

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E**  
**AMBIENTAL**

**ANÁLISE HIDROLÓGICA DO ASSENTAMENTO 26 DE**  
**SETEMBRO CONSIDERANDO OCUPAÇÃO ORDENADA**  
**COM IMPLANTAÇÃO DE MEDIDAS COMPENSATÓRIAS**

**CARLO SOBRAL DE VITO**

**ORIENTADOR: SERGIO KOIDE, PhD**

**COORIENTADORA: ALINE DA NÓBREGA OLIVEIRA**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA**  
**AMBIENTAL II**

**BRASÍLIA/DF: MAIO/2021**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE HIDROLÓGICA DO ASSENTAMENTO 26 DE  
SETEMBRO CONSIDERANDO OCUPAÇÃO ORDENADA  
COM IMPLANTAÇÃO DE MEDIDAS COMPENSATÓRIAS**

**CARLO SOBRAL DE VITO**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL 2 SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA AMBIENTAL.**

**APROVADA POR:**

---

**SERGIO KOIDE, PhD (ENC/UnB)  
(ORIENTADOR)**

---

**CONCEIÇÃO ALVES, PhD (ENC/UnB)  
(EXAMINADORA INTERNA)**

---

**Eng. DAVI NAVARRO DE ALMEIDA  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**BRASÍLIA/DF, MAIO DE 2021**

## FICHA CATALOGRÁFICA

DE VITO, CARLO SOBRAL.

ANÁLISE HIDROLÓGICA DO ASSENTAMENTO 26 DE SETEMBRO  
CONSIDERANDO OCUPAÇÃO ORDENADA COM IMPLANTAÇÃO DE MEDIDAS  
COMPENSATÓRIAS

89 p., 210 x 297mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2021) Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Medidas Compensatórias

2. Cidade Esponja

3. PCSWMM

4. Drenagem Urbana

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DE VITO, C.S. (2021). Análise hidrológica do Assentamento 26 de Setembro considerando ocupação ordenada com implantação de medidas compensatórias. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 89p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Carlo Sobral de Vito

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Análise hidrológica do Assentamento 26 de Setembro considerando ocupação ordenada com implantação de medidas compensatórias.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2021

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Carlo Sobral de Vito

carlodevito1@gmail.com

## **AGRADECIMENTOS**

A redação deste trabalho foi a conclusão de uma longa jornada de estudos que só poderia ser cumprida com o apoio de todos os que me acompanharam.

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais que sempre me incentivaram a continuar nessa tarefa e também me transmitiram seus conhecimentos com carinho e paciência.

Sempre ficará registrado nas minhas lembranças a dedicação de todos os professores, em particular aos professores Sergio Koide, meu exigente orientador, e Cristina Célia Brandão, que me fizeram apaixonar pelo curso!

Para a conclusão deste trabalho, foi fundamental a ajuda recebida da coorientadora Aline, que desenvolveu o desenho urbanístico utilizado no projeto. Também foi de extrema importância a ajuda recebida da Maria Elisa Costa, doutoranda do Programa de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da UnB, para a aprendizagem do *software* PCSWMM, que foi gentilmente concedido na versão estudantil pela CHIWATER.

Como não esquecer também do grande apoio e compreensão recebido da minha namorada, Amanda, e também dos meus amigos? Obrigado a todos!

## **RESUMO**

O Distrito Federal sofre com invasões constantes no seu território, com ocupações desordenadas sem a implantação de infraestruturas de drenagem urbana, causando transtornos à própria área ocupada, assim como às áreas à jusante. O trabalho busca demonstrar a validade dos conceitos de cidade esponja no planejamento de áreas urbana, visando resolver os problemas de alagamentos e inundações ligados à drenagem das águas pluviais. Depois de serem descritas as principais medidas compensatórias para reduzir o volume de escoamento e/ou as vazões de pico em áreas urbanizadas, sua implantação foi simulada num desenho urbanístico de ocupação ordenada previamente definido no Assentamento 26 de Setembro, região onde o processo de urbanização vem ocorrendo de maneira acelerada e desordenada. Nessa tarefa, o *software* PCSWMM se demonstrou ser uma ferramenta versátil para a análise hidrológica de áreas urbanas. Os resultados mostram que a ocupação planejada do Assentamento 26 de Setembro com a adoção de medidas compensatórias pode levar a vazões de pico dentro dos limites previstos na legislação vigente.

**Palavras-Chave:** Medidas Compensatórias, Cidade Esponja, PCSWMM, Drenagem Urbana.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>16</b>
2.1. OBJETIVO GERAL.....	16
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>17</b>
3.1. IMPACTOS DA URBANIZAÇÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS.....	17
3.2 EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA .....	18
3.3 MEDIDAS COMPENSATÓRIAS.....	20
3.4 CARACTERIZAÇÃO DAS MEDIDAS COMPENSATÓRIAS .....	22
3.4.1 Microrreservatórios .....	23
3.4.2 Bacia de detenção.....	26
3.4.3 Pavimentos porosos ou permeáveis.....	30
3.4.4 Valas e planos de infiltração .....	34
3.4.5 Trincheira de infiltração .....	35
3.4.6 Poços de infiltração .....	38
3.5 CIDADES ESPONJA.....	40
3.6 MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA .....	43
3.6.1 Método SCS .....	43
3.6.2 Modelo SWMM e <i>software</i> PCSWMM.....	46
<b>4 METODOLOGIA .....</b>	<b>51</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	51
4.1.1 Localização geográfica e delimitação da área de estudo.....	52
4.1.2 Geomorfologia e interface com a rede viária .....	54
4.1.3 Pedologia.....	57
4.1.4 Uso e ocupação do solo.....	57
4.2 CHUVA DE PROJETO.....	58
4.3 VAZÃO DE RESTRIÇÃO.....	59
4.4 PROPOSTA DE OCUPAÇÃO ORDENADA .....	60
4.4.1 Desenho Urbanístico .....	60
4.4.2 Criação de cenários .....	64
4.5 SIMULAÇÕES NO PCSWMM.....	65

4.5.1 Traçado da rede de drenagem.....	65
4.5.2 Sub-bacias .....	68
4.5.3 Controles LID.....	70
4.5.4 Unidades de armazenamento e bocais.....	70
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>73</b>
5.1 ANÁLISES HIDROLÓGICAS DOS NÓS TÍPICOS.....	73
5.1.1 Nó exutório OF1.....	73
5.1.2 Nó exutório OF12.....	77
5.2 ANÁLISES HIDROLÓGICAS DO SISTEMA .....	80
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>82</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>83</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1 – Comparação entre os hidrogramas de pré desenvolvimento e pós urbanização (SCHUELER, 1987 <i>apud</i> TUCCI, 2005).....	17
Figura 3-2 – Estágios do desenvolvimento da drenagem com obras de canalização (TUCCI, 2005).....	18
Figura 3-3 – Aumento do pico em função da proporção de área impermeável e da canalização do sistema de drenagem (LEOPOLD, 1968 <i>apud</i> TUCCI, 2005). 19	
Figura 3-4 – Tipologia de técnicas compensatórias para o manejo de águas pluviais (RIGHETTO, 2009).....	21
Figura 3-5 – Evolução da utilização de estruturas de retenção em áreas urbanas (CAMPANA <i>et al.</i> , 2007).....	22
Figura 3-6 – Modelo de instalação de microrreservatório dentro de lote residencial (DRUMOND, 2012).....	23
Figura 3-7 – Microrreservatório em alvenaria (CRUZ <i>et al.</i> , 1998 <i>apud</i> SUDERHSA, 2002).....	23
Figura 3-8 – Microrreservatório poroso enterrado (SCHUELER, 1987 <i>apud</i> SUDERSHA, 2002).....	24
Figura 3-9 – Desenho esquemático de uma bacia de retenção (SCHUELER, 1987 <i>apud</i> SUDERSHA, 2002).....	26
Figura 3-10 – Bacia de retenção subterrânea (STU, 1993 <i>apud</i> SUDERHSA, 2002).....	27
Figura 3-11 – Localização de bacias de retenção com respeito ao sistema de drenagem (BAPTISTA <i>et al.</i> , 2005 – adaptado). ....	28
Figura 3-12 – Hidrogramas nas seções de montante e jusante na bacia de retenção com espelho d'água permanente após um evento de precipitação (CAMPANA <i>et al.</i> , 2007).....	29
Figura 3-13 – Projeto da bacia de retenção Celso Peçanha – Mesquita (RJ) (JACOB <i>et al.</i> , 2019 – adaptado).....	30
Figura 3-14 – Pavimento intertravado permeável com infiltração total no solo (ABCP, 2015).....	31
Figura 3-15 – Pavimento intertravado permeável com infiltração parcial no solo (ABCP, 2015).....	31
Figura 3-16 – Pavimento intertravado permeável sem infiltração no solo (ABCP, 2015)..	32



Figura 3-17 – Redução da capacidade de infiltração do pavimento de concreto poroso ao longo do tempo (BORGWARDT, 2006 – adaptado) .....	33
Figura 3-18 – Vala de infiltração (SCHUELER, 1987 <i>apud</i> SUDERSHA, 2002). .....	34
Figura 3-19 – Vala de infiltração alagada (PACHECO, 2015). .....	35
Figura 3-20 – Seção padrão de trincheira (BAPTISTA <i>et al.</i> , 2005). .....	36
Figura 3-21 – Trincheira de infiltração (SCHUELER, 1987 <i>apud</i> SUDERSHA, 2002). ...	36
Figura 3-22 - Enchimento da trincheira com brita e monitoramento após sua construção (SOUZA, 2002). .....	37
Figura 3-23 – Poço de infiltração preenchido com brita (AZZOUT <i>et al.</i> , 1994 <i>apud</i> SUDERSHA, 2002). .....	38
Figura 3-24 – Comparação de imagens de sensoriamento remoto antes e depois do desenvolvimento da área residencial Yangtang (CRR, 2020). .....	40
Figura 3-25 – <i>Layout</i> da cidade esponja em Yangtang (CRR, 2020 – adaptado). .....	41
Figura 3-26 – Cenas reais após a implantação de medidas compensatórias em Yangtang (CRR, 2020 – adaptado). .....	41
Figura 3-27 - <i>Derbyshire Street</i> antes e depois da construção do parque sustentável (FOGEIRA, 2019 – adaptado). .....	42
Figura 3-28 – Comportamento do método SCS (Costa, 2013). .....	44
Figura 3-29 – Representação da sub-bacia no SWMM (ROSSMAN <i>et al.</i> , 2016). .....	47
Figura 3-30 – Visão conceitual do escoamento no SWMM (LEHNS, 2012). .....	47
Figura 3-31 – Redirecionamento do escoamento superficial (HUBER, 2001 – adaptado). .....	48
Figura 3-32 – Representação conceitual de um controle LID no modelo SWMM – Bacia de Filtração (LEHNS, 2012). .....	49
Figura 3-33 – Ajuste dos parâmetros da sub-bacia após a introdução de controles LID (ROSSMAN, 2015) – adaptado. .....	50
Figura 4-1 – Fluxograma das etapas a serem concluídas para a realização do trabalho. ....	51
Figura 4-2 – Localização geográfica do Assentamento 26 de Setembro. ....	52
Figura 4-3 – Situação do Assentamento 26 de Setembro frente aos divisores de água naturais. ....	53
Figura 4-4 – Redefinição da área de drenagem para proteção do manancial de Santa Maria. ....	54
Figura 4-5 – Mapa hipsométrico da área de estudo. ....	55
Figura 4-6 – Mapa de declividade da área de estudo. ....	55
Figura 4-7 – Rede viária e curvas de nível. ....	56

Figura 4-8 – Fotos da ocupação irregular no Assentamento 26 de Setembro. ....	56
Figura 4-9 – Mapa de solos do Distrito Federal, na escala 1:100.000, com indicação das classes de solos (EMBRAPA, 2004 – adaptado).....	57
Figura 4-10 – Evolução do uso e ocupação do solo da área de estudo.....	58
Figura 4-11 – Chuva de projeto.....	59
Figura 4-12 – Representação artística dos prédios residenciais e áreas verdes limítrofes da proposta de ocupação ordenada. ....	61
Figura 4-13 – Representação artística de uma quadra típica da proposta. ....	61
Figura 4-14 – Mapa de uso e ocupação do solo da proposta de ocupação ordenada. ....	63
Figura 4-15 – Desenho da rede de drenagem e das sub-bacias no PCSWMM. ....	67
Figura 4-16 – Discretização das sub-bacias. ....	69
Figura 4-17 – Utilização da ferramenta <i>Storage</i> do PCSWMM. ....	71
Figura 4-18 – Desenho do Cenário V no PCSWMM.....	72
Figura 5-1 – Hidrogramas do nó exutório OF1 para os Cenários I, II e III.....	73
Figura 5-2 – Hidrogramas afluente e efluente da bacia de detenção BD1. ....	75
Figura 5-3 – Perfil hidráulico e planta esquemática dos condutos a montante do nó exutório OF1 (Cenário V).....	76
Figura 5-4 – Hidrogramas do nó exutório OF12 para os Cenários I, II, III e IV. ....	77
Figura 5-5 – Hidrogramas afluente e efluente da bacia de detenção BD12. ....	78
Figura 5-6 – Perfil hidráulico e planta esquemática dos condutos a montante do nó exutório OF12 (Cenário V).....	79
Figura 5-7 – Hidrogramas do sistema para os Cenários I, II, III, IV e V.....	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 – Classificação dos grupos hidrológico dos solos e sua capacidade de infiltração (CANHOLI, 2005).....	45
Tabela 3-2 – Estimativas de CN para áreas urbanas (CANHOLI, 2005; TUCCI, 1993)....	45
Tabela 4-1 – Características dos cenários.....	65
Tabela 4-2 – Parâmetros utilizados para cada classe de sub-bacia.....	69

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 3-1 .....	44
Equação 3-2 .....	44
Equação 3-3 .....	46
Equação 3-4 .....	49
Equação 4-1 .....	58

## LISTA DE ABREVIACÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABCP.....	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABRH.....	Associação Brasileira de Recursos Hídricos
Adasa.....	Agência Reguladora de águas, Energia e Saneamento do Distrito Federal
ArcGIS.....	<i>Aeronautical Reconnaissance Coverage Geographic Information System</i>
cm.....	Centímetros
CN.....	<i>Curve Number</i>
CRR.....	<i>Climate Risk and Resilience in Chine</i>
DF.....	Distrito Federal
EMBRAPA.....	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETE.....	Estação de Tratamento de Esgoto
h.....	horas
ha.....	hectares
IBGE.....	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
<i>idf</i> .....	intensidade – duração – frequência
km <sup>2</sup> .....	Quilômetros Quadrados
L.....	Litros
LID.....	<i>Low Impact Development</i>
m.....	Metros
m <sup>3</sup> .....	Metros Cúbicos
min.....	Minutos
mm.....	Milímetros
NOVACAP.....	Companhia Urbanizadora da Nova Capital
PDDU.....	Plano Diretor de Drenagem Urbana
QGIS.....	<i>Quantum Geographic Information System</i>
s.....	Segundos
SCS.....	<i>Soil Conservation Service</i>
SIG.....	Sistema de Informações Geográficas
SUDERSHA.....	Superintendência de desenvolvimento de recursos hídricos e saneamento ambiental
SWMM.....	<i>Storm Water Management Model</i>
UH.....	Unidade Hidrográfica
USEPA.....	<i>United States Environmental Protection Agency</i>

## 1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a necessidade de moradias e falta de controle eficiente favorecem a atuação de agentes clandestinos, que acabam por definir uma configuração urbana desordenada, causando impactos ambientais.

A situação do DF, no que diz respeito ao ordenamento territorial, apresenta-se de forma diferente daquela observada na maioria dos estados, em que o poder público atua como provedor de redes urbanas e regulador do modelo de urbanização. Dada a política de desapropriação que precedeu a mudança da capital, o DF é detentor de boa parte das terras que circundam a região do Plano Piloto, o que facilitaria a implementação de políticas e permitiria estabelecimento de novos assentamentos, bairros e cidades, bem como a determinação de tipologias urbanísticas empregadas.

Todavia, o crescimento populacional do DF, que entre 1991 e 2010 foi de 60,25% (IBGE, 2010), gerou alta demanda por moradias em regiões próximas ao Plano Piloto de Brasília e a supervalorização dos preços dos imóveis no DF, impulsionando a ocupação irregular.

O Assentamento 26 de Setembro é uma dessas áreas recentes de ocupação irregular e apresenta forte tendência à urbanização. Essas terras, de posse da União, configuram uma oportunidade de realização de políticas urbanas mais inclusivas e da promoção de melhores práticas para ocupação do espaço urbano.

Uma questão que deve ser considerada para o estabelecimento de infraestruturas e empreendimentos é a da impermeabilização, causada pela redução da cobertura vegetal da superfície de bacias hidrográficas e das áreas de infiltração (ADASA, 2018). A impermeabilização impacta diretamente o escoamento superficial das águas pluviais, aumentando o volume de água escoada, e a vazão de pico, antecipando a sua ocorrência.

Diante desses eventos, a resposta imediata dos engenheiros responsáveis pela drenagem urbana foi implantar obras de canalização que levassem a jusante as águas drenadas dos locais onde haviam sido originadas o mais rapidamente possível (CANHOLI, 2005). Tal técnica demonstrou seus limites quando áreas urbanas e corpos hídricos a jusante começaram a apresentar problemas de alagamentos e erosão cada vez mais frequentes.

A tendência atual tem como paradigma a retenção do escoamento pluvial nas proximidades de suas fontes ao invés da remoção rápida para jusante. Dessa forma, busca-se criar sistemas de drenagem urbana capazes de coletar o escoamento provocado por uma precipitação, sem

mudar essencialmente o comportamento hidrológico da bacia. As medidas que visam a facilitar a infiltração, a percolação e o armazenameno da água são chamadas de medidas compensatórias.

Ao lado do Assentamento 26 de Setembro encontra-se o Setor Habitacional Vicente Pires, região infligida por frequentes e graves alagamentos em função da ocupação desordenada, aparentemente o caminho que está sendo seguido pelo assentamento. Dessa forma, a ocupação planejada e a implantação de medidas compensatórias no assentamento seriam uma forma de ocupar urbanisticamente a área, evitando problemas com alagamentos e altos custos para sua solução, como ocorreu em Vicente Pires.

Diante dessa situação, neste trabalho é apresentada uma proposta de urbanização sustentável para o Assentamento 26 de Setembro, com o objetivo de amortecer as vazões e diminuir os volumes das águas superficiais, buscando aplicar conceitos de cidade esponja, bastante utilizados em diversas cidades e pelo governo chinês após graves inundações em Pequim no ano de 2012 (FOGEIRO, 2019).

O objetivo principal do trabalho é aferir se a implantação de medidas compensatórias no Assentamento 26 de Setembro, após sua ocupação planejada com a aplicação desses conceitos, conseguem, de fato, evitar o agravamento dos alagamentos e inundações a jusante e ao mesmo tempo garantir a drenagem das águas pluviais na área onde estarão implantadas.

Este trabalho foi desenvolvido em paralelo com o de Bigonha (2021), que analisou cenários de ocupação da área com padrões e dinâmica semelhantes ao que ocorreu em Vicente Pires, verificando vazões até aproximadamente cinco vezes maiores que a imposta pela legislação vigente com a ocupação plena do Assentamento 26 de Setembro seguindo as características de desenvolvimento da região vizinha.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1.OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral deste trabalho é averiguar a eficácia da aplicação de forma alternativa de ocupação urbana no Assentamento 26 de Setembro para evitar o agravamento de alagamentos e inundações nas áreas a jusante, garantindo, ao mesmo tempo, a drenagem das águas pluviais no assentamento, no respeito à Resolução Adasa nº 09 de 2011.

### **2.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Elaborar proposta de ocupação ordenada do Assentamento 26 de Setembro, buscando aplicar os conceitos de cidade esponja;
- Efetuar análises hidrológicas da proposta de ocupação ordenada do Assentamento 26 de Setembro com o *software* PCSWMM;
- Comparar os hidrogramas, obtidos nas análises realizadas, entre os vários cenários criados a partir da proposta de ocupação ordenada e implementação de várias medidas compensatória.



### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1. IMPACTOS DA URBANIZAÇÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

A urbanização implica alterações significativas nos processos hidrológicos, em particular, através da ação direta nos cursos d'água e nas superfícies das bacias hidrográficas (BAPTISTA *et al.*, 2005).

As bacias hidrográficas naturais possuem maior presença de cobertura vegetal favorecendo a infiltração. Dessa forma, de um lado, o escoamento superficial pode ser reduzido a até 10% da precipitação (OECD, 1986), por outro, a recarga dos aquíferos garante o escoamento de base dos corpos d'água.

A consequência mais evidente da urbanização é a retirada da vegetação e sua substituição por superfícies impermeáveis. Em função do acréscimo de áreas impermeabilizadas, observam-se a redução da interceptação, do armazenamento superficial e da infiltração, assim como o consequente aumento dos volumes de escoamento superficial, da velocidade de escoamento e da magnitude dos picos de cheia (BAPTISTA *et al.*, 2005). A Figura 3-1 descreve, para a mesma precipitação, as alterações quantitativas provocadas pela urbanização no escoamento superficial das águas.

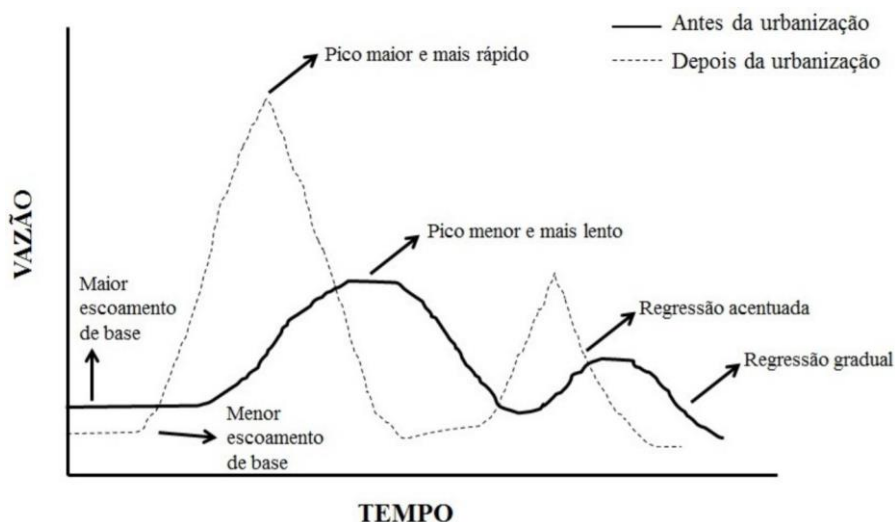


Figura 3-1 – Comparação entre os hidrogramas de pré desenvolvimento e pós urbanização (SCHUELER, 1987 *apud* TUCCI, 2005).

Em função dessas alterações no escoamento superficial, as áreas urbanas se tornam mais suscetíveis a inundações. Dessa forma, projetos de drenagem urbana adequados às características das bacias são essenciais para evitar o agravamento de problemas de inundação (BRITO, 2020).

Apesar de a qualidade da água não ser o foco deste trabalho, cabe mencionar que o desenvolvimento urbano altera a qualidade das águas drenadas. Em virtude da falta de proteção vegetal e da geração de resíduos sólidos, a produção de sedimentos é maior em áreas urbanas. A drenagem pluvial transporta esses sólidos e a quantidade de material suspenso apresenta carga muito elevada devido às vazões envolvidas (TUCCI, 2005).

### 3.2 EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA

Num primeiro momento, a engenharia visou solucionar o problema da perda do armazenamento natural realizando obras de canalização (CANHOLI, 2005). Essas obras podem consistir em alargar a calha do rio, aumentar sua profundidade, impermeabilizar e elevar o talude, com objetivo de fazer com que o escoamento fique confinado na calha do rio. Dessa forma, as velocidades do escoamento aumentam, evacuando mais rapidamente as águas superficiais, evitando, assim, alagamentos nas áreas urbanas onde foram implementadas essas obras.

Entretanto, as obras de canalização apenas transportam as águas de drenagem pluvial, sem diminuir seu volume. Dessa forma, essas são transferidas para jusante, trazendo com mais frequência inundações em áreas urbanas que antes não sofriam de tais problemas (CANHOLI, 2005). Essa dinâmica é exemplificada na Figura 3-2, onde é ilustrado como a canalização apenas transfere os problemas de inundação de montante para jusante.

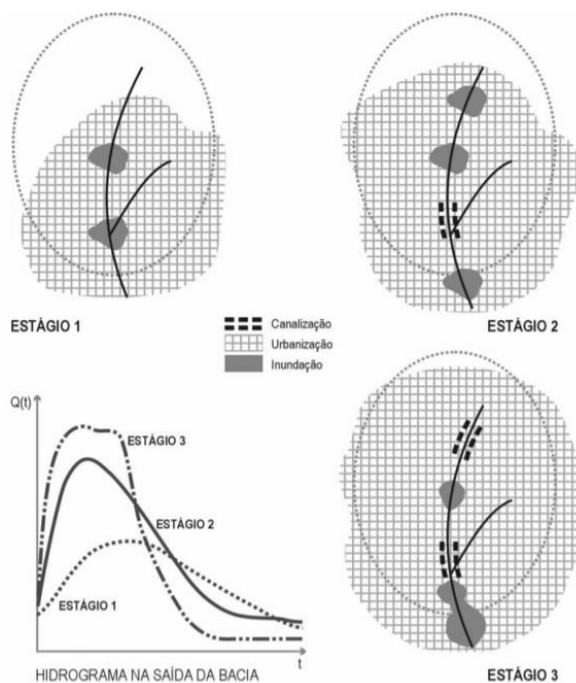


Figura 3-2 – Estágios do desenvolvimento da drenagem com obras de canalização (TUCCI, 2005).

Considerando que a ocupação urbana no Brasil geralmente começa nas áreas de planície, para em seguida ocupar as áreas mais elevadas e íngremes, essa solução mostra-se ainda mais ineficiente devido ao aumento da vazão de pico em função da canalização do sistema de drenagem nessas áreas recém-ocupadas.

Leopold (1968) verificou que ao se implantar sistemas de drenagem canalizados, a magnitude do pico de cheia pode aumentar em até 7 vezes (Figura 3-3). Esse é um dos grandes problemas de áreas urbanas: as vazões aumentam significativamente sem que haja necessariamente aumento da intensidade da precipitação, deixando dessa forma o projeto de drenagem original obsoleto. De fato, não há correspondência entre o tempo de retorno da precipitação e a vazão de escoamento em áreas urbanizadas, pois aquela é ligada apenas a fenômenos naturais e essa sofre interferências antrópicas.

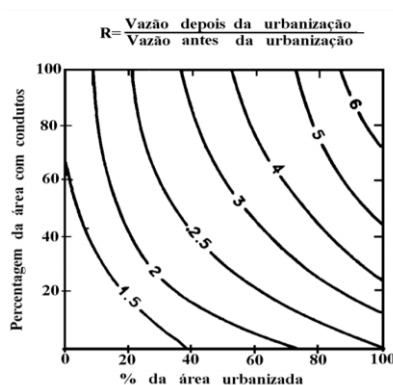


Figura 3-3 – Aumento do pico em função da proporção de área impermeável e da canalização do sistema de drenagem (LEOPOLD, 1968 *apud* TUCCI, 2005).

Como resultado disso, obras de drenagem a jusante devem ser ampliadas ou construídas. Em geral, essas obras são muito onerosas, pois são realizadas em áreas já ocupadas, e seu custo deve ser suportado por toda a comunidade (BAPTISTA *et al.*, 2005), inclusive pela população a montante que normalmente ocupa áreas menos suscetíveis a alagamentos, mas que sua drenagem causa as inundações a jusante.

Além disso, a canalização dos cursos d'água transmite, ainda mais, a falsa ideia de segurança com respeito a inundações, facilitando a ocupação de áreas ribeirinhas (BAPTISTA *et al.*, 2005), quando na verdade, o controle do escoamento pluvial nessas áreas é muito difícil, afinal as inundações que ocorrem nelas são normalmente associados ao próprio fenômeno natural.

A partir dos anos 1970, uma nova abordagem para tratar o problema foi desenvolvida buscando neutralizar os efeitos da urbanização sobre os processos hidrológicos, passando-

se da fase higienista para a fase corretiva (TUCCI, 2008). Recentemente, diversos paradigmas de drenagem urbana surgiram como alternativa ao sistema tradicional, todos eles com o objetivo de implantar um sistema para coletar o escoamento provocado por precipitações sem mudar essencialmente o comportamento hidrológico natural da bacia hidrográfica.

Dentre esses paradigmas, encontra-se o *Low Impact Development* (LID), que no Brasil é traduzido para Desenvolvimento de Baixo Impacto. As LIDs são projetos com a finalidade de criar paisagens funcionais urbanas que atendam às nossas necessidades, mas ao mesmo tempo alterá-las de forma que busquem simular as funções de infiltração e armazenamento pré-urbanização (COFFMAN *et al.*, 1998).

Para fazer com que o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas urbanizadas se mantenha mais próximo ao natural, pode-se aplicar o conceito de cidade esponja no planejamento urbano. De acordo Li *et al.* (2017), o conceito de cidade esponja refere-se ao desenvolvimento urbano sustentável que inclui ações que permitam o controle de inundações, conservação das águas, melhoria da qualidade das águas e proteção do ecossistema natural. Na China, país onde o conceito surgiu, a criação de cidades esponjas concentra-se principalmente na abordagem LID (XIA *et al.*, 2017).

Dentro da abordagem LID, o uso de medidas compensatórias é uma forma de compensar o excesso de impermeabilização provocada pela urbanização.

Os tópicos a seguir (3.3 e 3.4) apresentam o conceito de medidas compensatórias e a caracterização das principais estruturas. No tópico 3.5 será abordado com mais detalhes o conceito de cidade esponja e algumas experiências internacionais.

### **3.3 MEDIDAS COMPENSATÓRIAS**

As medidas compensatórias são, na maioria das vezes, ações estruturais que favorecem a infiltração da água no solo e/ou promovem o armazenamento temporário da água (CANHOLI, 2005; BAPTISTA *et al.*, 2005; RIGHETTO, 2009). Essas medidas se distinguem das demais ações estruturais por não promoverem o transporte das águas pluviais para jusante, o aumento da velocidade de escoamento ou o confinamento do fluxo dentro de calhas, por meio, por exemplo, de canalização, dragagem e construção de diques laterais.

Há ainda medidas compensatórias de caráter não estrutural, como por exemplo a regulação do uso do solo que estabelece restrições à taxa de impermeabilização das parcelas e

recomenda a criação de áreas verdes e de áreas destinadas à infiltração de águas pluviais (RIGHETTO, 2009).

As medidas compensatórias estruturais podem ser utilizadas em escalas diversas, ocupando desde pequenas parcelas até norteando sistemas de drenagem de grandes áreas (BAPTISTA *et al.*, 2005).

Essas tecnologias podem ser classificadas em:

- 1) *Técnicas para controle na fonte*: atuam sobre o escoamento de pequenas áreas, como lotes, praças e passeios. O controle é realizado no local onde o fluxo é gerado e, por sua vez, pode ser de dois tipos:
  - (a) *Localizado*: em caso de infraestruturas pontuais. São incluídos os microrreservatórios, os poços de infiltração, os planos de infiltração.
  - (b) *Linear*: quando as intervenções se desenvolvem linearmente. São incluídas as trincheiras de infiltração, os pavimentos permeáveis.
- 2) *Técnicas para o controle centralizado*: o controle se dá a jusante da área drenada. Essas técnicas agem sobre o hidrograma do escoamento em nível tanto de microdrenagem (áreas de captação inferiores a 2 km<sup>2</sup>) quanto de macrodrenagem (áreas de captação superiores a 2 km<sup>2</sup>). Consistem basicamente em bacias de detenção e de retenção.

As tipologias das técnicas compensatórias mencionadas anteriormente estão resumidas na Figura 3-4.

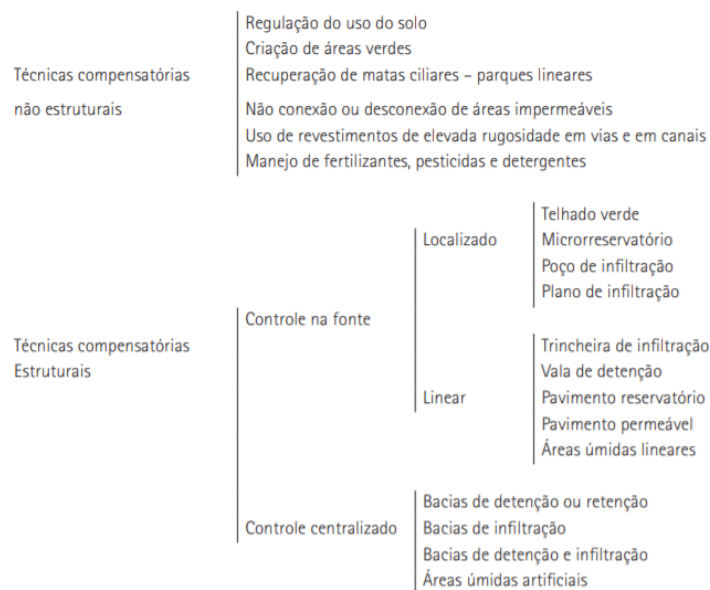


Figura 3-4 – Tipologia de técnicas compensatórias para o manejo de águas pluviais (RIGHETTO, 2009).

As medidas compensatórias nascidas apenas para o controle de enchentes foram assumindo cada vez outras finalidades, especialmente em função da sua inutilização durante os períodos de estiagem, inclusive para justificar elevados investimentos por, muitas vezes, ocuparem áreas de grandes metrópoles. A [Figura 3-5](#), ilustra a evolução das finalidades dessas obras. Atualmente além de controlar enchentes, busca-se oferecer recreação, paisagismo, controle de qualidade da água e mananciais urbanos.

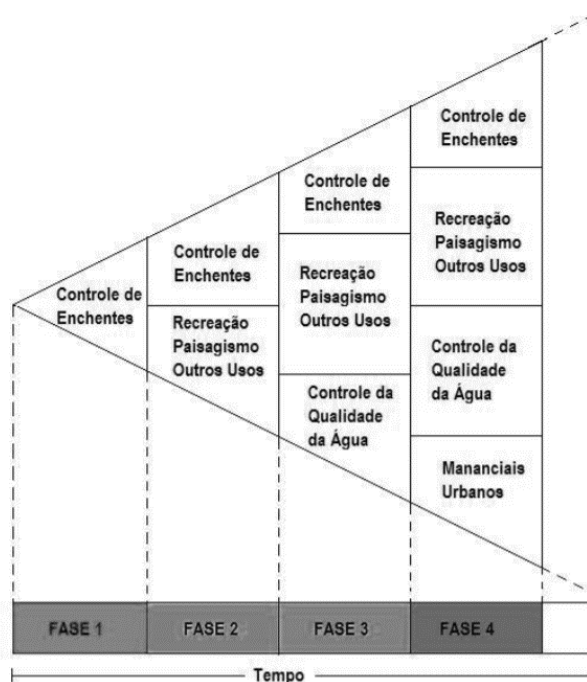


Figura 3-5 – Evolução da utilização de estruturas de retenção em áreas urbanas  
([CAMPANA et al., 2007](#)).

### 3.4 CARACTERIZAÇÃO DAS MEDIDAS COMPENSATÓRIAS

Complementando os tópicos anteriores, que revisaram os aspectos gerais e a importância das medidas compensatórias em sistemas de drenagem urbana, neste tópico são descritas as principais infraestruturas necessárias para sua implantação, caracterizando-as sob o ponto de vista de seu funcionamento.

A escolha das medidas compensatórias depende da análise de uma série de variáveis. [SUDERSHA \(2002\)](#) destaca os fatores críticos que condicionam a escolha dessas estruturas. Dentre esses fatores, encontra-se a área da bacia de contribuição a ser controlada, a capacidade de infiltração do solo, o nível do lençol freático, a disponibilidade de área, a declividade do terreno.

### 3.4.1 Microrreservatórios

Os microrreservatórios são reservatórios de dimensões reduzidas que visam armazenar o escoamento superficial gerado em lotes urbanos residenciais ou comerciais. Em geral, são estruturas simples na forma de caixas de concreto, alvenaria ou outro material com dispositivos para a evacuação da água que exceder a vazão de projeto (SUDERHSA, 2002). Na Figura 3-6 é representado um modelo de instalação de um microrreservatório dentro de um lote residencial.

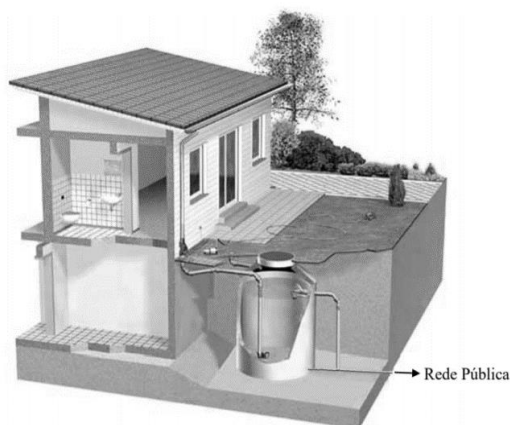


Figura 3-6 – Modelo de instalação de microrreservatório dentro de lote residencial (DRUMOND, 2012).

Os microrreservatórios podem ser de:

- Detenção: quando armazenam temporariamente o escoamento superficial. As águas drenadas são liberadas assim que chegarem ao reservatório de forma continuada por meio de um dispositivo de saída que restringe a vazão efluente até valor pré-definido. O que excede esse valor é armazenado ou vertido, caso a precipitação seja maior que a de projeto, ocupando a água o volume total do reservatório (Figura 3-7). Esse tipo de reservatório amortece apenas as vazões, mas o volume total do escoamento superficial permanece inalterado.

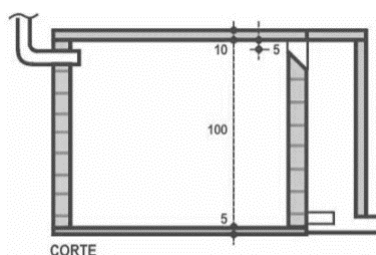


Figura 3-7 – Microrreservatório em alvenaria (CRUZ *et al.*, 1998 *apud* SUDERHSA, 2002).



- Retenção: são reservatórios capazes de armazenar a água de chuva para controlar o volume do escoamento superficial e, de consequência, as vazões no exutório. Nesse caso, não há liberação das águas pluviais quando a precipitação for menor que a de projeto, mas apenas acumulo, pois o dispositivo de saída é geralmente constituído por uma válvula ou por um registro. Esse volume de água acumulado no interior do reservatório pode ser destinado para usos que não requeiram água potável.
- Poroso: são reservatórios escavados no solo, preenchidos com brita, e isolados do solo por tecido geotêxtil (SUDERSHA, 2002). O esgotamento é por infiltração da água no solo e, portanto, além de amortecer as vazões de cheia, também diminui o volume total do escoamento superficial (Figura 3-8).

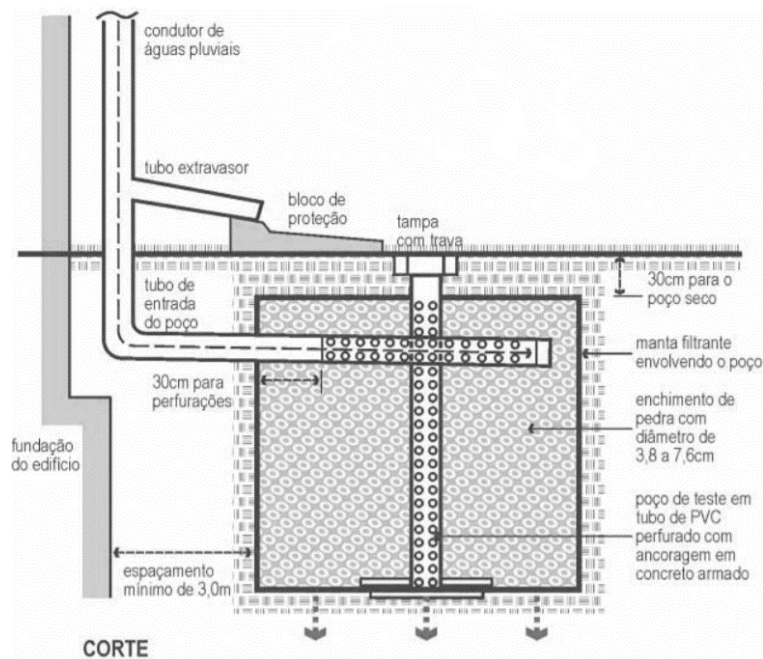


Figura 3-8 – Microrreservatório poroso enterrado (SCHUELER, 1987 apud SUDERSHA, 2002).

Para implantar medidas compensatórias desse tipo, existem soluções para todos os orçamentos, podendo ser realizadas, por exemplo, mediante adaptações de caixas d'água comerciais (SUDERHSA, 2002). Caso não seja viável a instalação de reservatório subterrâneo, a água pluvial pode ser direcionada, pela calha do telhado, para cisternas verticais de PVC.



Pela [SUDERHSA \(2002\)](#), existem as seguintes desvantagens:

- em regiões de elevada pluviosidade os volumes de reservação devem ser significativos, para o controle efetivo do escoamento superficial;
- considerando o aspecto sanitário, para evitar o desenvolvimento de vetores de doenças tropicais, é necessária a limpeza frequente dos microrreservatórios;
- águas poluídas o com grande transporte sólido são prejudiciais ao sistema.

Diversos estudos foram conduzidos visando avaliar a eficiência dessas estruturas. Nos estudos de [Agra \(2001\)](#), foi construído um módulo experimental constituído por um microrreservatório de detenção com volume igual a 1 m<sup>3</sup> para verificar a eficácia da implantação dessa estrutura no amortecimento de vazões. Essa estrutura coletava águas pluviais de um telhado e foram estudados oito eventos de precipitação. Analisando os hidrogramas na saída e na entrada do dispositivo, o autor constatou que o microrreservatório se mostrou eficiente no que se refere à redução das vazões de pico do escoamento superficial, atingindo 50% de redução em um dos eventos de precipitação e apresentando redução em média de 24%. Entretanto, foi observado que o dispositivo não se mostrou eficiente no aumento do tempo ao pico devido ao seu pequeno volume de detenção. Durante o monitoramento, o autor relatou a presença de folhas e sedimentos dentro do reservatório, destacando a importância de implementar nessas estruturas uma tela para a proteção do dispositivo de descarga, com a finalidade de evitar sua obstrução.

A elevada eficiência dessa estrutura no amortecimento das vazões também foi constada por [Silva \(2016\)](#). A autora, por meio de simulações com o modelo SMWW para precipitações com diferentes durações e tempo de retorno de 10 anos, verificou que a utilização de microrreservatório de detenção, dimensionado com base na duração crítica, em um lote localizado em São Carlos (São Paulo) reduz em, pelo menos, 44% a vazão de pico do escoamento superficial na saída do loteamento.

Já [Drumond et al. \(2018\)](#), ao verificar a performance de um microrreservatório de detenção enterrado construído em um hospital localizado em Belo Horizonte (Minas Gerais), monitorando o nível da água dentro da estrutura com 45,5 m<sup>3</sup>, constatou que o dispositivo se mostrou ineficiente para o amortecimento das vazões na maioria dos 48 eventos de chuva estudados, chegando ao valor máximo de redução da vazão de pico igual a 22,9%.

### 3.4.2 Bacia de detenção

As bacias de detenção (Figura 3-9) são reservatórios de controle centralizado construídos com a finalidade de armazenar temporariamente as águas de escoamento de origem pluvial, podendo eventualmente infiltrá-las (BAPTISTA *et al.*, 2005).

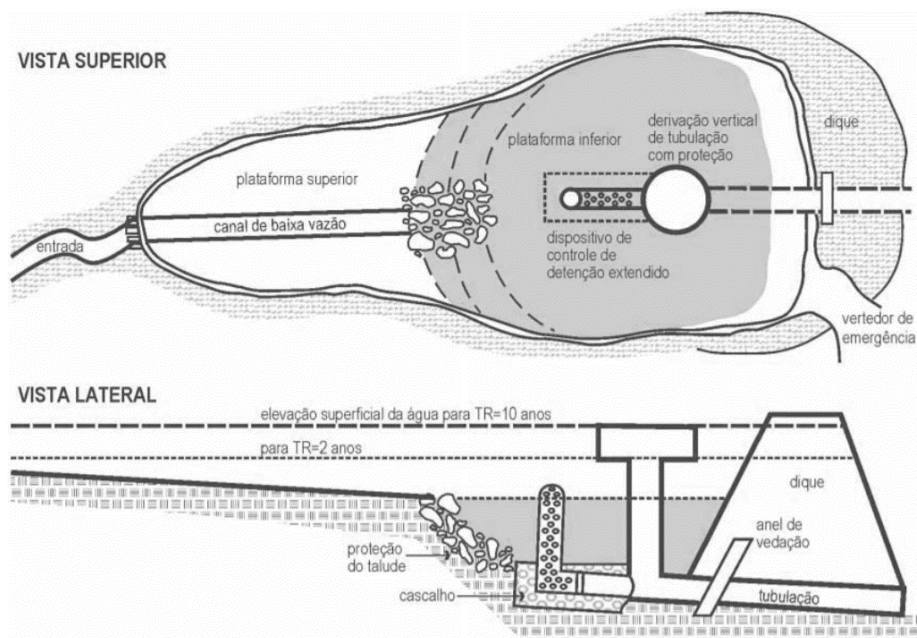


Figura 3-9 – Desenho esquemático de uma bacia de detenção (SCHUELER, 1987 apud SUDERSHA, 2002).

Apesar de parte da literatura especializada costumar diferenciar as bacias de detenção e de retenção (CANHOLI, 2005; RIGHETTO, 2009), nesse trabalho elas serão descritas num mesmo tópico.

De fato, a função principal de ambas as estruturas é controlar a cheia e possuem características construtivas e de implantação parecidas, sendo que as de retenção permitem a decantação dos poluentes por ela carregadas, usualmente operam com descargas de fundo fechadas durante o evento e acumulam água por tempos mais longos (BAPTISTA *et al.*, 2005), possuindo espelho d'água permanente (CANHOLI, 2005). Esse tipo de bacia, geralmente, permite a interrupção das vazões de saída através de dispositivos de controle, como por exemplo válvulas e registros.

Em qualquer tipo de bacia de detenção deve ser previsto, a jusante, o extravasor de emergência para verter vazões acima às de projeto e a montante, para evitar o assoreamento, bacias de decantação, gradeamentos ou outra infraestrutura que evite a entrada de sedimentos e resíduos sólidos (SUDERHSA, 2002).

De acordo com [Baptista et al. \(2005\)](#), as bacias de retenção podem ser:

- bacias a céu aberto, divididas, por sua vez, em:
  - bacias secas: são reservatórios que normalmente se mantêm secos e, durante eventos de precipitações, armazenam temporariamente as águas pluviais.
  - bacias com espelho d'água permanente: são reservatórios com espelho d'água permanente em que o nível d'água se eleva durante as precipitações.
  - bacias de zonas úmidas (*wetlands*): são áreas úmidas artificialmente construídas com forte desenvolvimento de vegetação.
- bacias subterrâneas ([Figura 3-10](#)): permite o aproveitamento da superfície para outro fim, como por exemplo, uma praça, área verde gramada ou quadra de esporte. Essas estruturas são tipicamente empregadas em zonas densamente ocupadas.

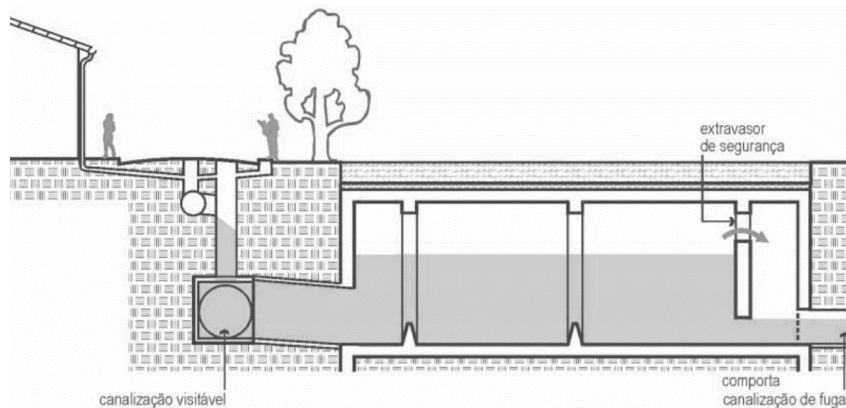


Figura 3-10 – Bacia de retenção subterrânea ([STU, 1993 apud SUDERHSA, 2002](#)).

Os mesmos autores classificam as bacias de retenção secas em dois tipos:

- bacias secas com fundo impermeabilizado ou não: as águas de escoamento de origem pluvial são armazenadas temporariamente nesses reservatórios e liberadas continuamente por meio de um dispositivo de saída. Dessa forma, as vazões máximas são reduzidas, porém o volume total do escoamento superficial se mantém praticamente inalterado. Na maioria das vezes, é realizada a impermeabilização quando há risco de contaminação do lençol freático. Para esse fim, utilizam-se concreto, camada de argila, geomembrana. O concreto, apesar do custo elevado, permite o de aproveitamento para outros usos: praças, quadra de esportes.
- bacias de infiltração: desempenham as funções de armazenamento temporário e de infiltração de águas pluviais simultaneamente, permitindo, portanto, tanto o amortecimento das vazões, quanto a redução do volume total de escoamento

superficial. Essas estruturas são dimensionadas para que todos os aportes de águas de escoamento infiltrem-se no solo e, portanto, não são necessários dispositivos de saída, a não ser o vertedor de emergência.

De acordo com a localização das bacias de retenção em relação ao sistema de drenagem, as bacias de retenção podem ser classificadas em série (*on-line*) ou em paralelo (*off-line*) (Figura 3-11).

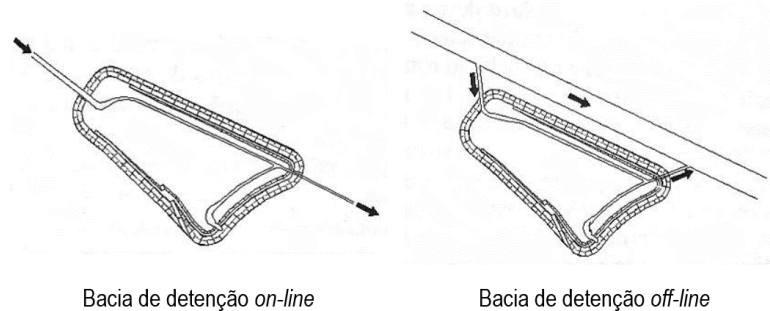


Figura 3-11 – Localização de bacias de retenção com respeito ao sistema de drenagem (BAPTISTA *et al.*, 2005 – adaptado).

As bacias de retenção *on-line* encontram-se na linha principal do sistema de drenagem e o armazenamento é usualmente obtido por meio da construção de barramentos. O escoamento de origem pluvial é restituído, normalmente por gravidade, continuamente de forma atenuada e retardada a jusante (BAPTISTA *et al.*, 2005; CANHOLI, 2005). Dessa forma, esse tipo de bacia promove a atenuação do hidrograma de escoamento superficial, diminuindo a vazão de pico e tornando o escoamento mais lento.

Por sua vez, as bacias de retenção *off-line* são usualmente empregadas quando as margens dos canais de drenagem estão ocupadas. Nesse caso, quando a vazão atinge determinado valor limite, o excesso é direcionado, geralmente através de um vertedor de soleira lateral, para a bacia de retenção afastada do canal. As águas pluviais armazenadas retornam ao canal principal, após obtido alívio nos picos de vazão (CANHOLI, 2005). Portanto, esse tipo de bacia diminuem as vazões máximas, mas não altera significativamente o tempo ao pico.

De um lado, de acordo com ABCP (2013), as vantagens dessa infraestrutura são:

- Utilização recreativa e paisagística;
- Baixo impacto no trânsito e nas atividades econômicas local
- Facilita limpeza urbana, concentrando sedimentos e resíduos;
- Redução de canalização a jusante.

Por outro, pelos mesmos autores, são necessárias as seguintes precauções:

- Baixa aceitação da população, caso não haja caráter multifuncional
- Necessidade de limpeza e manutenção frequente, como prevenção de doenças;
- Necessidade de fiscalização para evitar disposição ilegal de resíduos sólidos
- Implantação de sistemas de esgoto e coleta de resíduos sólidos a montante;
- Eventual manutenção de equipamento de bombeamento;
- Desapropriação da área, se necessária.

Quanto às precauções acima relativas ao risco de poluição das bacias, [Campana et al. \(2007\)](#) detectou, de fato, melhora da qualidade da água na saída da bacia após sua implantação, pois os poluentes ficaram nela retidos e, portanto, sugere que ao optar por estruturas como essa, deva-se realizar periodicamente sua limpeza.

Cabe também destacar que durante longos períodos chuvosos, se esses reservatórios ainda não estiverem vazios e prontos para receberem novos volumes de águas pluviais, a capacidade de amortecimento é reduzida ([SUDERHSA, 2002](#)).

Para verificar a eficácia dessas infraestruturas, [Campana et al. \(2007\)](#) avaliaram o desempenho de duas bacias de retenção em Brasília (DF), constatando que esse tipo de medida compensatória é bastante eficiente do ponto de vista hidráulico, demonstrando que a vazão máxima era significativamente menor e o tempo ao pico maior. A [Figura 3-12](#) apresenta o comportamento frente a um evento de precipitação da bacia de retenção com espelho d'água permanente localizada no Parque da Cidade de Brasília. Na época do estudo, a lagoa situava-se em série com a galeria de águas pluvias, funcionando como uma bacia de retenção do tipo *online*. Em função da qualidade das águas pluviais, a ligação com a rede de drenagem foi retirada e a lagoa atualmente possui apenas finalidades paisagísticas, não tendo efeito sobre o controle das inundações.

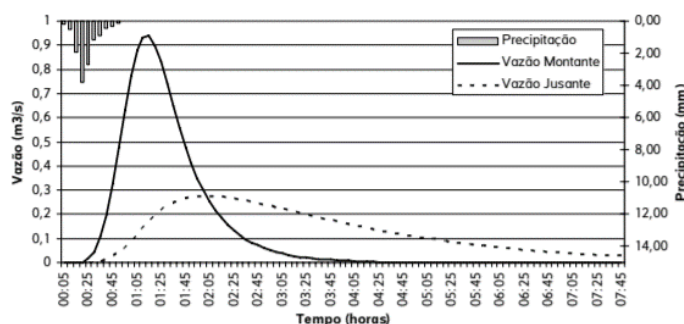


Figura 3-12 – Hidrogramas nas seções de montante e jusante na bacia de retenção com espelho d'água permanente após um evento de precipitação ([CAMPANA et al., 2007](#)).

Diversas são as propostas de construções de bacias de retenção para o controle de inundações encontradas na literatura. *Jacob et al. (2019)* estudaram a possibilidade de implantação desse dispositivo no município de Mesquita (Rio de Janeiro). A estrutura seria também utilizada para fins recreativos, funcionando como parque nos períodos de estiagem, garantindo usos sociais do espaço e a valorização do ambiente urbano do bairro. O *layout* da proposta encontra-se na [Figura 3-13](#).

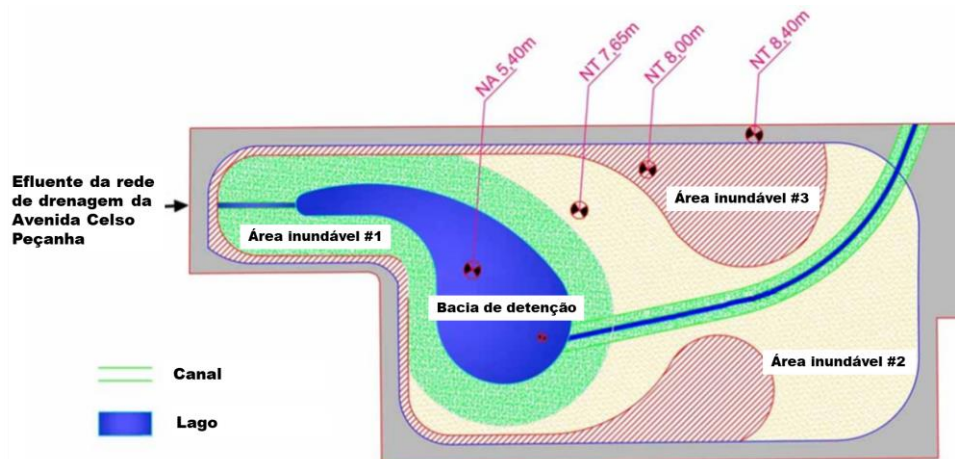


Figura 3-13 – Projeto da bacia de retenção Celso Peçanha – Mesquita (RJ) (*JACOB et al., 2019* – adaptado).

Os autores concluíram que para precipitações com duração igual ao tempo de concentração da bacia hidrográfica, a estrutura consegue reduzir tanto as vazões de pico, a valores em torno de 90% dos originais, quanto o volume do escoamento superficial, por favorecer a infiltração. Observa-se também que a topografia do terreno faz com que nem toda a área seja inundada com qualquer volume de chuva, assim, por exemplo, a área número 3 é alagada apenas com precipitações com tempo de retorno de 50 anos.

### 3.4.3 Pavimentos porosos ou permeáveis

A simples adoção de superfícies permeáveis ou semipermeáveis, por si só, não contribui para o controle de inundações, pois sua eficácia é limitada pela taxa de infiltração natural do terreno e pela capacidade de armazenamento das águas pluviais na camada inferior (*BAPTISTA et al., 2005*).

Os pavimentos porosos ou permeáveis permitem que a água infiltre rapidamente e que ela seja armazenada na camada de base, geralmente de cascalho poroso (*SUDERHSA, 2002*), constituindo assim um reservatório enterrado (*BAPTISTA et al., 2005*).



De acordo com a [ABCP \(2015\)](#), existem três tipologias de implementação da pavimentação permeável:

- pavimento permeável com infiltração total no solo: as águas pluviais infiltram pela junta do bloco maciço e são armazenadas temporariamente no reservatório de material granular e depois são esgotadas totalmente por infiltração na camada de subleito ([Figura 3-14](#)).

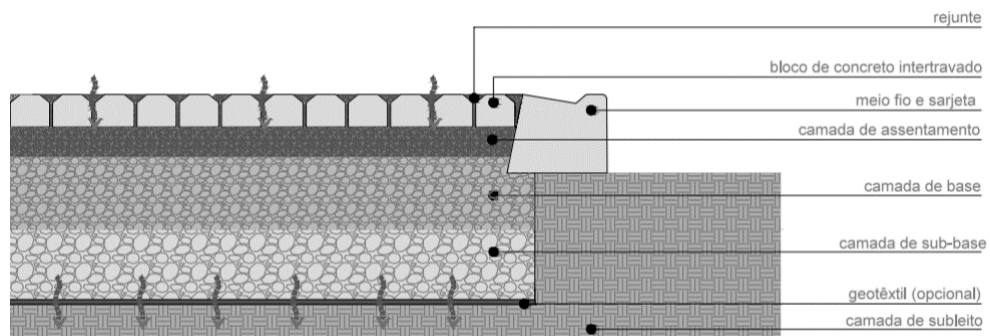


Figura 3-14 – Pavimento intertravado permeável com infiltração total no solo ([ABCP, 2015](#)).

- pavimento permeável com infiltração parcial no solo: uma parcela das águas pluviais infiltra no solo e outra é coletada por um dreno ([Figura 3-15](#)). Essa solução é usualmente empregada quando o solo não possui capacidade de infiltração elevada ou quando o lençol freático está muito próximo da superfície.

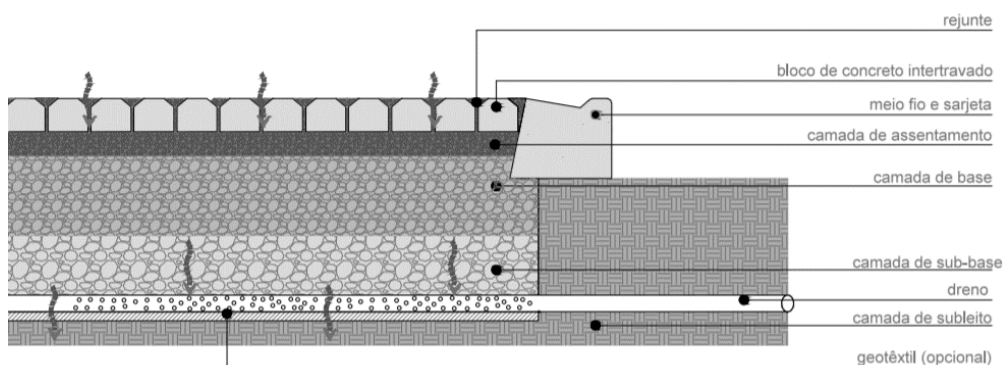


Figura 3-15 – Pavimento intertravado permeável com infiltração parcial no solo ([ABCP, 2015](#)).

- pavimento permeável sem infiltração no solo: o volume de água armazenada na camada suporte é coletada integralmente por um dreno ([Figura 3-16](#)). Essa solução é usualmente empregada quando é desejada a utilização de pavimentos permeáveis em

locais onde se deve evitar a percolação de águas de má qualidade, como por exemplo em estacionamentos, postos de combustíveis.

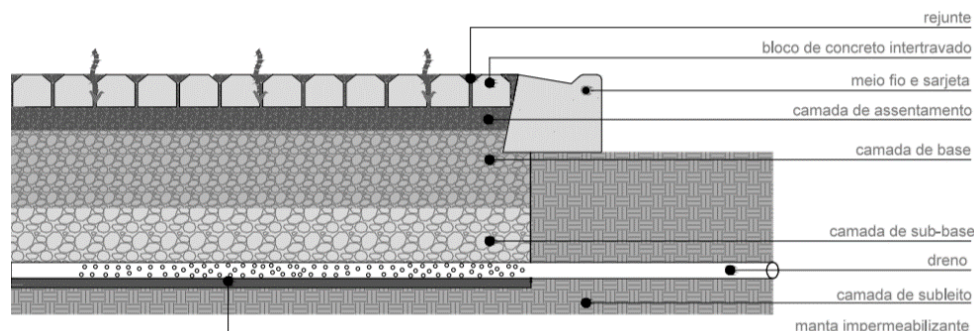


Figura 3-16 – Pavimento intertravado permeável sem infiltração no solo (ABCP, 2015).

As principais vantagens da utilização de pavimentos permeáveis ou porosos são (CASTRO, 2002; SUDERHSA, 2002; ABCP, 2015):

- Controle das vazões de pico;
- Redução das dimensões dos sistemas de drenagem a jusante;
- Controle da poluição difusa (filtração de poluentes);
- Controle do volume total de escoamento superficial e recarga dos aquíferos (quando existe infiltração no solo das águas armazenadas);

As desvantagens incluem (SUDERSHA, 2002):

- colmatagem das camadas permeáveis;
- o perigo de contaminação do lençol freático;
- a necessidade de manutenção regular especializada.

Cabe também destacar que essas estruturas estão sujeitas a compactação e, portanto, o uso preferencial é em estacionamentos, vias de trânsito leve, praças, quadras de esportes (SUDERSHA, 2002).

Na literatura existem diversos estudos que buscam verificar a eficiência de diferentes tipos de superfícies permeáveis. Silva (2006) avaliou experimentalmente quatro superfícies permeáveis: grama, solo exposto, revestimento permeável com blocos de concretos maciços, revestimento permeável com blocos de concreto vazados. O autor constatou que a superfície com grama foi aquela que apresentou os melhores resultados, possuindo valores para o coeficiente de escoamento inferiores a 0,2. Já a parcela com solo exposto apresentou os



piores resultados, com valor para o coeficiente de escoamento de até 0,6. Em relação aos revestimentos permeáveis, os blocos maciços apresentaram bons resultados para a situação onde a parcela de substrato não foi compactada e a declividade igual a 2%, apresentando coeficientes de escoamento de, no máximo, 0,4. As superfícies de blocos vazados se mostraram mais eficientes que as de blocos maciços, apresentando valores para o coeficiente de escoamento que variavam de 0,33 a 0,35. Portanto, os revestimentos permeáveis podem contribuir significativamente para a redução dos volumes de escoamento superficial.

Uma das grandes preocupações em relação a utilização de pavimentos permeáveis é a perda da sua capacidade de infiltração ao longo da vida útil. De fato, [Silva \(2006\)](#) verificou que a capacidade de infiltração dos revestimentos permeáveis foi se reduzindo ao longo do experimento, principalmente devido à disposição de sedimentos nessas superfícies. Pesquisas realizadas na Alemanha por [Borgwardt \(2006\)](#) mostraram que, sem qualquer tipo de manutenção, a capacidade de infiltração do pavimento de concreto poroso estudado se reduz em 30% do seu valor inicial após seis anos de uso, mas permanece praticamente constante nos anos seguintes ([Figura 3-17](#)).

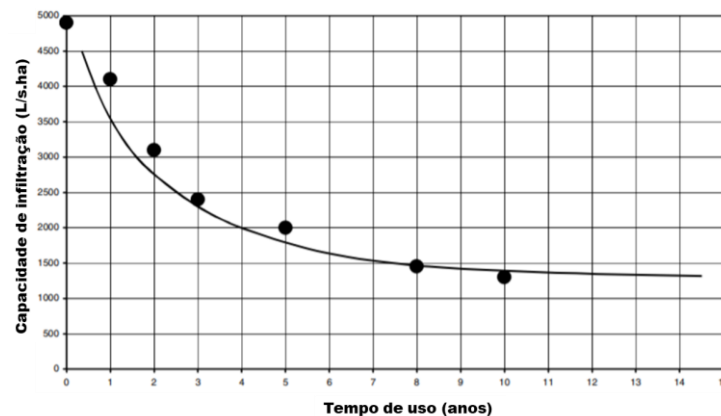


Figura 3-17 – Redução da capacidade de infiltração do pavimento de concreto poroso ao longo do tempo ([BORGWARDT, 2006](#) – adaptado)

Diversas pesquisas recentes buscaram avaliar a eficácia dos pavimentos permeáveis já em exercício. No estudo de caso realizado por [Rodríguez-Rojas et al. \(2018\)](#), na cidade de Granada (Espanha), foi analisada o desempenho de três tipos de superfícies permeáveis num mesmo projeto de estacionamento. Utilizando o modelo SWMM (*Storm Water Management Model*), foi verificado que, a depender do evento de precipitação e do tipo de pavimento, o volume do escoamento superficial pode alcançar uma redução de até 95,9% daquele obtido numa pavimentação convencional e, quanto ao amortecimento de vazões de pico, de pelo menos, 80%.

### 3.4.4 Valas e planos de infiltração

Os planos e valas de infiltração são depressões escavadas onde o escoamento é acumulado temporariamente a céu aberto e depois esgotado por infiltração. Enquanto as valas de infiltração possuem dimensões longitudinais significativamente maiores que as dimensões transversais, os planos de infiltração possuem dimensões longitudinais não muito maiores do que as transversais e as profundidades são reduzidas (BAPTISTA *et al.*, 2005).

As valas de infiltração (Figura 3-18) funcionam como pequenos canais onde o escoamento é desacelerado e infiltrado parcialmente no percurso, com o excesso destinado a uma rede pluvial convencional. Para favorecer a infiltração, podem ser incorporadas pequenas barragens de desaceleração (SUDERSHA, 2002).

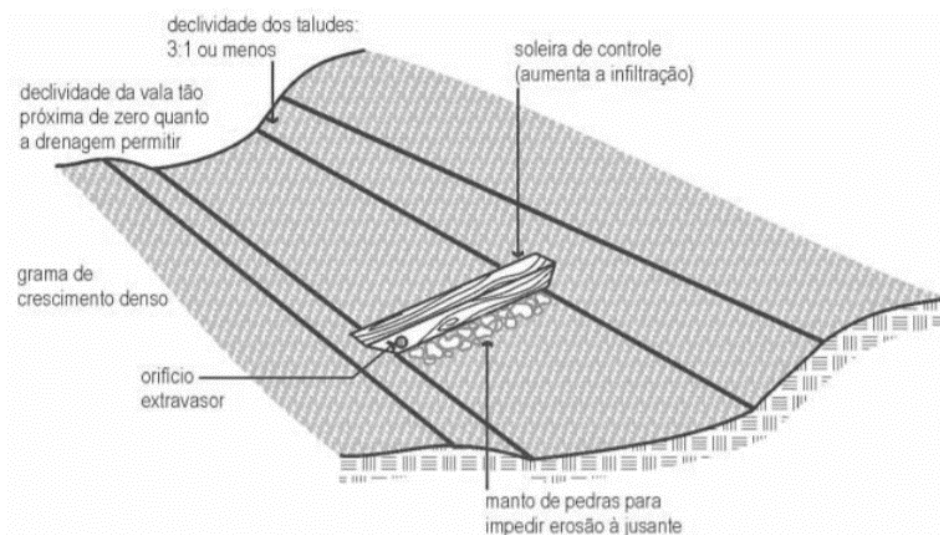


Figura 3-18 – Vala de infiltração (SCHUELER, 1987 *apud* SUDERSHA, 2002).

De acordo com Baptista *et al.* (2005), além do controle de escoamento (redução da vazão de pico e do volume total do escoamento superficial), as vantagens que essas estruturas proporcionam são:

- baixo custo de construção e manutenção;
- benefício financeiro, com redução das dimensões do sistema de drenagem a jusante ou mesmo sua completa eliminação;
- ganhos paisagísticos com a possibilidade de valorização do espaço urbano;
- benefícios ambientais, com a recarga do lençol freático e com a melhoria da qualidade das águas pluviais.

Para os mesmos autores, os inconvenientes identificados para essas estruturas são:

- necessidade de manutenção periódica;
- baixa eficiência em áreas de fortes declividades;
- possibilidade de estagnação das águas, com severas implicações sanitárias.

Para verificar a eficiência dessas estruturas, [Pacheco \(2015\)](#) avaliou o comportamento de uma vala de infiltração ([Figura 3-19](#)) com aproximadamente 10 metros de comprimento localizada em Florianópolis (Santa Catarina). No estudo, entre os 18 eventos de precipitações analisados, somente em três, o dispositivo não conseguiu controlar o escoamento pela infiltração, consequência dos dias chuvosos que antecederam os eventos considerados. Em 47% dos casos, o volume de água esgotada por infiltração foi maior que o volume de saída da estrutura.



Figura 3-19 – Vala de infiltração alagada ([PACHECO, 2015](#)).

#### **3.4.5 Trincheira de infiltração**

As trincheiras de infiltração são dispositivos lineares, isto é, possuem comprimento extenso em comparação com sua largura e profundidade. Essas estruturas são realizadas mediante retirada do solo original e substituição por material granular de maior porosidade, normalmente brita. O escoamento superficial é direcionado para esse dispositivo e esgotado por infiltração. Fundamentalmente diferem das valas e planos de infiltração por o armazenamento, ao invés de se dar a céu aberto, ocorrer no reservatório poroso. A [Figura 3-20](#) ilustra seção típica de trincheira de infiltração.

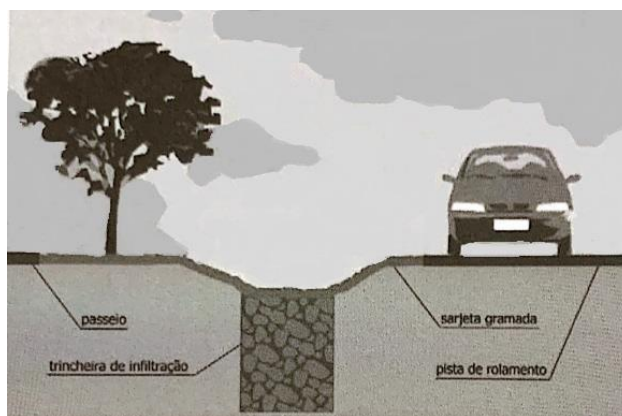


Figura 3-20 – Seção padrão de trincheira (BAPTISTA *et al.*, 2005).

As paredes, o topo e o fundo da trincheira, geralmente, são revestidos por filtro geotêxtil para evitar penetração de sedimentos e aumentar sua vida útil. Alternativamente, no fundo da trincheira, utiliza-se camada de areia filtrante no lugar da manta geotêxtil (SUDERSHA, 2002). Outra solução para aumentar a vida útil dessa estrutura é deixar uma pequena faixa de área verde em torno dela para que os sedimentos fiquem nela retidos. A Figura 3-21 ilustra os principais componentes dessas estruturas.

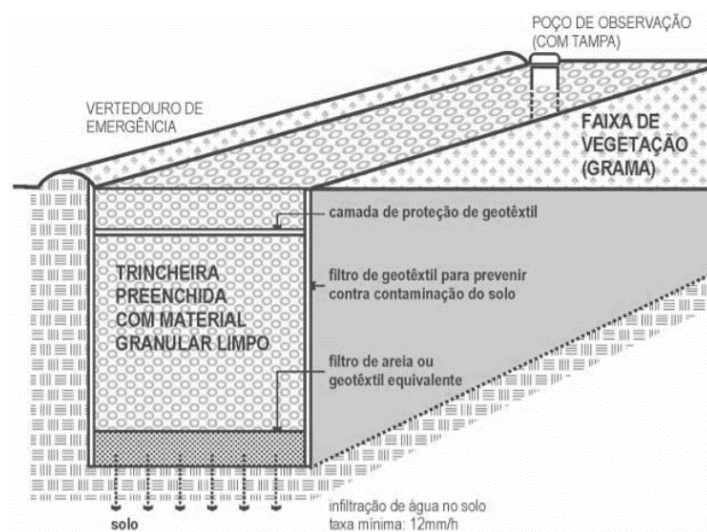


Figura 3-21 – Trincheira de infiltração (SCHUELER, 1987 *apud* SUDERSHA, 2002).

Essas estruturas exigem que o solo tenha taxa de infiltração nem muito baixa, para que o tempo de esvaziamento não seja elevado, nem muito alta a ponto de favorecer a contaminação do lençol freático, por falta de filtragem no solo de águas poluídas. Ressalta-se que mesmo realizadas em áreas ideais, apesar de as trincheiras de infiltração promoverem melhora da qualidade das águas pluviais, essas estruturas não são concebidas para a redução de cargas poluidoras, assim como não podem receber altas concentrações de sedimentos, sob risco de colmatção (SUDERSHA, 2002).

De acordo com [Baptista et al. \(2005\)](#), os benefícios do uso de trincheiras são:

- ganhos financeiros, com redução das dimensões do sistema de drenagem a jusante ou mesmo sua completa eliminação;
- ganhos paisagísticos com a possibilidade de valorização do espaço urbano;
- ganhos ambientais, com a recarga do lençol freático e com a melhoria da qualidade das águas pluviais.

Os mesmos autores destacam os inconvenientes e as dificuldades da implementação dessas estruturas:

- necessidade de manutenção periódica;
- baixa eficiência em áreas de fortes declividades;
- risco de poluição do lençol freático.

Com a finalidade de avaliar a eficiência desses dispositivos, [Souza \(2002\)](#) monitorou duas trincheiras de infiltração que recebiam águas pluviais de rua pavimentada e de estacionamento, durante 33 e seis meses, respectivamente. A [Figura 3-22](#) mostra as fases de enchimento da trincheira com brita e de monitoramento. Para todos os 108 eventos de precipitação analisados, foi verificado o completo controle do escoamento, até mesmo em determinado evento com tempo de retorno maior ao de projeto, indicando superdimensionamento da estrutura. Também foram constatados tempos de esvaziamento baixos, garantia de que as trincheiras controlariam eventos sucessivos sem maiores riscos de insuficiência. Apesar de as estruturas não terem apresentado alterações significativas em seu funcionamento ao longo do monitoramento, o autor identificou presença de caminhos preferenciais e acentuado grau de colmatação em uma das trincheiras, ressaltando a necessidade de manutenções periódicas.



Figura 3-22 - Enchimento da trincheira com brita e monitoramento após sua construção ([SOUZA, 2002](#)).



Vieira *et al.* (2020) apresentaram uma proposta de implantação desse tipo de dispositivo num canteiro central, localizado na Avenida Águas Marinhas, no município de Contagem (Minas Gerais). Comparando os hidrogramas antes e após a implantação da medida compensatória, foi constatado que o dispositivo permite, para o escoamento gerado pela chuva de projeto, reduzir em 58% a vazão de pico e retardar em torno de 70% o tempo ao pico.

### 3.4.6 Poços de infiltração

Os poços de infiltração são dispositivos pontuais de reduzida extensão superficial, concebidos para permitir a infiltração do escoamento superficial para o solo (BAPTISTA *et al.*, 2005; SUDERSHA, 2002).

O armazenamento temporário das águas de escoamento superficial é realizado por meio de um poço vazio ou preenchido com materiais porosos (BAPTISTA *et al.*, 2005). A principal diferença dessas estruturas para os microrreservatórios é que a parte superior é a céu aberto. A Figura 3-23 ilustra a seção típica de um poço de infiltração preenchido com brita, onde o isolamento do material poroso é realizado por um geotêxtil para evitar a migração de materiais finos para dentro ou para fora da estrutura.

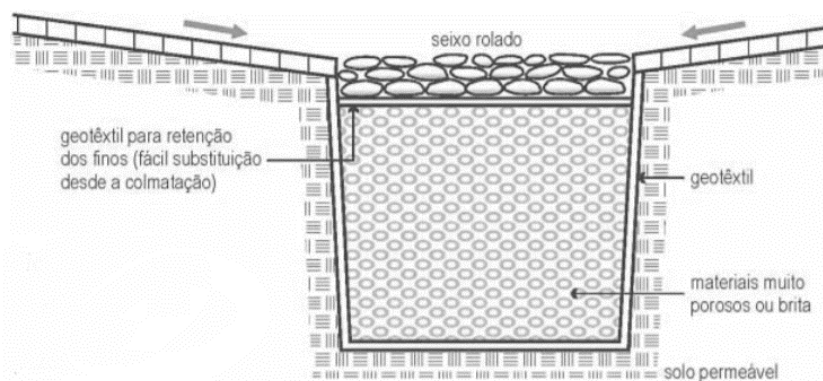


Figura 3-23 – Poço de infiltração preenchido com brita (AZZOUT *et al.*, 1994 apud SUDERSHA, 2002).

Essas estruturas geralmente possuem profundidade elevada e, portanto, sua implantação pode ser limitada a depender da profundidade do lençol freático. Baptista *et al.* (2005) destaca a importância de existência de uma zona não saturada com espessura de pelo menos um metro e meio entre o fundo da estrutura e o nível d'água máximo do lençol.

Assim como as demais medidas compensatórias fundamentadas na infiltração, essas estruturas além de reduzir as vazões de pico e o volume do escoamento superficial,

promovem a recarga das águas subterrâneas, podendo-se, inclusive, integrar harmoniosamente no projeto de paisagismo de áreas urbanas (BAPTISTA *et al.*, 2005).

Apesar dessas vantagens, Baptista *et al.* (2005) e SUDERSHA (2002) destacam os seguintes inconvenientes:

- pequena capacidade volumétrica de armazenamento;
- risco de contaminação das águas subterrâneas;
- necessidade de manutenção periódica para evitar a colmatção;
- podem ser utilizados para disposição de rejeitos.

Com o objetivo de verificar a eficiência das estruturas de infiltração, Yoo *et al.* (2016) utilizaram o Método Soil Conservation Service (SCS) para estimar valores do índice curva-número (CN) antes e depois da implantação dessas estruturas. De acordo com o Método SCS, que será descrito no tópico 3.6 (página 43), o índice CN é diretamente proporcional ao grau de impermeabilização das superfícies. Os autores verificaram que a instalação de 200 poços de infiltração em uma área de 10.000 m<sup>2</sup> reduz o índice CN em 6%.

Reis *et al.* (2014) avaliaram o desempenho de um poço de infiltração com 1,10 m de diâmetro e 1,50 m de profundidade, receptor de águas superficiais oriundas de sistema predial. O monitoramento permitiu identificar que o dispositivo foi capaz de suportar toda a vazão do escoamento superficial gerado pela chuva de projeto, sem extravasar. Portanto, concluiu-se que toda a água de chuva recebida pela estrutura foi infiltrada, permitindo reduzir os volumes de escoamento superficial. Para uma chuva de maior duração que a de projeto, foi constatado que o dispositivo extravasou, mas foi capaz de reduzir a vazão de pico em 16%. O estudo conclui que sistemas de infiltração integrados aos sistemas prediais de água pluvial proporcionam redução do volume escoado e amortecimento das vazões de forma eficaz.

### 3.5 CIDADES ESPONJA

As cidades chinesas sofrem com frequentes desastres causados por inundações resultantes da rápida urbanização, das mudanças climáticas e da falta de planejamento urbano (Nguyen *et al.*, 2018). Diante dessa situação, foi apresentado formalmente pela primeira vez o conceito de cidade esponja em 2013 pelo governo chinês (Xia *et al.*, 2017).

As cidades esponjas são formas de desenvolvimento urbano sustentável que visam tornar a operação do sistema de água da cidade como uma esponja, capaz de absorver, armazenar, infiltrar e purificar as águas pluviais, tornando o seu reuso possível, se necessário (Li *et al.*, 2017). O objetivo geral é adotar uma série de medidas capazes de fazer com que as água da chuva fiquem por mais tempo na cidade (CRR, 2020), tornando o comportamento hidrológico da bacia hidrográfica urbanizada próximo do seu comportamento natural.

Na China, é utilizada a abordagem LID para a maioria das construções de cidades esponja (Xia *et al.*, 2017), portanto o uso de medidas compensatórias é estimulado nessas cidades como forma de mitigar os problemas causados pela impermeabilização do solo.

Xiamen, uma cidade turística localizada na costa sudeste da China, foi uma das primeiras cidades a ser selecionada para a realização de projetos de controle de inundações ambientalmente sustentável (CRR, 2020). A zona residencial de Yangtang, urbanizada em 2010, foi escolhida como área piloto da cidade esponja (Figura 3-24).



Figura 3-24 – Comparação de imagens de sensoriamento remoto antes e depois do desenvolvimento da área residencial Yangtang (CRR, 2020).

Devido ao seu desenvolvimento, vários problemas relacionados com as águas urbanas surgiram gradualmente, como por exemplo poluição do escoamento superficial, acúmulo de água nas estradas e formação de ilhas de calor (CRR, 2020).

O *layout* da cidade esponja construída em Yangtang planejado para solucionar esses problemas está ilustrado na Figura 3-25.



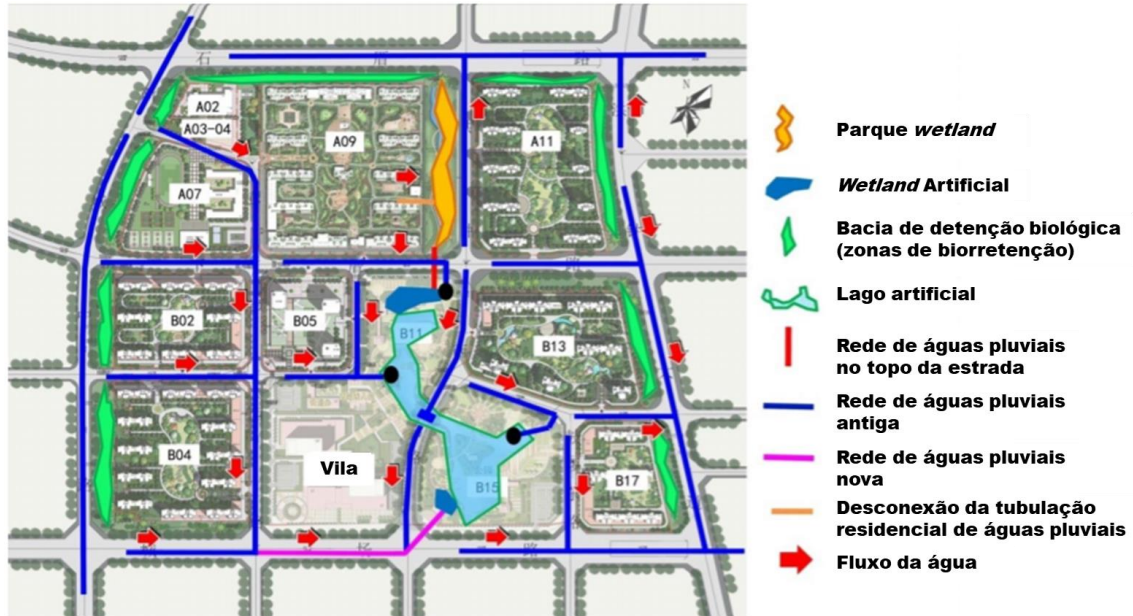


Figura 3-25 – Layout da cidade esponja em Yangtang (CRR, 2020 – adaptado).

Além das estruturas de maior porte destacadas na Figura 3-25, também foram utilizadas valas de infiltração, trincheira de infiltração, jardins de chuva, telhados verdes, microrreservatórios de detenção. Algumas fotos após a implementação das estruturas utilizadas são mostradas na Figura 3-26.



Figura 3-26 – Cenas reais após a implantação de medidas compensatórias em Yangtang (CRR, 2020 – adaptado).

De acordo com [Randall et al. \(2019\)](#), as cidades esponjas chinesas possuem ambiciosas metas de redução do volume de escoamento superficial. Os autores avaliaram, por meio do modelo SWMM, o potencial de alcance das metas estabelecidas para Pequim. Para isso foram criados diferentes cenários utilizando a abordagem LID. Esses cenários possuem vários graus de implementação das seguintes medidas compensatórias: jardins de chuva, pavimentos permeáveis e telhados verdes. No cenário sem a implantação de nenhuma medida compensatória, a taxa anual de volume de águas pluviais capturado é estimada em 59,9%, quando a meta estabelecida é de 80%. Já no cenário onde 30% das áreas de telhado são substituídas por telhados verdes, 35% das áreas pavimentadas são substituídos por pavimentos permeáveis e 10% das áreas verdes são substituídas por jardins de chuva, a taxa anual de volume capturado foi igual a 82,2%, indicando que as metas estabelecidas para as cidades esponjas podem ser alcançadas com níveis viáveis de implantação de LIDs.

Existem experiências da aplicação desse conceito também na Europa. Em Londres (Inglaterra), *Derbyshire Street* não sofria com grandes problemas de inundações, mas com a finalidade de contribuir na redução das pressões na rede de esgoto ([FOGEIRA, 2019](#)) e revitalizar a área, foi construído um parque aplicando os conceitos de cidade esponja. As medidas compensatórias implantadas foram: vala de infiltração, pavimentos permeáveis, poços de infiltração, telhados verdes, jardins de chuva. A [Figura 3-27](#) mostra fotos da *Derbyshire Street* antes e depois da construção do parque.



Figura 3-27 - *Derbyshire Street* antes e depois da construção do parque sustentável ([FOGEIRA, 2019](#) – adaptado).

Após sua construção, a área passou a receber diversos eventos realizados pela comunidade, mostrando-se ser um exemplo bem sucedido de valorização do espaço urbano atrelado ao controle do escoamento superficial.

### 3.6 MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA

Os modelos matemáticos de drenagem urbana permitem simular os processos hidrológicos. A partir da década de 1960, com a evolução da tecnologia da informação, observou-se o aparecimento de um grande número de modelos computacionais (TUCCI, 1993).

De acordo com Cabral *et al.* (2009), os modelos computacionais de drenagem urbana são entendidos como a associação de modelos tipo chuva-vazão com modelos de propagação do escoamento.

Esses modelos passaram a ser utilizados tanto para o planejamento e detalhamento de projetos, quanto para simular cenários do comportamento de um sistema de drenagem submetidos a determinada condição de precipitação pluviométrica (CABRAL *et al.*, 2009). Para isso, é recomendado a utilização de *softwares* que incorporem duas componentes: modelo de chuva-vazão e modelo de propagação de escoamento.

Para estimar o escoamento superficial, entre os vários modelos propostos, o Método SCS é a relação funcional mais empregada em bacias não monitoradas (CUNHA, 2015). Para modelar a propagação desse escoamento, o modelo da onda dinâmica gera os resultados mais precisos (ROSSMAN *et al.*, 2016), pois os modelos de regime uniforme e da onda cinemática resolvem as equações de *Saint Venant* de maneira simplificada.

O ideal é que as informações necessárias à modelagem de drenagem urbana sejam georreferenciadas dentro bacia hidrográfica urbana, de modo que haja integração do modelo de drenagem com ferramentas de geoprocessamento.

#### 3.6.1 Método SCS

O Método SCS – representado pela Figura 3-28 – necessita basicamente de três dados de entrada: precipitação, tipo de solo e o uso e ocupação da área de estudo. Para esse modelo, o escoamento superficial começa a ocorrer somente quando a precipitação acumulada atinge valor determinado, denominado abstração inicial ( $I_a$ ), em função da capacidade máxima de armazenamento do solo. Dessa forma, pode-se definir como abstração inicial ( $I_a$ ) a quantidade de água precipitada em milímetros que foi interceptada pela vegetação, ou retida em depressões do terreno, infiltrada ou evaporada antes do início do escoamento (CANHOLI, 2005). Estima-se que a abstração inicial ( $I_a$ ) corresponda a 20% da capacidade máxima de armazenamento do solo (TUCCI, 1993).

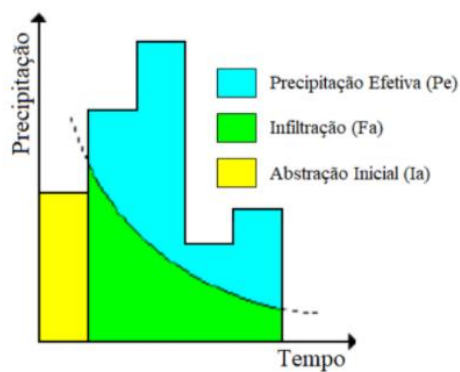


Figura 3-28 – Comportamento do método SCS (Costa, 2013).

Adotando-se essa estimativa, a precipitação efetiva pode ser calculada por meio da [Equação 3-1](#).

$$P_{ef} = \frac{(P - 0,2S_D)^2}{(P + 0,8S_D)} \quad \text{Equação 3-1}$$

onde:

$P_{ef}$  – Escoamento superficial (precipitação efetiva) (mm);

$P$  – Precipitação (mm);

$S_D$  – Capacidade máxima de armazenamento do solo (mm).

A capacidade máxima de armazenamento do solo ( $S_D$ ) é estimada mediante a determinação da curva-número (CN), conforme a [Equação 3-2](#).

$$S_D = \frac{25400 - 254CN}{CN} \quad \text{Equação 3-2}$$

A atribuição do valor do CN é realizada a partir de valores tabelados disponíveis em função do tipo de solo e do uso e ocupação existentes na área de interesse (CANHOLI, 2005). Os tipos de solo identificados estão descritos na Tabela 3-1 e os valores de CN para bacias urbanas em função do tipo de solo, na Tabela 3-2.



Tabela 3-1 – Classificação dos grupos hidrológico dos solos e sua capacidade de infiltração (CANHOLI, 2005).

Grupo Hidrológico do Solo	Descrição do Solo	Capacidade de Infiltração (cm/h)
A	Areias e cascalhos profundos (h > 1,5m), muito permeáveis, com alta taxa de infiltração, mesmo quando saturados. Teor de argila até 10%.	1,20 - 0,80
B	Solos arenosos ou pouco finos, menos profundos (h < 1,5m) e permeáveis. Teor de argila 10% - 20%.	0,80 - 0,40
C	Solos pouco profundos com camadas subsuperficiais que impedem o fluxo descendente da água, ou solos com porcentagem de argila elevada (20% - 30%).	0,40 - 0,15
D	Solos compostos principalmente de argila (acima de 30%) ou solos com nível freático elevado, ou solos com camadas argilosas próximas à superfície, ou solos rasos sobre camadas impermeáveis.	0,15 - 0,00

Tabela 3-2 – Estimativas de CN para áreas urbanas (CANHOLI, 2005; TUCCI, 1993).

Tipo de solo/ocupação e condição hidrológica	Grupo Hidrológico			
	A	B	C	D
<b>Áreas Urbanas Livres</b>				
Condições ruins (gramados < 50%)	68	79	86	89
Condições normais (gramados de 50% a 75%)	49	69	79	84
Condições excelentes (gramados > 75%)	39	61	74	80
<b>Áreas Impermeáveis</b>				
Estacionamentos pavimentados, telhados	98	98	98	98
<b>Estradas e ruas</b>				
Asfaltadas e com sistema de drenagem	98	98	98	98
Asfaltadas e sem sistema de drenagem	83	89	92	93
Pavimentadas com paralelepípedos	76	85	89	91
Terra	72	82	87	89
<b>Áreas Urbanas</b>				
Áreas comerciais com 85% de área impermeável	89	92	94	95
Áreas industriais com 72% de área impermeável	81	88	91	93
<b>Áreas Residenciais</b>				
Área residencial com 65% de área impermeável	77	85	90	92
Área residencial com 38% de área impermeável	61	75	83	87
Área residencial com 25% de área impermeável	54	70	80	85
Área residencial com 20% de área impermeável	51	68	79	84
Área residencial com 12% de área impermeável	45	65	77	82

Os valores de CN dependem, além do tipo de solo e sua ocupação, da condição média de umidade antecedente do solo (*Antecedent Moisture Condition - AMC*) (USDA SCS, 1985). Existem três classes de AMC, distintas em função das precipitações que ocorreram anteriormente ao evento em estudo, sendo elas: condição de solo seco (AMC I); condição média de umidade (AMC II); e condição de solo saturado (AMC III). Os valores de CN da Tabela 3-2 se referem a condições médias de umidade (AMC II). O valor de CN para a condição AMC III pode ser calculada a partir do valor de CN para a condição AMC II utilizando a Equação 3-3.

$$CN_{III} = \frac{23 CN_{II}}{10 + 0,13 CN_{II}} \quad \text{Equação 3-3}$$

onde:

$CN_{III}$  – Valor de CN para a condição AMC III;

$CN_{II}$  – Valor de CN para a condição AMC II.

### 3.6.2 Modelo SWMM e software PCSWMM

Apresenta-se a seguir concisa descrição do modelo SWMM. Pela complexidade do programa, essa explanação não compreende todas suas particularidades, mas se concentra nos tópicos e itens que foram utilizados ao analisar o comportamento hidrológico do cenário de estudo.

O modelo SWMM (*Storm Water Management Model*), desenvolvido pela USEPA (*United States Environmental Protection Agency*) no começo da década de 1970, é um dos modelos computacionais amplamente utilizado em bacias urbanizadas. Ele se baseia em dois módulos principais: o *Runoff* define o escoamento superficial mediante modelos chuva-vazão, e o *Extran* é responsável pela modelagem hidrodinâmica de propagação do escoamento pelos canais e condutos da rede de drenagem (BELING *et al.*, 2011).

Por meio do módulo *Runoff*, determina-se a parcela da chuva que gera o escoamento superficial (precipitação efetiva) em determinada área. Para esse cálculo, o sistema disponibiliza ao usuário diferentes métodos: equação de Horton, de Green-Ampt e do SCS. Já para a propagação do escoamento superficial, por meio do módulo *Extran*, o sistema disponibiliza os seguintes métodos: fluxo em regime uniforme, onda cinemática e onda dinâmica.

A simulação do escoamento superficial no modelo SWMM é realizada considerando o comportamento das sub-bacias como reservatórios não lineares que recebem a precipitação diretamente e as águas pluviais de qualquer outra sub-bacia situada a montante, quando houver.

Consideram-se sub-bacias, unidades hidrológicas de terreno cuja topografia e elementos da infraestrutura urbana (muros, ruas e até mesmo itens do próprio sistema de drenagem urbana) conduzem o escoamento para um único ponto de descarga. Elas são representadas no SWMM como superfícies retangulares com declividade ( $S$ ) constante, e largura ( $W$ ) que drenam para um único canal de saída (ROSSMAN *et al.*, 2016) com determinado coeficiente de rugosidade de Manning ( $n$ ), conforme representado na Figura 3-29.

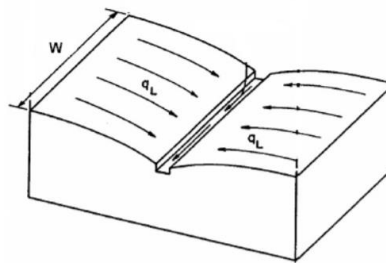


Figura 3-29 – Representação da sub-bacia no SWMM (ROSSMAN *et al.*, 2016).

Segundo com Rossman *et al.* (2016), o parâmetro  $W$  pode ser estimado determinando dividindo a média dos maiores comprimentos de escoamento na sub-bacia pela sua área. O coeficiente de rugosidade de Manning é estimado com base na cobertura do solo por meio de tabelas presentes na literatura especializada.

A visão conceitual do escoamento superficial no SWMM está ilustrada na Figura 3-30, onde a variável  $d$  constitui a lâmina d'água na sub-bacia, representada como reservatório não linear no modelo SWMM,  $d_p$  é o valor máximo de armazenamento na depressão e  $Q$ , a vazão máxima gerada em cada sub-bacia. De acordo com Rossman *et al.* (2016), o valor máximo do armazenamento em depressões ( $d_p$ ) representa a abstração inicial ( $I_a$ ).

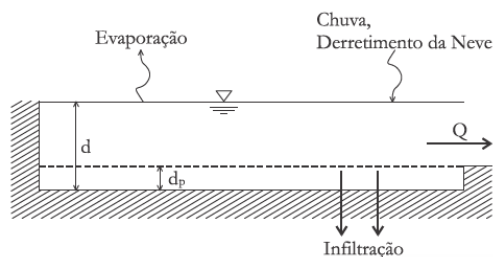


Figura 3-30 – Visão conceitual do escoamento no SWMM (LEHNS, 2012).

Huber (2001) estendeu o modelo tradicional de escoamento superficial do SWMM permitindo a transferência da vazão gerada numa sub-bacia impermeável para uma sub-bacia permeável (Figura 3-31).

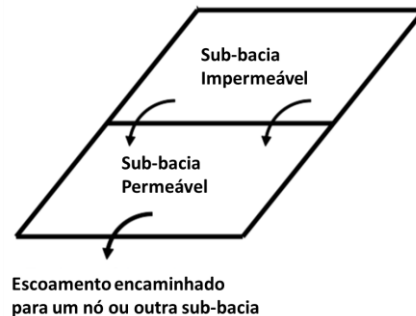


Figura 3-31 – Redirecionamento do escoamento superficial (HUBER, 2001 – adaptado).

Como mencionado anteriormente, a descarga das sub-bacias pode se dar em outra sub-bacia ou no nó. Os nós podem ser de conexão (*Junctions*), exutórios (*Outfalls*), unidades de armazenamento (*Storage*). É possível conectar os nós por trechos de condutos (*Conduits*), bocais (*Outlets*). As informações a seguir foram extraídas do Manual do Usuário EPA SWMM 5.0 traduzido em português por Lehns (2012).

Os nós conectam diferentes itens do sistema de drenagem (representados por linhas) entre si, podendo indicar poços de visita, elementos de conexão de tubulações ou confluências de canais superficiais. Os principais parâmetros dos nós de conexão são as cotas de radier da estrutura física representada pelo nó e a do terreno. Além do escoamento encaminhado diretamente pelas sub-bacias e/ou condutos, é possível também fornecer dados de contribuições externas de fluxo aos nós de conexão.

Os nós do tipo exutórios são terminais do sistema de drenagem. Os principais parâmetros são a cota de fundo (do radier) da estrutura representada pelo nó e as condições de contorno finais.

As unidades de armazenamento são nós com capacidade para armazenar determinados volumes de água, podendo representar desde pequenas bacias de detenção até grandes lagos. Esses objetos possuem como principais parâmetros a cota de fundo ou de radier da estrutura representada pelo nó, a altura máxima da estrutura representada pelo nó e a função ou tabela que relaciona sua área superficial à profundidade.

Os condutos são tubulações ou canais que transportam a água de um nó para o outro, sendo necessário definir as características da seção transversal e seu comprimento.



Os bocais, também representados por trechos entre nós, são dispositivos empregados para controlar as vazões de descarga das unidades de armazenamento e, portanto, deve-se fornecer a função ou tabela que representa a curva de descarga.

Para canais abertos e condutos livres, o SWMM emprega a equação de Manning (Equação 3-4) para estabelecer a relação entre a vazão que escoa pelo conduto, a área da seção transversal, o raio hidráulico e a declividade.

$$Q = \frac{1,49}{n} A R_H^{2/3} \sqrt{S} \quad \text{Equação 3-4}$$

onde:

$Q$  – vazão que escoa pelo conduto (m<sup>3</sup>/s);

$n$  – rugosidade de Manning (adimensional);

$A$  – área da seção transversal (m<sup>2</sup>);

$R_H$  – raio hidráulico (m);

$S$  – declividade (m/m).

Algumas medidas compensatórias descritas no tópico 3.4 podem ser inseridas no modelo SWMM como objetos de controles LID, sendo representadas pela combinação de camadas cujas propriedades são definidas por unidades de áreas (LEHNS, 2012). A Figura 3-32 ilustra as principais camadas possíveis de um controle LID no SWMM.

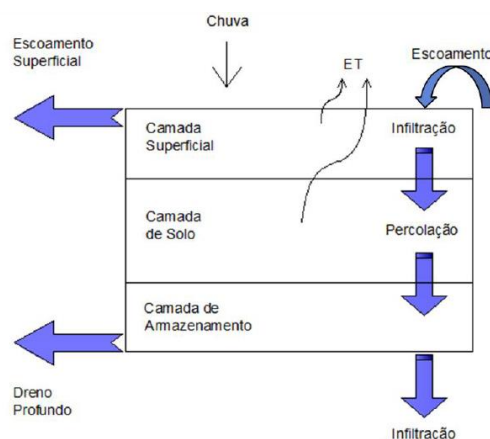


Figura 3-32 – Representação conceitual de um controle LID no modelo SWMM – Bacia de Filtração (LEHNS, 2012).

Existem duas formas de alocar controles LID no modelo SWMM (ROSSMAN, 2015):

- 1) Adicionando uma ou mais unidade de controle LID em uma sub-bacia existente. Nesse caso, a LID vai tratar uma porção específica da área permeável e/ou impermeável da sub-bacia na qual ela está inserida. Após a alocação da LID, os parâmetros porcentagem de área impermeável e largura ( $W$ ) da sub-bacia podem precisar ser corrigidos para compensar a quantidade de área original que foi substituída pela LID, conforme ilustra a Figura 3-33.

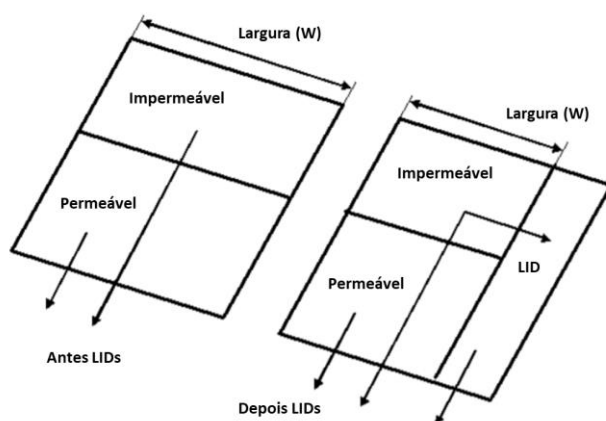


Figura 3-33 – Ajuste dos parâmetros da sub-bacia após a introdução de controles LID (ROSSMAN, 2015) – adaptado.

- 2) Criando uma nova sub-bacia dedicada totalmente para uma única unidade de controle LID. Nesse caso, deve-se encaminhar o escoamento das sub-bacias a montante para essa nova sub-bacia.

O *software* PCSWMM, desenvolvido pela CHIWATER, permite o acoplamento direto do modelo SWMM ao Sistema de Informações Geográficas (SIG), tornando possível a utilização de ferramentas de geoprocessamento.

## 4 METODOLOGIA

A Figura 4-1 resume as etapas a serem concluídas para alcançar os objetivos delineados no Capítulo 2 (página 16).

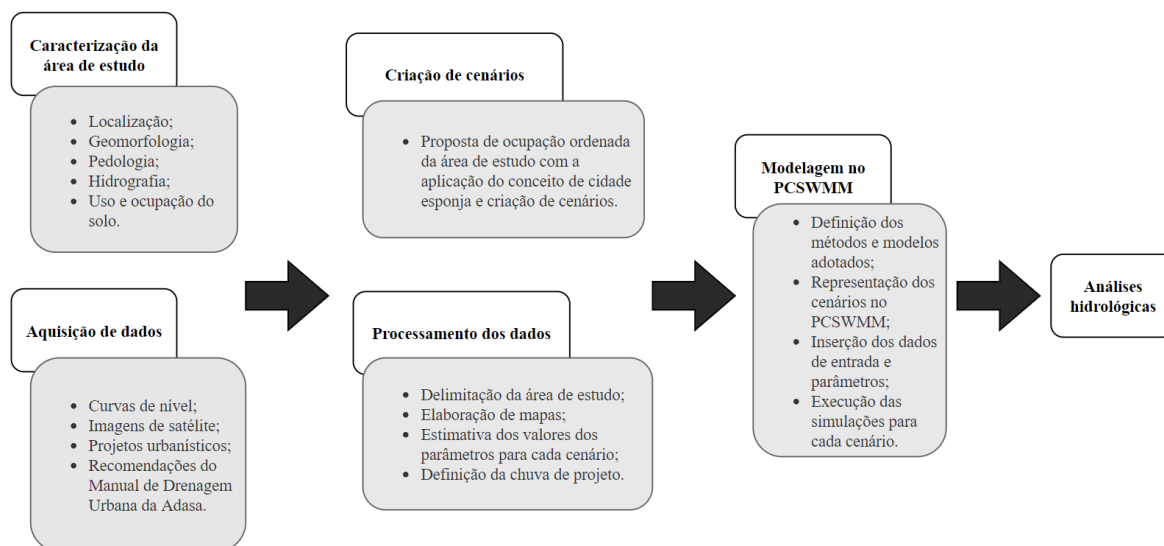


Figura 4-1 – Fluxograma das etapas a serem concluídas para a realização do trabalho.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A escolha da área de estudo está relacionada à expansão urbana que está ocorrendo no DF e que pode comprometer a qualidade dos recursos hídricos da região. A Bacia do Riacho Fundo está entre as áreas mais exploradas em termos de ocupação urbana e sua situação é particular pela forma com que vem sendo ocupada, em grande parte irregular e desordenada. Há ainda, próximo da área de estudo, a região de Vicente Pires, que, para as alterações no presente trabalho avaliadas, deve ser afetada com maior frequência pelas inundações e alagamentos que já a afligem.

O Assentamento 26 de Setembro vem apresentando acentuada urbanização. As ocupações na região, inicialmente destinada à atividade agrícola, vêm se intensificando desde 2009. Esse processo desordenado de ocupação ocorre sem a implantação da devida estrutura de saneamento: serviços de drenagem, coleta e tratamento de esgotos, abastecimento de água e coleta de resíduos sólidos.

#### 4.1.1 Localização geográfica e delimitação da área de estudo

A área de estudo do trabalho corresponde ao Assentamento 26 de Setembro, localizada nas proximidades da região central de Brasília – a 10 km do Eixo Monumental – inserida na cabeceira de duas importantes unidades hidrográficas do Distrito Federal: Riacho Fundo e Córrego do Bananal (Figura 4-2)

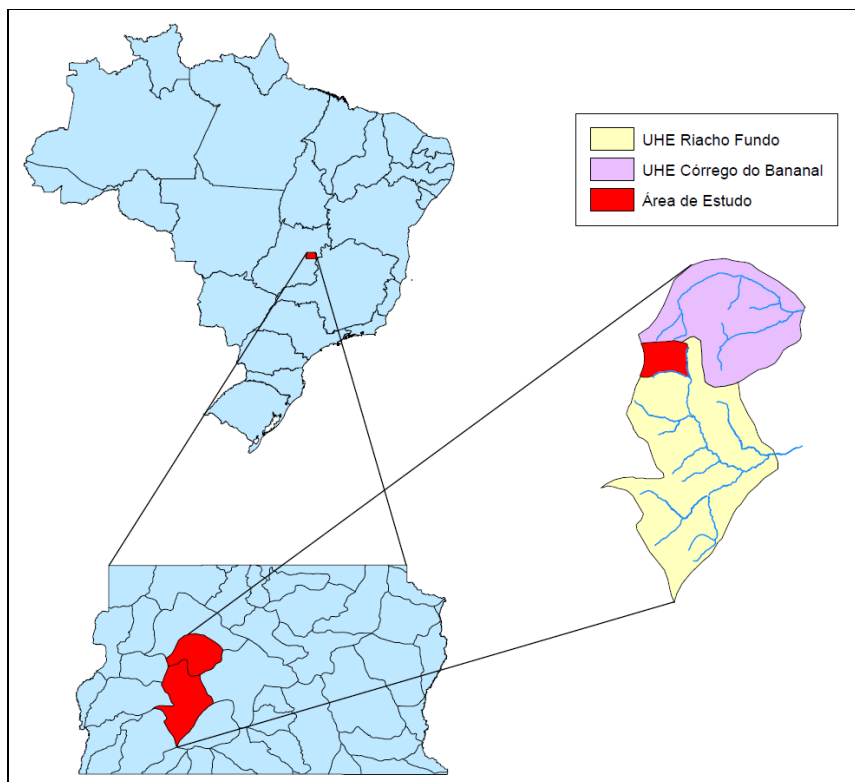


Figura 4-2 – Localização geográfica do Assentamento 26 de Setembro.

A Figura 4-3 mostra a situação da região frente aos divisores de água naturais, tendo no exutório a Estação Fluviométrica 60477680, no caso do Riacho Fundo, e a confluência dos córregos Poço d'Água e Ribeirão Bananal, no caso do Bananal. Os divisores de água naturais e a hidrografia foram delimitados a partir de ferramentas de geoprocessamento do software *ArcGIS 10.6.1* e utilizando as curvas de nível de 5 metros do ano de 2009 obtidas no GeoPortal – DF.

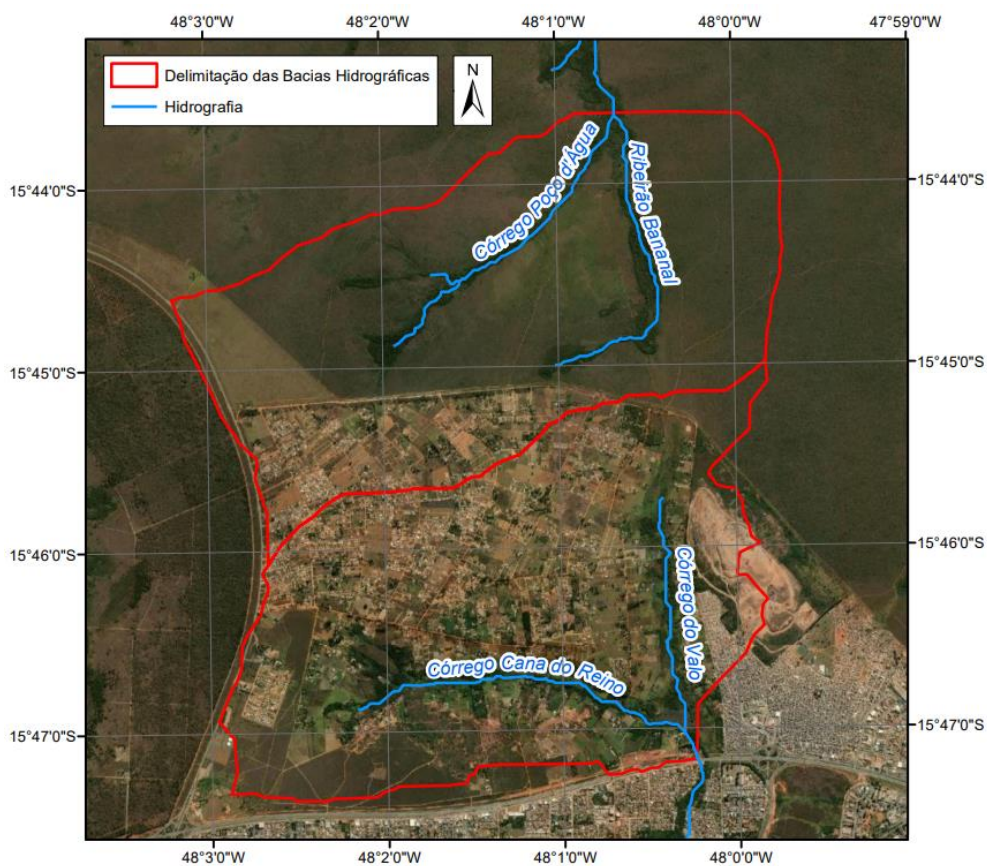


Figura 4-3 – Situação do Assentamento 26 de Setembro frente aos divisores de água naturais.

Enquanto o Riacho Fundo é tributário do Lago Paranoá, importante manancial do DF, o Córrego do Bananal está inserido dentro do Parque Nacional de Brasília, criado para proteger suas águas. Assim, é fundamental que a qualidade seja preservada e as águas de drenagem da área urbanizada do Assentamento 26 de Setembro não atinjam este manancial. A área de estudo não reflete, portanto, a morfologia natural, mas uma subdivisão urbanística, que considera a rede de drenagem a ser implantada, identificando-se com a extensão do Assentamento 26 de Setembro. Na [Figura 4-4](#) está representada a delimitação da área de estudo conforme descrita. Sua superfície é de 13,16 km<sup>2</sup>.

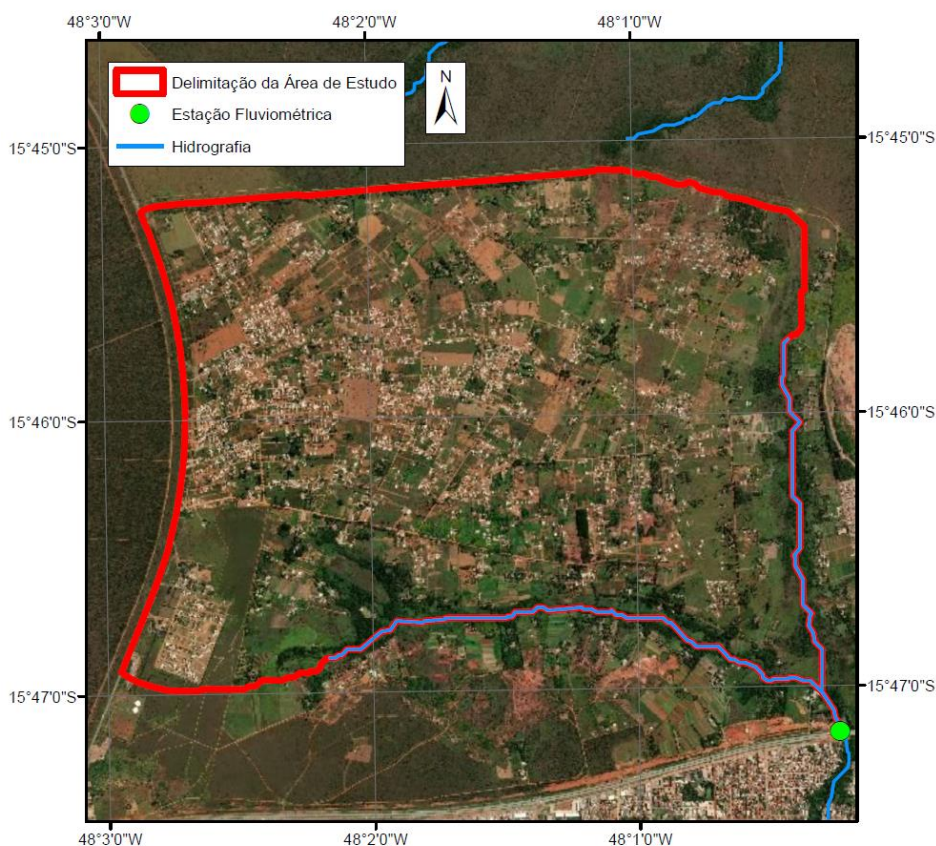


Figura 4-4 – Redefinição da área de drenagem para proteção do manancial de Santa Maria.

#### 4.1.2 Geomorfologia e interface com a rede viária

Por meio das ferramentas de geoprocessamento do software *ArcGIS 10.6.1* e utilizando as curvas de nível de cinco metros do ano de 2009 obtidas no GeoPortal - DF, foram produzidos os mapas hipsométrico e de declividade da área de estudo. A partir de imagens do satélite *Maxar* capturadas em 16/06/2018, foi efetuada a digitalização das principais vias do Assentamento 26 de Setembro, todas não pavimentadas.

Os mapas hipsométrico e de declividade estão reproduzidos nas Figura 4-5 e Figura 4-6, respectivamente. A morfologia acidentada da região e a abertura de estradas perpendicularmente às curvas de nível (Figura 4-7) aumentam a erosão, o carreamento de sólidos e a velocidade de escoamento superficial, promovendo a diminuição do tempo de concentração.



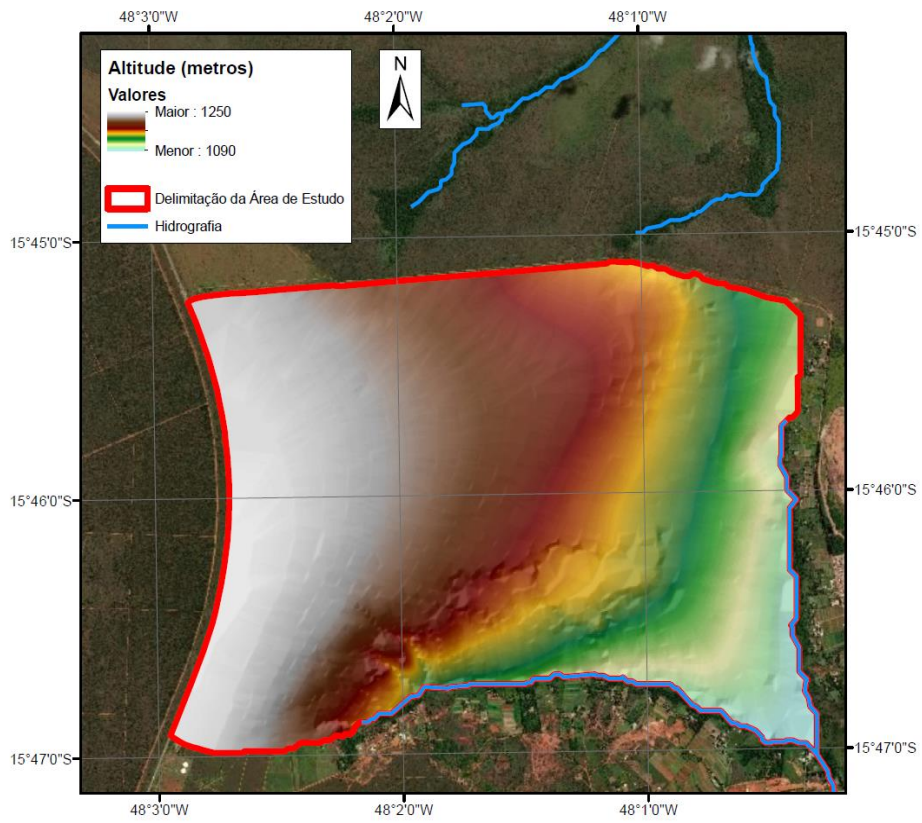


Figura 4-5 – Mapa hipsométrico da área de estudo.

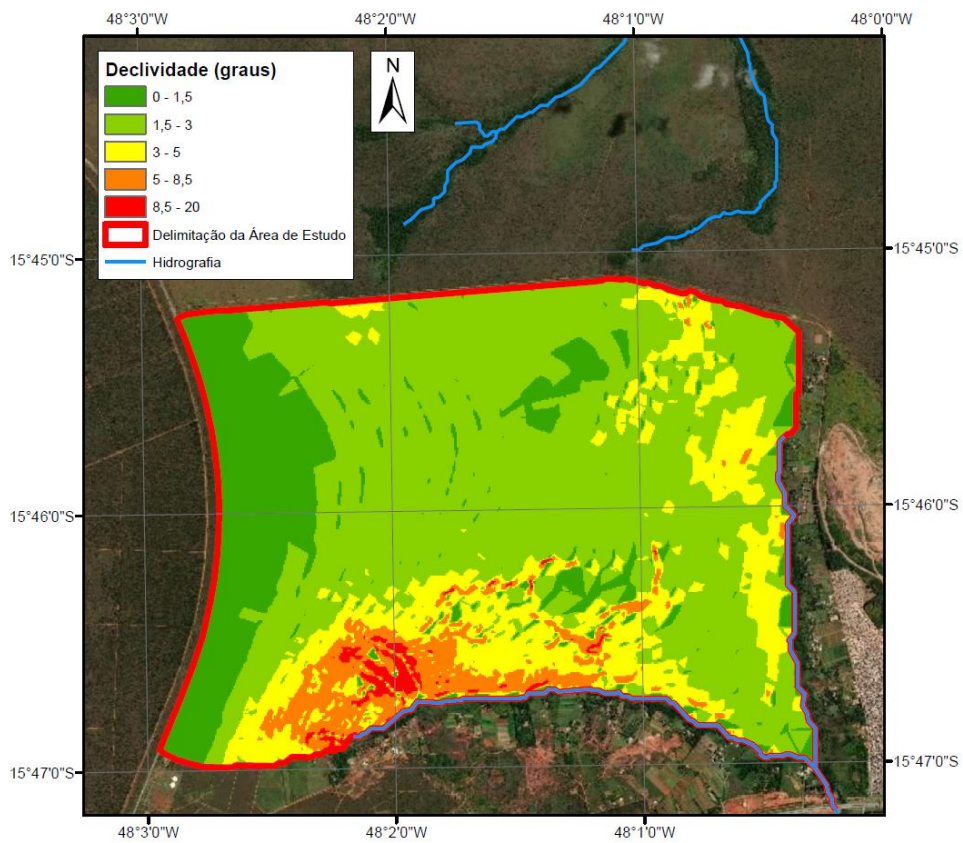


Figura 4-6 – Mapa de declividade da área de estudo.

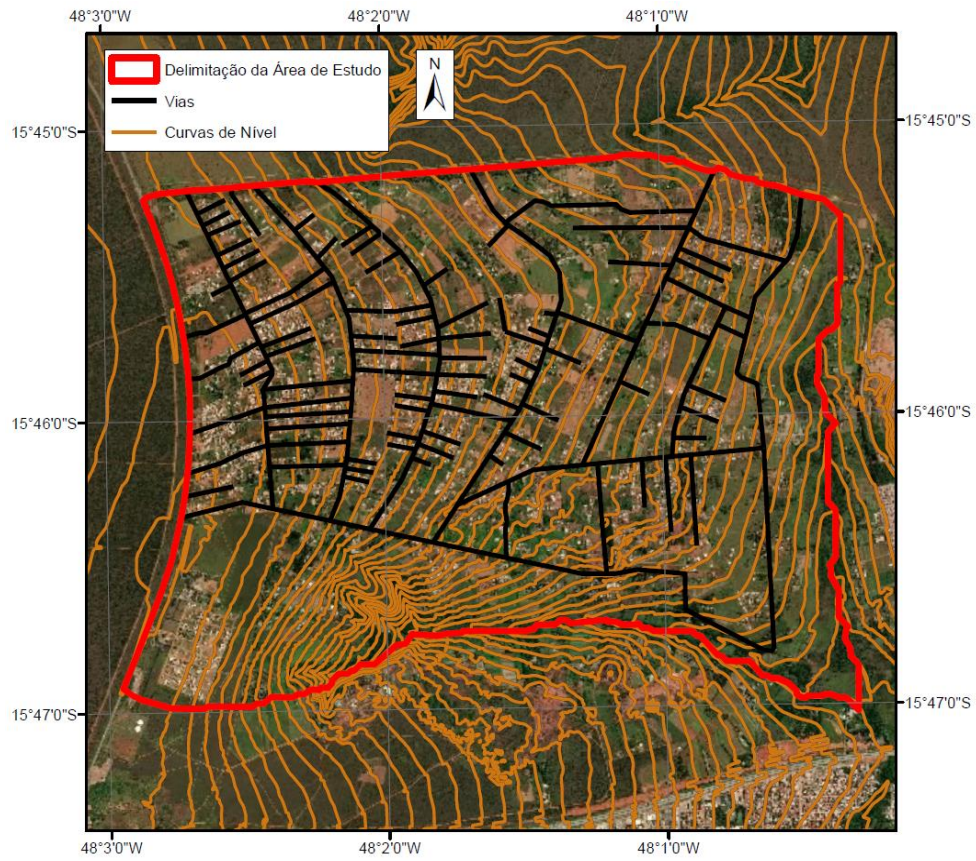


Figura 4-7 – Rede viária e curvas de nível.

As fotos apresentadas na Figura 4-8, capturadas no dia 9 de fevereiro de 2021, retratam a urbanização em andamento com aberturas de vias não pavimentadas e sem infraestrutura de drenagem.



Figura 4-8 – Fotos da ocupação irregular no Assentamento 26 de Setembro.



### 4.1.3 Pedologia

Com base no mapeamento de solos (Figura 4-9) realizado pelo Serviço Nacional de Levantamentos de Solos (EMBRAPA, 2004), as classes dominantes na região estudada são as de Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho-Amarelo, solos muito permeáveis a depender da natureza da textura, estrutura e situação topográfica (FREITAS *et al.*, 2018). Considerado a classificação do Método SCS quanto ao grupo hidrológico do solo (Tabela 3-1), a região foi classificada como Grupo A.

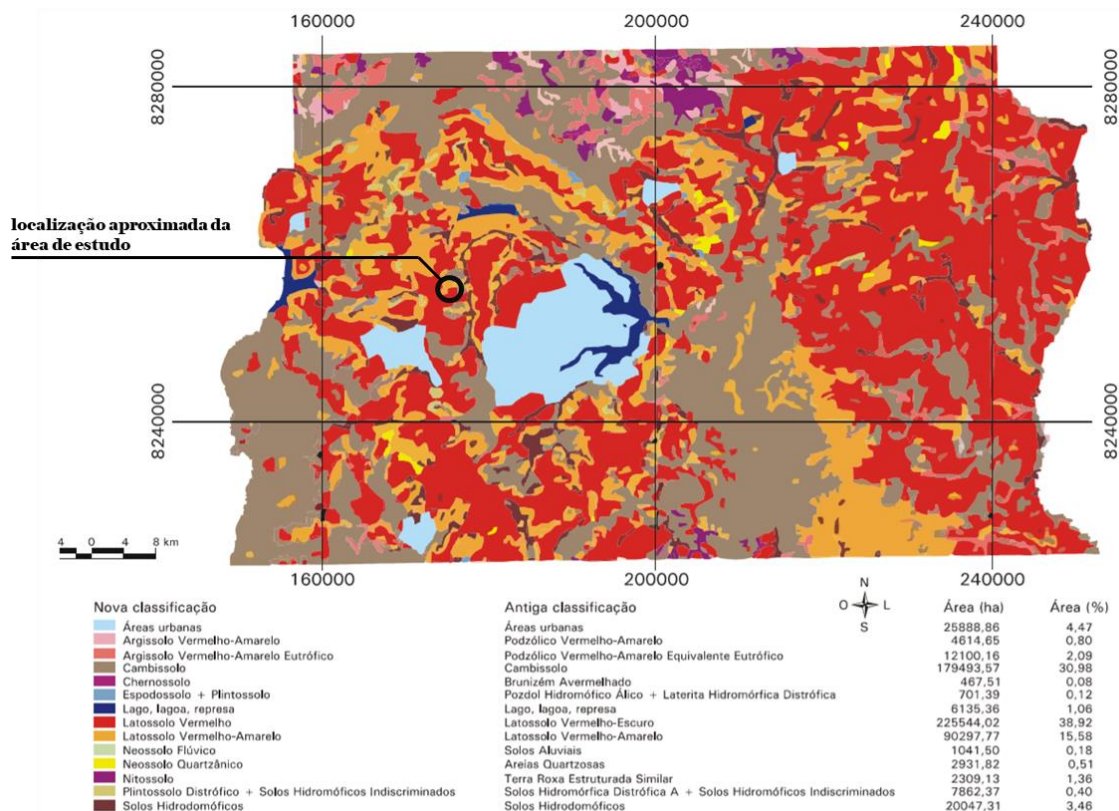


Figura 4-9 – Mapa de solos do Distrito Federal, na escala 1:100.000, com indicação das classes de solos (EMBRAPA, 2004 – adaptado).

### 4.1.4 Uso e ocupação do solo

Para a análise de uso e ocupação do solo ao longo do tempo da área de estudo, foi utilizado o método de classificação supervisionada com o *plugin Dzetsaka* no *software QGIS 3.10.4*. Foram utilizadas bandas multiespectrais do sensor OLI do satélite *Landsat 7*, órbita/ponto 221/71, de 01/07/2000 e 24/04/2010 e bandas multiespectrais do sensor OLI do satélite *Landsat 8*, órbita/ponto 221/71, de 14/06/2020. As classes consideradas na classificação foram: floresta galeria/ciliar, área urbana, gramínea/agricultura, campos/cerrado e solo exposto. Entende-se por área urbana, as edificações presentes na área de estudo nesses anos

e por solo exposto, as áreas onde foi retirada a vegetação, incluindo as vias não pavimentadas.

Os resultados da classificação supervisionada mostram que a área urbana total da área de estudo no ano 2000 era praticamente inexistente. Já em 2010, registravam-se os primeiros indícios de construções, ocupando em torno de 3% da área total. Para 2020 é possível constatar que a urbanização se acentua na região, alcançando 22% da área (Figura 4-10).

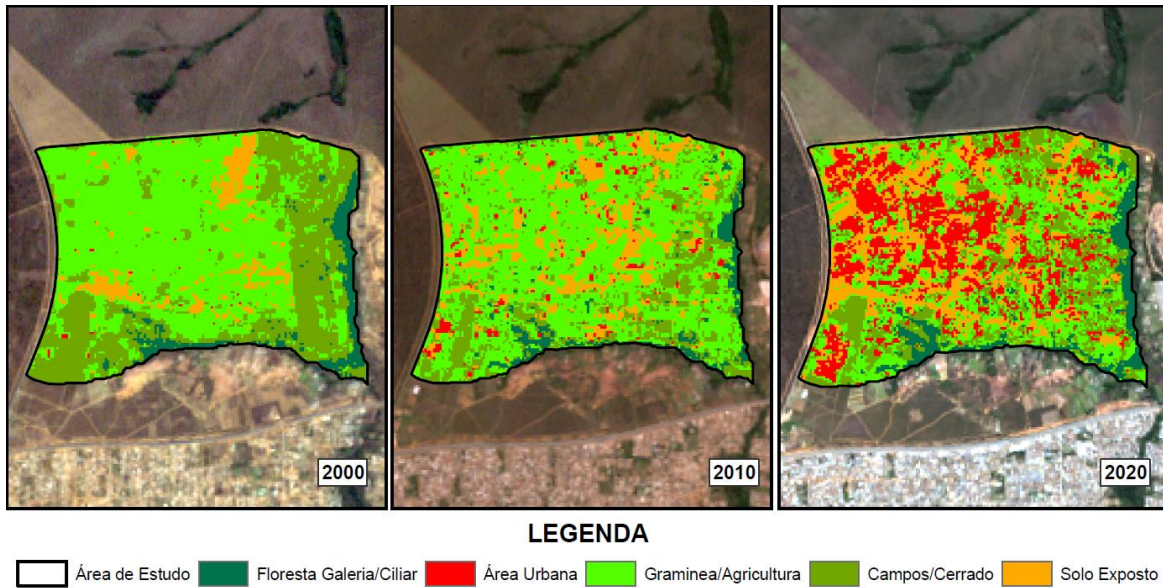


Figura 4-10 – Evolução do uso e ocupação do solo da área de estudo.

## 4.2 CHUVA DE PROJETO

Para a determinação da chuva de projeto, foi utilizada a curva intensidade-duração-frequência (*idf*) de Brasília (Equação 4-1) recomendada pela Adasa (2018), a duração de 24 horas e o tempo de retorno de 10 anos.

$$i = \frac{1574,70 T_R^{0,207}}{(t + 11)^{0,884}} \quad \text{Equação 4-1}$$

onde:

$i$  – Intensidade da chuva (mm/h);

$T_R$  – Tempo de retorno (ano);

$t$  – Duração da chuva (min).

O hietograma foi obtido utilizando o método dos blocos alternados, com blocos a cada 5 minutos (Figura 4-11). Essa chuva de projeto é a mesma utilizada para avaliação dos sistemas de drenagem pela [NOVACAP \(2019\)](#), que utiliza a vazão de pré-desenvolvimento de 24,4 L/(s.ha) estabelecida pela Adasa na Resolução nº 9/2011.

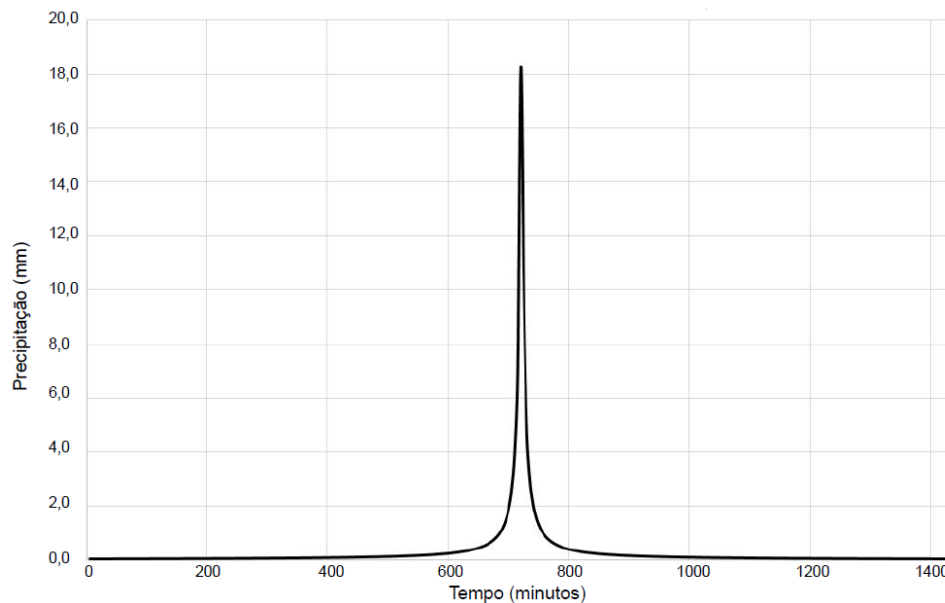


Figura 4-11 – Chuva de projeto.

### 4.3 VAZÃO DE RESTRIÇÃO

Entende-se por vazão de restrição aquela que representa as condições do local antes de ocorrer a urbanização. A Resolução Adasa nº 09 de 2011 adota como vazão de restrição o valor de 24,4 L/(s.ha). Dessa forma, a vazão máxima gerada por qualquer área após sua ocupação, considerando precipitações com tempo de retorno de 10 anos, está limitada a essa vazão específica. Portanto, a proposta de ocupação ordenada do Assentamento 26 de Setembro foi realizada de modo que se atinja valores de vazões de escoamento superficial no máximo iguais a vazão de restrição.

#### **4.4 PROPOSTA DE OCUPAÇÃO ORDENADA**

A urbanização plena do Assentamento 26 de Setembro nos mesmos padrões da ocupação vizinha, sem adoção de medidas compensatórias, pode levar a vazões de pico mais de três vezes superiores às vazões sem ocupação urbana na área estudada (DE VITO *et al.*, 2020).

Adicionalmente, a erosão causada pela abertura de vias perpendiculares às curvas de nível sem pavimentação é bastante prejudicial para as medidas compensatórias, uma vez que o fenômeno contribui para o assoreamento de estruturas de armazenamento e para a colmatação de estruturas de infiltração. Nesse caso, para a utilização dessas medidas na região, seria necessário considerar sistemas de pré-tratamento a montante das estruturas (BAPTISTA *et al.*, 2005), encarecendo e dificultando ainda mais sua implantação.

Dessa forma, a ocupação Assentamento 26 de Setembro apresenta uma ameaça para as áreas localizadas a jusante. Essa situação é agravada pelo fato de as áreas a jusante serem densamente habitadas e já sofrerem com inundações frequentes, mesmo com precipitações moderadas. Portanto, devem ser consideradas propostas de planejamento urbano aplicando o conceito de cidade esponja, permitindo que a nova área urbana mantenha comportamento hidrológico similar ao natural (sem urbanização), mantendo as vazões dentro dos limites previstos pela Resolução Adasa nº 09 de 2011. A proposta de ocupação ordenada desenvolvida neste trabalho será apresentada a seguir.

##### **4.4.1 Desenho Urbanístico**

A proposta de ocupação ordenada do Assentamento 26 de Setembro apresentada neste estudo levou em consideração a aplicação do conceito de cidade esponja e foi elaborada em conjunto com os estudantes da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo.

Visando diminuir a fração impermeável e ao mesmo tempo garantir o atendimento às demandas por espaços urbanos, optou-se por zonas habitacionais verticalizadas com a implantação de extensas áreas verdes que, além das finalidades paisagísticas e recreativas, amortecem as ondas de cheia e diminuem o volume do escoamento superficial. As águas pluviais coletadas pelas calhas dos telhados dos prédios residenciais são direcionadas para essas áreas verdes, que funcionam como planos de infiltração, seguindo o conceito de áreas diretamente conectadas. A representação artística dos prédios residenciais e das áreas verdes limítrofes encontra-se na Figura 4-12.



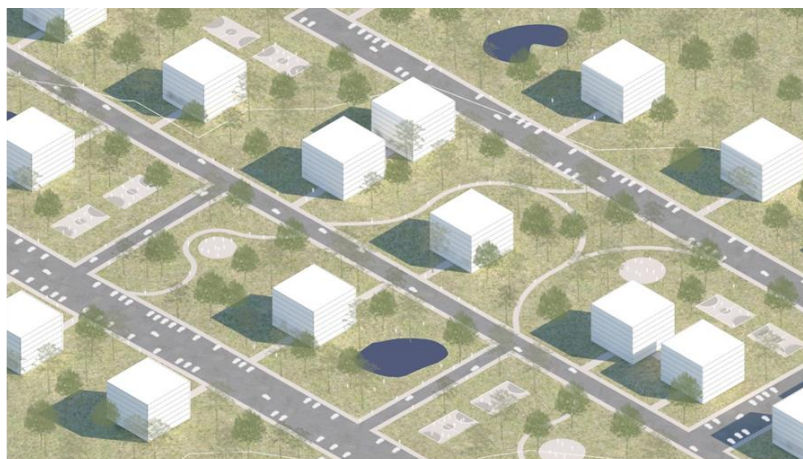


Ilustração: Aline Oliveira e Isabella Ghiraldo

Figura 4-12 – Representação artística dos prédios residenciais e áreas verdes limítrofes da proposta de ocupação ordenada.

A área de estudo foi dividida em oito quadras habitacionais. O traçado da rede viária das quadras considerou as características geomorfológicas da região, buscando evitar a abertura de vias perpendiculares às curvas de nível. Nas vias está prevista a construção de estacionamentos. As quadras possuem zona comercial localizada na entrada e lagoas que, além da finalidade paisagística e recreativa, armazenam o escoamento superficial, funcionando como bacias de retenção com espelho d'água permanente. A Figura 4-13 ilustra uma quadra habitacional típica da proposta de ocupação.



Ilustração: Aline Oliveira e Isabella Ghiraldo

Figura 4-13 – Representação artística de uma quadra típica da proposta.

Ao longo de toda a via que fornece acesso às quadras, está prevista a implantação de áreas comerciais. O escoamento superficial da zona comercial é direcionado diretamente para a via, sem que haja a infiltração em áreas permeáveis. Essa via não recebe águas pluviais das quadras residenciais.

O mapa de uso do solo da proposta de ocupação urbana ordenada está esquematicamente apresentado na Figura 4-14.

.

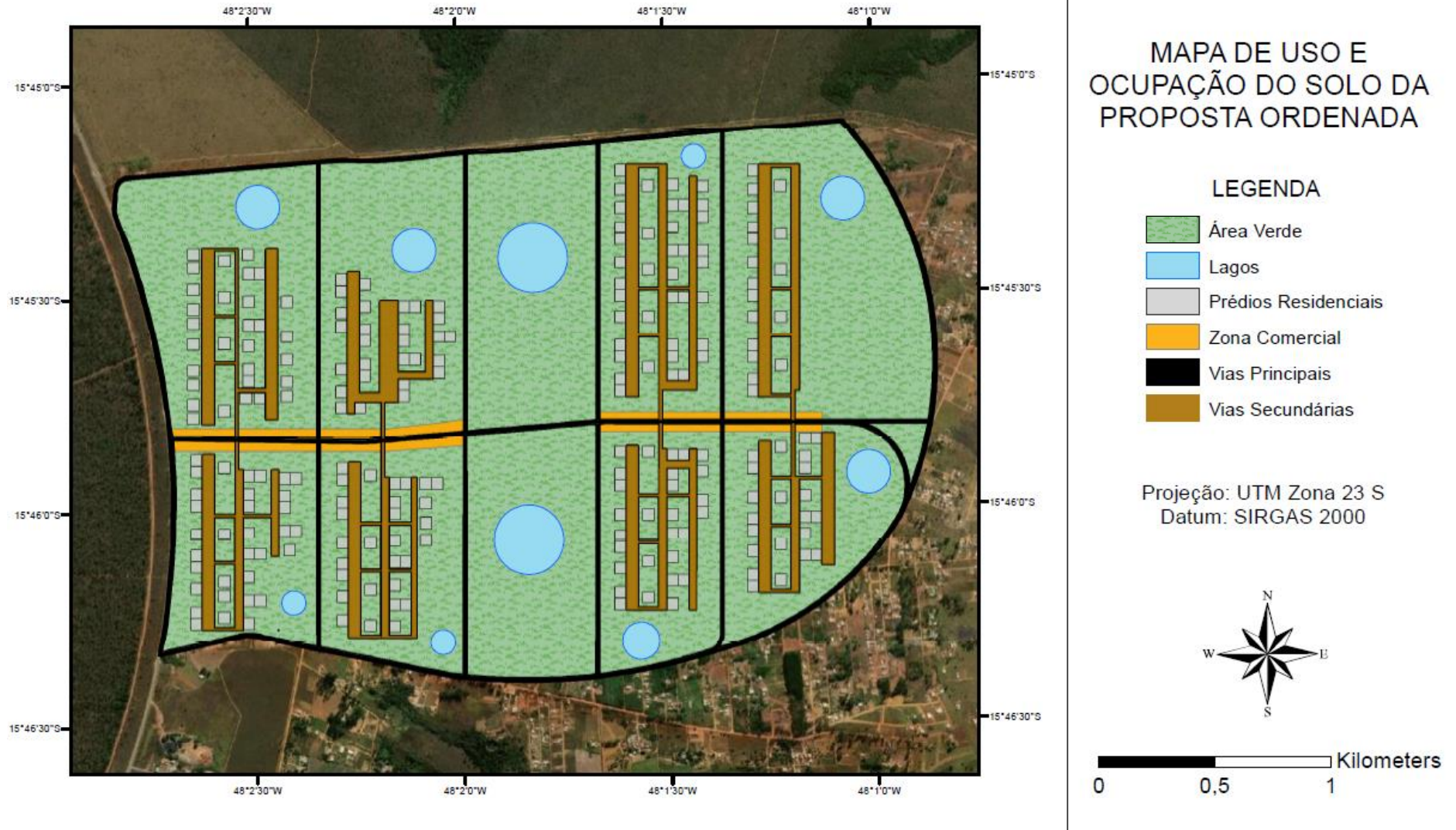


Figura 4-14 – Mapa de uso e ocupação do solo da proposta de ocupação ordenada.

A extensão da área é cerca de 693 ha, sendo aproximadamente 23% impermeável. Foi prevista a construção de zona comercial de 17,3 ha e de prédios residenciais com projeção de 0,25 ha. Cada projeção possuirá sete pavimentos, considerando nove apartamentos por andar, com média de 80 m<sup>2</sup>. Totalizando 63 unidades por projeção. Ao todo foram implantados 227 módulos, o que totaliza 14.301 apartamentos. Ao considerar grupos familiares compostos por quatro pessoas, estipula-se um total de 57.204 habitantes na região. Atualmente, a região abriga uma população de aproximadamente 30 mil habitantes, qualificando a área para assentar novas famílias.

Na região central, preveem-se dois parques urbanos. Lagoas estão previstas em várias áreas do assentamento. Como mencionado anteriormente, essas, além da finalidade paisagística e recreativas, recebem águas pluviais conduzidas pelo sistema de drenagem e exercem a função de bacias de retenção a céu aberto com espelho d'água permanente.

Empreendimentos imobiliários desse tipo permitem a implantação de áreas de lazer e maior contato com a natureza, facilitando o convívio social e contribuindo para uma melhor qualidade de vida e ambiental urbana. Entretanto, devem ser acompanhados por um sistema de transporte público integrado que permita o fácil deslocamento até os locais de trabalho, uma vez que essa ocupação se encontra distante do centro de Brasília.

Para incentivar a ocupação residencial, devem-se prever instrumentos econômicos que tornem o empreendimento mais atrativo. No caso desse empreendimento, se demonstraria viável a aplicação do Imposto Predial Territorial Urbano Verde (IPTU Verde), que pode garantir a aplicação de alíquotas menores sobre o valor do imóvel a partir de contrapartidas vindas dos moradores, como a inclusão da comunidade na manutenção das áreas verdes.

#### **4.4.2 Criação de cenários**

Foram desenvolvidos cinco cenários de simulação para a mesma proposta de ocupação ordenada, nomeados de Cenário I, Cenário II, Cenário III, Cenário IV e Cenário V,

Em todos os cenários considera-se que: as águas pluviais captadas pelos telhados dos prédios residenciais são direcionadas para as áreas verdes limítrofes, o traçado do sistema de drenagem não varia, a pavimentação da via principal é asfaltada. As áreas verdes receptoras do escoamento dos prédios residenciais servem como planos de infiltração.

O Cenário I prevê a pavimentação das vias secundárias com camada asfáltica sem a adoção de medidas compensatórias além da citada acima. O Cenário II, respeito ao Cenário I, apenas



substitui o asfalto das vias secundárias por blocos intertravados. Os cenários sucessivos adotam de maneira incremental várias medidas compensatórias, conforme Tabela 4-1.

Tabela 4-1 – Características dos cenários.

	<b>Pavimentação das vias secundárias</b>	<b>Microrreservatório no prédio</b>	<b>Trincheiras na zona comercial</b>	<b>Bacia de detenção</b>
<b>Cenário I</b>	Asfalto	Não	Não	Não
<b>Cenário II</b>	Blocos Intertravados	Não	Não	Não
<b>Cenário III</b>	Blocos Intertravados	Sim	Não	Não
<b>Cenário IV</b>	Blocos Intertravados	Sim	Sim	Não
<b>Cenário V</b>	Blocos Intertravados	Sim	Sim	Sim

Os microrreservatórios, quando previstos, são dois para cada prédio e possuem capacidade de 20.000 L. As trincheiras, nos cenários IV e V, inseridas apenas na zona comercial, apresentam área em planta de 30 m<sup>2</sup> e 1 m de profundidade. As bacias de detenção do Cenário V possuem fundo impermeável e, portanto, amortecem apenas as vazões de escoamento superficial e foram dimensionadas de forma a garantir vazões de defluxo dentro das vazões de restrição.

#### 4.5 SIMULAÇÕES NO PCSWMM

As análises hidrológicas foram realizadas a partir dos resultados gerados das simulações dos diferentes cenários com o *software* PCSWMM. A chuva de projeto utilizada nas simulações está apresentada na Figura 4-11. Para o cálculo da precipitação efetiva foi adotado o Método SCS e o modelo hidrodinâmico adotado foi o da onda dinâmica.

##### 4.5.1 Traçado da rede de drenagem

O croqui da proposta de ocupação ordenada foi inserido no *software* PCSWMM. A partir dessa esquematização e da sua sobreposição com as curvas de nível de cinco metros do ano de 2009 obtidas no GeoPortal - DF – considerado que a área manterá as mesmas características geomorfológicas descritas no tópico 4.1.2 – foi desenhado o traçado do sistema de drenagem, que se desenvolve ao longo das vias. Para sua representação se utilizaram as seguintes camadas do *software*: condutos, nós de conexão e nós exutório.

Os nós de conexão representam os poços de visita e foram posicionados de maneira que os condutos acompanhassem o sentido da declividade do terreno e espaçados de no máximo cento e vinte metros entre si, conforme a recomendação de Aisse (1997).

As cotas do terreno onde os nós de conexão estão localizados foram obtidas a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) produzido por meio de ferramentas de

geoprocessamento do software *ArcGIS 10.6.1* a partir das curvas de nível citadas acima. Nos nós exutório a cota do terreno corresponde à sua geratriz inferior, uma vez que nesse ponto o conduto desemboca do solo, garantindo assim o defluxo.

As cotas de fundo dos nós de conexão foram obtidas utilizando a ferramenta *Set Slope* disponível no próprio *software*. Essa ferramenta ajusta os valores das cotas de fundo dos nós para atingir uma declividade dos condutos pré-definida. A declividade de cada trecho foi considerada constante e determinada em função das características geomorfológicas, principalmente da cota de fundo atribuída ao nó exutório daquele trecho.

Os condutos são de seção circular e apresentam declividade que varia de 0,45% a 2,25%. O comprimento deles foi calculado pelo próprio *software* por meio do SIG. A rugosidade é representada pelo coeficiente de Manning ( $n$ ) de 0,013. O diâmetro dos condutos foi determinado utilizando a ferramenta *Pipe Sizing* disponível no próprio *software*. A ferramenta utiliza a fórmula de Manning (Equação 3-4) para calcular o diâmetro mínimo comercial da tubulação. Essa ferramenta obtém a otimização do dimensionamento a partir de uma estimativa superdimensionada, para ter certeza que o escoamento se dê em superfície livre.

ADASA (2018) recomenda que nas mudanças de diâmetro, os tubos sejam alinhados pela geratriz superior. Para isso, foi utilizada a ferramenta *Align Conduit Crowns* disponível no próprio *software*.

O desenho do traçado da rede de drenagem e das sub-bacias para a proposta de ocupação ordenada está ilustradas na Figura 4-15. Os nós exutórios foram nomeados com o prefixo OF e enumerados de 1 a 25.



Figura 4-15 – Desenho da rede de drenagem e das sub-bacias no PCSWMM.

#### 4.5.2 Sub-bacias

Devido à infraestrutura a ser implantada, cada sub-bacia representa apenas uma classe de uso e ocupação, conforme mapa elaborado para o planejamento urbano proposto (Figura 4-14). Dessa forma, as sub-bacias podem representar apenas uma das seguintes classes: área verde, prédios residenciais, zona comercial, vias principais ou vias secundárias.

Rossman *et al.* (2016) sugerem recomendações comuns para todas as sub-bacias quando se utiliza o Método SCS para o cálculo da precipitação efetiva. É recomendado que a porcentagem de área impermeável de cada sub-bacia seja definida como nula, uma vez que o valor de CN já considera sua impermeabilidade. Dessa forma, não é preciso fornecer valores para os parâmetros relacionados à fração impermeável da sub-bacia, como por exemplo o coeficiente de rugosidade de Manning ( $n$ ) da área impermeável, a lâmina de armazenamento em depressões da área impermeável e a porcentagem de área impermeável sem armazenamento em depressões. Porém, independentemente se a sub-bacia representar tipo de uso e cobertura classificado como impermeável, é necessário fornecer o valor do coeficiente de Manning ( $n$ ) da área permeável, e sua lâmina de armazenamento em depressões, que representa esse uso e cobertura.

Os mesmos autores sugerem também que a lâmina de armazenamento em depressões da área permeável seja igual à abstração inicial ( $I_a$ ), portanto é definida como sendo 20% do armazenamento  $S_D$ , calculado a partir da Equação 3-2. Para o cálculo da abstração inicial ( $I_a$ ), foi utilizado o valor de CN para a condição AMC III, buscando representar as condições do solo durante períodos chuvosos.

Na estimativa do valor de CN a ser adotado no método de infiltração para cada classe das sub-bacias, considera-se que o solo se encontra na condição AMC II. Classificando o solo como Grupo Hidrológico A e considerando condições normais para as áreas verdes, foi possível atribuir o valor de CN para cada um dos usos das sub-bacias a partir da Tabela 3-2. Foi considerado que o valor de CN para as vias secundárias com blocos intertravados é o mesmo das vias pavimentadas com paralelepípedos.

Segundo Engman (1986), o coeficiente de rugosidade de Manning ( $n$ ) para superfícies de grama rasteira é igual a 0,15 e o de concreto ou asfalto é igual a 0,011. Com base nesse estudo, o coeficiente de Manning ( $n$ ) da área permeável adotado para as sub-bacias

classificadas como áreas verdes foi de 0,15 e para as demais (prédios residenciais, zona comercial e vias) foi de 0,011.

Na Tabela 4-2 são resumidos os parâmetros CN, lâmina de armazenamento da área permeável (*Dstore Perv.*) e coeficiente de Manning da área permeável (*N Perv.*) para cada uso da sub-bacia.

Tabela 4-2 – Parâmetros utilizados para cada classe de sub-bacia.

Sub-Bacia	CN	Dstore Perv. (mm) *	N Perv. *
Área Verde	49	22.988	0,15
Prédios Residenciais	98	0,451	0,011
Zona Comercial	89	2,73	0,011
Vias			
Pavimentadas com Asfalto	98	0,451	0,011
Pavimentadas com Blocos Intertravados	76	6,975	0,011

\* nome do parâmetro no *software* PCSWMM

Para a proposta de ocupação apresentada, foram definidas 911 sub-bacias com base nas características geomorfológicas da região, infraestrutura implantada e na localização dos nós de conexão. Algumas regiões onde essas sub-bacias estão inseridas, como por exemplo os parques ecológicos da região central, não possuem rede de coleta de águas pluviais e, portanto, os pontos de descarga delas se dá diretamente nos nós exutório.

Para as outras sub-bacias, localizadas em regiões com sistema de drenagem urbana, apenas as que representam as vias possuem sua saída para os nós de conexão. As demais sub-bacias dessas regiões encaminham o escoamento superficial para as sub-bacias adjacentes. A Figura 4-16 exemplifica essa discretização das sub-bacias e seus respectivos pontos de descarga, representados pelas linhas tracejadas vermelhas. Dessa forma, é simulado que o escoamento superficial coletado pelas calhas dos telhados dos prédios residências é encaminhado para as áreas verdes, funcionando como planos de infiltração.

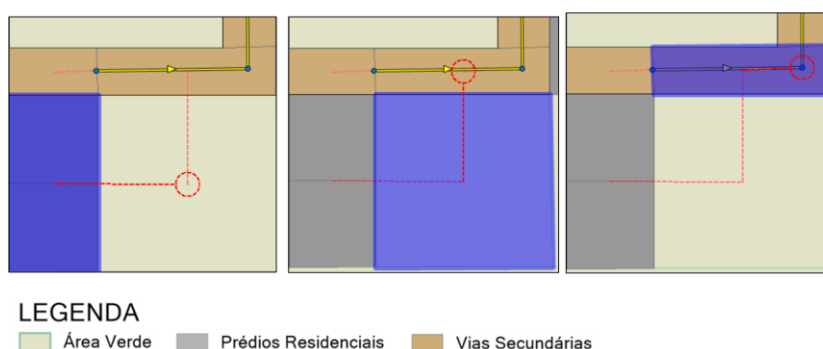


Figura 4-16 – Discretização das sub-bacias.

Por possuir SIG integrado, a área de cada sub-bacia é calculada pelo próprio *software* após sua delimitação. A declividade média da superfície das sub-bacias foi obtida por meio do mapa específico (Figura 4-6), por sua vez produzido a partir das curvas de nível de cinco metros do ano de 2009 obtidas no GeoPortal - DF.

A largura ( $W$ ) das sub-bacias foi estimada dividindo a média dos maiores comprimentos de fluxo pela área da sub-bacia. Esses comprimentos de fluxo foram definidos a partir de uma camada do tipo linha criada no SIG.

### **4.5.3 Controles LID**

Os controles LID utilizados nas simulações foram microrreservatório, nomeado em inglês no *software* PCSWMM de *Rain Barrels*, e trincheira de infiltração, nomeado de *Infiltration Trench*.

Os microrreservatórios foram inseridos nas sub-bacias que representam os prédios residenciais, sem criar sub-bacia específica. Cada prédio residencial possui dois microrreservatórios de 20.000 L, volume comercial usualmente utilizado nesses casos, sem dispositivo de saída.

As trincheiras de infiltração, com a profundidade usualmente utilizada de 1 m, foram inseridas em cada sub-bacia da zona comercial, também nesse caso, sem criar sub-bacia específica. Elas possuem 0,6 m de largura, tamanho padrão ditado pela largura da pá da retroescavadeira, e 50 m de comprimento, que corresponde ao valor médio da largura da sub-bacia, perfazendo 30 m<sup>2</sup> de área em planta. A porosidade adotada foi de 0,4 (índice de vazios da brita grossa) e foi considerado que elas não possuem dispositivo de saída. O coeficiente de permeabilidade do solo saturado adotado foi de 40 mm/h.

Pelo fato dos controles LIDs inseridos ocuparem uma fração muito pequena da área da sub-bacia (menos que 1%), não foram realizados ajustes dos parâmetros das sub-bacias depois de sua inserção.

### **4.5.4 Unidades de armazenamento e bocais**

As bacias de detenção com fundo impermeabilizado inseridas no Cenário V foram representadas no PCSWMM por unidades de armazenamento. Essas estão localizadas no trecho terminal da rede de drenagem e foram dimensionadas de forma a garantir uma descarga dentro da vazão de restrição imposta pela Resolução Adasa nº 09 de 2011.

A Figura 4-17 ilustra o volume a ser armazenado na bacia de retenção que recebe o escoamento afluente ao nó exutório OF1 (ver Figura 4-15), uma vez definida a vazão de entrada e a vazão de restrição, que deve corresponder à vazão de saída. A vazão de restrição foi calculada multiplicando a área das sub-bacias que contribuem para o escoamento afluente ao nó exutório OF1 pela vazão de restrição específica imposta pela Resolução Adasa nº 09 de 2011. O volume de armazenamento foi obtido através da ferramenta *Storage* disponível no próprio *software*.

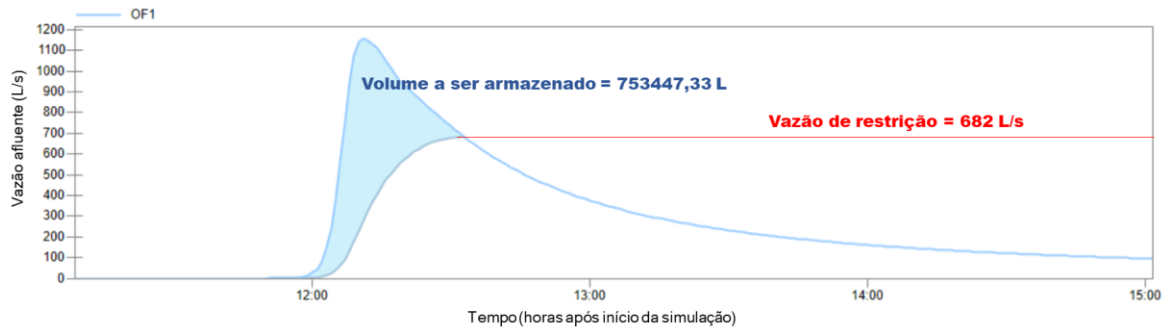


Figura 4-17 – Utilização da ferramenta *Storage* do PCSWMM.

As cotas de fundo dessas estruturas foram calculadas subtraindo à cota do terreno, onde os nós unidades de armazenamento estão localizados, a profundidade delas. Neste estudo, todas as bacias de retenção possuem profundidade de 4 m e formato de paralelepípedo.

Dessa forma, a curva de armazenamento (nível d'água *versus* área inundada), continua constante independentemente do nível d'água. Essa área foi calculada dividindo o volume a ser armazenado em cada bacia de retenção pela sua profundidade de 4 m.

As unidades de armazenamento foram conectadas aos nós exutórios por meio de trechos de bocais cuja descarga, alcançada quando o reservatório se encontra no nível máximo (4 m), é igual à vazão de restrição.

A Figura 4-18 apresenta o desenho esquemático do Cenário V no PCSWMM. As unidades de armazenamento foram nomeadas com o prefixo BD e enumerados de 1 a 22. Nota-se que o nó exutório OF15 não necessita de bacia de retenção a montante, pois a vazão é inferior a vazão de restrição.

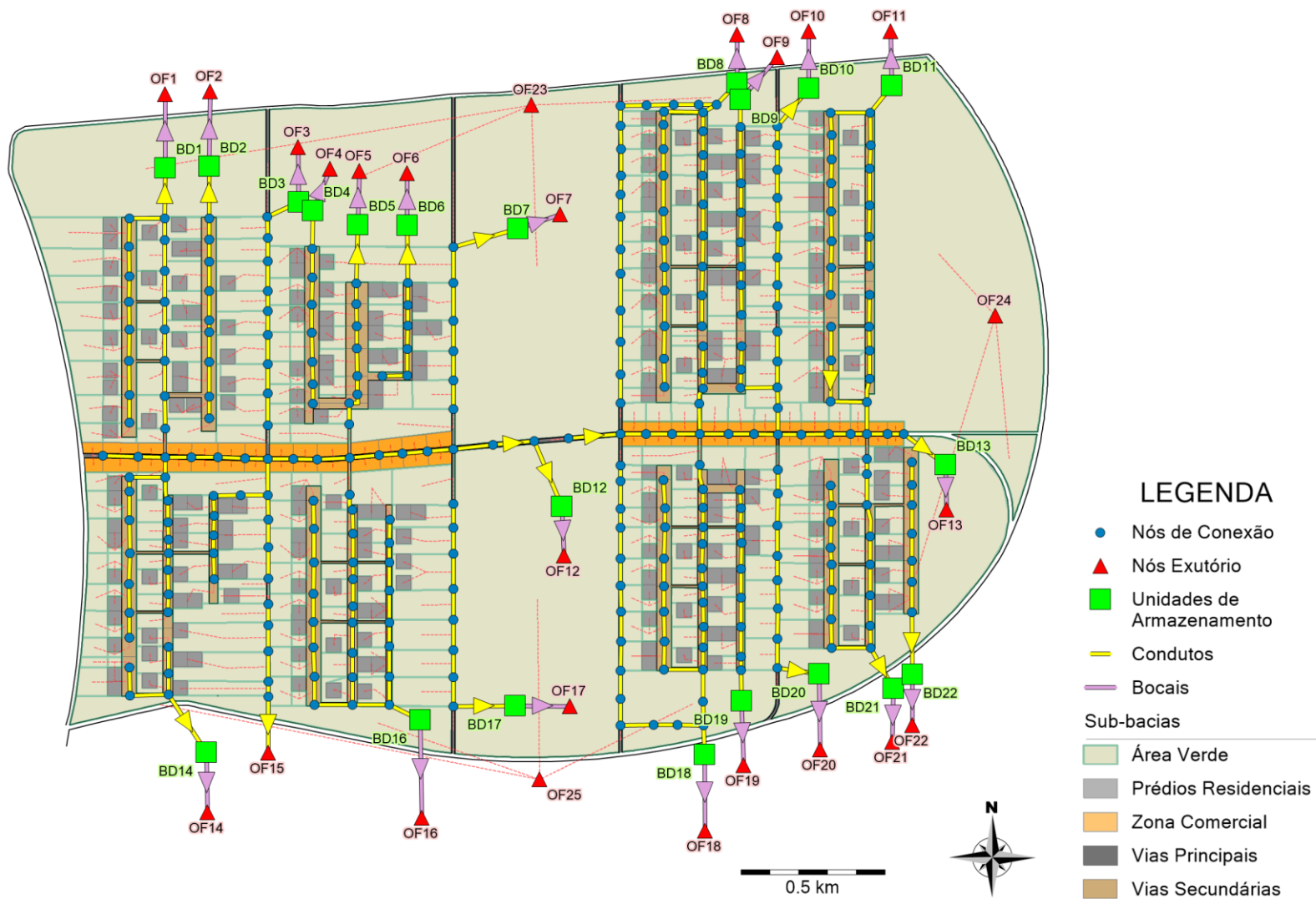


Figura 4-18 – Desenho do Cenário V no PCSWMM



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O *software* o PCSWMM se demonstrou uma ferramenta versátil para a análise hidrológica de áreas urbanas. Por meio dele foi possível obter, de maneira simples, os hidrogramas em vários cenários, observando os efeitos de várias medidas compensatórias,

Para o melhor entendimento dos resultados obtidos, antes da análise de todo o sistema, se descreve o comportamento de um conjunto de sub-bacias tributárias de dois nós exutórios – OF1 e OF12, cuja características se repetem nos demais.

### 5.1 ANÁLISES HIDROLÓGICAS DOS NÓS TÍPICOS

#### 5.1.1 Nó exutório OF1

Nesse exutório fluem as águas de uma quadra residencial ocupadas por prédios, vias secundárias e área verde. Portanto, por não drenar o escoamento da zona comercial, os hidrogramas do Cenário III e Cenário IV apresentam o mesmo andamento. A extensão total das sub-bacias tributárias é de aproximadamente 28 ha.

A Figura 5-1 ilustra na parte superior o hietograma, em mm/h, da chuva de projeto e na parte inferior os hidrogramas para os Cenários I, II e III do nó exutório OF1.

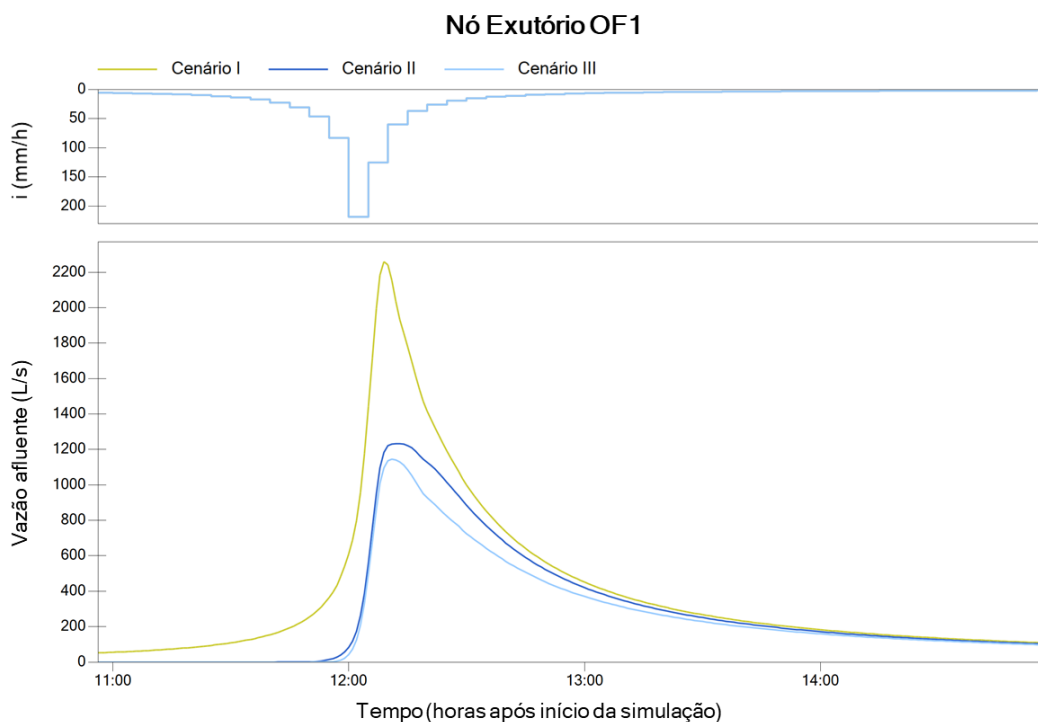


Figura 5-1 – Hidrogramas do nó exutório OF1 para os Cenários I, II e III.

Verifica-se que a substituição da pavimentação asfáltica por blocos intertravados reduz a vazão de pico em cerca de 45% e o volume de escoamento em aproximadamente de 28%, demonstrando alta eficácia dessa tecnologia no amortecimento da onda de cheia. Já a inserção adicional de microrreservatórios reduziu em cerca de 7% a vazão de pico e o volume de escoamento, em 10%.

É evidente que a grande contribuição na redução da vazão de pico é dada pela pavimentação com blocos intertravados. Entretanto, a função do microrreservatório foi ofuscada pela presença de uma grande área verde que recebe as águas pluviais coletadas pelas calhas dos prédios residenciais, amortecendo assim a onda de cheia e favorecendo a infiltração.

Quanto ao tempo ao pico, não se observa nenhuma variação com a pavimentação com blocos intertravados e tampouco com a implantação de microrreservatórios, indicando que não houve diminuição da velocidade do escoamento superficial, uma vez que a área verde, pela sua extensão e características, reveste uma importância maior do que as medidas pontuais.

A vazão de pico no Cenário III, em que todas as medidas pontuais foram adotadas, foi 3,3 vezes maior que a vazão de restrição, sendo necessário a adoção de medidas compensatórias centralizadas para atender a legislação vigente. A bacia de detenção impermeável de aproximadamente 750 m<sup>3</sup>, dimensionada para atender a Resolução Adasa nº 09 de 2011, permitiu sua observância, conforme Figura 5-2, onde o hidrograma que representa a vazão afluente do reservatório é o do Cenário III.

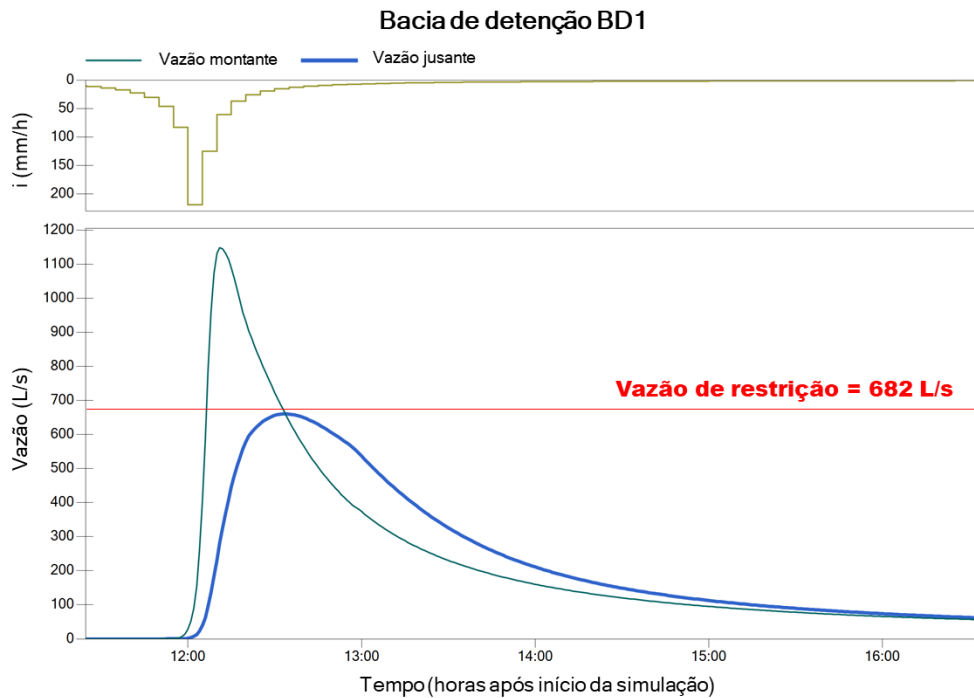


Figura 5-2 – Hidrogramas afluyente e efluente da bacia de detenção BD1.

O software PCSWMM permite traçar o perfil hidráulico dos condutos e dimensionar seu diâmetro de acordo com a disponibilidade comercial. Os resultados desse processamento são ilustrados na Figura 5-3. Na ordenada superior se lê o nome do conduto e a vazão de pico por ele transportada. Na ordenada inferior se lê o nome do nó e a cota do terreno onde ele está localizado. Também é apresentada a linha piezométrica graficamente de forma a verificar que o escoamento se dê em superfície livre. À direita encontra-se o esquema dos condutos em planta.

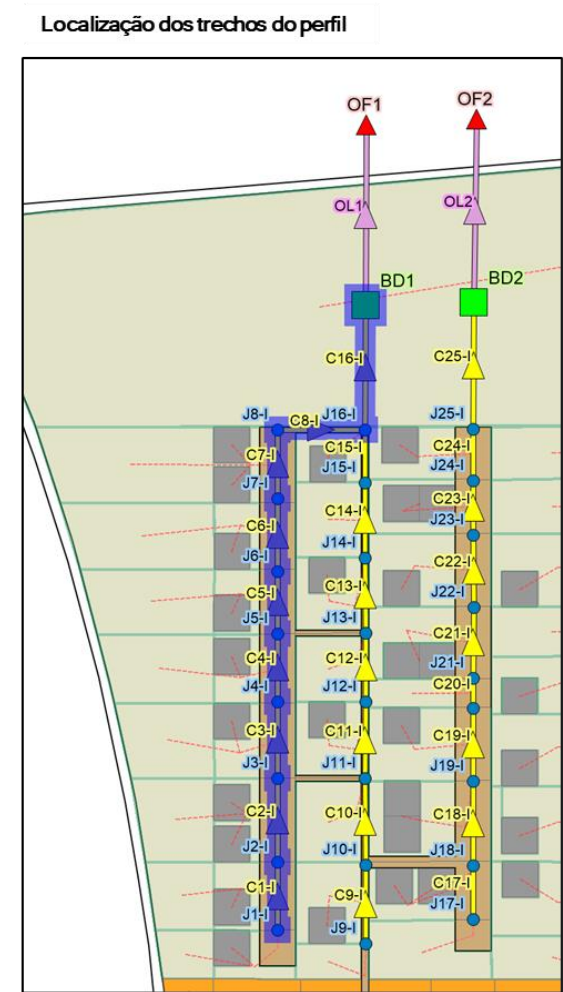
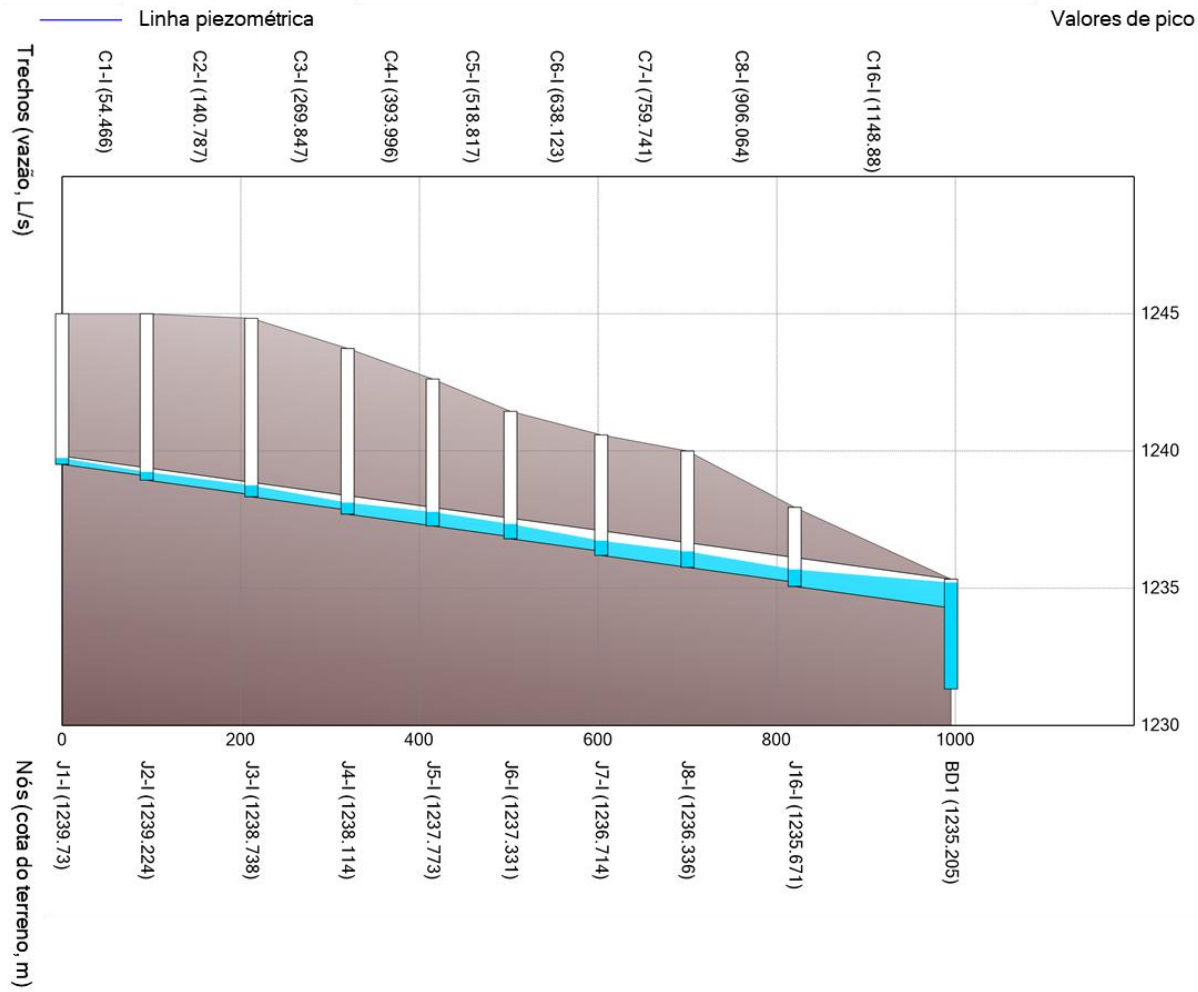


Figura 5-3 – Perfil hidráulico e planta esquemática dos condutos a montante do nó exutório OF1 (Cenário V).

### 5.1.2 Nó exutório OF12

Nesse exutório fluem as águas de uma extensa área residencial e de zona comercial localizada ao longo da via principal. A extensão total das sub-bacias tributárias é de aproximadamente 45 ha.

A Figura 5-4 ilustra na parte superior o hietograma, em mm/h, da chuva de projeto e na parte inferior os hidrogramas para os Cenários I, II, III e IV do nó exutório OF12.

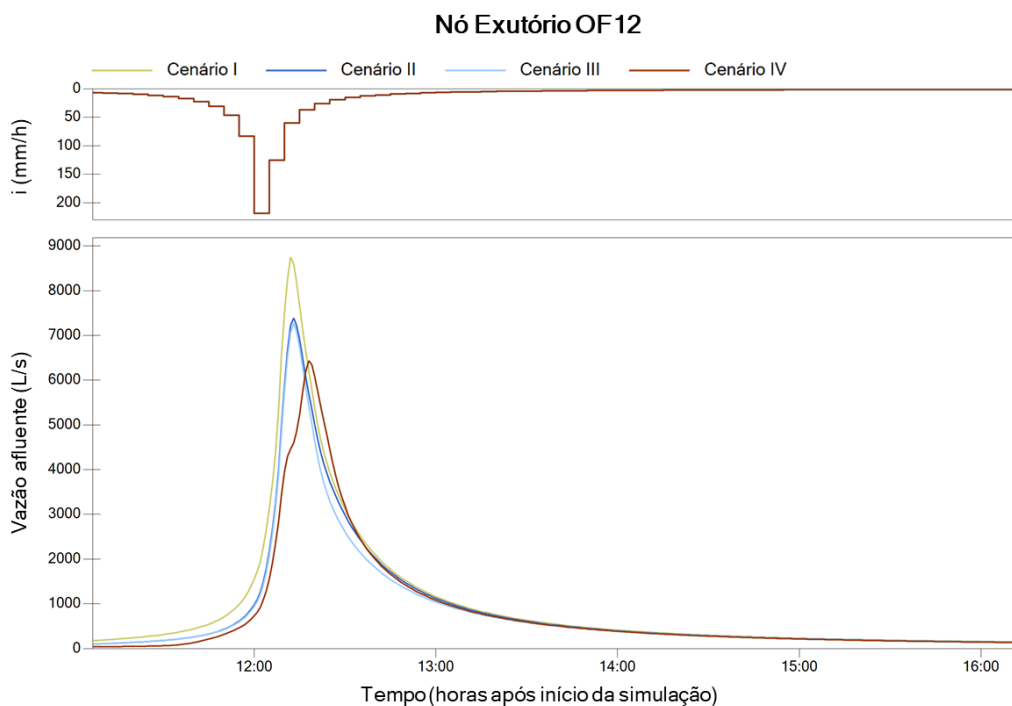


Figura 5-4 – Hidrogramas do nó exutório OF12 para os Cenários I, II, III e IV.

De acordo com os resultados, a substituição da pavimentação asfáltica por blocos intertravados das vias secundárias reduz em cerca de 15% a vazão de pico e o volume de escoamento. Os efeitos dessa medida são menos evidentes se comparado ao nó exutório OF1, devido ao fato de a via principal continuar com pavimentação asfáltica e pela sua extensão contribuir de forma predominante no escoamento.

Supõe-se também que os microrreservatórios não surtiram os efeitos desejados pelo mesmo motivo, assim como pela influência da zona comercial, na qual não foi inserida essa LID. Observa-se de fato que os hidrogramas dos Cenários II e III estão muito próximos de se sobreporem.

Nessas zonas comerciais foram implantadas, ao invés de microrreservatórios, trincheiras de infiltração. Ao analisar o hidrograma do Cenário IV, pode-se observar que essa infraestrutura, além de retardar em cerca de 10 minutos o tempo ao pico, contribui para uma redução de aproximadamente 12% da vazão nesse instante e de 4% do volume de escoamento superficial. Observa-se nesse hidrograma a inflexão da curva antes de alcançar o pico, devido ao armazenamento das águas pluviais nas trincheiras de infiltração no volume ainda disponível.

A vazão de pico do Cenário IV, em que todas as medidas pontuais foram adotadas, é cerca de 6 vezes maior que a permitida nesse exutório e, portanto, foi necessário prever a implantação de nova medida compensatória. Assim como o caso anterior, foi utilizada uma bacia de detenção impermeável, dimensionada para atender a Resolução Adasa nº 09 de 2011 e com aproximadamente 8115 m<sup>3</sup>. A Figura 5-5 ilustra a situação acima descrita, com representação dos hidrogramas afluente, do Cenário IV, e efluente da bacia de detenção.

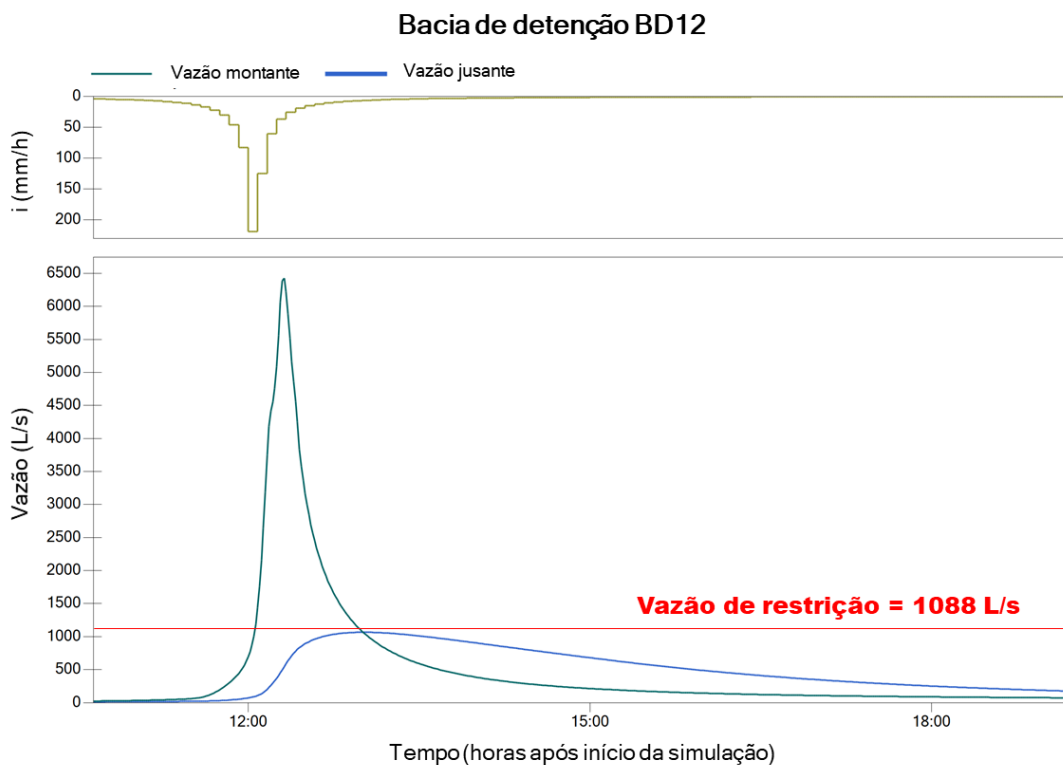


Figura 5-5 – Hidrogramas afluente e efluente da bacia de detenção BD12.

A Figura 5-6 ilustra o perfil hidráulico de um conjunto de condutos que levam o escoamento até o exutório analisado. Também é apresentado seu esquema em planta, adotando as mesmas legendas descritas no sub-tópico anterior

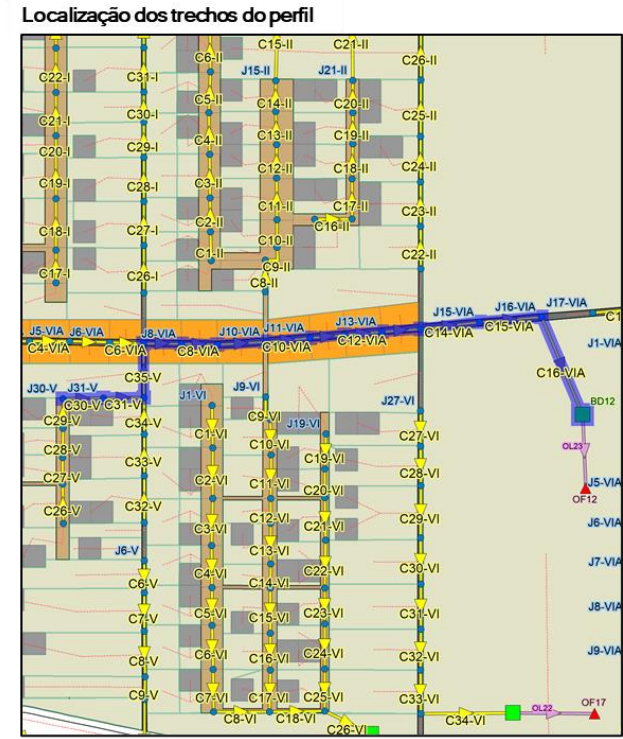
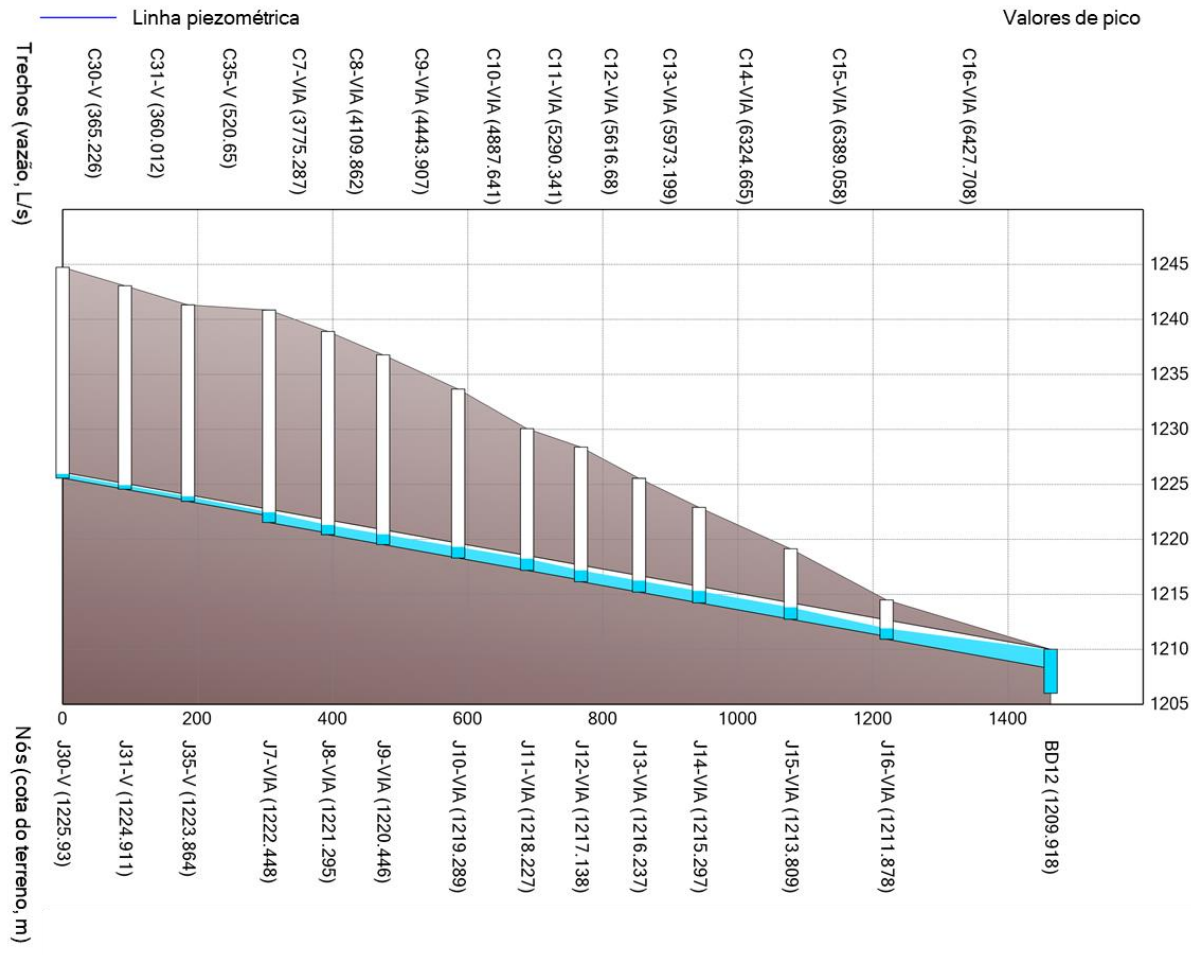


Figura 5-6 – Perfil hidráulico e planta esquemática dos condutos a montante do nó exutório OF12 (Cenário V).

## 5.2 ANÁLISES HIDROLÓGICAS DO SISTEMA

O software PCSWMM permite analisar o conjunto de exutórios como se fosse um único sistema de drenagem. Os resultados são apresentados na Figura 5-7.

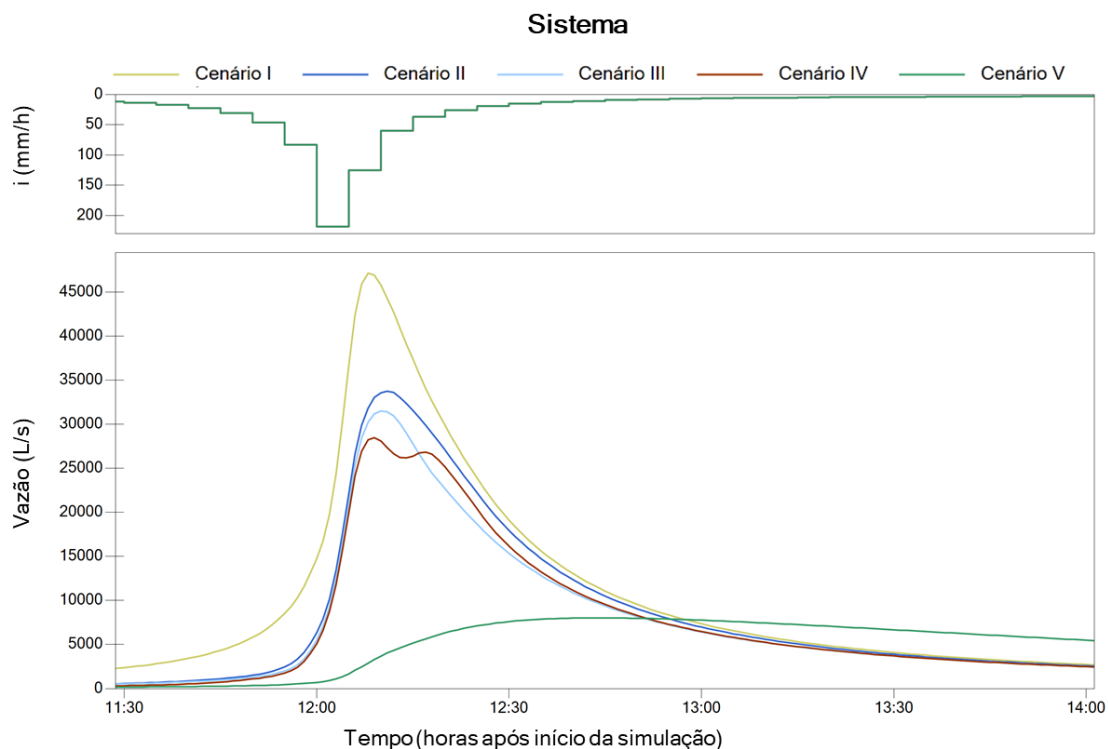


Figura 5-7 – Hidrogramas do sistema para os Cenários I, II, III, IV e V.

Com a substituição da pavimentação asfáltica por blocos intertravados nas vias secundárias, foi possível alcançar uma redução de aproximadamente 30% da vazão de pico efluente do sistema e em cerca de 22% do volume de escoamento. Foi demonstrado que a pavimentação com blocos intertravados constitui uma boa alternativa para amortecer a onda de cheia em vias com trânsito moderado.

Já a eficácia dos microrreservatórios instalados nos prédios residenciais foi limitada, uma vez que se conseguiu alcançar apenas a redução de aproximadamente 7% da vazão de pico e 10% do volume do escoamento. Essa baixa eficácia se deve ao fato de os telhados dos prédios residenciais sempre encaminharem as águas pluviais para as áreas verdes, que funcionam como planos de infiltração, diminuindo a importância dos microrreservatórios.

Quanto a trincheira de infiltração, mesmo inserida apenas na zona comercial, alcançou a redução de 10% da vazão de pico. O escoamento da zona comercial é direcionado diretamente para a via principal, sem ser transferida para as áreas verdes, fazendo com que



as trincheiras de infiltração não tenham sua eficácia diminuída pela presença de outras medidas compensatórias. Em relação ao volume de escoamento do sistema, a implantação dessa medida compensatória reduziu apenas cerca de 1%. Tal comportamento se justifica pelo fato de essa área de um lado possuir um valor de CN elevado e por outro por ocupar uma extensão relativamente pequena. Essa redução de volume, mesmo que pequena, se justifica pela capacidade de armazenamento dessas infraestruturas, representado no hidrograma pela sua inflexão no Cenário IV.

No Cenário IV, onde apenas foram implantadas medidas compensatórias de controle na fonte, a vazão de pico efluente do sistema é cerca de 1,7 vezes maior que a vazão de restrição. Apesar de não alcançar as vazões previstas pela legislação, esse valor representa grande avanço, uma vez que, analisando o trabalho de Bigonha (2021), a ocupação do Assentamento 26 de Setembro incorporando as características da área urbana vizinha (Setor Habitacional Vicente Pires) e sem a implantação de medidas compensatórias leva a vazão de pico efluente do sistema a ser cerca de 4,2 vezes maior que a imposta pela Resolução Adasa nº 09 de 2011.

As bacias de retenção impermeáveis garantem que as vazões de lançamento das águas pluviais sejam inferiores à vazão de restrição. Devidamente enquadradas dentro do desenho urbanístico da proposta, esses reservatórios podem se tornar elementos importantes de paisagismo e ponto de lazer para a comunidade.

## **6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES**

A implantação de medidas compensatórias se mostrou eficaz no amortecimento das ondas de cheia, entretanto devem ser analisadas no seu conjunto, tendo em vista os efeitos sinérgicos entre elas, necessitando equilibrar seu uso.

Foi verificado que, de um lado, a ocupação ordenada do Assentamento 26 de Setembro com a implantação de medidas compensatórias traria benefícios para toda a comunidade que ocupa a unidade hidrográfica do Riacho Fundo, por outro, a ocupação sem controle do lançamento das águas pluviais pode acarretar em problemas ocasionados por inundações e alagamentos para os centros urbanos localizados a jusante e também para o próprio assentamento.

Os resultados obtidos demonstram que a substituição da pavimentação asfáltica por blocos intertravados é a medida que majoritariamente contribuiu para o amortecimento da onda de cheia, conseguindo reduzir em cerca de 30% da vazão de pico efluente do sistema.

A implantação de microrreservatórios e de trincheiras de infiltração também favoreceram o amortecimento, alcançando redução de aproximadamente 15 % da vazão de pico efluente do sistema com a inserção de ambas medidas compensatórias. Entretanto, para garantir que as vazões de lançamento das águas pluviais sejam inferiores à vazão de restrição, foi necessária a implantação de bacias de detenção.

Apesar da ocupação irregular do Assentamento 26 de Setembro estar em fase bastante avançada e de difícil reversão, a proposta de desenvolvimento urbano ordenado discutida neste trabalho pode servir de exemplo para futuras ocupações, especialmente no DF, que apresenta uma forte tendência a novos condomínios residenciais.

Como recomendações, salienta-se a importância de ampliar o estudo adotando outras medidas compensatórias, como por exemplo valas de infiltração, bacias de infiltração. Também devem ser estudados os aspectos econômicos, levando em consideração o conceito de eficiência.

Outro aspecto importante a ser estudado é a otimização do posicionamento dos poços de visita, tendo em vista a necessidade de manter a sua profundidade dentro de limites operacionais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABCP. *Programa Soluções para Cidades: Iniciativas inspiradoras - Projeto Técnico: Reservatórios de Detenção*. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland, 2013.
- ABCP. *Programa Soluções para Cidades: Iniciativas inspiradoras - Projeto Técnico: Pavimento Permeável*. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland, 2015.
- ADASA (Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento do Distrito Federal). *Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais Urbanas do Distrito Federal*. Ed. rev. e atual. Brasília: Superintendência de Drenagem Urbana, Adasa, 2018.
- AGRA, S.G. *Estudo experimental de microrreservatórios para o controle do escoamento superficial, 2001*. 105f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2001.
- AISSE, M. M. Drenagem urbana. In: FENDRICH, R.; OBLADEN, N. L.; AISSE, M. M.; GARCIAS, C. M. *Drenagem e controle da erosão urbana*. 4 ed. Curitiba: Champagnat, 1997. p. 195-267.
- Azzout Y.; Barraud, S; Cres, F.; Alfakih, E. (1994). *Techniques Alternatives em Assainissement Pluvial: Choix, Conception, Réalisation et Entretien*. LCPC, INSA Lyon, Certu, Agences de I.Eau Lavoisier Technique et Documentation.
- Baptista, M.; Nascimento, N.; Barraud, S. (2005). *Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana*. 2ª edição. Porto Alegre: ABRH, 318 p.
- BELING, F. A.; GARCIA, J. I. B.; PAIVA, E. M. C. D.; BASTOS, G. A. P.; PAIVA, J. B. D. *Analysis of the SWMM Model Parameters for Runoff Evaluation in Periurban Basins from Southern Brazil*. In: 12th International Conference on Urban Drainage. Porto Alegre, 2011.
- BIGONHA, M. B. (2021). *Avaliação da drenagem no desenvolvimento da região do Assentamento 26 de Setembrbo*. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 83.

- BRITO, L. K. S. (2020). *Avaliação do Impacto das Características Geomorfológicas e Padrões de Uso e Ocupação do Solo Urbano no Distrito Federal no Manejo de Águas Pluviais*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídrico, Publicação PTARH.DM, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 200p.
- Borgwardt, S. (2006). *Long-term in-situ infiltration performance of permeable concrete block pavement*. Proc., 8th Int. Conf. on Concrete Block Paving, Interlocking Concrete Pavement Institute, Washington, DC.
- CABRAL, J. J. S. P.; MASCARENHAS, F. B.; CASTRO, M. A. H.; MIGUEZ, M. G.; PEPLAU, G. R.; BEZERRA A. A. *Modelos Computacionais para Drenagem Urbana*. In: RIGHETTO, A. M. (Org.). *Manejo de águas pluviais urbanas*. p. 112-148. Natal: Editora Abes, 2009.
- Castro, L. M. A. (2002). *Proposição de Indicadores para a Avaliação de Sistemas de Drenagem Urbana*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio ambiente e Recursos Hídricos, Belo Horizonte, 118p.
- Campana, N.A., Bernardes, R.S., Silva Jr., J.A. *Controle qualitativo e quantitativo do escoamento pluvial urbano com bacias de retenção*. *Amby-Água*, Taubaté, v. 2, n. 3, p. 98-111, 2007.
- Canholi, A.P. (2005). *Drenagem urbana e controle de enchentes*. Oficina de Textos, São Paulo, 302p.
- CENSO DEMOGRÁFICO 2010. *Características da população e dos Domicílios: Resultados do Universo*. Rio de Janeiro: IBGE, 2011.
- COFFMAN, L.S., CHENG, M., WEINSTEIN, N. & CLAR, M. (1998). *Low-Impact Development Hydrologic Analysis and Design*. In: Proceedings of the 25th Annual Conference on Water Resources Planning and Management, Nova York, USA, 1998.
- Costa, M. E. L. (2013) *Monitoramento e Modelagem de Águas de Drenagem Urbana na Bacia do Lago Paranoá*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília.

- CRR – *Climate Risk and Resilience in China* (2020). *Xiamen: Adapting to Climate Change with Sponge City Construction*. Disponível em: <<http://climatecooperation.cn/urbanisation/xiamen-adapting-to-climate-change-with-sponge-city-construction/>>. Acesso em: 01/12/2020.
- CRUZ, M. A. S. *Controle do Escoamento no Lote com Detenção*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental – Dissertação de Mestrado. 1998.
- CUNHA, S. F. C.; OLIVEIRA E SILVA; F. E. MOTA; TAINÁ, ULHPA; PINHEIRO, M. C. 2015. *Avaliação da acurácia dos métodos do SCS para cálculo da precipitação efetiva e hidrogramas de cheia*. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.20, n.4, p. 837 – 848.
- de Vito, Carlo & Bigonha, Márcio Bittar & Costa, Maria Elisa & Koide, Sergio (2020). *Análise do impacto hidrológico da ocupação do Assentamento 26 de Setembro – DF*. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=7144>. Acesso em: 12/05/2021.
- DRUMOND, P.de. P. *Estudo da influência da reservação de águas pluviais em lotes no município de Belo Horizonte, MG: Avaliação hidráulica e hidrológica*. 2012. Dissertação. (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.
- DRUMOND, P. P.; MOURA, P. M.; COELHO, M. M. L. P. 2018. *Comparison the monitoring data of an on-site stormwater detention (OSD) and the results in the use of theoretical methods for its design*. *RBRH*, v. 23, n. 18, p. 1-12.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2004). *Mapa Pedológico Digital – SIG Atualizado do Distrito Federal Escala 1:100.000 e uma Síntese do Texto Explicativo*. Documento 120. Planaltina–DF: Embrapa Cerrados.
- Engman, E.T., *Roughness Coefficients for Routing Surface Runoff*, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 112, No. 1, February 1986, pp. 39-53
- FOGEIRA, J.S. *Cidade Esponja – Aplicação do conceito e métodos no Bairro Marechal Gomes da Costa, Porto*. Dissertação. (Mestrado em Arquitetura Paisagista) – Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto, 2019.

- Freitas, Ana & Silva, Fernando & Costa, Maria Elisa & Acosta, Sandro & Brites, Carlo. (2018). *Análise Hidrológica da Aplicação de Sistemas de Drenagem Sustentável – Estudo de Caso Assentamento 26 de Setembro*. Disponível em: <<https://tratamentodeagua.com.br/wp-content/uploads/2019/01/9168.pdf>>. Acesso em: 10/09/2020.
- GARCIA, J.I.B. & PAIVA, E.M.C.D. (2006) *Monitoramento Hidrológico e Modelagem da Drenagem Urbana da Bacia do Arroio Cancela - RS*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos v. 11, p. 99-108.
- Huber, W.C., “New Options for Overland Flow Routing in SWMM,” Urban Drainage Modeling, R.W. Brashear and C. Maksimovic, eds., Proc. of the Specialty Symposium of the World Water and Environmental Resources Conference, ASCE, Environmental and Water Resources Institute, Orlando, FL, May 2001, pp. 22-29.
- Jacob ACP, Rezende OM, de Sousa MM, de França Ribeiro LB, de Oliveira AKB, Arrais CM, Miguez MG. *Use of detention basin for flood mitigation and urban requalification in Mesquita, Brazil*. Water Science & Technology. 2019.
- LEHNS. *Manual do usuário, EPA SWMM 5.0, Modelo de Gestão de Drenagem Urbana - Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS)*. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Centro de Tecnologia. Universidade Federal da Paraíba (UFPB). 2012.
- Leopold, L. T. 1968 *Hydrology for urban planning - A guide book on the Hydrologic effects of urban land use*. USGS circ 554, 18p.
- Li, H., Ding, L., Ren, M., Li, C., Wang, H., 2017. *Sponge City construction in China: a survey of the challenges and opportunities*. Water 9 (12).
- Nguyen, T. T., Ngo, H. H., Guo, W., & Wang, X. C. (2020). A new model framework for sponge city implementation: Emerging challenges and future developments. *Journal of Environmental Management*, 253, 109689.
- NOVACAP - Companhia Urbanizadora da Nova Capital do Brasil. (2019). *Termo de Referência e Especificações para elaboração de projetos de sistema de drenagem pluvial no Distrito Federal*. NOVACAP, 25 pg.
- OECD (1986). *Control of Water Pollution from Urban Runoff*. Organization for Economic Cooperation and Development, Paris.



- PACHECO, E. F. (2015). *Avaliação quali-quantitativa de uma vala de infiltração pluvial em termos de retenção de contaminantes. Estudo de caso: Distrito do Campeche – Florianópolis- Santa Catarina*. Dissertação de mestrado em Engenharia Ambiental, UFSC.
- Randall, M., Sun, F., Zhang, Y., & Jensen, M. B. (2019). *Evaluating Sponge City volume capture ratio at the catchment scale using SWMM*. *Journal of Environmental Management*, 246, 745–757.
- REIS, R.P.A.; ILHA, M.S.O. (2014) Comparação de desempenho hidrológico de sistemas de infiltração de água de chuva: poço de infiltração e jardim de chuva. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 14, n. 2, p. 79-90.
- Righetto, A. M.; Moreira, L. F. F.; Sales, T. E. A. (2009). *Manejo de águas pluviais urbanas*. In: RIGHETTO, A. M. *Manejo de águas pluviais urbanas*. Rio de Janeiro: ABES.
- Rodríguez-Rojas, M. I., Huertas-Fernández, F., Moreno, B., Martínez, G., & Grindlay, A. L. (2018). *A study of the application of permeable pavements as a sustainable technique for the mitigation of soil sealing in cities: A case study in the south of Spain*. *Journal of Environmental Management*, 205, 151–162.
- ROSSMAN, L. A. *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1*. Cincinnati (EUA): USEPA (United States Environment Protection Agency), 2015.
- ROSSMAN, L. A.; HUBER, W. C. *Storm Water Management Model Reference Manual Volume I – Hydrology*. Cincinnati (EUA): USEPA (United States Environment Protection Agency), 2016.
- SCHULER, T. R. *Controlling urban runoff: a practical manual for planning and designing urban BMPs*. Washington Department of Environmental Programs; Metropolitan Washington Council of Governments, 1987.
- SILVA, G. B. L. (2006). *Avaliação Experimental Sobre a Eficiência de Superfícies Permeáveis com Vistas ao Controle do Escoamento Superficial em Áreas Urbanas*. Tese de Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.TD-01/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 180p.

- Silva, D. F. (2016) *Análise da Influência de Microrreservatórios em um Loteamento e seus Efeitos em Escala de Bacia*, Dissertação de Mestrado, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 128p.
- SOUZA, V. C. 2002. *Estudo Experimental de Trincheiras de Infiltração no Controle da Geração do Escoamento Superficial*. Tese de Doutorado. 127 pp. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- STU, 1993. *La maîtrise des eaux pluviales: des solutions sans tuyau dans l'agglomération de Bordeaux*. Les Éditions du STU, Service Technique de l'Urbanisme, Bordeaux, France.
- SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL (Paraná). *Manual de drenagem urbana da região metropolitana de Curitiba*. Curitiba: SUDERHSA, 2002.
- Tucci, C.E.M. (1993). *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Ed. da Universidade/ EDUSP. Coleção ABRH de Recursos Hídricos. Porto Alegre - RS, 944 p.
- Tucci, C.E.M.; Porto, R.L.L.; Barros, M.T. *Drenagem Urbana*. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/ABRH, 428p., 1995.
- Tucci, C.E.M. (2005). *Gestão de águas pluviais urbanas*. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília. Ministério das Cidades. Saneamento para todos, 4º volume.
- TUCCI, C. E. M. *Águas urbanas: Desenvolvimento urbano*. Estudos Avançados, v. 22, n. 63, p. 97-112, 2008.
- USDA - Soil Conservation Service (USDA SCS). National Engineering Handbook. Section 4. Hydrology. USDA-SCS, Washington, D.C. 1985.
- Vieira, Julia & Faria, Larissa & Merched, Mateus & Coelho, Lineker. (2020). *Proposta de integração de trincheira de infiltração para minimizar danos causados pelas chuvas na região da Pampulha, em Contagem-MG*.
- Xia, J.; Zhang, Y.Y.; Xiong, L.H.; He, S.; Wang, L.F.; Yu, Z.B. *Opportunities and challenges of the Sponge City construction related to urban water issues in China*. Sci. China Earth Sci. 2017, 60, 652–658.

Yoo, C., Ku, J. M., Jun, C., & Zhu, J. H. (2016). *Simulation of infiltration facilities using the SEEP/W model and quantification of flood runoff reduction effect by the decrease in CN*. *Water Science and Technology*, 74(1), 118–129.