de 5% para mais ou menos.



**Figura 4.16:** Variação média do custo de construção quando aumentado o tempo de retorno de 2 para 5 anos, de 5 para 10 anos e de 10 para 25 anos.



**Figura 4.17:** Custo geral de construção, escavação, geotêxtil e brita para determinada duração da chuva de projeto e tempo de retorno.

#### 4.1.4 Comentários Finais

Apesar da ocorrência de alguns extravasamentos, a trincheira de infiltração foi considerada uma boa técnica compensatória principalmente por ter possibilitado a infiltração de grande parte do volume de entrada no sistema. Dos volumes originados pela precipitação direta e pelo escoamento superficial, o sistema foi capaz de suportar 100% em E3 e E4 e, no geral o sistema teve a capacidade máxima de infiltrar 63,57% dos volumes de entrada.

A ocorrência de extravasamento na trincheira de infiltração pode ter relação com o período da análise do estudo e com o local de implantação do sistema. Os meses de junho a setembro apresentaram elevadas ocorrências de precipitação em curtos intervalos de tempo, o que dificultou o processo de resiliência do sistema.

No local de implantação há elevada circulação de pessoas e desenvolvimento de serviços como o de regas de jardins e de limpeza (lavagem de pátios e reservatórios), sendo difícil o controle de determinados episódios que possam interferir no funcionamento do sistema.

A ocorrência de blocos de precipitação durante os eventos de recessão fizeram com que o conceito de drenagem livre inerente ao processo não se aplicasse, assim também como o esvaziamento total da trincheira de infiltração também não foi possível, interferindo e dificultando as análises do movimento descendente do nível de água.

Essas interferências consequentes de precipitações durante o processo de recessão, ora modificaram o sentido descendente do nível de água, ora não. Por exemplo, a precipitação ocorrida em E4.4 não proporcionou mudança na fase intermediária do processo de recessão, mas somente no final desse momento. Já em E1.3 e E2.3, os blocos de precipitação ocorridos foram suficientes para propiciar a descontinuidade no movimento de recessão, proporcionando breves elevações no nível de água e uma posterior retomada do movimento descendente.

A avaliação da trincheira de infiltração representou a dificuldade que existe em implantar essa técnica em regiões com elevadas intensidades pluviométricas e a produção de grandes volumes de escoamento superficial. O dimensionamento dessas estruturas, geralmente, é baseado nas condições adotadas para projetos de microdrenagem convencionais, sendo assim, muitas vezes subestimadas. É necessário alterar alguns padrões de projeto, no que tange ao tempo de retorno adotado, visto que as condições estruturais e funcionais dessa técnica de infiltração se comportam de maneira bem diferente do que o sistema de microdrenagem tradicional.

Apesar disso, as taxas e vazões de infiltração foram consideradas boas, apresentando uma média geral de 0,83 cm/h e 14,80 L/h, respectivamente.

O estudo do custo de construção verificou a relação entre o preço de construção geral da estrutura e de alguns materiais individualmente, em função dos tempos de retorno (2, 5, 10 e 25 anos), e dos tempos de duração da chuva de projeto (5, 15, 60 e 120 minutos).

Os dados mostraram que, os custos estão diretamente relacionados com o aumento dos tempos ( $t$  e  $T_r$ ). Se comparado o custo entre os tempos de retorno, os anos de 10 e 25 apresentam maiores valores, principalmente pelo aumento da camada de armazenamento e

do custo do material de preenchimento dessa camada. O material granular (brita) apresentou maiores elevações de custos se comparado com o custo do serviço de escavação e do geotêxtil.

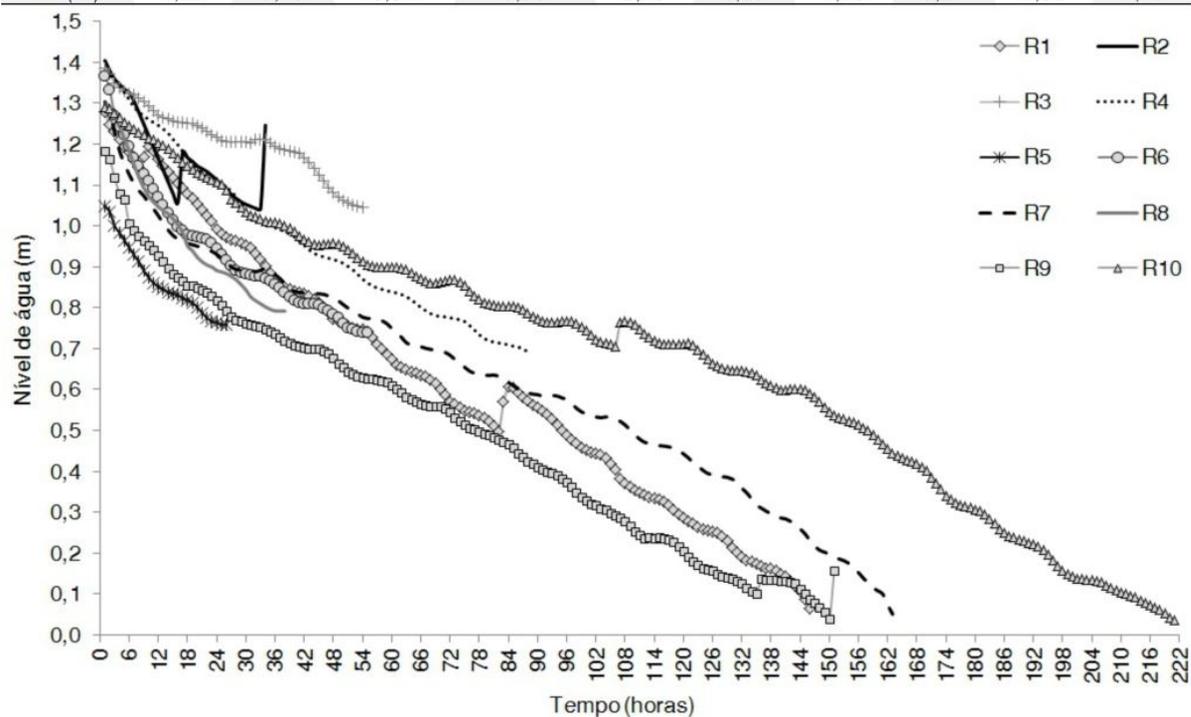
## 4.2 Modelagem Analítica - Bouwer (1969)

### 4.2.1 Descrição dos eventos de recessão

A escolha dos eventos de recessão resultou da análise do comportamento hidráulico da trincheira de infiltração realizada na primeira etapa de resultados (Análise hidráulica da trincheira de infiltração). O monitoramento foi realizado nos primeiros quatro meses de funcionamento do sistema - junho a setembro. O formato das curvas de recessão foi reflexo desse período de elevadas precipitações, resultando configurações distintas e com momentos de complexidade nas análises das curvas.

Alguns eventos apresentaram mais de um momento de recessão, sendo assim, esses períodos foram renomeados para facilitar a avaliação de cada trecho nesta etapa do trabalho como apresentado na Figura 4.18.

Recessão	R 1	R 2	R 3	R 4	R 5	R 6	R 7	R 8	R 9	R 10
Evento	E 1	E 2	E 2	E 2	E 3	E 3	E 3	E 4	E 4	E 5
Momento	3	3	5	7	1	3	5	2	4	4
$\Delta t$ (h)	147	34	54	88	26	55	163	38	151	221
$\Delta h$ (m)	1,22	0,16	0,34	0,68	0,29	0,63	1,25	0,51	1,03	1,25



**Figura 4.18:** Curvas de recessão da trincheira de infiltração.

As elevações de nível que ora interrompem o processo de recessão foram menosprezadas, propondo uma simplificação dos eventos de recessão ao considera-los contínuos. Segundo MOORE (1997), HAMMOND; HAN (2006) e COSTA; BACELLAR (2010), essas interferências são difíceis de serem consideradas na avaliação do movimento descendente, sendo geralmente menosprezadas.

### 4.2.2 Análise geral

A Figura 4.19 apresenta os ajustes do modelo de Bouwer aos dados observados para todos os 10 eventos de recessão do estudo.

Vale ressaltar que os dados observados (pontos) são resultados dos dados brutos trabalhados no método do OMOPSO. A distribuição dos valores médios das resistências hidráulicas, como realizado por EMERSON; WADZUK; TRAVER (2010), são apresentados na Figura 4.20.

Na Figura 4.19 são apresentados somente os gráficos de ajuste resultantes para  $P_{cr} = 0$ , visto que na comparação geral com os demais valores para  $P_{cr} (-0,5m; -0,75m; -1,00m)$ , o cálculo com o valor zero demonstrou o melhor ajuste.

Assim como realizado em SOUZA (2002), a primeira análise feita em relação ao ajuste do modelo de Bouwer aos dados observados foi o comportamento da concavidade da curva. A concavidade de todos os gráficos está posicionada para cima, representando a legitimidade no ajuste com a obtenção de valores positivos para  $R_{cb}$  e  $R_{cp}$ . Os valores de  $R_{cb}$  e  $R_{cp}$  calculados para cada evento são apresentados na Tabela 4.6.

**Tabela 4.6:** Parâmetros  $R_{cb}$  e  $R_{cp}$  gerados. Valores em horas.

	Pcr = 0,00 m		Pcr = -0,5 m		Pcr = -0,75 m		Pcr = -1,00 m	
	Rcb	Rcp	Rcb	Rcp	Rcb	Rcp	Rcb	Rcp
R1	401,09	238,62	479,72	448,51	594,89	594,37	618,09	617,20
R2	357,22	325,07	541,75	538,81	637,06	635,83	736,45	736,35
R3	583,39	583,38	753,13	753,11	800,24	800,22	816,81	816,78
R4	430,28	428,37	723,58	723,15	783,46	783,45	817,62	817,60
R5	217,41	214,17	370,09	369,06	441,92	438,54	529,57	521,81
R6	235,43	203,81	368,12	358,99	432,45	429,29	511,93	503,44
R7	277,52	183,62	363,83	332,00	415,40	412,44	489,52	487,99
R8	258,42	258,34	485,66	481,02	599,18	597,93	688,33	688,29
R9	250,03	154,69	382,61	312,25	442,90	397,39	552,26	460,94
R10	322,48	317,78	504,49	503,16	615,31	610,46	709,91	709,85

A tabela apresentou valores muito próximos para as resistências hidráulicas do fundo e das paredes em R10, R5, R4, R8 e R3, com uma diferença inferior a 5 horas entre os parâmetros. R2 e R6 mantiveram uma diferença média de 31,88 horas entre os parâmetros, R7 e R9 de 94,62 horas. R1 apresentou a maior discrepância entre os valores dos parâmetros, com aproximadamente 162 horas. Em todos os casos, a resistência da base obteve valor mais elevado, como encontrado em BARRAUD et al. (2013).

BARRAUD et al. (2013) afirmam que essa variabilidade nos valores das resistências hidráulicas pode ocorrer de um evento de precipitação para outro e pode ser explicada pela concentração de sólidos suspensos totais (SST) carregados para o sistema.

A Tabela 4.7 apresenta os valores dos parâmetros de resistência hidráulica, duração do evento e da carga hidráulica. A tabela considera somente  $P_{cr} = 0$ , por resultarem nos ajustes mais adequados a cada recessão. Essa tabela é referência para as seguintes análises: diferença entre

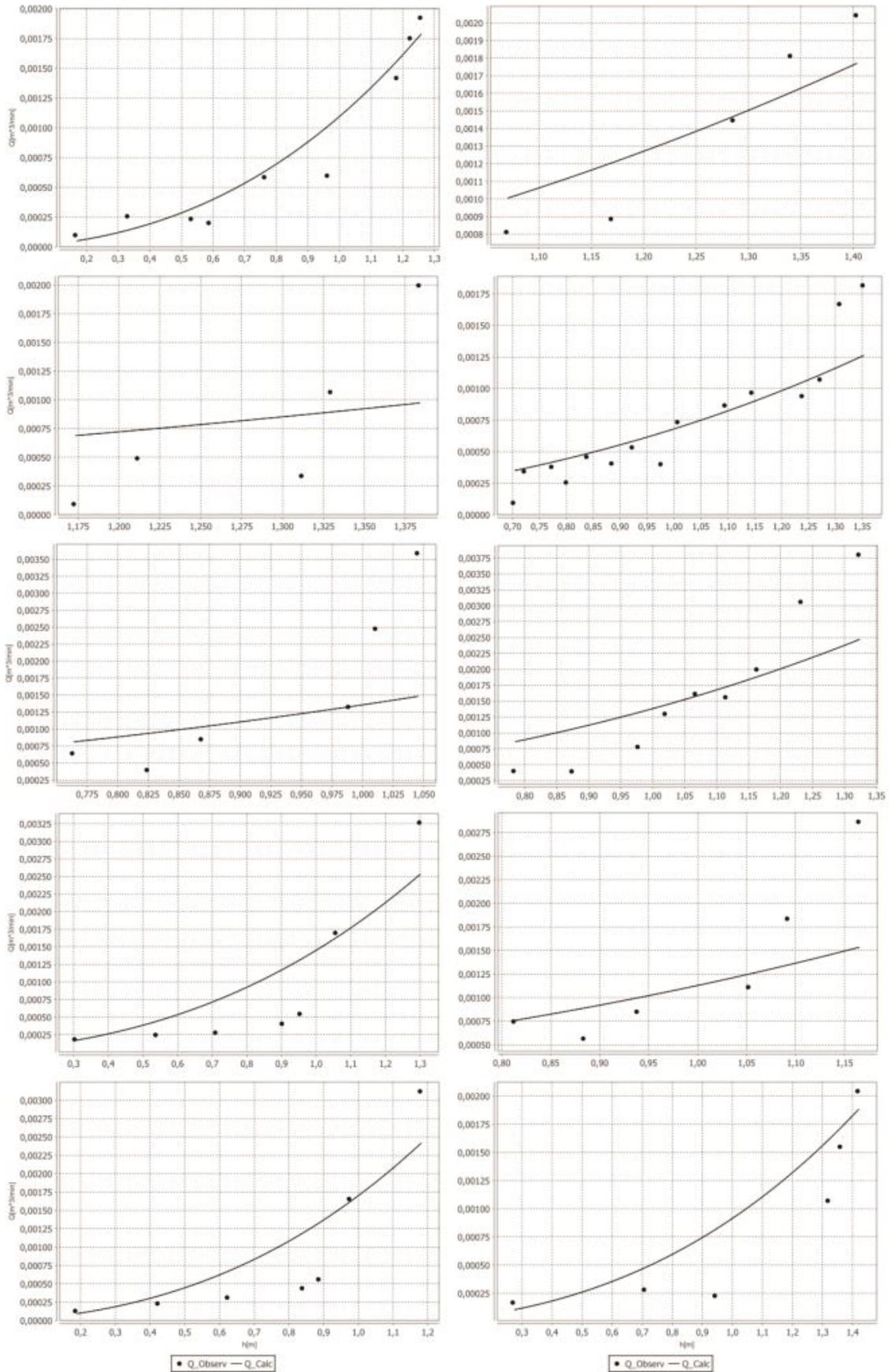
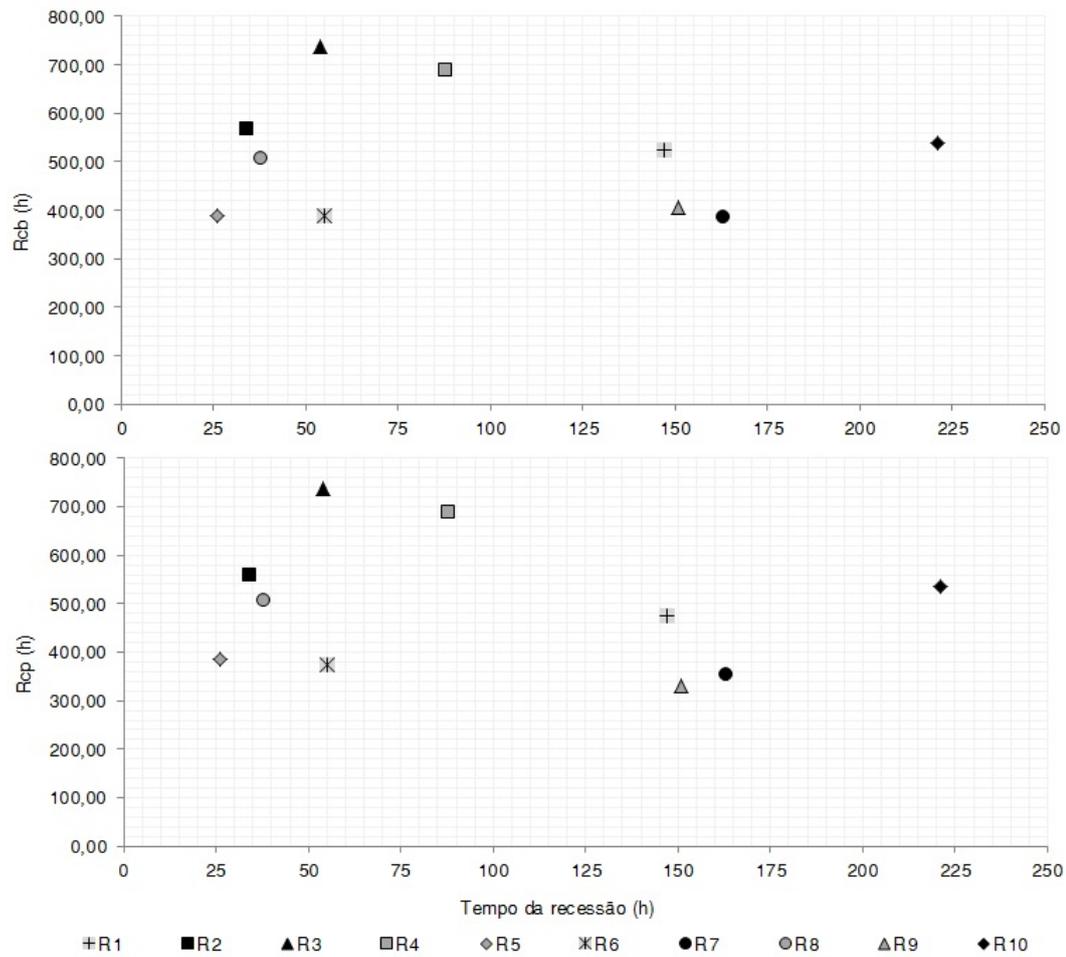


Figura 4.19: Ajustes do modelo de Bouwer aos dados observados.



**Figura 4.20:** Variação dos valores médios de  $R_{cb}$  e  $R_{cp}$ , respectivamente.

os valores de  $R_{cb}$  e  $R_{cp}$  para um mesmo evento; valores de  $R_{cb}$  e  $R_{cp}$  para um mesmo evento e; comportamento da curva de ajuste de Bouwer aos dados observados.

**Tabela 4.7:** Comportamento geral de cada evento de recessão após ajuste do modelo de Bouwer.

Evento	Parâmetros ( $h$ )		Duração do evento ( $h$ )	Carga hidráulica ( $m$ )		
	$R_{cb}$	$R_{cp}$		inicial	final	variação
R1	401,09	238,62	147	1,26	0,17	1,09
R2	357,22	325,07	34	1,40	1,07	0,33
R3	583,39	583,38	54	1,38	1,17	0,21
R4	430,28	428,37	88	1,35	0,70	0,65
R5	217,41	214,17	26	1,05	0,76	0,28
R6	235,43	203,81	55	1,32	0,79	0,54
R7	277,52	183,62	163	1,30	0,31	1,00
R8	258,42	258,34	38	1,17	0,81	0,35
R9	250,03	154,69	151	1,12	0,16	0,96
R10	322,48	317,78	221	1,42	0,28	1,15

Os valores de carga hidráulica se diferem dos informados na Figura 4.18, sendo aqui apresentados os valores após aplicação do método OMOPSO.

### 4.2.3 Análise detalhada

#### Diferença entre os valores de $R_{cb}$ e $R_{cp}$ para um mesmo evento

Iniciando a análise da diferença entre os valores de  $R_{cb}$  e  $R_{cp}$  para um mesmo evento, essa diferença é refletida no comportamento da curva. Quanto maior a diferença entre esses parâmetros, melhor é o ajuste gráfico do modelo de Bouwer aos dados observados, como em R1, R7 e R9. R10 apresentou comportamento gráfico similar a esses ajustes, porém possui uma diferença pequena entre os valores das resistências (Figura 4.19).

A diferença entre as resistências hidráulicas não apresenta relação com o valor da carga hidráulica inicial, final ou sua variação, como pode ser observado na comparação entre R1 e R10. Em ambos os eventos, os valores de variação da carga hidráulica são elevados e se equiparam, sendo 1,09 m em R1 e, 1,15 m em R2, e a diferença entre as resistências são de 162,47 e 4,70 horas, respectivamente.

O mesmo ocorre para pequenas variações de carga hidráulica, como em R5 e R8. R5 apresenta uma variação de 0,33 m e diferença entre os parâmetros de 32,14 horas, já R8 apresenta uma variação de 0,35 m e 0,08 horas de diferença. Apesar de não ser uma diferença muito discrepante se na comparação com a análise do parágrafo antecedente, ambos os tempos de recessão podem ser considerados curtos, mesmo com a diferença de mais de 30 horas entre os dois processos e com mesma variação de carga hidráulica deve ser considerada.

Neste aspecto, um evento de recessão foi considerado curto quando inferior a 72 h, valor adotado por DUCHENE; MCBEAN; THOMSON (1994) como o tempo máximo para o esvaziamento em uma trincheira de infiltração.

Ainda analisando essa diferença, ela não pode ser justificada pela duração do movimento de recessão. Ou seja, recessões com curtas durações, como em R2 e R8, podem ter valores próximos ou discrepantes entre parâmetros, do mesmo modo que em eventos com longa duração, a exemplos de R1 e R10.

Para valores onde  $R_{cb}$  supera  $R_{cp}$  (R1, R2, R6, R7 e R9), afirma-se que a infiltração pelas paredes prevaleceu, constatando um maior acúmulo de finos na base da trincheira de infiltração. Esse aspecto pode ser consequência da geometria retangular do sistema como também observado por SOUZA (2002).

A geometria retangular proporciona o contato da carga hidráulica com a área de infiltração horizontal em todo o processo de recessão e o potencial gravitacional intensifica o movimento vertical do fluxo de água. Diferentemente do que ocorre em relação às áreas de infiltração verticais, onde o contato com a carga hidráulica é variável durante o movimento descendente do nível de água e não há presença do potencial gravitacional para acentuar o movimento de infiltração horizontal.

Assim, em ocorrência do não esvaziamento total da água no interior do sistema, os sedimentos podem se acumular significativamente ao redor dos níveis mínimos de água e isso eventualmente altera a dinâmica de formação de uma camada colmatada (SIRIWARDENE;

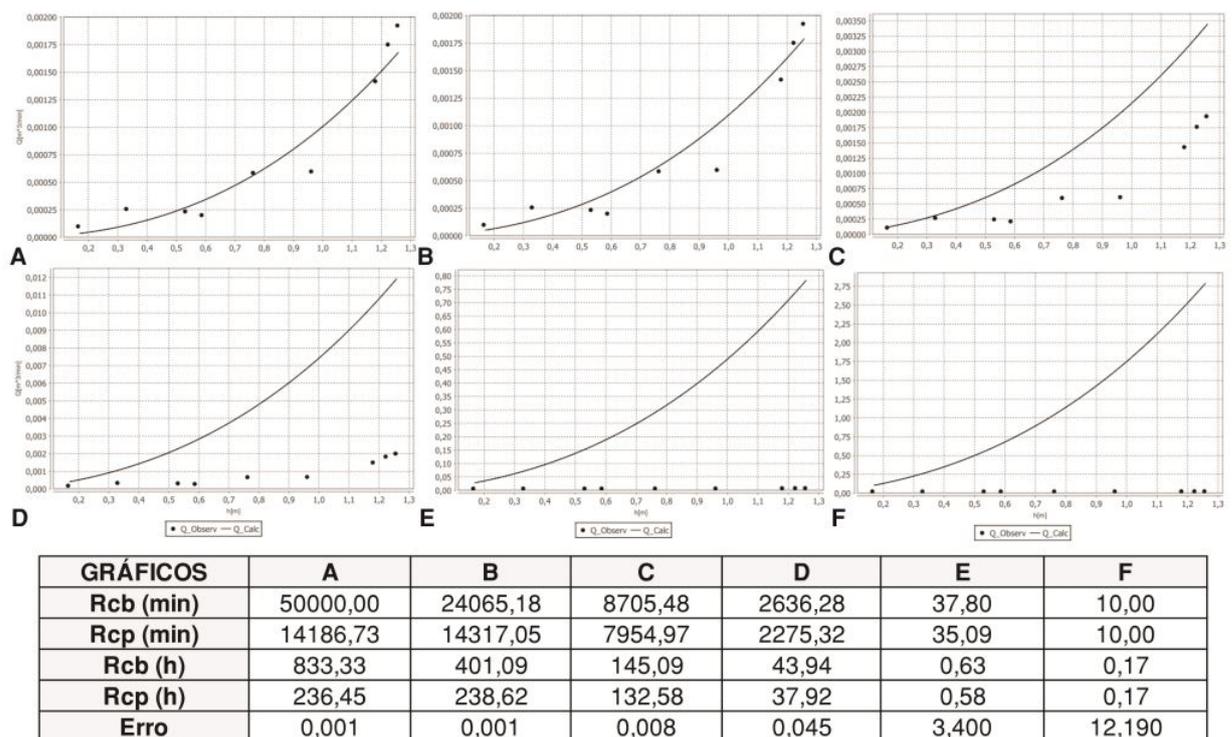
DELETIC; FLETCHER, 2007).

Já nos eventos onde os valores dos parâmetros foram semelhantes (R3, R8, R4, R5 e R10), pode-se considerar que não há uma área de infiltração dominante.

Apesar dessas considerações acerca da diferença entre os valores de  $R_{cb}$  e  $R_{cp}$ , é difícil afirmar com exatidão se houve uma maior infiltração através das paredes ou em ambas as áreas de infiltração (base e paredes) do experimento, visto que não houve monitoramento do perfil de umidade do solo neste estudo. Porém, uma boa análise com base no nível de água no interior da trincheira permitiu bons resultados neste estudo sobre a trincheira de infiltração, como realizado em EMERSON; WADZUK; TRAVER (2010).

### Valores de $R_{cb}$ e $R_{cp}$ para um mesmo evento

Através dos valores obtidos utilizando o Método OMOPSO, constatou-se que é importante considerar os próprios valores dos parâmetros e a compensação entre um e outro. A Figura 4.21 introduz essa questão.



**Figura 4.21:** Comparação entre os resultados de  $R_{cb}$ ,  $R_{cp}$  e os erros gerados pelo Método OMOPSO para R1 e considerando  $P_{cr} = 0$ .

Através da figura e dos dados de saída obtidos, neste caso para R1 e considerando  $P_{cr} = 0$ , pode-se afirmar que:

- Os valores obtidos para  $R_{cb}$  geralmente são superiores aos de  $R_{cp}$ ;
- A condição de valor máximo para a resistência hidráulica imposta para aplicação do método OMOPSO (50.000 minutos), alcança sempre o melhor ajuste;

- Quanto menor e mais equiparado o valor dos parâmetros, pior é o ajuste do modelo de Bouwer e maior é o valor do erro.

O mesmo comportamento anteriormente descrito foi observado para os demais eventos de recessão. Foi observado também que, quanto menor o valor de  $P_{cr}$ , maiores foram os valores de  $R_{cb}$  e  $R_{cp}$  obtidos e o erro ainda mais desfavorável.

Apesar das afirmativas descritas, os melhores ajustes sempre ocorreram para o valor máximo imposto para as resistências, houve neste trabalho um empenho em atingir valores de resistência menores, com ajustes razoáveis e com pequenos erros. Assim, os melhores ajustes de  $R_{cb}$  e  $R_{cp}$  para todos os casos de recessão foram apresentados na Tabela 4.6.

Análise de sensibilidade de  $R_{cb}$  e  $R_{cp}$  à curva de ajuste de Bouwer aos dados observados é apresentada na Figura 4.22. A análise foi feita para os valores obtidos em R1 e considerando  $P_{cr} = 0$ , resultado com melhor ajuste.

Na Figura 4.21, apesar dos valores dos parâmetros variarem para cada caso, há uma relação de proporcionalidade entre  $R_{cb}$  e  $R_{cp}$ , resultando em comportamentos idênticos das curvas, diferentemente do que ocorre na Figura 4.22.

Quando  $R_{cb}$  permanece fixo e os valores de  $R_{cp}$  são variáveis, a curva apresenta um comportamento de rotação em torno da menor vazão e carga hidráulica.

Quanto maior a porcentagem de variação em relação ao melhor ajuste de  $R_{cp}$  (1.4317,05 min) maior é a rotação, principalmente se o valor variar para menos, como no caso de  $-70\%$ . Nesse caso, o sentido da rotação é anti-horário e mais distante a curva fica dos dados observados, resultando em um pior ajuste. O oposto ocorre com a variação para mais: sentido horário e melhor ajuste, porém com movimento de rotação menos acentuado.

No caso de  $R_{cp}$  fixo, há uma tendência de deslocamento vertical da curva. Quanto maior a variação, mais acentuado é o deslocamento, principalmente se a variação for para menos. A porcentagem de variação de  $+70\%$  resultou um melhor resultado gráfico, ajustando-se melhor aos dados observados, porém em uma proporção inferior quando  $R_{cb}$  se mantém fixo.

Essas duas análises reforçam uma constatação feita anteriormente, que quanto maior os valores dos parâmetros, melhores são os ajustes do modelo de Bouwer aos dados observados.

Outro aspecto interessante observado é a relação entre a sensibilidade dos parâmetros e às variações de vazões de infiltração. Nota-se que os valores de vazões de infiltrações são maiores quando há uma diminuição nos valores das resistências, principalmente quando  $R_{cb}$  é fixo e há variabilidade para menos em  $R_{cp}$ .

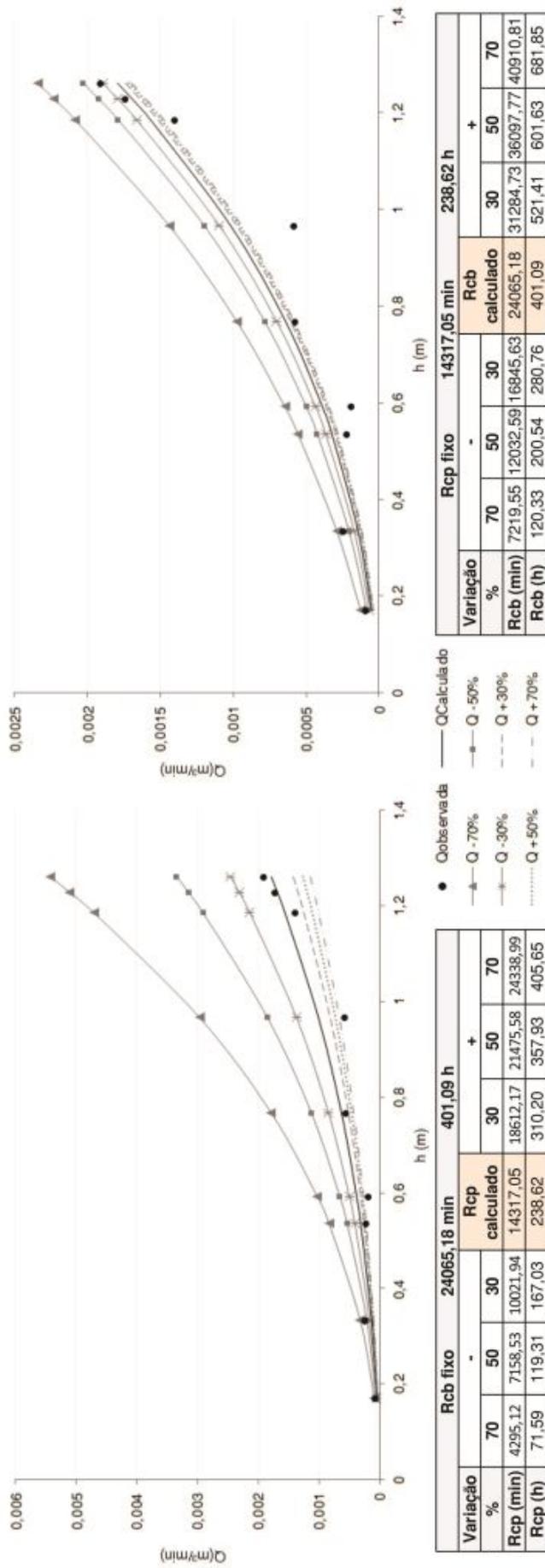


Figura 4.22: Análise de sensibilidade de  $R_{cb}$  e  $R_{cp}$  à curva de ajuste de Bouwer aos dados observados.

### Comportamento da curva de ajuste de Bouwer aos dados observados

O comportamento da curva de ajuste do modelo de Bouwer aos dados observados não possuem relação com os valores de  $R_{cb}$  e  $R_{cp}$  quando há proporcionalidade entre os valores (Figura 4.21), porém quando há uma sub ou superestimação de um dos parâmetros, o comportamento da curva é alterado (Figura 4.22).

Sendo assim, o comportamento da curva também é confrontado com as informações referentes à duração da recessão, à variação da carga hidráulica durante o evento e os valores de vazão e fluxo médio de infiltração. A Figura 4.19 e a Tabela 4.7 serão constantemente utilizadas para fazer as análises dessas relações.

Inicialmente, pode-se observar que o formato da curva de ajuste tem conexão direta e positiva com a duração do evento. Quanto maior o tempo do movimento de recessão, maior a quantidade de informações sobre o comportamento da carga hidráulica na trincheira de infiltração. Como consequência, o modelo de Bouwer acompanhou de maneira mais fiel o comportamento dos dados observados e se ajustou mais adequadamente, resultando numa curvatura com concavidade mais acentuada.

Esse comportamento pode ser observado em R1, R9, R7 e R10, os quais tiveram as durações mais longas e os melhores ajustes, sendo de 147 h, 151, 163 h e 221 h, respectivamente. O contrário pode ser observado nas demais recessões. À medida que há uma diminuição na duração dos eventos os ajustes são mais difíceis e não apresentam bons resultados, como em R4 - 88 h, R6 - 55 h, R3 - 54 h, R8 - 38 h, R2 - 34 h e R5 - 26 h.

No que tange à variação de carga hidráulica, quanto maior a variação de carga hidráulica, melhor é o ajuste. Para pequenas variações, a curva não consegue obter um formato côncavo, mesmo que suavemente, resultando em um comportamento próximo ao linear.

Mesmo que o valor inicial do nível de um determinado evento seja maior que outro, o que vai importar é de quanto foi a diferença do valor inicial para o final. Esse fato pode ser respondido quando se comparam R2 e R9. R2 apresenta um nível de água inicial de 1,40 m, sendo superior ao de R9 com 1,12 m. Porém, a variação de carga ocorrida em R2 (0,33 m) foi bem inferior a de R9 (0,96 m), refletindo um ajuste de melhor representatividade em R9.

SIRIWARDENE; DELETIC; FLETCHER (2007) sugerem que, se possível, os sistemas de infiltração operem com o mínimo de carga hidráulica constante sobre a base, a fim de prolongar sua vida útil. Ou seja, quanto maior a variabilidade na carga hidráulica maior pode ser a probabilidade de uma distribuição mais uniforme de sedimentos carreados em todo o sistema (base e paredes), minimizando uma maior deposição desses na base da estrutura.

A vazão e o fluxo de infiltração são diretamente proporcionais ao valor da carga hidráulica. Mesmo havendo a presença de uma camada colmatada, a relação entre essas variáveis ainda é válida (BOUWER, 2002).

Vale ressaltar que os valores de carga hidráulica apresentados na modelagem analítica são resultados dos dados reais observados, os quais foram derivados e interpolados, a fim de

minimizar os erros existentes nas informações brutas. Cada evento de recessão foi processado individualmente, como descrito na etapa metodológica.

Sendo assim, os valores referentes às cargas hidráulicas e seus respectivos valores de vazão e fluxo de infiltração apresentados na Tabela 4.7, não se adequam à realidade exposta acima sobre a proporcionalidade entre as variáveis. Isso, pois em cada caso, os intervalos utilizados nas interpolações foram diferentes, consequentemente a variação de tempo para o cálculo de cada vazão não foi uniforme no mesmo evento e entre todos.

Dessa maneira, uma relação entre o comportamento da curva de ajuste com os valores de vazão e fluxo de infiltração não pode ser realizada. Porém, em um mesmo evento, pode-se fazer uma conexão entre os valores de vazão e fluxo com os parâmetros  $R_{cb}$  e  $R_{cp}$ .

Observando novamente a Figura 4.21, a vazão tem um comportamento inverso ao dos parâmetros, aumentando consideravelmente com a diminuição das resistências hidráulicas. Esse comportamento traduz um movimento contínuo e rápido da vazão e fluxo de infiltração quanto menor for a obstrução nas áreas de infiltração.

R1 apresentou o melhor ajuste dentre todas as recessões analisadas, mesmo sem ser o evento mais longo (147 h) ou o de maior variação de carga hidráulica (1,09 m). R1 foi a única recessão extraída de um dos eventos analisados na sessão anterior deste trabalho (E1), em que as condições iniciais de umidade eram de solo seco (E1), o que pode ter contribuído para o melhor resultado entre todos os ajustes.

#### 4.2.4 Validação do modelo

A análise do coeficiente de massa residual (CMR) é apresentada na Figura 4.23, refletindo a superestimativa ou subestimativa dos valores calculados pelo método de Bouwer em relação aos observados. Nota-se a superestimativa dos valores em todos os casos, refletida na maioria dos pontos locados acima da reta.

Em relação ao RD (razão de desvios), quanto mais próximo o valor da unidade maior é a igualdade entre os valores observados e calculados. Os valores que mais se aproximam ao ótimo foram encontrados em R10 e R1, com 1,02 e 1,06, respectivamente. Em seguida, os eventos R9 e R7 apresentaram valores próximos a um e, R3 o valor mais distante, confirmando-o como a recessão com o pior ajuste.

No que tange ao coeficiente de determinação  $R^2$ , o valor mais próximo da unidade foi verificado em R1 (Tabela 4.8). Em todos os casos,  $P_{cr} = 0$  apresentou melhores valores e, quanto menor o valor de  $P_{cr}$  mais distante da unidade eram os valores do coeficiente.

**Tabela 4.8:** Valores do coeficiente de determinação, considerando  $P_{cr} = 0$ .

R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
0,93	0,78	0,23	0,79	0,24	0,66	0,74	0,45	0,69	0,75

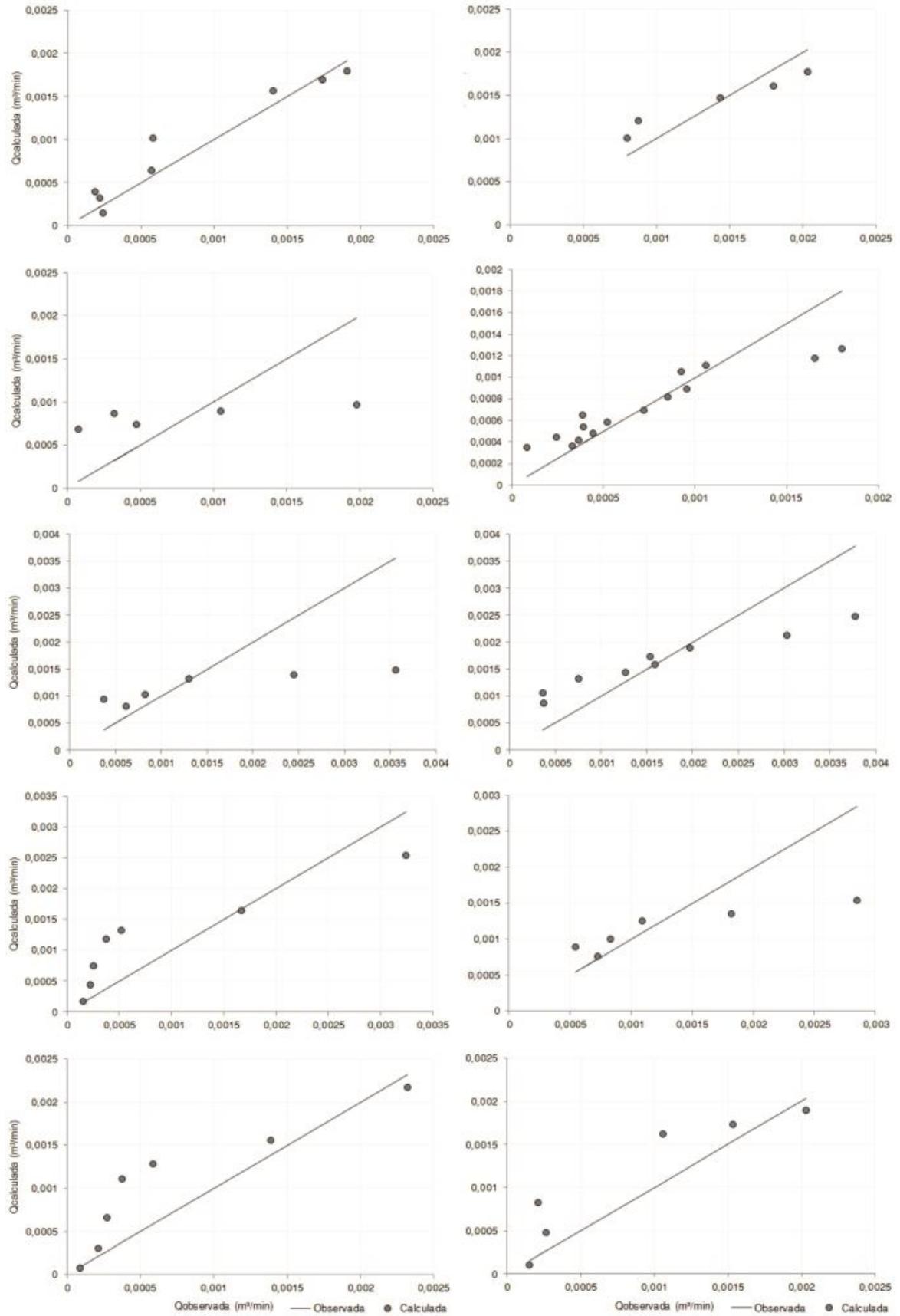


Figura 4.23: Análise do coeficiente de massa residual para  $P_{cr} = 0$ .

### 4.2.5 Comentários Finais

Os valores de  $R_{cb}$  geralmente são superiores aos de  $R_{cp}$ , onde o comportamento da curva apresentou melhores ajustes gráficos do modelo de Bouwer aos dados observados quanto maior a diferença entre essas resistências, com exceção de R10.

Ao tentar interligar os valores das resistências hidráulicas às características iniciais do evento, como carga hidráulica e duração do evento, não há relação desses parâmetros com a diferença entre os valores encontrados para as resistências hidráulicas.

Essa diferença entre os parâmetros, ora próxima e ora discrepante, não oferece uma resposta concreta sobre a prevalência de uma área de infiltração, se pela base ou paredes ou ambas as áreas. A ausência de monitoramento do perfil de umidade ou potencial matricial do solo adjacente ao sistema, bloqueiou a possibilidade de uma possível comparação entre esses valores resultantes da modelagem analítica e dados reais adquiridos por algum equipamento de monitoramento.

Constatou-se que a diferença entre os valores das resistências não é importante, mas sim o valor de cada parâmetro. Ou seja, quanto maior o valor dos parâmetros, melhor é o ajuste de Bouwer. E, em todos os ajustes, os melhores resultados convergiram para um valor de  $R_{cb}$  igual ao limite máximo de 50.000 minutos.

As características de variação de carga hidráulica e duração do evento de recessão refletem no comportamento da curva. Essa relação mostra que, quanto maiores esses valores, maior é a concavidade da curva de ajuste, retratando em um melhor ajuste.

No que tange à aplicação do OMOPSO, os valores refletem a eficácia da metodologia, minimizando as funções objetivas propostas para aplicação do Método de Bouwer. Para as opções resultantes em cada otimização, os valores dos erros são mínimos na variação de uma opção ou outra e os valores dos parâmetros próximos entre si.

O Modelo de Bouwer tem uma formulação matemática um pouco particular, o que impediu que os dados simulados se ajustassem com excelência aos dados observados durante cada evento. Essa particularidade pode estar relacionada com os seguintes fatores:

- Ao tipo de solo para qual o modelo foi desenvolvido, solo arenoso (BOUWER, 1969), proporcionando uma limitação quando aplicado pra outros tipos de solos, como neste caso com camadas de solo franco arenoso e franco argilo-arenoso.
- Considerar  $P_{cr} = P$  e não variável espacialmente durante o processo de recessão, o que de fato não é. Isso foi uma forma de simplificar a variação da pressão intersticial na equação do modelo, como realizado por SOUZA (2002), já que neste trabalho não houve monitoramento do comportamento do perfil de umidade;
- O modelo não leva em consideração a variação do potencial matricial e da distribuição de umidade durante a dinâmica de armazenamento, infiltração e redistribuição da água ao longo do perfil de solo.

- O modelo se ajusta melhor a grandes variações de cargas hidráulicas. Porém, este trabalho não apresentou uma resposta quanto ao limite de variação da carga hidráulica para um ajuste de médio a bom;
- A trincheira de infiltração deste estudo apresenta uma altura de 1,50 m para a camada de armazenamento, sendo superior a média de 0,80 m adotada na literatura. Esse fato pode ter proporcionado alterações no movimento de drenagem na camada de armazenamento, na interação sistema - solo natural e na própria redistribuição da água no solo do entorno, como caminhos preferenciais, o que pode justificar valores elevados para as resistências hidráulicas;
- O Modelo de Bouwer (1969) não considera a heterogeneidade do solo na modelagem;
- Simplificar os eventos de recessão considerando-os contínuos e sem as interferências pluviométricas. Essas interferências são difíceis de serem consideradas na avaliação do movimento descendente, sendo, geralmente, menosprezadas (MOORE, 1997; HAMMOND; HAN, 2006 e COSTA; BACELLAR, 2010).

As análises de sensibilidade mostraram os melhores resultados para R1 considerando  $P_{cr} = 0$ , e quanto menor a pressão, piores foram os valores de  $RCM$ ,  $RD$  e  $R^2$ .

## 4.3 Modelagem Numérica - Hydrus 2D

### 4.3.1 Análise da malha para simulações

O tamanho da malha adotada para a modelagem foi determinada entre 10 e 5 cm. Foi escolhida a malha de 7 cm por apresentar desempenho similar a de 10 cm e um tempo de modelagem mais curto se comparado as malhas de 6 e 5 cm (Figura 4.24). Sendo assim, foi adotada uma malha triangular de 7 cm, discretizada em 27.778 elemento finitos, sendo 409 elementos unidimensionais e 27.369 elementos bidimensionais (Figura 4.25).

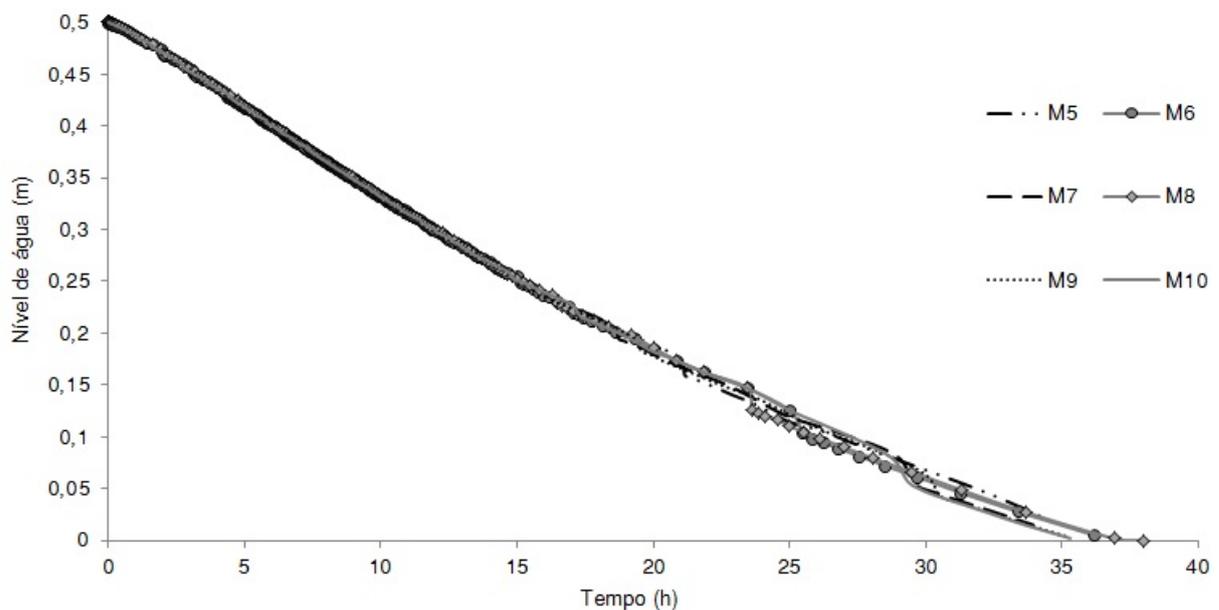


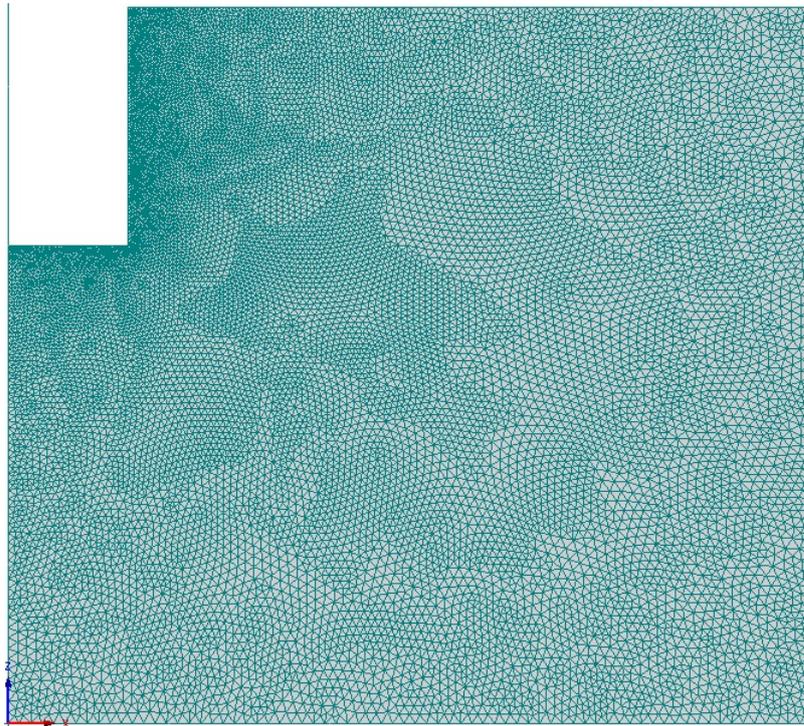
Figura 4.24: Análise da malha para modelagem no Hydrus 2D.

### 4.3.2 Estratégia de modelagem

Na 1ª etapa foram determinadas os parâmetros hidráulicos e de forma para 12 tipos de solos, a partir da base de dados do Rosetta / Hydrus. A Tabela 4.9 apresenta os tipos de solo e seus respectivos parâmetros gerados pelo modelo numérico.

Na 2ª etapa, os parâmetros das resistências hidráulicas da base ( $R_{cb}$ ) e das paredes ( $R_{cp}$ ) para cada solo são apresentados na Tabela 4.10. Nota-se uma tendência à igualdade entre os parâmetros  $R_{cb}$  e  $R_{cp}$  independente da carga hidráulica inicial ou da condição de potencial matricial adotadas.

Os solos de composição siltosa (9, 11 e 12) apresentaram os menores valores de  $R_{cb}$  e  $R_{cp}$  se comparado aos demais solos, para a carga hidráulica de 50 cm e ambas condições de potencial matricial. O solo 10 não apresenta a mesma tendência de menores valores para as resistências hidráulicas, sendo considerado uma exceção desse grupo siltoso, possivelmente por apresentar uma maior porcentagem de argila em sua composição.



**Figura 4.25:** Malha de elementos finitos de 7 cm.

**Tabela 4.9:** Parâmetros da curva de retenção e de condutividade hidráulica gerados pelo Rosetta/Hydrus para 12 tipos de solo.

Fonte: SIMUNEK; VAN GENUCHTEN; SEJNA (2012).

	Tipo de solo	Parâmetros Hydrus/Rosetta*				
		$\theta_r(cm^3/cm^3)$	$\theta_s(cm^3/cm^3)$	$\alpha(cm^{-1})$	$n$	$K_s(cm/h)$
1	Argiloso	0,98	0,46	0,02	1,25	0,61
2	Franco argiloso	0,08	0,44	0,02	1,41	0,34
3	Franco	0,06	0,40	0,01	1,47	0,50
4	Franco arenoso	0,05	0,39	0,03	1,75	4,38
5	Arenoso	0,05	0,37	0,04	3,18	26,79
6	Argilo arenoso	0,12	0,39	0,03	1,21	0,47
7	Franco argiloso arenoso	0,06	0,38	0,21	1,33	0,55
8	Areia franca	0,04	0,39	0,27	1,45	1,59
9	Siltoso	0,05	0,49	0,01	1,68	1,82
10	Argilo siltoso	0,11	0,48	0,02	1,32	0,40
11	Franco argilo siltoso	0,09	0,48	0,01	1,52	0,46
12	Franco siltoso	0,06	0,44	0,01	1,66	0,76

\*Os parâmetros são os mesmos para  $\Psi = -1cmH_2O$  e  $\Psi = -100cmH_2O$ .

**Tabela 4.10:** Parâmetros de resistência hidráulica do modelo de Bouwer para 12 tipos de solo.

Potencial matricial	$\Psi = -1cmH_2O$						$\Psi = -100cmH_2O$					
	50cm		80cm		100cm		50cm		80cm		100cm	
Carga hidráulica	$R_{cb}$	$R_{cp}$	$R_{cb}$	$R_{cp}$	$R_{cb}$	$R_{cp}$	$R_{cb}$	$R_{cp}$	$R_{cb}$	$R_{cp}$	$R_{cb}$	$R_{cp}$
Resistência hidráulica	$R_{cb}$	$R_{cp}$	$R_{cb}$	$R_{cp}$	$R_{cb}$	$R_{cp}$	$R_{cb}$	$R_{cp}$	$R_{cb}$	$R_{cp}$	$R_{cb}$	$R_{cp}$
1 Argiloso	84,50	45,41	52,92	52,92	10,40	10,40	20,18	20,18	19,43	19,41	12,35	12,34
2 Franco argiloso	24,79	24,76	16,56	16,56	4,43	4,43	5,23	5,23	5,10	5,09	4,10	4,24
3 Franco	12,20	11,92	11,55	11,55	3,10	3,10	1,89	1,87	3,66	3,66	3,01	3,01
4 Franco arenoso	9,37	8,09	8,79	8,77	3,84	3,84	7,44	7,43	6,69	6,69	2,63	2,63
5 Areia	2,95	2,95	1,25	1,25	0,73	0,73	6,06	6,04	5,27	5,26	1,41	1,41
6 Argilo arenoso	6,23	5,35	16,03	16,03	14,08	14,08	3,04	3,03	2,97	2,97	2,91	2,91
7 Franco argiloso	3,14	2,82	7,55	7,54	6,60	6,60	1,57	1,57	5,73	5,73	8,37	8,36
8 Areia franca	2,33	2,33	4,82	4,82	4,23	4,23	1,64	1,63	2,46	2,46	3,49	4,84
9 Siltoso	0,60	0,60	1,34	1,34	1,04	1,04	0,68	0,68	0,69	0,69	1,27	1,27
10 Argilo siltoso	3,46	3,42	9,36	9,36	6,42	6,41	2,47	2,46	3,92	3,91	7,86	7,86
11 Franco argilo siltoso	0,82	0,82	4,19	4,19	2,32	2,32	1,01	1,01	1,01	1,01	3,13	3,13
12 Franco siltoso	0,74	0,74	1,38	1,38	2,24	2,26	0,95	0,95	1,01	1,01	2,45	2,45

Assim, pode-se dizer que os solos de composição siltosa, com exceção do argilo siltoso, possuem uma relação direta com pequenas variações de carga hidráulica, ou seja, quanto menor a variação menor são os valores de  $R_{cb}$  e  $R_{cp}$ .

O solo argiloso, 1, apresentou maiores valores de resistências hidráulicas para todas as cargas hidráulicas e nas duas condições de potencial matricial se comparado aos demais solos. É interessante observar a tendência decrescente dos valores de  $R_{cb}$  e  $R_{cp}$  quando há um aumento da carga hidráulica, mostrando uma relação inversa entre a variação de carga hidráulica e os valores de  $R_{cb}$  e  $R_{cp}$ . Esse mesmo comportamento foi observado no solo franco argiloso, 2.

Com a elevação da carga hidráulica e o aumento da pressão existe a hipótese da ocorrência da reativação dos espaços dos poros do solo argiloso que apresentam uma efetiva conectividade hidráulica, justificando assim a diminuição dos valores das resistências hidráulicas com o aumento proporcional da carga hidráulica. Esse comportamento é de se esperar, devido ao baixo valor da condutividade hidráulica saturada da argila.

Esse decréscimo dos valores das resistências hidráulicas em detrimento do aumento da carga hidráulica para  $\Psi = -1cmH_2O$  e  $\Psi = -100cmH_2O$ , também foi verificado no solo arenoso, 5. Esse solo possui uma condutividade hidráulica, na ordem de 26,79 cm/h, e a ação da carga hidráulica potencializou a redistribuição de água no solo.

Para os demais solos - 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12, não foram observadas tendências de diminuição dos valores das resistências hidráulicas com o aumento da carga hidráulica nas duas condições de potencial matricial. Os parâmetros  $R_{cb}$  e  $R_{cp}$  desses solos ora aumentaram, ora diminuíram com a carga hidráulica.

Em relação a 3º etapa da modelagem, relação dos parâmetros analíticos  $R_{cb}$  e  $R_{cp}$  com os parâmetros numéricos  $K_s$ ,  $\alpha$  e  $n$ , não foram observadas relações diretas entre eles. Com ressalva para os solos de composição siltosa - 9, 10 e 11, os quais mostraram, para uma carga de 50 cm, os menores valores dos parâmetros de resistência hidráulica e do  $\alpha$  no estudo.

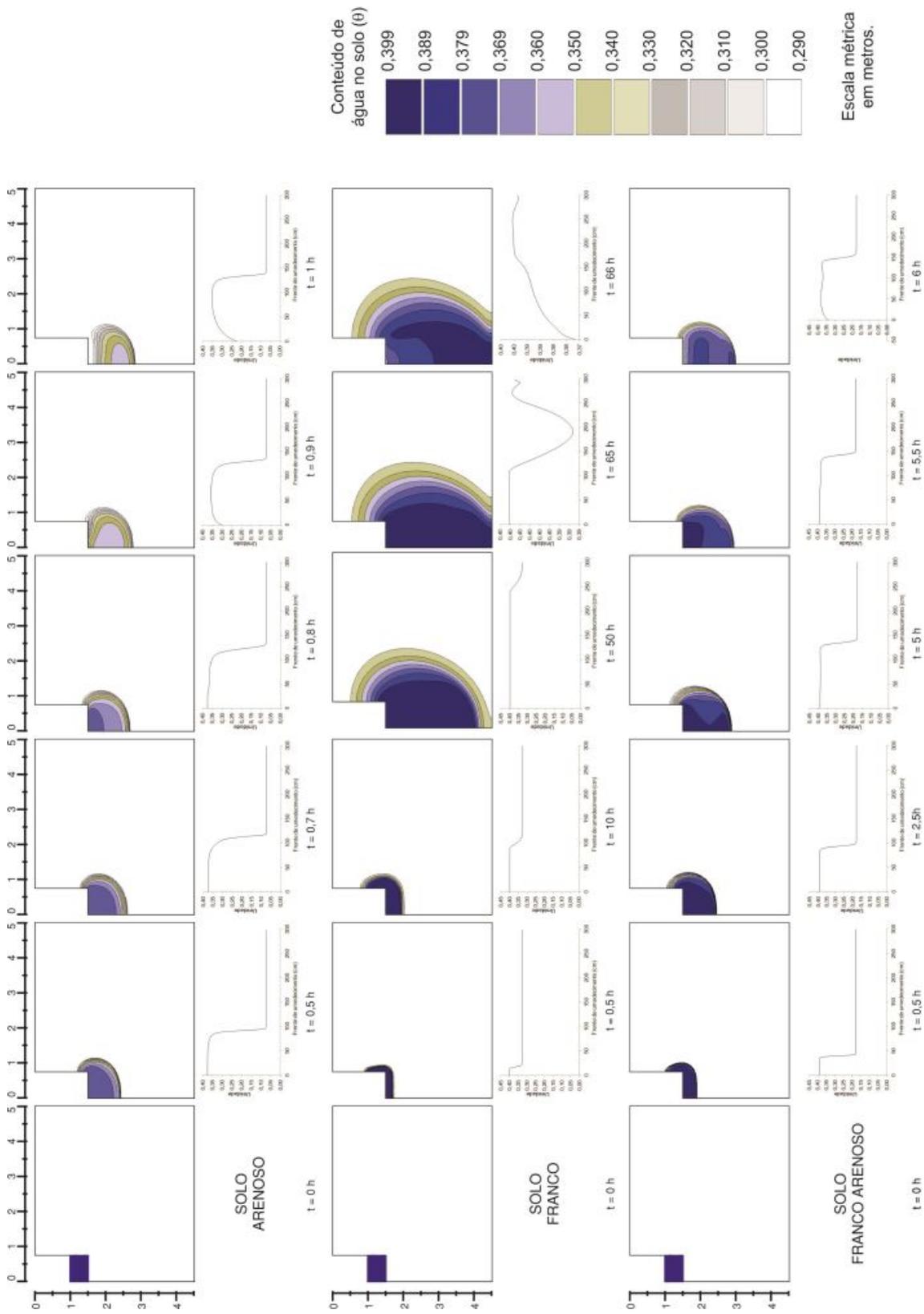
### 4.3.3 Estudo da frente de umedecimento

As cartas e perfis do comportamento da frente de umedecimento são apresentados para os solos arenoso (Figuras 4.26, 4.27), franco (4.28, 4.29) e franco arenoso (4.30 e 4.31). Ressalta-se que, os três solos foram simulados para cargas hidráulicas de 50, 80 e 150 cm e em condições de potenciais matriciais de  $-1cmH_2O$  e  $-100cmH_2O$ .

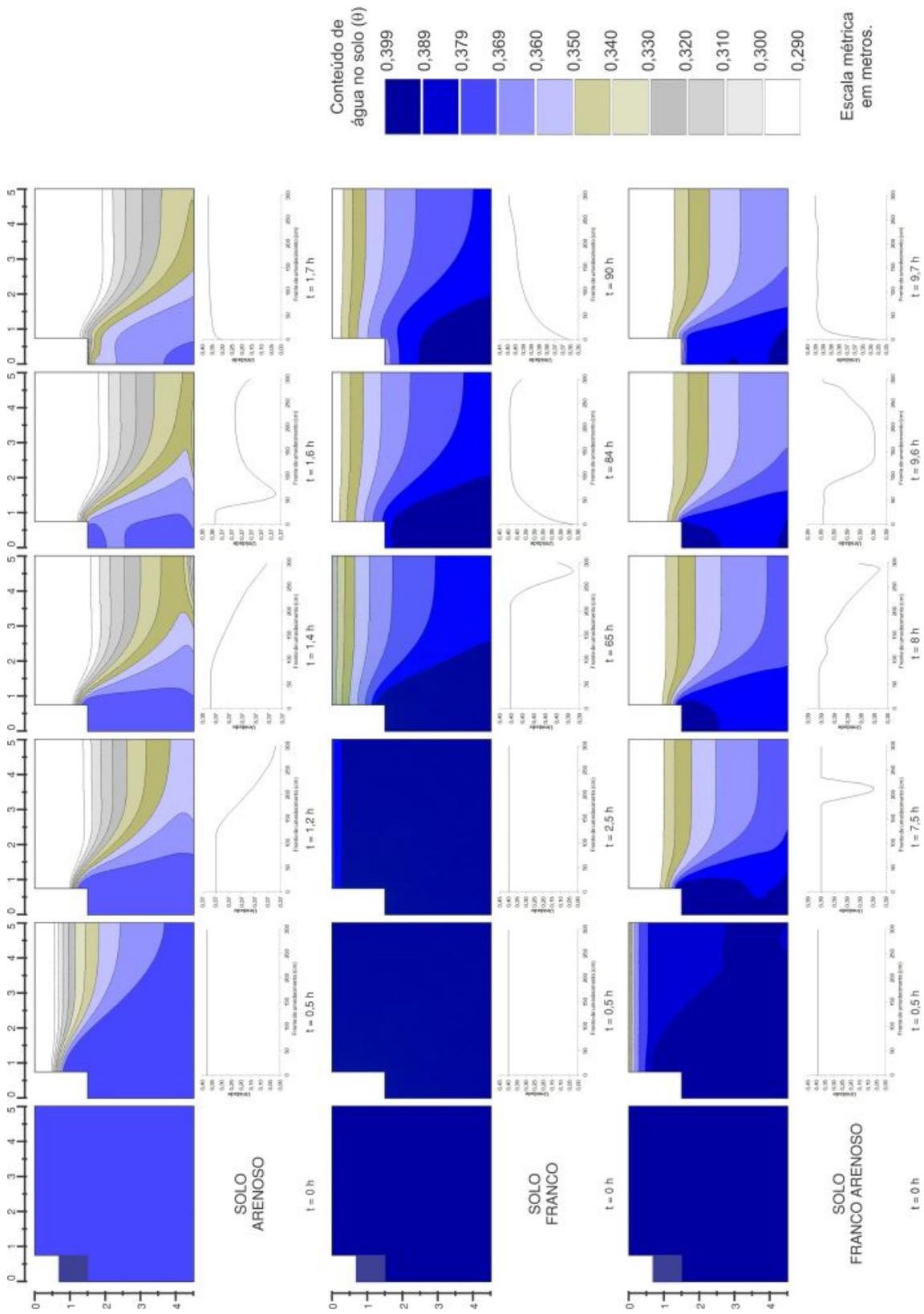
Devido as variações dos tempos de simulações, chegando até 150 h nos solos francos, as cartas de umidades apresentadas foram extraídas do comportamento total da frente de molhamento, representando os momentos mais importantes de cada caso.

Em uma primeira análise geral sobre as cartas de umidade, pode-se observar que, em todos os casos, o solo franco demandou maior tempo de simulação para que toda ou grande parte da carga hidráulica se redistribuísse no solo e o mesmo iniciasse um retorno às condições de saturação. Isso ocorreu tanto nas duas condições de potencial matricial.

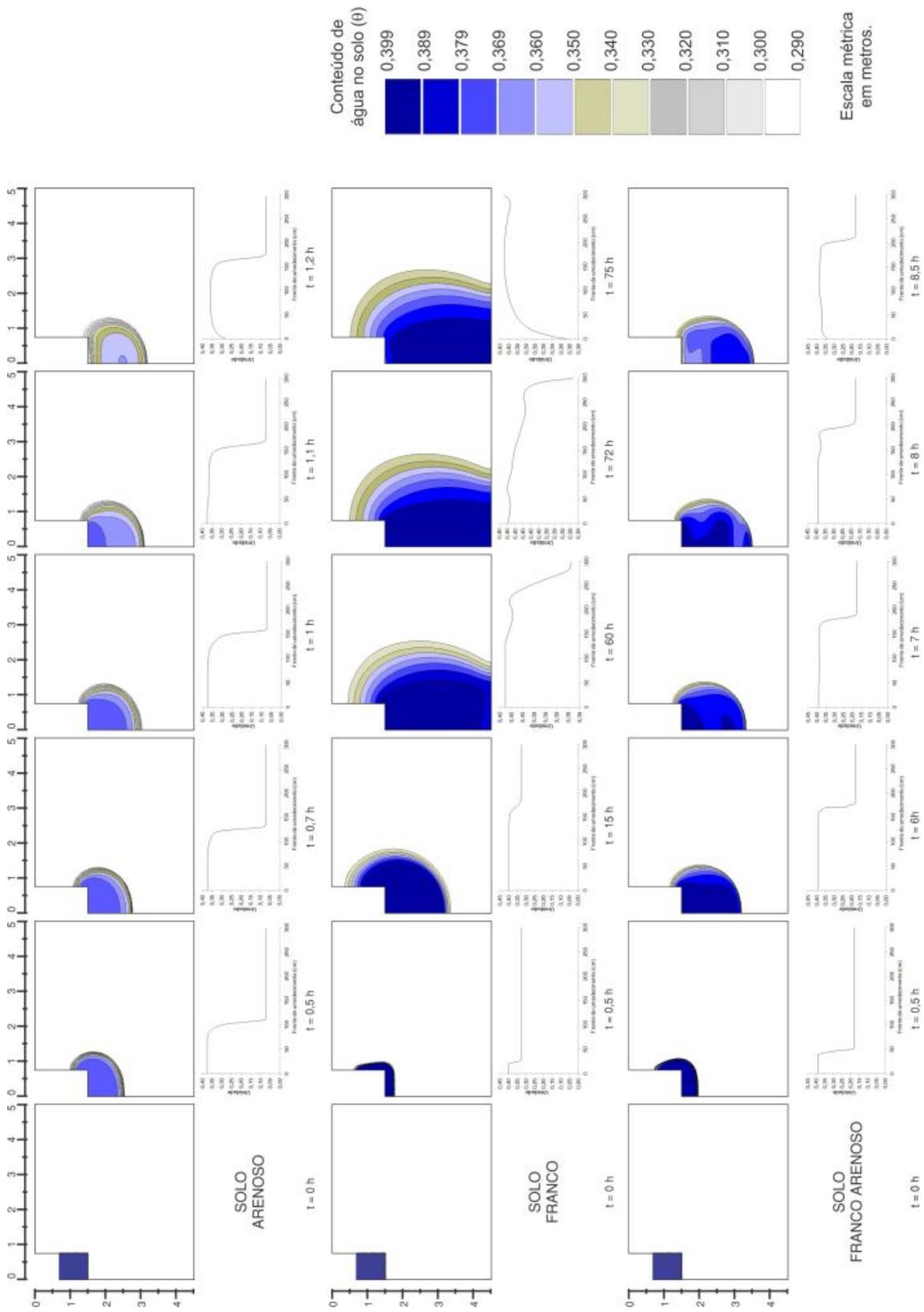




**Figura 4.27:** Comportamento da frente de molhamento e perfil de umidade para uma carga hidráulica de 50 cm e potencial matricial de  $-100 \text{ cm H}_2\text{O}$ .

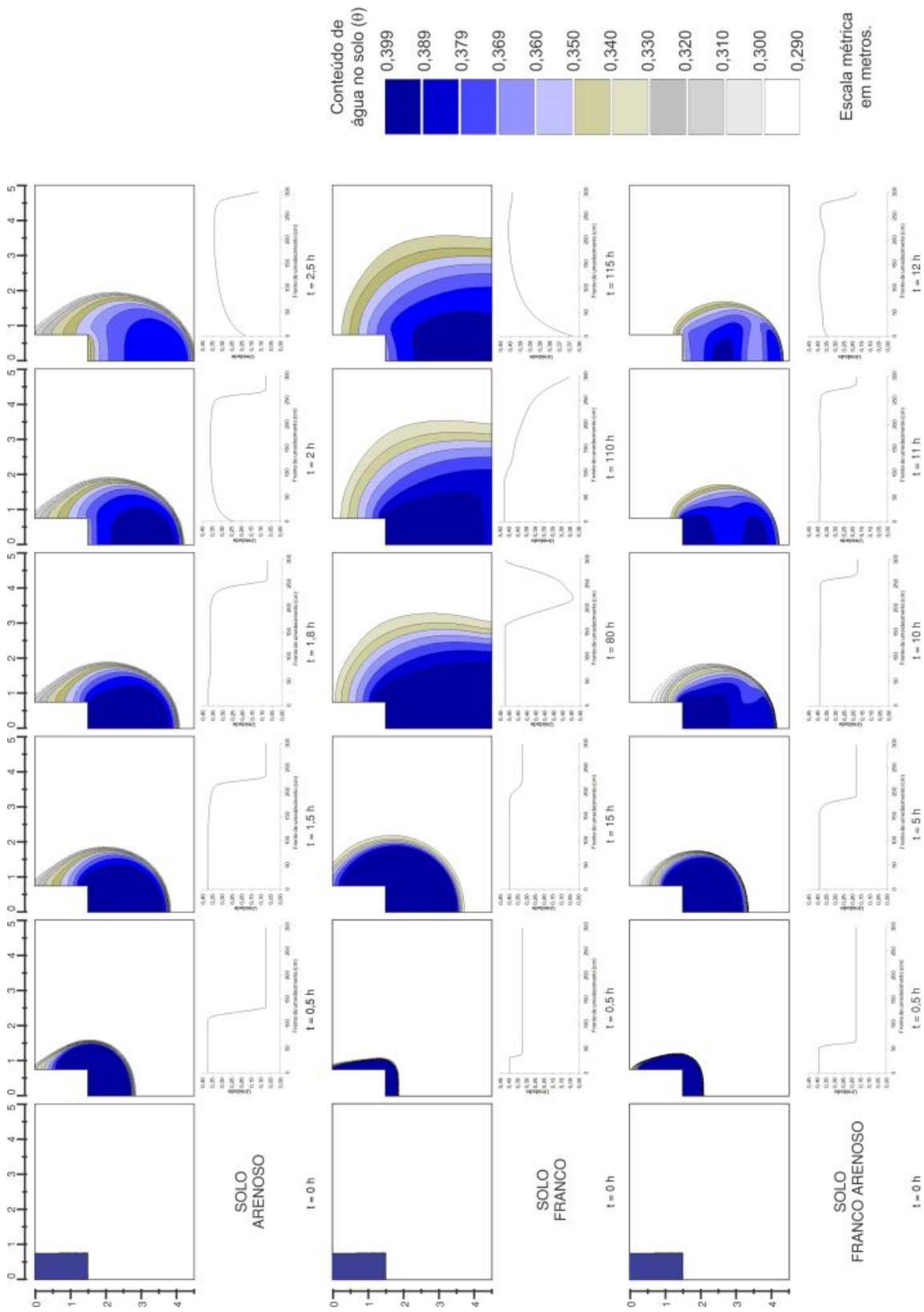


**Figura 4.28:** Comportamento da frente de molhamento e perfil de umidade para uma carga hidráulica de 80 cm e potencial matricial de  $-1\text{ cmH}_2\text{O}$ .



**Figura 4.29:** Comportamento da frente de molhamento e perfil de umidade para uma carga hidráulica de 80 cm e potencial matricial de  $-100\text{cmH}_2\text{O}$ .





**Figura 4.31:** Comportamento da frente de molhamento e perfil de umidade para uma carga hidráulica de 150 cm e potencial matricial de  $-100\text{cmH}_2\text{O}$ .

A composição textural do solo franco, com maiores porcentagens de argila e silte se comparados aos solos arenosos e franco arenoso, determinou esse aumento do tempo de simulação.

O oposto ocorre no solo arenoso em todos os casos. À medida que há uma diminuição da carga hidráulica simulada, mais rápido foi o processo de umedecimento e menor o tempo de simulação, ficando entre 0,8 e 0,9 h para uma carga hidráulica de 50 cm. Nota-se também que, na comparação entre os dois potenciais, o processo de umedecimento ocorreu mais intensamente na condição de potencial matricial de  $-100\text{cmH}_2\text{O}$ , ou seja, em uma condição de solo mais seco que  $-1\text{cmH}_2\text{O}$ .

Para o solo franco arenoso, pode-se considerar que ele apresenta uma frente de umedecimento de comportamento médio dos solos arenoso e franco. Ele não demanda do tempo máximo de simulação para toda a redistribuição da água no solo, 150 h, como também não ocorre rapidamente como no solo arenoso.

Em todos os casos, a carta e perfil de umidade no tempo 0,5 h está presente. Isso possibilitou uma análise do comportamento da frente de umedecimento nos primeiros momentos da trincheira de infiltração nas duas condições de potencial matricial. Nas condições de solo seco é visível o comportamento rápido da frente de umedecimento em todos os solos, com ênfase para o solo arenoso e um movimento mais vertical do fluxo de água.

Já nas condições de saturação para o tempo de 0,5 h, o solo franco permaneceu praticamente constante, não sendo observadas alterações representativas nas condições do solo e da redistribuição da água da trincheira de infiltração para o solo, como nos solos arenoso e franco arenoso. O solo arenoso apresentou rápida resiliência à condição de não saturação, mesmo quando a carga hidráulica simulada foi a máxima, 150 cm.

Ainda analisando de maneira geral as cartas de umidade, para uma condição de potencial matricial de  $-100\text{cmH}_2\text{O}$ , observa-se que o solo franco apresenta uma forte tendência de dispersão lateral da frente de umedecimento, diferente de um comportamento mais vertical presente nos solos arenoso e franco arenoso. Essa situação pode não ser observada em algumas cartas nos nas primeiras horas de simulação (0,5 h), porém ao acompanhar todo fluxo até o último tempo, é possível atentar a essa tendência de dispersão lateral da frente de umedecimento.

Após essa constatação, mostrou-se relevante mensurar o alcance dessa frente de umedecimento nos sentidos vertical e lateral. A Tabela 4.11 fornece esses valores para os três solos, as três cargas hidráulicas, considerando  $\Psi = -100\text{cmH}_2\text{O}$  e para os tempos de 0,5 h e de alcance máximo em cada solo.

Constata-se na Tabela 4.11, considerando  $t = 0,5$  h, que a frente de umedecimento do solo arenoso é maior do que os demais solos, alcançando um comprimento máximo de 1,36 m para a carga hidráulica de 150 cm. A dispersão lateral também se mostrou superior e sendo proporcional à carga hidráulica, sendo de 0,84 cm para 150 cm.

Ainda para  $t = 0,5$  h, os comprimentos das frentes de umedecimento do solo arenoso foram superiores aos comprimentos dos demais solos nas seguintes proporções médias: sentido

**Tabela 4.11:** Alcances máximos da frente de umedecimento lateral e vertical.

Tipo de solo	t = 0,5 h					
	Vertical			Lateral		
	50 cm	80 cm	150 cm	50 cm	80 cm	150 cm
Arenoso	0,94	1,04	1,36	0,40	0,52	0,84
Franco	0,24	0,28	0,39	0,20	0,23	0,33
Franco arenoso	0,40	0,45	0,60	0,25	0,32	0,45
Tipo de solo	t = alcance máximo					
	Vertical			Lateral		
	50 cm	80 cm	150 cm	50 cm	80 cm	150 cm
Arenoso	t = 0,6 h	t = 1 h	t = 1,8 h	t = 0,8 h	t = 1 h	t = 1 h
	1,12	1,53	2,61	0,40	0,57	1,01
Franco	t = 65 h	t = 74 h	t = 105 h	t = 65 h	t = 74 h	t = 111 h
	3,00	3,00	3,00	1,67	1,91	2,79
Franco arenoso	t = 5,5 h	t = 8 h	t = 10 h	t = 5 h	t = 5 h	t = 7,5 h
	1,45	2,00	2,64	0,46	0,61	0,98

vertical - 72,96% ao solo franco e 56,60% ao solo franco arenoso; sentido lateral - 55,49% ao solo franco e 40,80% ao solo franco arenoso.

Ao analisar t = alcance máximo, observa-se que os maiores valores para o comprimento máximo da frente de umedecimento estão relacionados ao solo franco. Isso porque o maior teor de argila em sua composição, se comparado com os demais solos, proporcionam uma maior retenção da água no solo devido aos pequenos tamanhos dos poros.

Para as três cargas hidráulicas, o solo franco atingiu um alcance máximo na vertical de 3,00 m<sup>1</sup>. Já para dispersão lateral, o solo franco apresentou valores superiores aos demais solos, diferente do que ocorreu para o t = 0,5 h, onde a frente de umedecimento do solo arenoso se mostrou mais próspera.

Outro aspecto relevante foi o tempo que o solo franco demandou para atingir a frente de umedecimento máxima. Os tempos superaram, e muito, os demais solos, sendo necessário um intervalo de tempo superior para que o solo franco atingisse um alcance máximo da umidade, mesmo quando a carga hidráulica foi de 50 cm (t = 65 h).

Assim, para t = alcance máximo, os comprimentos das frentes de umedecimento do solo franco foram superiores aos comprimentos dos demais solos nas seguintes proporções médias: sentido vertical - 41,56% ao solo arenoso e 32,33% ao solo franco arenoso; sentido lateral - 7,00% ao solo arenoso e 68,46% ao solo franco arenoso.

O comportamento da frente de umedecimento nas condições de solo saturado é de difícil visualização. Porém, o processo inverso, de secamento do solo, pode ser analisado.

Observa-se uma tendência de secamento na lateral da trincheira de infiltração, sobrepondo-

<sup>1</sup>3,00 m (300 cm) foi o limite máximo da construção da geometria abaixo da trincheira de infiltração para o cenário de modelagem no Hydrus 2D.

se ao sentido vertical, logo nos primeiros momentos de simulação ( $t = 0,5$  h). O potencial gravitacional e a própria composição textural do solo com maiores frações de areia - principalmente no arenoso, mantém o fluxo de água mais vertical, quase coincidindo no mesmo nível do secamento lateral.

Esse comportamento é melhor percebido em solos arenosos quando a carga hidráulica é de 50 ou 80 cm. Já quando a carga hidráulica é máxima, 150 cm, o processo de secamento lateral ocorre de maneira mais lenta, no qual a frente de umedecimento se desloca verticalmente bem antes das condições superficiais do solo se apresentar próximas as de solo seco (cores branca e cinza claro da legenda).

Já no solo franco, o processo de secamento é mais lento, demandando maior tempo de simulação para análise da frente de umedecimento. Diferentemente do solo anterior, a condição de solo úmido desperta não só uma tendência de secamento na lateral da trincheira de infiltração, mas também na porção inferior (marcação de 4,5 m na escala), sendo melhor visualizado na carga hidráulica de 50 cm. Posteriormente, a porção úmida desloca-se verticalmente em detrimento do potencial gravitacional ( $t = 75$  h para 50 cm). Para as demais cargas hidráulicas, 80 e 150 cm, essa tendência não ocorre.

#### 4.3.4 Comentários Finais

A análise das curvas de recessão para 12 tipos de solos mostrou a importância em se considerar a composição textural do solo antes da implantação de uma trincheira de infiltração, visto que para cada tipo de solo, a dinâmica da água no solo ocorre de maneira diferenciada.

Confrontando os parâmetros gerados pelo modelo analítico de Bouwer (1969) e pelo modelo numérico Hydrus 2D, não há uma correlação entre os valores dos parâmetros. Ou seja, mesmo que os valores de  $R_{cb}$  e  $R_{cp}$  sejam elevados, esses não podem ser justificados pelos valores dos parâmetros de  $K_s$ ,  $\alpha$  e  $n$  gerados pelo Hydrus 2D.

Porém, pode-se observar a relação entre o tipo de solo e os valores das resistências hidráulicas em alguns casos. Os solos argilosos apresentam maiores valores para as resistências, sendo esse superior quando o solo argiloso é submetido a uma carga hidráulica de 50 cm e em condições de potencial matricial de  $-1\text{cmH}_2\text{O}$ . A tendência para esse tipo de solo é que quanto maior a carga hidráulica, menores são as resistências hidráulicas, nesse caso para as duas condições de potencial matricial ( $-1$  e  $-100\text{cmH}_2\text{O}$ ).

Os solos de composição siltosa (siltoso, franco argilo siltoso e franco siltoso) apresentaram os menores para  $R_{cb}$  e  $R_{cp}$  e nas duas condições de potencial matricial. A exceção dessa classe textural é do solo argilo siltoso, possivelmente pela maior concentração de argila em sua composição se comparada com a dos outros solos dessa classe.

Na avaliação da frente de umedecimento nos solos arenoso, franco e franco arenoso, o solo arenoso apresentou os menores tempos de simulação, tanto em condições de  $\Psi = -1\text{cmH}_2\text{O}$ , quanto para  $\Psi = -100\text{cmH}_2\text{O}$ . O contrário ocorreu no solo franco e o solo franco arenoso

apresentou um tempo intermediário.

Notou-se um comportamento mais vertical no solo arenoso, principalmente em condições não saturadas. Já o solo franco, apresentou uma frente de umedecimento com um comportamento mais dispersivo lateralmente, atingindo maiores alcances se comparado aos demais solos.

Já em condições saturadas, observou-se um processo de secamento nos três solos, sendo o processo mais rápido ocorrido no solo arenoso e, posteriormente no franco arenoso. O solo franco, novamente, demandou um maior tempo de simulação para retornar às condições de não saturação, superando o máximo de 122 h impostas para a simulação.

Por fim, o Hydrus 2D se mostrou uma importante ferramenta para o estudo da dinâmica da água na interface trincheira de infiltração - solo natural, apresentando resultados aquém do modelo analítico de Bouwer.

# 5

## Considerações Finais

### 5.1 Conclusões

A trincheira de infiltração apresentou resultados satisfatórios, no que tange ao desempenho hidráulico, mesmo com a ocorrência de alguns extravasamentos na estrutura. Isso pode ser justificado pela época de realização do estudo, sendo um período de ocorrência de elevados eventos de precipitação em curtos intervalos entre um evento e outro, impedindo que o solo natural e o sistema voltassem às condições de não saturação, contribuindo para a ocorrência do extravasamento.

O sistema tem capacidade de armazenar 2.227,50 L de águas superficiais em seu interior, mesmo quando a trincheira estiver em condições de saturação. E o estudo mostrou que essa capacidade foi bastante solicitada na ocorrência dos eventos. O sistema, de maneira geral, atingiu às perspectivas quanto ao amortecimento de parte dos volumes produzidos pela área impermeável. Informações sobre o nível do lençol freático não foram adicionados neste trabalho, não sendo quantificado o grau de interferência do nível do lençol em relação ao desempenho do sistema.

A análise de custo mostrou que, quanto maior os tempos adotados ( $t$  e  $Tr$ ), maiores serão os custos e a altura da camada de armazenamento da estrutura. Essa camada de armazenamento possui o maior custo construtivo, sendo importante sua consideração no projeto do sistema, principalmente no que tange à etapa de dimensionamento da estrutura. Mesmo com a elevação dos custos construtivos ao longo do tempo, a trincheira de infiltração é uma opção viável como sistema de drenagem alternativo e sustentável se comparado com o sistema de drenagem convencional.

Os períodos de recessão analisados neste trabalho contribuíram na compreensão do processo de infiltração no experimento. O comportamento desse processo confirmou que, mesmo quando cessada a precipitação, a trincheira de infiltração ainda pode receber contribuições remanescentes do escoamento superficial, dos poros do solo ou parcela de escoamento produzido de maneira antrópica (limpeza de pátio e reservatórios, por exemplo). Essas contribuições dificultam uma análise mais detalhada do processo de recessão, sendo considerada neste trabalho, a recessão de maneira contínua e sem externalidades.

Modelando analiticamente as recessões através do BOUWER (1969), inicialmente os gráficos apresentaram resultados não muito satisfatórios, apesar dos valores positivos resultantes para os parâmetros de resistência hidráulica da base ( $R_{cb}$ ) e das paredes ( $R_{cp}$ ) do sistema, o que é fisicamente possível e comprova a legitimidade dos ajustes.

Analisando mais cautelosamente, observou-se que, apesar das curvas não se ajustarem de maneira excelente aos dados observados, os valores dos parâmetros foram elevados, porém dentro do esperado, por considerar um volume adicionado de material fino e uma possível camada de colmatagem formada na base e paredes da trincheira de infiltração.

Vale ressaltar que a existência de colmatagem no sistema foi determinada através de um modelo analítico, sendo sua confirmação efetivada através de um ensaio destrutivo do experimento, o que não ocorreu neste trabalho.

Os valores dos parâmetros hidráulicos pela modelagem analítica, representados pelas resistências hidráulicas da base e das paredes, não refletiram em uma relação clara e direta com o comportamento das recessões utilizadas neste estudo. Isso pode ser justificado também pelo pequeno tempo de vida útil do sistema, o que impossibilitou uma análise mais detalhada da formação e evolução de uma possível camada colmatada sobre as áreas de infiltração. Apesar disso, modelagem analítica apresentou resultados positivos no que tange à variação da carga hidráulica e tempo de duração do processo de recessão.

No que tange a modelagem numérica, o Hydrus se mostrou uma excelente ferramenta no estudo da dinâmica da água na interface trincheira de infiltração - solo natural. No confronto dos parâmetros do modelo analítico com os parâmetros da modelagem numérica foi constatado que não há relação entre os parâmetros, sendo assim, não é possível criar uma correlação de dependência entre o comportamento das resistências hidráulicas de Bouwer com os parâmetros hidráulicos de cada tipo de solo.

Já na análise mais restrita da interação entre a trincheira de infiltração e os solos arenoso, franco e franco arenoso, o solo arenoso se mostrou mais propício à implantação dessa técnica. Isso se deve ao fato de proporcionar uma maior redistribuição da água no solo em um menor tempo. Porém, deve-se ressaltar a importância de um pré-tratamento ou eficiente sistema de retenção de finos e possíveis poluentes, a fim de potencializar a recarga das águas subterrâneas com a devida proteção contra poluentes.

Analisando o comportamento das curvas de recessões artificiais geradas para 12 tipos de solo, o solo argilo apresentou maiores valores de resistência hidráulica, principalmente na condição de potencial matricial de  $-1\text{cmH}_2\text{O}$ , possivelmente pela própria composição textural e pequenos tamanhos dos poros dos solos argilosos. Os solos de composição siltosa apresentaram menores valores de resistências hidráulicas.

Mesmo nos estudos em que não sejam considerados aspectos como variabilidade dos parâmetros ou a heterogeneidade do solo, o Hydrus 2D ainda é uma ferramenta importante para diversas pesquisas desenvolvidas na área de solos, águas subterrâneas e irrigação. Por ser um modelo que resolve a Equação de Richards, ele se torna mais completo do que os modelos

analíticos, principalmente por gerar grande gama de formatos de resultados (gráficos, planilhas, etc.), além da possibilidade da criação de cenários diversos.

No mais, este estudo confere a importância que há na análise das técnicas compensatórias e sua interação com o solo do entorno. No geral, a trincheira de infiltração foi considerada com bons resultados, sendo considerada uma potencial solução no manejo sustentável das águas pluviais urbanas, principalmente no controle do escoamento urbano.

## 5.2 Recomendações e trabalhos futuros

A continuidade no monitoramento da trincheira de infiltração é importante para a evolução e aprimoramento do estudo sobre essa técnica compensatória. A análise de seu desempenho pode ser realizada em outras épocas, a fim de comparar o desempenho da técnica e o comportamento da curva de recessão em períodos distintos de condições climáticas.

É importante também analisar o movimento de recessão de maneira completa, considerando a possibilidade de contribuição remanescente do entorno, a qual pode interferir no movimento descendente da recessão.

Pode ser realizado o aperfeiçoamento no sistema, monitorando variáveis como umidade, viabilizando os registros do avanço da água infiltrada no solo natural. Isso possibilitaria uma comparação, por exemplo, entre o avanço da umidade com os valores obtidos nos ajustes dos parâmetros de resistência hidráulica, confrontando os valores monitorados com os simulados.

As informações e resultados apresentados são fundamentais para embasar futuros trabalhos e enriquecer a importância que há do estudo *in situ* dos sistemas de infiltração, para uma posterior aplicação em maiores escalas.

Além do controle quantitativo do escoamento superficial urbano é relevante o controle qualitativo dessas águas, a fim de manter a segurança do solo e das águas urbanas contra qualquer passível contaminante.

A caixa de entrada com vertedor utilizada neste trabalho funcionou como um dispositivo auxiliar para controle de sedimentos. Estudos futuros podem apresentar a relação entre essa caixa e a trincheira de infiltração, no que tange ao controle de sedimentos do escoamento superficial. Para tal, será necessário isolar toda a área da trincheira, controlando o volume de entrada da água ao experimento somente através de uma abertura.

Futuramente pode ser realizado o ensaio destrutivo do sistema, a fim de constatar valores exatos de colmatação, além da análise química do material exato carregado junto ao escoamento superficial ou formado ao longo de sua vida útil.

O Modelo de Bouwer não utiliza a heterogeneidade do solo na modelagem. Sendo assim, podem ser realizados estudos considerando heterogeneidade do solo nas simulações realizadas no Hydrus 2D.

Além dos estudos referentes ao desempenho da trincheira de infiltração e sua interação com o solo natural, a relação que existe entre esse tipo de sistema e o meio urbano também se

---

torna importante, principalmente por se mostrar uma alternativa aplicável a pequenas e grandes áreas, como quintais, calçadas, canteiros, praças e estacionamentos. Além disso, a aceitabilidade perante a população é maior, se comparada com outras técnicas compensatórias como bacias de retenção e infiltração, por se integrarem mais positivamente ao ambiente urbano.

## Referências Bibliográficas

- AHIABLAME, L. M.; ENGEL, B. A.; CHAUBEY, I. Effectiveness of low impact development practices in two urbanized watersheds: retrofitting with rain barrel/cistern and porous pavement. **Journal of Environmental Management**, [s.l.], v.119, p.151–161, 2013.
- AKAN, A. O. Sizing stormwater infiltration structures. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s.l.], v.128, n.5, p.534–537, 2002.
- AKBAR, G.; RAINE, S.; MCHUGH, A. D. Managing lateral infiltration on wide beds in clay and sandy clay loam using Hydrus 2D. **Irrigation Science**, [s.l.], v.33, p.177–190, 2015.
- ALLETTO, L. et al. Temporal variation in soil physical properties improves the water dynamics modeling in a conventionally-tilled soil. **Geoderma**, [s.l.], v.243-244, p.18–28, 2015.
- AMIT, H. et al. Interpretation os spring recession curves. **Groundwater**, [s.l.], v.40, n.5, p.543–551, 2002.
- APAC. **Monitoramento pluviométrico**. Recife/PE: Agência Pernambucana de Águas e Clima, 2014. Disponível em:<<http://www.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php>>.
- BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N. O.; BARRAUD, S. **Técnicas Compensatorias em Drenagem Urbana**. Porto Alegre: ABRH, 2005.
- BARRAUD, S.; CHERQUI, F. **Indicateurs de performance de stratégies d’assainissement pluvial par infiltration**. [s.l.]: OTHU - Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine, 2009. Fiche technique. (9).
- BARRAUD, S. et al. **Evolution of clogging applied to Pampulha Campus infiltration system (Brazil)**. [s.l.]: Novatech, 2013.
- BARRAUD, S.; LE COUSTOMER, S. **Recommandations pour la faisabilite, la conception et la gestion des ouvrages d’infiltration des eaux pluviales en milieu urban**. Lyon, France: Programme MGD Infiltration du RCGU, 2006.
- BERHAIL, S.; OUERDACHI, L.; BOUTAGHANE, H. The use of the recession index as indicator for components of flow. **Energy Procedia**, [s.l.], v.18, p.741–750, 2012.
- BOUWER, H. Theory of seepage from open channels. **Advances in Hydroscience**, [s.l.], v.5, p.121–170, 1969.
- BOUWER, H. **Hydraulic design handbook**. [s.l.]: McGraw-Hill, New York, 1999. p.24.1–24.44.

- BOUWER, H. Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. **Hydrogeology Journal**, [s.l.], v.10, p.121–142, 2002.
- BROOKS, R. H.; COREY, A. T. Hydraulic properties of porous media. **Hydrology Paper**, [s.l.], v.3, 1964.
- BROWNE, D. et al. A two-dimensional model of hydraulic performance of stormwater infiltration system. **Hydrological Processes**, [s.l.], v.27, n.19, p.2785–2799, 2013.
- CARVALHO, J. C.; LUIZ, G. C.; GONÇALVES, T. D. **A infiltração no contexto do plano urbanístico e dos projetos paisagístico e arquitetônico**. [s.l.]: In: CARVALHO, J. C.; LUIZ, G. C. GONÇALVES, T. D. Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais. Brasília: Faculdade de Tecnologia, 2012. p.25–47. (Série Geotecnia, v.4).
- CHAHAR, B. R.; GRAILLOT, D.; GAUR, S. Storm-water management through infiltration trenches. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, [s.l.], v.138, n.3, p.274–281, 2012.
- CHEN, L. et al. Simulation of soil water and salt transfer under mulched furrow irrigation with saline water. **Geoderma**, [s.l.], v.241-242, p.87–96, 2015.
- CHEN, X. et al. Estimation of baseflow recession constants and effective hydraulic parameters in the karst basins of southwest China. **Hydrology Research**, [s.l.], v.43, p.102–112, 2012.
- COSTA, F. M.; BACELLAR, L. A. P. Caracterização hidrogeológica de aquíferos a partir do fluxo de base. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s.l.], v.15, n.3, p.173–183, 2010.
- COUNTY, P. G. **Low-Impact Development Hydrologic Analysis**. Maryland: Department of Environmental Resources, 2007.
- COUTINHO, A. P. et al. Vadose zone heterogeneity effect on unsaturated water flow modeling at meso-scale. **Journal of Water Resource and Protection**, [s.l.], v.7, p.353–368, 2015.
- CREACO, E.; FRANCHINI, M. A dimensionless procedure for the design on infiltration trenches. **American Water Works Association**, [s.l.], v.104, n.9, p.501–509, 2012.
- DECHESNE, M.; BARRAUD, S.; BARDIN, J. P. Indicators for hydraulic and pollution retention assessment of stormwater infiltration basins. **Journal of Environmental Management**, [s.l.], v.71, p.371–380, 2004.
- DECHESNE, M.; BARRAUD, S.; BARDIN, J. P. Experimental assessment of stormwater infiltration basin evolution. **Journal of Environmental Engineering**, [s.l.], v.131, p.1090–1098, 2005.

- DUCHENE, M.; MCBEAN, E. A.; THOMSON, N. R. Modeling of infiltration from trenches for storm water control. **Journal of Water Resources Planning and Management**, [s.l.], v.120, n.3, p.276–293, 1994.
- DURNER, W. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. **Water Resources Research**, [s.l.], v.32, n.9, p.211–223, 1994.
- EMBRAPA. **Manual de Análises Químicas de Solos, Plantas e Fertilizantes**. Embrapa Informática Agropecuária.ed. Rio de Janeiro/RJ: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1999.
- EMERSON, C. H.; WADZUK, B. M.; TRAVER, R. G. Hydraulic evolution and total suspended solids capture of an infiltration trench. **Hydrological Processes**, [s.l.], v.24, p.1008–1014, 2010.
- EMLURB. **Tabela de Preços para Contratação de Obras e Serviços de Engenharia**. Recife/PE: Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana - Prefeitura do Recife, 2013.
- EPA, U. S. E. P. A. **Storm water technology fact sheet: infiltration trench**. [s.l.]: Office of Water Washington, 1999.
- FEDDES, R. A.; KOWALIK, P. J.; ZARADNY, H. **Simulation of Field Water Use and Crop Yield**. [s.l.]: John Wiley and Sons, 1978.
- FIORILLO, F. Tank-reservoir drainage as a simulation of the recession limb of karst spring hydrographs. **Hydrogeology Journal**, [s.l.], v.19, p.1009–1019, 2011.
- FIORILLO, F. The recession os spring hydrographs, focused on karst aquifers. **Water Resources Management**, [s.l.], v.28, p.1781–1805, 2014.
- GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, [s.l.], v.44, n.5, p.892–898, 1980.
- GENUCHTEN, M. T. Convective-dispersive transport of solutes involved in sequential first-order decay reactions. **Computers and Geoscience**, [s.l.], v.11, n.2, p.129–147, 1985.
- GONZALEZ-MERCHAN, C. et al. Monitoring of clogging evolution in the stormwater infiltration system and determinant factors. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, [s.l.], v.16, n.1, p.s34–s47, 2012.
- GRACIOSA, M. C. P.; MEDIONDO, E. M.; CHAUDHRY, F. H. Simulação hidráulica de trincheiras de infiltração de águas pluviais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s.l.], v.13, n.2, p.89–99, 2008.

- GRACIOSA, M. C. P.; MEDIONDO, E. M.; CHAUDHRY, F. H. Metodologia para dimensionamento de trincheiras de infiltração para o controle do escoamento superficial na origem. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s.l.], v.13, n.2, p.207–214, 2008.
- GRIFFITHS, G. A.; CLAUSEN, B. Streamflow recession in basins with multiple water storages. **Journal of Hydrology**, [s.l.], v.190, p.60–74, 1997.
- HAMMOND, M.; HAN, D. Recession curve estimation for storm event separations. **Journal of Hydrology**, [s.l.], v.330, p.573–585, 2006.
- HEILWEIL, V. M.; BENOIT, J.; HEALY, R. W. Variably saturated groundwater modelling for optimizing managed aquifer recharge using trench infiltration. **Hydrological Processes**, [s.l.], v.Early View, 2015.
- HERRADA, M. A.; GUTIÉRREZ-MARTIN, A.; MONTANERO, J. M. Modeling infiltration rates in a saturated/unsaturated soil under the free draining condition. **Journal of Hydrology**, [s.l.], v.515, p.10–15, 2014.
- HILLEL, D. **Environmental Soil Physics**. [s.l.]: New York, Academic Press, 1998.
- HINMAN, C. **Low Impact Development**: technical guidance manual for puget sound. [s.l.]: Puget Sound Action Team and Washington State University Pierce County Extension, 2005.
- KANDELOUS, M. M.; SIMUNEK, J. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using Hydrus 2D. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v.97, n.7, p.1070–1076, 2010.
- KENNEDY, J.; EBERHART, R. **Particle swarm optimization**. [s.l.]: IEEE International Conference on Neural Networks (ICNN'95), 1995. 1942-1947p. v.4.
- KOSUGI, K. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. **Water Resources Research**, [s.l.], v.32, n.9, p.2697–2703, 1996.
- LEMONS, R. C.; SANTOS, R. D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 3.ed. [s.l.]: Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996.
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. [s.l.]: São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005.
- LOAGUE, K.; GREEN, R. E. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. **Journal of Contaminant Hydrology**, [s.l.], v.7, p.51–73, 1991.
- LOYOLA, J. M. T.; PREVEDELLO, C. L. Modelos analíticos para predição do processo da redistribuição da água no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v.27, n.5, p.783–787, 2003.

- LUCAS, A. H.; BARBASSA, A. P.; MORUZZ, R. B. Modelagem de um sistema filtro-vala-trincheira de infiltração pelo Método PLUS adaptado para calibração de parâmetros. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s.l.], v.18, n.2, p.225–236, 2013.
- LUCAS, A. H. et al. Avaliação da construção e operação de técnicas compensatórias de drenagem urbana: o transporte de finos, a capacidade de infiltração, a taxa de infiltração real do solo e a permeabilidade da manta geotêxtil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [s.l.], v.20, n.1, p.17–28, 2015.
- MALÍK, P.; VOJTKOVÁ, S. Use of recession-curve analysis for estimation of karstification degree and its application in assessing overflow/underflow conditions in closely spaced karstic springs. **Environmental Earth Sciences**, [s.l.], v.65, p.2245–2257, 2012.
- MCCUEN, R. H. **Hydrologic Analysis and Design**. 2.ed. [s.l.]: Prentice Hall, 1998.
- MDE. **Stormwater Design Manual**. [s.l.]: Maryland Department of the Environment - Water Management Administration, 2009.
- MELLO, C. R. et al. Modelos para determinação dos parâmetros da equação de van Genuchten para um Cambissolo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s.l.], v.9, n.1, p.23–29, 2005.
- MELO, T. A. T.; ARAÚJO, D. C.; CABRAL, J. J. S. P. **Aplicação de sistemas não convencionais de drenagem urbana para o município de Recife**. Belo Horizonte / MG: IX Encontro Nacional de Águas Urbanas, 2012.
- MELO, T. A. T. et al. Jardim de chuva: sistema de biorretenção para o manejo das águas pluviais urbanas. **Ambiente Construído**, [s.l.], v.14, n.4, p.147–165, 2014.
- MOORE, R. D. Storage-outflow modelling of streamflow recessions, with application to a shallow-soil forest catchment. **Journal of Hydrology**, [s.l.], v.198, p.260–270, 1997.
- NATHAN, R. J.; MCMAHON, T. A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. **Water Resources Research**, [s.l.], v.26, n.7, p.1465–1473, 1990.
- NUTBROWN, D. A.; DOWNING, R. A. Normal-mode analysis of the structure of baseflow-recession curves. **Journal of Hydrology**, [s.l.], v.30, p.327–340, 1976.
- POMPÊO, C. A. Drenagem Urbana Sustentável. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s.l.], v.5, n.1, p.15–23, 2000.
- PROTON, A. **Etude hydraulique des tranches de retention / infiltration**. 2008. These — L’Institut National des Sciences Appliquees de Lyon.

- RAMOS, M. A.; AZEVEDO, J. R. G. **Nova equação de chuvas intensas para a cidade de Recife-Pernambuco**. Fortaleza / CE: X Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2010.
- REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. [s.l.]: Barueri, SP: Manole, 2004.
- REIS, R. P. A.; ILHA, M. S. O.; TEIXEIRA, P. C. Sistemas prediais de infiltração de água de chuva: aplicações, limitações e perspectivas. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, [s.l.], v.7, n.3, p.55–67, 2013.
- RESTREPO, J. S. et al. **Avanço da frente de infiltração em solos profundamente intemperizados não saturados**. [s.l.]: In: CARVALHO, J. C.; LUIZ, G. C. GONÇALVES, T. D. Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais. Brasília: Faculdade de Tecnologia, 2012. p.235–248. (Série Geotecnia, v.4).
- RIGHETTO, A. M.; MOREIRA, L. F. F.; SALES, T. E. A. **Manejo de Águas Pluviais Urbanas**. [s.l.]: In: RIGHETTO, A. M. (ed). Manejo de Águas Pluviais Urbanas. ABES, 2009. n.4, p.19–73. (PROSAB).
- ROY-POIRIER, A.; CHAMPAGNE, P.; FILION, Y. Review of bioretention system research and design: past, present and future. **Journal of Environmental Engineering**, [s.l.], v.136, n.9, p.878–889, 2010.
- SANTOS, J. B. F. **Construção, monitoramento e simulação hidráulica de uma trincheira de infiltração**. 2014. Dissertação — Universidade Federal de Pernambuco, Recife/PE.
- SANTOS, P. T. S. et al. Telhado verde: desempenho do sistema construtivo na redução do escoamento superficial. **Ambiente Construído**, [s.l.], v.13, n.1, p.161–174, 2013.
- SCHAAP, M. G.; LEIJ, F. J.; GENUCHTEN, M. T. van. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. **Journal of Hydrology**, [s.l.], v.251, p.163–176, 2001.
- SIERRA, M. R.; COELLO, C. A. C. **Improving PSO-Based Multi-objective Optimization Using Crowding, Mutation and Dominance**. [s.l.]: Evolutionary Multi-Criterion Optimization. Springer Berlin Heidelberg, 2005. 505-519p. v.3410.
- SILVEIRA, A. L.; LOUZADA, J. A.; BELTRAME, L. Infiltração e Armazenamento no solo. In: UFRGS, P. A. E. da (Ed.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4.ed. [s.l.: s.n.], 2012. p.335–372.
- SIMUNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M. T.; SEJNA, M. **The Hydrus software package for simulating the two-three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated porous media**. Version 2.0.ed. [s.l.]: Technical Manual, 2012.

- SIRIWARDENE, N. R.; DELETIC, A.; FLETCHER, T. D. Clogging of stormwater gravel infiltration system and filters: insights from a laboratory study. **Water Resource**, [s.l.], v.41, p.1433–1440, 2007.
- SLIMENE, E. B. et al. Modeling water infiltration and solute transfer in a heterogeneous vadose zone as a function of entering flow rates. **Journal of Water Resource and Protection**, [s.l.], v.7, p.1017–1028, 2015.
- SMMWW. **Stormwater Management Manual for Western Washington**. [s.l.]: Washington State Department of Ecology, 2014.
- STRECKER, E. W.; HUBER, W. C. (Ed.). **Global Solutions for Urban Drainage**. [s.l.]: American Society of Civil Engineers, 2002. p.1–10.
- SOUZA, V. C. B. **Estudo experimental de trincheiras de infiltração no controle da geração do escoamento superficial**. 2002. Tese — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS.
- SWMM. **Stormwater Management Manual**. [s.l.]: City of Portland - Environmental Services, 2014.
- TALLAKSEN, L. M. A review of baseflow recession analysis. **Journal of Hydrology**, [s.l.], v.165, p.349–370, 1995.
- TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2.ed. [s.l.]: Porto Alegre: Editora da Universidade, 2005.
- TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4.ed. [s.l.]: Porto Alegre: ABRH, 2012.
- URBONAS, B.; STAHERE, P. **Stormwater: best management practices and detention for water quality, drainage and cso management**. New Jersey: Prentice Hall, 1993.
- VOGEL, T.; CÍSLEROVÁ, M. On the reliability of unsaturated hydraulic conductivity calculated from the moisture retention curve. **Transport in Porous Media**, [s.l.], v.3, p.1–15, 1988.
- WARNAARS, E. et al. Hydrologic behaviour of stormwater infiltration trenches in a central urban area during  $2\frac{3}{4}$  years of operation. **Water Science Technology**, [s.l.], v.39, n.2, p.217–224, 1999.
- WILLMOTT, C. J. et al. Statistics for the Evaluation and Comparison of Models. **Journal of Geophysical Research**, [s.l.], v.90, n.5, p.8995–9005, 1985.
- WINSTON, R. J. et al. **Certifying the Landscape Community in Rain Garden Installation: the north carolina experience**. San Francisco, California: International Low Impact Development Conference, 2010.