

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

**AVALIAÇÃO DA DRENAGEM NO DESENVOLVIMENTO
DA REGIÃO DO ASSENTAMENTO 26 DE SETEMBRO - DF**

MÁRCIO BITTAR BIGONHA

ORIENTADOR: SÉRGIO KOIDE, Dr.

COORIENTADORA: MARIA ELISA LEITE COSTA, Ma.

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

BRASÍLIA/DF: MAIO/2021

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

**AVALIAÇÃO DA DRENAGEM NO DESENVOLVIMENTO
DA REGIÃO DO ASSENTAMENTO 26 DE SETEMBRO - DF**

MÁRCIO BITTAR BIGONHA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL 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:

**SÉRGIO KOIDE, Dr. (ENC/UNB)
(ORIENTADOR)**

**ALEXANDRE KEPLER SOARES, Dr. (ENC/UNB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**ALINE DA NÓBREGA OLIVEIRA (PPGFAU/UNB)
(EXAMINADORA EXTERNA)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 24 DE MAIO DE 2021.

FICHA CATALOGRÁFICA

BIGONHA, MÁRCIO BITTAR
AVALIAÇÃO DA DRENAGEM NO DESENVOLVIMENTO DA REGIÃO DO
ASSENTAMENTO 26 DE SETEMBRO - DF.

xi, 83 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2021)

Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. DRENAGEM URBANA

2. URBANIZAÇÃO

3. SWMM

4. MEDIDAS COMPENSATÓRIAS

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BIGONHA, M. B. (2021). *AVALIAÇÃO DA DRENAGEM NO DESENVOLVIMENTO DA REGIÃO DO ASSENTAMENTO 26 DE SETEMBRO*. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 83 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: MÁRCIO BITTAR BIGONHA

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: AVALIAÇÃO DA DRENAGEM
NO DESENVOLVIMENTO DA REGIÃO DO ASSENTAMENTO 26 DE SETEMBRO -
DF

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.

Márcio Bittar Bigonha
bittarbigonha@gmail.com

AGRADECIMENTOS

À minha família, Antonio Carlos, Márcia, Antonio e Roberto, pelo apoio durante a realização deste trabalho. Este foi mais um desafio que vencemos juntos nesses anos de 2020 e 2021.

Ao meu orientador, guardião da água, Sérgio Koide, e à coorientadora Maria Elisa Leite Costa, que me conduziram com paciência e sabedoria no meu processo de amadurecimento, que acompanhou o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos da Universidade de Brasília e do grupo de estudos Maplu do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, sempre dispostos a orientar e dar suporte em todos os sentidos.

RESUMO

O processo de desenvolvimento de cidades brasileiras muitas vezes se dá sem a consideração de importantes fatores. Esse desordenado processo de construção das cidades pode provocar altas taxas de impermeabilização do solo e até mesmo promover a ocupação de leitos de rios. As alterações no uso do solo provocam redução no tempo de concentração de águas pluviais na bacia, aumento no volumes escoados e eleva o valor de pico de vazões. Dessa forma, a ocorrência de enchentes se torna mais frequente e intensa. Soluções para a questão da drenagem foram elaboradas ao longo do tempo, com diferentes mecanismos de manejo. As soluções clássicas para a drenagem foram propostas com base no escoamento de volumes e afastamento das águas pluviais. Já as soluções alternativas foram desenvolvidas com base em mecanismos de retenção e infiltração, no intuito de minimizar os efeitos a jusante. O Assentamento 26 de Setembro vem sendo ocupado em área próxima ao centro de Brasília e apresenta configuração urbana semelhante à já consolidada na região de Vicente Pires, de instalação de condomínios horizontais com alta taxa de impermeabilização do solo. O presente estudo objetivou avaliar o processo de desenvolvimento da região do Assentamento 26 de Setembro considerando uma evolução no processo de ocupação conduzindo à realidade de Vicente pires e analisando os efeitos desse processo na drenagem urbana. Foram propostas infraestruturas de drenagem para viabilizar a análise dos efeitos hidrológicos e foi realizada simulação com o programa PCSWMM, que incorpora o programa computacional SWMM. As análises apontaram para o aumento dos hidrogramas de cheias e para a necessidade de aplicação de medidas de controle centralizado na gestão das vazões excedentes, que já se mostram alteradas em relação ao uso estabelecido nas diretrizes de ocupação para a região.

PALAVRAS-CHAVE: Drenagem urbana; urbanização; SWMM, medidas compensatórias

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVO GERAL	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
3.1	O CICLO HIDROLÓGICO E O ESCOAMENTO SUPERFICIAL	15
3.2	O ESPAÇO URBANO E A ÁGUA	15
3.3	METABOLISMO URBANO	18
3.4	ABORDAGENS EM DRENAGEM URBANA.....	19
3.4.1	SISTEMAS CLÁSSICOS DE DRENAGEM.....	20
3.4.2	SOLUÇÕES ALTERNATIVAS DE DRENAGEM	22
3.5	MEDIDAS COMPENSATÓRIAS	24
3.5.1	TÉCNICAS PARA CONTROLE NA FONTE	24
3.5.1.1	MICRORRESERVATÓRIOS.....	24
3.5.1.2	POÇOS DE INFILTRAÇÃO	26
3.5.2	TÉCNICAS LINEARES	29
3.5.2.1	PAVIMENTOS PERMEÁVEIS	29
3.5.2.2	TRINCHEIRAS DE INFILTRAÇÃO.....	31
3.5.2.3	VALAS E PLANOS DE INFILTRAÇÃO.....	33
3.5.3	TÉCNICAS PARA CONTROLE CENTRALIZADO	35
3.5.3.1	RESERVATÓRIOS DE DETENÇÃO	36
3.5.3.2	RESERVATÓRIOS DE RETENÇÃO.....	37
3.6	MODELAGEM EM DRENAGEM URBANA	39
3.6.1	VAZÃO DE RESTRIÇÃO.....	39
3.6.2	TEMPO DE RETORNO	40
3.6.3	MODELOS HIDROLÓGICOS	40
3.7	SWMM E PCSWMM	41
3.8	MODELO SCS.....	42
4	METODOLOGIA	46
4.1	LOCALIZAÇÃO E HISTÓRICO	47
4.2	CARACTERIZAÇÃO	49

4.2.1 CLIMA	49
4.2.2 PEDOLOGIA	50
4.2.3 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	50
4.2.4 REDE DE DRENAGEM	52
4.3 FORMULAÇÃO DOS CENÁRIOS	53
4.4 MODELAGEM	54
4.4.1 CONFIGURAÇÃO DAS SUB-BACIAS	54
4.4.2 CONFIGURAÇÃO DA REDE DE DRENAGEM	56
4.4.3 CHUVA DE PROJETO	57
4.4.4 VAZÃO DE RESTRIÇÃO DO DF	57
4.4.5 MEDIDAS COMPENSATÓRIAS	58
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	60
5.1.1 HIPSOMETRIA	60
5.1.2 PEDOLOGIA	61
5.1.3 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	61
5.1.4 PRECIPITAÇÃO	65
5.2 SISTEMA PROPOSTO	66
5.2.1 CONFIGURAÇÃO DAS SUB-BACIAS	66
5.2.2 CONFIGURAÇÃO DA REDE DE DRENAGEM	67
5.3 RESULTADOS DA MODELAGEM NO PCSWMM	69
5.3.1 ANÁLISE DOS CENÁRIOS C1, C2 E C3	69
5.3.2 ANÁLISE DOS CENÁRIOS C3 E C4	73
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	76

Lista de Figuras

3.1	Alterações no balanço hídrico provocadas pela urbanização (ADASA (2018)).	16
3.2	Alterações no hidrograma (ADASA (2018)).	17
3.3	Cidades com metabolismo circular (Silva (2011) adaptado de Rogers (2001)).	18
3.4	Cidades com metabolismo linear (Silva (2011) adaptado de Rogers (2001)).	19
3.5	Esquema típico de sistema clássico de drenagem (ADASA (2018)).	21
3.6	Hidrogramas de pré e pós-urbanização, com a indicação da vazão de restrição (ADASA (2018)).	23
3.7	a) Esquema de microrreservatório e b) detalhamento (O’Loughlin et al. (1995) adaptado por SILVA (2016)).	25
3.8	Esquema de configuração de poços de infiltração (ADASA, 2018).	27
3.9	Esquema de configuração de poços de infiltração com sistema de decantação (ADASA, 2018).	28
3.10	(A) Esquema de configuração de poços de infiltração fechados P-SC; (B) Anéis de concreto; (C) Configuração da tubulação (FERREIRA; BARBASSA; MORUZZI, 2018).	28
3.11	(A) Esquema de configuração de poços de infiltração adaptados P-GHidro; (B) Anéis de concreto com brita nas laterais; (C) Tampa modificada (FERREIRA; BARBASSA; MORUZZI, 2018).	29
3.12	Esquema de configuração de pavimentos permeáveis (ADASA, 2018).	30
3.13	Esquema de configuração de trincheiras de infiltração, corte transversal (ADASA, 2018).	32
3.14	Esquema de configuração de trincheiras de infiltração, corte longitudinal (ADASA, 2018).	32
3.15	Esquema de valas de infiltração dotadas de revestimento de fundo (ADASA, 2018).	34
3.16	Bacias de detenção integradas ao espaço urbano (TUCCI, 2005).	36
3.17	Bacia de retenção integrada ao espaço urbano (ADASA, 2018).	38
4.1	Fluxograma das etapas de projeto.	46
4.2	Localização do Assentamento 26 de Setembro (de Vito et al., 2020).	47
4.3	Divisores de água naturais da região em que se encontra o Assentamento 26 de Setembro (de Vito et al., 2020).	48
4.4	Área de estudo (de Vito et al., 2020).	49
4.5	Área urbana de Vicente Pires e delimitação da região extraída no estudo.	51

4.6	Área urbana de Vicente Pires e delimitação da região extraída no estudo.	52
4.7	Mapa do traçado viário existente.	53
4.8	Ocupação de Vicente Pires, lote tipo.....	55
4.9	Processo de ocupação do Assentamento 26 de Setembro, configuração de lotes.	55
4.10	Dimensionamento do reservatório pela ferramenta <i>Storage</i> do PCSWMM.....	58
5.1	Carta hipsométrica da área de estudo com perfil transversal.....	61
5.2	Mapa do uso e ocupação atual da área de estudo, utilizado no cenário C1.....	63
5.3	Mapa do uso e ocupação atual da área de Vicente Pires.	63
5.4	Mapa do uso e ocupação proposto para os cenários C3 e C4.	64
5.5	Hietogramada chuva de projeto de Brasília com Tempo de Retorno de 10 anos pelo método dos blocos alternados.	66
5.6	Proposta de configuração de lotes no Assentamento 26 de Setembro.	67
5.7	Proposta de rede de drenagem traçada no programa PCSWMM.....	68
5.8	Hidrogramas de saída no exutório OF1 para os cenários C1, C2 e C3.	71
5.9	Proposta de rede de drenagem traçada no programa PCSWMM, detalhe do subsistema de OF1.	72
5.10	Perfil do trecho destacado na Figura 5.9.	72
5.11	Hidrogramas de saída no exutório OF1 para os cenários C3 e C4.....	74
5.12	Proposta de sistema de drenagem formulado no programa PCSWMM.	75
5.13	Detalhe do sistema de drenagem para OF1.....	75

Lista de Tabelas

3.1	Potencialidades e desafios no uso de microrreservatórios.	26
3.2	Potencialidades e desafios no uso de poços de infiltração.	29
3.3	Potencialidades e desafios no uso de pavimentos permeáveis.	31
3.4	Potencialidades e desafios no uso de trincheiras de infiltração.	33
3.5	Potencialidades e desafios no uso de valas e planos de infiltração.....	35
3.6	Potencialidades e desafios no uso de bacias de retenção.	37
3.7	Potencialidades e desafios no uso de bacias de retenção.	39
3.8	Grupos de solos e características (TUCCI, 2001).....	43
3.9	Valores do parâmetro CN_{II} para diferentes usos de solo urbano (TUCCI, 2001).....	45
5.1	Valores adotados para os parâmetros Curva Número e n de Manning no estudo de uso e ocupação.....	62
5.2	Comparativo dos tipos de uso obtidos no estudo de uso e ocupação.	64
5.3	Tabela de valor médio do parâmetro CN para toda a área de estudo nos cenários C1, C2, C3 e C4.....	65
5.4	Características gerais da rede de drenagem.	68
5.5	Áreas dos subsistemas propostos e respectivos CNs.....	69
5.6	Vazões máximas dos subsistemas propostos.	70
5.7	Tabela de dimensões dos reservatórios incorporados na modelagem.....	73
5.8	Vazões dos subsistemas propostos com a incorporação de bacias de retenção..	73

Lista de Abreviações

<i>ADASA</i>	Agência Reguladora de águas, Energia e Saneamento do Distrito Federal
<i>AMC</i>	<i>Antecedent Moisture Condition</i>
<i>ANA</i>	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
<i>BIM</i>	modelo da informação da Cconstrução
<i>CAD</i>	desenho assistido por computador
<i>CHIWATER</i>	<i>Computational Hydraulics International</i>
<i>CN</i>	coeficiente curva número
<i>EMBRAPA</i>	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
<i>EPA</i>	<i>Environmental Protect Agency</i>
<i>h</i>	horas
<i>ha</i>	hectares
<i>I_a</i>	abstração inicial
<i>IDF</i>	curva Intensidade – Duração – Frequência
<i>LID</i>	<i>Low Impact Development</i>
<i>LIUDD</i>	<i>Low Impact Urban Design and Development</i>
<i>m²</i>	metros quadrados
<i>m³</i>	metros cúbicos
<i>min</i>	minutos
<i>mm</i>	milímetros
<i>NOVACAP</i>	Companhia Urbanizadora da Nova Capital
<i>P</i>	precipitação
<i>PDDU</i>	Plano Diretor de Drenagem Urbana
<i>PDOT</i>	Plano Diretor de Ordenamento Territorial
<i>Pe</i>	precipitação efetiva
<i>Q</i>	vazão
<i>s</i>	segundos
<i>S</i>	Capacidade de armazenamntento no solo
<i>SCS</i>	Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos
<i>SIG</i>	sistema de informações geográficas
<i>SUDS</i>	<i>Sustainable Urban Drainage Systems</i>
<i>SWMM</i>	<i>Storm Water Management Model</i>
<i>T_c</i>	tempo de concentração
<i>T_r</i>	tempo de retorno
<i>WSUD</i>	<i>Water Sensitive Urban Design</i>

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a necessidade de moradias dado o aumento da população urbana intensifica a atuação de agentes clandestinos, que acabam por definir configurações desordenadas nas cidades, ocupando, por vezes, áreas ambientalmente sensíveis.

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 mais restritamente 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 facilita a implementação de políticas e permite estabelecimento de novos assentamentos, bairros e cidades, bem como a determinação de tipologias urbanísticas empregadas. As 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.

O crescimento populacional observado no Distrito Federal nas últimas décadas, que provoca aumento na demanda por moradias, e a atuação de agentes clandestinos em áreas públicas potencializam o surgimento de ocupações irregulares. O Assentamento 26 de Setembro é uma dessas áreas recentes de ocupação irregular. Localizado às margens da rodovia DF-095, o assentamento tem ocupação orientada no Plano de Ordenamento Territorial do Distrito Federal (PDOT) como zona agrícola (DF, 2009). Contudo, o uso das terras vem apresentando um caminho diferente do proposto pelo PDOT.

Vicente Pires é uma região que está situada próxima ao Assentamento 26 de Setembro e apresentou processo de ocupação irregular. Os usos orientados para a área, originalmente agropastoris, também não foram seguidos, e as chácaras rurais foram loteadas e convertidas em áreas urbanas. Assim, a região foi ocupada irregularmente e, hoje, se consolida com tipologia urbanística de baixa densidade, alto grau de impermeabilização do solo e recorrentes problemas com inundações. O processo que se observa no Assentamento 26 de Setembro é, portanto, muito semelhante ao já verificado em Vicente Pires.

A impermeabilização, causada pela redução da cobertura vegetal da superfície de bacias hidrográficas e das áreas de infiltração deve ser considerada no estabelecimento de infraestruturas e empreendimentos (ADASA, 2018). A impermeabilização impacta diretamente no regime do escoamento superficial decorrente de águas pluviais, aumentando o volume de água escoada, e a vazão de pico, antecipando a sua ocorrência.

O plano de manejo de águas pluvias pode se dar pela implementação de diversas técnicas. Dispositivos de baixo impacto têm sido desenvolvidos com o intuito de promover reduções de vazão por meio de intervenções urbanas menos impactantes. Low Impact Developments (LIDs) podem ser empregadas em diferentes escalas, fazendo com que o sistema de drenagem implantado provoque menores modificações no comportamento hidrológico natural da bacia, aproximando vazões naturais, de pré-desenvolvimento, das resultantes do desenvolvimento urbano.

Estudos hidrológicos podem ser conduzido mediante a utilização do modelo computacional SWMM (*Storm Water Management Model*), modelo hidrológico de manejo de águas pluviais desenvolvido para permitir a previsão hidráulica e de qualidade de escoamento em sistemas de drenagem para determinado cenário. A ferramenta PCSWMM, disponibilizada pela *Computational Hydraulics International* (CHIWATER), implementa o modelo SWMM em interface com sistema de informação geográfica (SIG).

Utilizando o PCSWMM, foram avaliados os impactos hidrológicos da ocupação da área do Assentamento 26 de Setembro em diferentes cenários, detectando a evolução de uso e ocupação do solo tendo como base o desenvolvimento da área de Vicente Pires.

O trabalho está estruturado em 6 capítulos. O capítulo 2 apresenta objetivos gerais e específicos. O capítulo 3 contém referencial teórico e revisão bibliográfica fundamental para a realização do trabalho, trazendo conceitos e abordagens importantes para a compreensão da temática abordada. No capítulo 4 é detalhada a metodologia empregada para alcançar os objetivos fixados no capítulo 2. Resultados e discussões são apresentados no capítulo 5 e, no capítulo 6, são tecidas conclusões e recomendações.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O trabalho tem como objetivo geral avaliar a evolução dos hidrogramas de cheias em função das alterações de uso e da implementação de sistemas de drenagem no Assentamento 26 de Setembro. A avaliação realizada pressupõe ocupação urbana desordenada semelhante àquela observada na região administrativa Vicente Pires, verificando os impactos provocados pelo modelo de ocupação e incorporando soluções para sua mitigação.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar os impactos provocados pela urbanização na situação de pré-desenvolvimento, na situação atual, e na de ocupação semelhante àquela observada em Vicente Pires;
- Estudar arranjo de combinação de redes convencionais, para viabilizar o estudo de hidrogramas de cheias, e bacias de detenção;
- Verificar o impacto hidrológico promovido pela implementação do sistema proposto no amortecimento das ondas de cheia provocadas por chuva de projeto e o abatimento da vazão de lançamento das águas pluviais.

3

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 O CICLO HIDROLÓGICO E O ESCOAMENTO SUPERFICIAL

O ciclo hidrológico compõe processos de transporte da água entre oceanos, atmosfera e superfícies continentais. Infiltração e escoamento superficial são fenômenos constituintes do ciclo hidrológico que têm ocorrência afetada pelo tipo de uso do solo. Com a diminuição da capacidade de retenção, provocada por alterações na superfície da bacia hidrográfica, a água tende a escoar (VIESSMAN et al., 1977).

As características do solo e da água, dentre outros aspectos físicos e ambientais, representam importante papel na quantidade limite de retenção de água do solo, alcançado na condição de saturação. A depender da porosidade, do tipo de cobertura vegetal presente e da qualidade da água precipitada, o volume de água infiltrada pode variar (TUCCI, 2001).

Ao ser alcançada a saturação do solo, a água residual presente na superfície tende a escoar. A precipitação efetiva é a parcela de água que incide na superfície do solo e, após a saturação, sob influência da força gravitacional, converge para calhas definitivas, os rios, na forma de escoamento superficial (TUCCI, 2001).

O tipo de cobertura do solo é destacado por Calux e Thomaz (2013) como fator influente no balanço entre as parcelas de água escoada e infiltrada. A vegetação atua amenizando a energia com que a água precipitada alcança o solo, reduzindo a ocorrência de processos erosivos, que podem prejudicar a infiltração pela colmatação da camada superior do solo (VIESSMAN et al., 1977). A vegetação promove, também, a diminuição do volume de escoamento superficial, por meio da retenção.

Uma vez infiltrado, o volume alcança camadas inferiores, onde pode encontrar reservatórios subterrâneos e ser armazenado. O volume infiltrado pode, ainda, compor vazões de percolação, escoamento subterrâneo e escoamento subsuperficial, este último associado ao fluxo existente nas raízes da cobertura vegetal. (TUCCI; MENDES, 2006).

3.2 O ESPAÇO URBANO E A ÁGUA

As modificações promovidas pelas ações antrópicas nos ambientes naturais provocam impactos na dinâmica do ciclo hidrológico. Em uma perspectiva global, há de se considerar

os impactos promovidos por mudanças climáticas, que podem gerar alterações em vazões de pico e tempos de retorno a elas associados, potencializando a ocorrência de eventos hidrometeorológicos extremos (POUR et al., 2020). Analisando alterações locais e suas decorrências imediatas, podem ser observadas, em grande medida, consequências provocadas pela ação antrópica direta em cursos d'água e nas superfícies de bacias hidrográficas (BAPTISTA, 2005). Alguns desses impactos são enumerados por ADASA (2018), como o aumento de temperaturas no espaço urbano, o aumento de volumes escoados, a aceleração de processos erosivos e a redução da qualidade da água pluvial escoada. A Figura 3.1 esquematiza os fenômenos observados.



Figura 3.1: Alterações no balanço hídrico provocadas pela urbanização (ADASA (2018)).

A impermeabilização, decorrente da remoção da vegetação nativa e instalação de edificações e infraestrutura urbana, reduz as taxas de infiltração e de evapotranspiração, provocando aumento dos volumes de escoamento superficial (TUCCI; MENDES, 2006). Esse comportamento intensifica a ocorrência de processos erosivos, provocando assoreamento em corpos receptores que pode ser ainda agravado pela presença de resíduos sólidos na superfície da bacia (ADASA, 2018).

No âmbito da qualidade da água escoada, deve-se levar em conta a poluição gerada pela atividade antrópica no espaço urbano (BARBOSA; FERNANDES; DAVID, 2012). Cargas poluidoras presentes na superfície das bacias de drenagem, quando carregadas pelas águas pluviais, podem alcançar reservatórios, cursos d'água e, por vezes, aquíferos, que por meio de infiltração indevida provocam impactos de ordem pontual e difusa (GOONETILLEKE et al., 2005). Barbosa, Fernandes e David (2012) enumeram os principais poluentes transportados em uma bacia, que estão relacionados com características de uso e ocupação. Percebe-se, portanto, o viés sanitário da drenagem urbana, que tem sua origem ligada ao controle de epidemias de cólera e tifo na Europa no século XIX, configurando uma questão de saúde pública (BAPTISTA, 2005).

A dinâmica das águas subterrâneas é, também, impactada pelas mudanças promovidas na

bacia. Com a redução da infiltração, o abastecimento de aquíferos é prejudicado, reduzindo os volumes armazenados. Durante períodos de seca, quando a vazão subterrânea possui maior importância para a manutenção das vazões dos rios, o baixo aporte hídrico pode significar a diminuição ou a interrupção do escoamento em corpos hídricos superficiais (TUCCI; CLARKE, 1997).

Quando da ocorrência da impermeabilização, uma vez que a eficiência hidráulica observada nas superfícies urbanas é maior que a de ambientes naturais, tem-se o desenvolvimento de maiores velocidades de escoamento (BAPTISTA, 2005). O tempo que uma gota de água leva para escoar superficialmente do ponto mais distante da bacia até a seção principal, tempo de concentração da bacia (TUCCI; MENDES, 2006), é, portanto, reduzido e as vazões a montante se intensificam. Estudos analisados por Burns et al. (2005) apresentaram aumento de até 80% nas vazões de pico registradas em áreas urbanas com 50% de impermeabilização. Rose e Peters (2001) registram aumento de vazões de pico de 30% a mais de 100% em épocas de cheias em rios localizados áreas urbanizadas quando comparados com outros cursos d'água menos impactados pela urbanização, comportamento também evidenciado por Paliaga et al. (2020). A Figura 3.2 evidencia o impacto provocado pelas alterações no uso do solo em áreas urbanas no hidrograma.

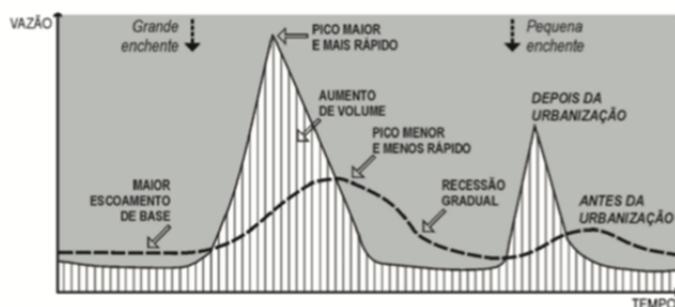


Figura 3.2: Alterações no hidrograma (ADASA (2018)).

A pesquisa de informações básicas municipais realizada pelo IBGE em 2017 indicou que, entre 2013 e 2017, 27,2% dos municípios brasileiros foram atingidos por enchentes ou inundações graduais, provocando danos a infraestruturas, desalojamentos e óbitos (IBGE, 2017). O estudo registra ainda que, para municípios com mais de 500.000 habitantes, a proporção foi de 73,8 % para o período. De acordo com ANA (2014), a região Centro-Oeste apresenta a maior proporção de rios com alta vulnerabilidade no Brasil (41%), o que significa a ocorrência de inundações de alto impacto e frequentes inundações de médio impacto. Trechos assim avaliados podem ser encontrados nos córregos Riacho Fundo e Vicente Pires (ANA, 2014).

Para Tucci (2008), os principais componentes da estrutura da gestão da cidade envolvem planejamento e gestão do uso do solo, infraestruturas fundamentais da cidade e a gestão socioambiental. Desse modo, é fundamental que a gestão considere os aspectos ambientais quando implementando políticas urbanas. O desenho urbano deve, portanto, contar com integração entre campos de ciências da natureza, sociais e humanas, para que sejam formuladas propostas de ocupação que conciliem as demandas antrópicas e as questões ambientais (ANDRADE, 2014).

3.3 METABOLISMO URBANO

A minimização dos impactos promovidos pela urbanização aos sistemas naturais pode ser alcançada, segundo Silva (2011), pela implementação dos conceitos de metabolismo circular no meio urbano. O desenvolvimento de sistemas integrados, contando com infraestruturas multifuncionais que promovem simultaneamente reúso de águas pluviais e controle de impactos ambientais, pode ainda acarretar em ganhos sociais e econômicos (FENNER et al., 2019).

De acordo com Silva e Romero (2013), a aplicação de técnicas ambientais e uma mudança de hábitos seriam decorrências desse tipo de planejamento aplicado ao ordenamento urbano, acarretando na redução da produção de resíduos poluentes e maior eficiência nos sistemas energéticos. A Figura 3.3 esquematiza o metabolismo urbano para uma cidade de metabolismo circular.



Figura 3.3: Cidades com metabolismo circular (Silva (2011) adaptado de Rogers (2001)).

O conceito de cidade circular, em contraposição ao de cidade linear, baseia-se em configuração urbana que promove menor impacto regional, demandando menor quantidade de recursos e energia, e gerando menos impactos ambientais. A cidade linear, que pressupõe

o espalhamento urbano, implica em maiores gastos com transporte e maiores áreas impermeabilizadas, tornando a implementação de sistemas de drenagem mais complexa e onerosa (SILVA, 2011), como esquematizado na Figura 3.4.



Figura 3.4: Cidades com metabolismo linear (Silva (2011) adaptado de Rogers (2001)).

Propostas fundadas no espalhamento urbano podem provocar danos ambientais, impactando sobre a paisagem natural, aumentando a demanda por energia e produzindo maior quantidade de resíduos. Nithila Devi, Sridharan e Kuiry (2019) estudaram o impacto do aumento da área urbana ocupada pela cidade de Chennai, na Índia, na ocorrência de inundações e obtiveram resultados que apontam para o aumento na ocorrência e agravamento das consequências de eventos pluviométricos extremos. Isso ocorre pois a ocupação de maiores quantidades de área gera impacto na capacidade de infiltração na bacia hidrográfica, o que intensifica as alterações do ciclo hidrológico (SILVA; ROMERO, 2013).

3.4 ABORDAGENS EM DRENAGEM URBANA

A busca por incorporar, no planejamento de cidades, as soluções para as questões relacionadas ao saneamento se mostra presente desde as origens do planejamento urbano (ARMUS, 1995). A utopia sanitária de Richardson (RICHARDSON, 1876, 2005) e a implementação do zoneamento pela Alemanha, precursora do urbanismo científico, como mecanismo de controle de aspectos higiênicos e funcionais no pós guerra (FELDMAN, 2005) demonstram essa ligação do arranjo formal da cidade com a tentativa de solucionar as questões relacionadas à água nos centros urbanos. No Brasil, a aplicação dessas soluções se efetivou a partir da proclamação da república, sob a égide do pensamento positivista (BAPTISTA, 2005).

A partir da segunda metade do século XX, novas tecnologias para o manejo das águas pluviais foram propostas. Partindo da bacia hidrográfica como unidade fundamental de estudo e gestão hidrológica, buscou-se a compensação dos efeitos provocados pela urbanização na infiltração e na retenção das águas precipitadas (BAPTISTA, 2005). Assim, foram elaboradas novas soluções, apresentando melhor integração à paisagem urbana e considerando a qualidade da água escoada e a biodiversidade do sistema urbano (ROCHA, 2019).

Diferentes denominações foram empregadas para as novas abordagens no manejo de águas pluviais a depender da região. Fletcher et al. (2014) discorrem sobre a utilização das terminologias *Low Impact Development* (LID), *Sustainable Urban Drainage Systems* (SUDS), *Water Sensitive Urban Design* (WSUD) e *Low Impact Urban Design and Development* (LIUDD) para as tecnologias voltadas à gestão de águas pluviais respectivamente nos Estados Unidos da América, no Reino Unido, na Austrália e na Nova Zelândia. Os autores, apontando para o desenvolvimento de uma nova área voltada para a mitigação de inundações que leva em conta aspectos ambientais, sanitários e econômicos, ressaltam que o surgimento de novas nomenclaturas evidencia a proeminência e a dinâmica do emergente campo de estudo.

3.4.1 Sistemas clássicos de drenagem

Dentro da perspectiva higienista, a drenagem se desenvolveu na busca por evacuação rápida de águas pluviais das áreas urbanas. Segundo Baptista (2005), os sistemas foram concebidos com o intuito de promover a liberdade de vias e permitir o pleno desenvolvimento urbano na superfície. Assim, buscando o rápido escoamento das precipitações, provoca-se um aumento na velocidade do volume escoado, que aumenta os picos de vazões lançadas em corpos receptores, em geral, de maneira pontual (ROCHA, 2019).

No Brasil, a implementação da drenagem urbana se deu com base nessa abordagem higienista (CHRISTOFIDIS; ASSUMPÇÃO; KLIGERMAN, 2019). Fatima (2013) analisa os projetos urbanísticos desenvolvidos por Saturnino de Brito para o município de Santos. As proposições tiveram no seu centro as questões sanitárias, buscando controlar epidemias e endemias que se proliferavam no fim do século XIX por meio da instalação de sistemas de drenagem em áreas sujeitas à inundação. A metodologia empregada viria a se tornar referência para a área de drenagem pluvial no país.

Sistemas de drenagem convencional são implementados utilizando, em geral, infraestrutura subterrânea. Assim, apresentam limitações de flexibilidade operacional e fazem necessárias reestruturações onerosas sempre que observadas variações nas configurações urbanas que apresentem potencial de modificação dos padrões de escoamento (ROCHA, 2019). Além das dificuldades de manutenção, Pour et al. (2020) ressaltam a limitação associada ao projeto das infraestruturas clássicas, em que se considera a precipitação como uma variável hidrometeorológica estacionária, desconsiderando incertezas associadas a mudanças climáticas (NOOR et al., 2018). Assim, quando da ocorrência de eventos hidrometeorológicos extremos, sistemas convencionais podem se mostrar insuficientes no controle de alagamentos.

A qualidade da água escoada é um aspecto, em grande medida, colocado à margem nos

projetos convencionais de drenagem (BAPTISTA, 2005). Segundo ADASA (2018) cargas de diferentes localidades do centro urbano são conduzidas pelas redes de águas pluviais juntamente com sedimentos e podem ser fonte de poluição significativa no corpo receptor, em especial nas primeiras chuvas (COSTA; TSUJI; KOIDE, 2018). Ligações clandestinas de esgotamento sanitário e lançamentos a céu aberto, quando levados pelo escoamento superficial, podem comprometer ainda mais a qualidade da água no sistema, agravando as consequências associadas ao lançamento (CRUZ et al., 2001).

Os sistemas clássicos de drenagem são compostos por infraestruturas divididas em duas escalas, microdrenagem e macrodrenagem. Elementos microdrenagem são associados à drenagem da rede viária, composta por sarjetas, canaletas, captações, condutos de ligação e tubulações (ADASA, 2018). Já os sistemas de macrodrenagem constituem canais abertos ou condutos de maior porte, também chamados de galerias. Outros componentes podem ser também empregados, como estações elevatórias, bueiros e dissipadores de energia (BAPTISTA, 2005). A Figura 3.5 esquematiza a implementação de sistema de drenagem clássico.

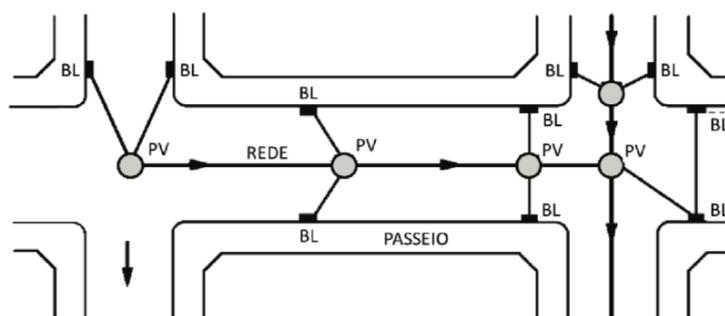


Figura 3.5: Esquema típico de sistema clássico de drenagem (ADASA (2018)).

O termo de referência para elaboração de projetos de sistema de drenagem pluvial no Distrito Federal, aprovado pela Novacap em 2019, estabelece diretrizes para projetos de drenagem, especificando etapas de projeto e parâmetros a serem utilizados (NOVACAP, 2019). Segundo o documento, o diâmetro mínimo admitido na rede deve ser de 60 centímetros e devem ser posicionados poços de visita em locais de mudança de direção da rede sem que se exceda a distância máxima de 60 metros. O coeficiente de rugosidade adotado para cálculos de canais e galerias de concreto deve ser de 0,013. Quanto à declividade, ADASA (2018) orienta para a adoção de valor mínimo de 0,5%.

Ainda segundo Novacap (2019), o dimensionamento da rede de drenagem deve ser realizada com base no Método Racional para áreas de contribuição de, no máximo, 100 hectares. Para áreas maiores, o termo de referência orienta que sejam utilizados modelos de transformação chuva-vazão e o método do Hidrograma Unitário.

3.4.2 Soluções alternativas de drenagem

O emprego de LIDs objetiva a melhoria da qualidade de vida nas cidades, contribuindo para a recuperação e preservação do meio ambiente (BAPTISTA, 2005). Assim, promovendo a reconexão dos fluxos hídricos, medidas alternativas viabilizam o desenvolvimento urbano e podem contribuir para a redução das cargas de poluição de origem pluvial, que impactam o meio ambiente, minimizando riscos de natureza sanitária e poluidora (BAPTISTA, 2005; ROCHA, 2019).

A aplicação de medidas compensatórias no Distrito Federal tem crescido nos últimos anos (FILENI; COSTA; ALVES, 2019). Contudo, a aplicação desse tipo de tecnologia pode encontrar, no Brasil, condicionantes críticas associadas à dificuldade de implementação em regiões de configuração urbana já bem definida (VILLANUEVA et al., 2011), que limitam sua implementação social, legal e fisicamente. Ainda assim, experiências exitosas de emprego de LIDs vêm sendo registradas com abordagens diversas desde a primeira década do século XXI em cidades brasileiras (CRUZ; SOUZA; TUCCI, 2007).

O estudo conduzido por Gonçalves, Ribeiro e Baptista (2016) avaliou a implementação de sistemas alternativos de drenagem na área do campus da Universidade Federal de São Carlos, São Paulo. Adotando critérios físicos e urbanísticos para a implementação dos dispositivos de controle, foram alcançadas reduções no volume escoado e na vazão de pico quando comparando o sistema a um sistema clássico. Fileni, Costa e Alves (2019) estudaram a implementação de sistemas alternativos de drenagem na região de Ceilândia, no Distrito Federal, alcançando reduções no volume escoado e diminuição da vazão de pico para aquela verificada no estado de pré-urbanização.

Sistemas alternativos de drenagem são implementados de modo a serem funcionais e de fácil manutenção (VILLANUEVA et al., 2011). Apresentam, também, maior durabilidade quando comparados aos sistemas clássicos, de uma vez que se compreende que uma ação local sobre o ciclo da água apresenta impacto global (BAPTISTA, 2005).

A qualidade da água é uma questão que se faz presente na formulação de LIDs. Segundo (SOUZA; TUCCI, 2005), a redução de cargas de poluição pode ser observada na qualidade do escoamento, com controle total para eventos menores que descarga de projeto. O desafio enquanto projetando LIDs passa, portanto, pela busca de dispositivos que controlem a qualidade do escoamento, o que é alcançado por meio de práticas integradas (TAVANTI; BARBASSA, 2012).

Contudo, quando medidas de controle na fonte são implementadas sem o seguimento de recomendações técnicas de segurança, podem representar um risco de contaminação de águas subterrâneas (ADASA, 2018). Desse modo, é importante que sejam destinados à

infiltração apenas os volumes de qualidade assimilável, sendo os efluentes de pior qualidade direcionados ao tratamento (SOUZA; CRUZ; TUCCI, 2012).

O projeto de LIDs se dá no âmbito da bacia hidrográfica tomando parâmetros geográficos, como topografia, hidrologia e vegetação, e parâmetros urbanos, como zoneamento e uso do solo, para a formação de base de referência que subsidiará a identificação de áreas adequadas para o manejo de águas (SOUZA; CRUZ; TUCCI, 2012). Assim, o sistema de drenagem é formulado de maneira interdisciplinar, criando e mantendo espaços integrados e bem adaptados (CRUZ et al., 2001), não afetando outras funções urbanas (ROCHA, 2019).

Infraestruturas de drenagem sustentável, que podem se apresentar em diferentes escalas, são implementadas aproveitando as características do sítio, de modo a explorar as potencialidades do solo, o que pode implicar em ganhos econômicos (BAPTISTA, 2005). Na tentativa de alcançar a situação hidrológica de pré-desenvolvimento, as medidas estruturais se utilizam, em grande parte, de tecnologias que promovam a infiltração e a retenção da água, fenômenos esses que podem ou não ocorrer simultaneamente nas estruturas propostas (CHESHMEHZANGI; BUTTERS, 2016).

A Figura 3.6 exibe um comparativo entre vazões e volumes escoados em três situações. O hidrograma após urbanização sem medidas de controle registra maior vazão de pico com ocorrência em momento anterior àquele observado na situação de pré-urbanização. A figura registra, ainda, a vazão de restrição, que para ADASA (2018) é a máxima vazão observada na situação de pré-urbanização. Já o hidrograma após urbanização para a situação em que se utilizam medidas de controle, a vazão de pico se apresenta controlada e com ocorrência retardada. Contudo, é importante destacar que o volume escoado é maior em relação à situação de pré-urbanização, a menos que todo o volume excedente seja infiltrado.

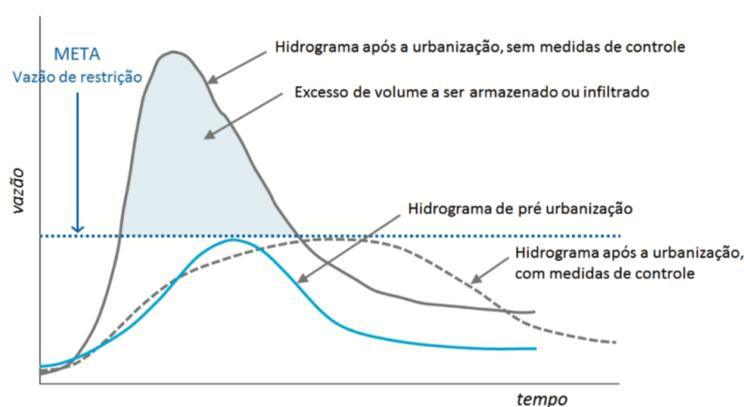


Figura 3.6: Hidrogramas de pré e pós-urbanização, com a indicação da vazão de restrição (ADASA (2018)).

3.5 MEDIDAS COMPENSATÓRIAS

Baptista (2005) classifica sistematicamente as medidas compensatórias estruturais em três grupos, a saber, técnicas para controle na fonte, técnicas lineares e técnicas para controle centralizado. Esta seção apresentará detalhes sobre características e aplicação para diferentes tecnologias dentro de cada grupo criando, ao fim de cada seção, um quadro de potencialidades e desafios de cada tecnologia.

A implementação das medidas compensatórias pressupõe o conhecimento da capacidade de infiltração do solo ADASA (2018). No Plano Diretor de Drenagem Urbana do DF, (Distrito Federal, 2009), recomenda-se para a elaboração de projetos a adoção de condutividade hidráulica saturada mínima de $7,6 \text{ mmh}^{-1}$, que significa a adoção de coeficiente de condutividade hidráulica (ou coeficiente de permeabilidade) do solo (k) de $2,1 \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$.

Contudo, ADASA (2018) cita estudos que apontam para a variabilidade das taxas de infiltração, ressaltando também a questão da colapsibilidade do solo do DF. Assim, tece recomendações para o planejamento de dispositivos de infiltração, que vão desde a realização de ensaios de infiltração e colapsibilidade, em conformidade com os padrões normatizados, até a adoção de coeficientes de segurança no projeto.

Quanto à estratégia adotada para o controle das vazões, podem-se empregar individual ou conjuntamente tecnologias de retenção e infiltração. Assim, Baptista (2005) ressalta a importância não apenas dos estudos mencionados acima, mas da realização de manutenções periódicas para que seja evitado o processo de colmatação, aumentando a vida útil dos dispositivos.

Outro fator importante citado por Baptista (2005) para tecnologias de infiltração é a necessidade de conhecimento da profundidade do lençol subterrâneo, que deve ser considerado para que não ocorra a poluição das águas subterrâneas pela infiltração de águas pluviais. Assim, recomenda-se o distanciamento de pelo menos um metro entre o ponto mais baixo das medidas empregadas e a cota máxima do lençol (BAPTISTA, 2005).

3.5.1 Técnicas para controle na fonte

3.5.1.1 Microrreservatórios

Utilizados principalmente para o controle de vazão em lotes urbanos, são estruturas simples, ideais para áreas edificadas com baixa disponibilidade de espaços destinados a medidas compensatórias (ADASA, 2018). Segundo SILVA (2016), o dispositivo deve receber o escoamento produzido no lote e promover seu armazenamento temporário, de modo a realizar

a descarga em nível de pré-urbanização. Assim, torna-se responsabilidade do ator que se beneficia da impermeabilização o controle das águas pluviais geradas.

Segundo Baptista (2005), as estruturas podem ser fabricadas em alvenaria e concreto ou pré-fabricadas e sua disposição pode se dar a céu aberto ou enterrada. Pode-se, também, promover a construção de estruturas em paralelo, na conformação off-line (SILVA, 2016), de modo a diminuir os custos associados à fabricação de tanques para os volumes de armazenamento necessários. Um esquema de implantação de microrreservatórios é exibido na Figura 3.7.

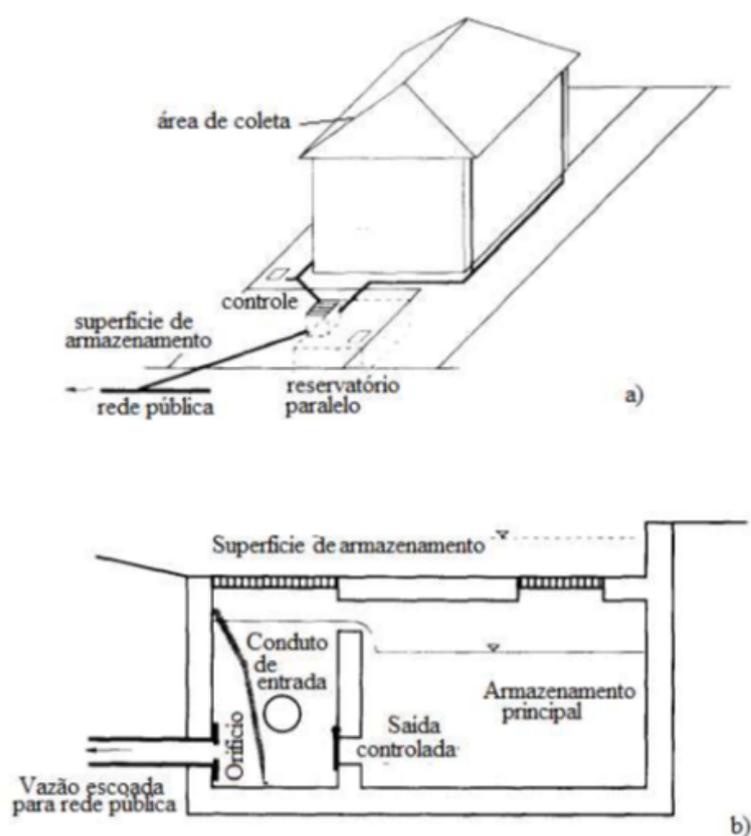


Figura 3.7: a) Esquema de microrreservatório e b) detalhamento (O’Loughlin et al. (1995) adaptado por SILVA (2016)).

A água captada pode ser disposta diretamente na rede ou por infiltração. Há ainda a possibilidade de instalação de sistemas de reúso, que deve contar com sistema de tratamento adequado uma vez que o sistema em si não promove ganhos nesse sentido (BAPTISTA, 2005).

O estudo conduzido por Li et al. (2017) avaliou a aplicação ótima de uma combinação

de LIDs na cidade de Xi'an. A metodologia empregada considerou parâmetros ambientais, sociais e econômicos para a verificação da eficiência dos sistemas, ressaltando microrreservatórios como a tecnologia mais favorável do ponto de vista social quando comparada com pavimentos permeáveis, telhados verdes, biorretenção e cinturões verdes de baixa elevação.

Potencialidades e desafios da aplicação da tecnologia de microrreservatórios no manejo de águas pluviais são apresentados na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Potencialidades e desafios no uso de microrreservatórios.

Potencialidades	Desafios
Estruturas simples, baixa demanda por espaço; Flexibilidade de construção e aplicação; Reúso da água.	Responsabiliza o beneficiado pela impermeabilização; Não atua na melhora da qualidade da água; Necessidade de manutenção.

3.5.1.2 Poços de infiltração

Dispositivos pontuais de até 20 metros de profundidade (ADASA, 2018), poços de infiltração têm como princípio de funcionamento o rearranjo do volume escoado, direcionado para o subsolo por meio de infiltração, assim, quando da sua aplicação é importante que sejam feitas as investigações geotécnicas relacionadas à escavação já mencionadas. Seu uso apresenta destaque nas situações em que camadas subterrâneas apresentem maior permeabilidade que as camadas mais superficiais (BAPTISTA, 2005).

ADASA (2018) ressalta a importância de posicionar poços de modo a evitar o seu processo de colmatção, provocado pela presença de material particulado fino na região. A manutenção, que deve se manter regular, pode significar um desafio dadas as profundidades que as infraestruturas podem alcançar e a depender da visitabilidade do local.

A configuração dos poços se dá utilizado material graúdo uniforme no preenchimento envolto em material geotêxtil com transpasse mínimo de 50 centímetros (ADASA, 2018), como esquematizado na Figura 3.8. Dada a pequena demanda por área superficial, possui boa integração no ambiente urbano. O estudo realizado por Barbassa, Sobrinha e Moruzzi (2014) destaca a importância da incorporação de manta geotêxtil para melhor funcionamento hidráulico da estrutura e a facilidade da substituição da manta, que contribui para aumento do tempo de vida da infraestrutura e manutenção das vazões de infiltração.

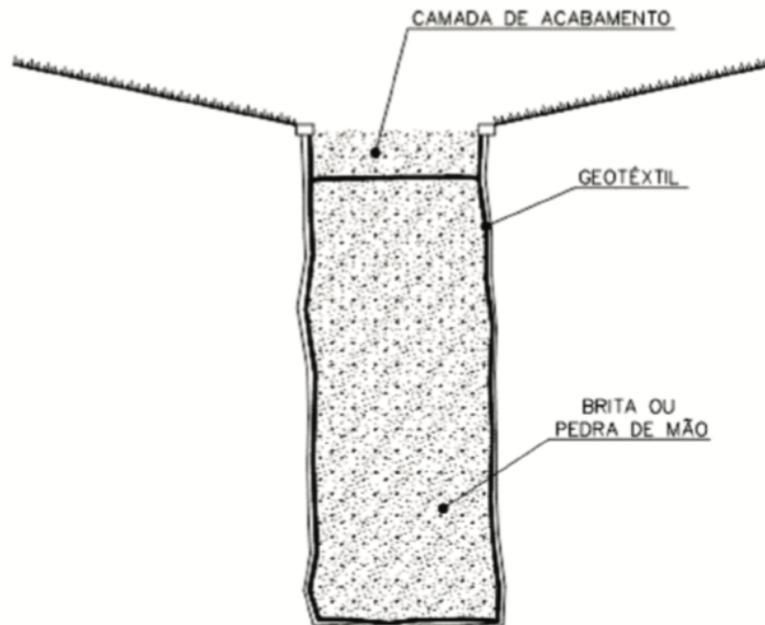


Figura 3.8: Esquema de configuração de poços de infiltração (ADASA, 2018).

Segundo (BAPTISTA, 2005), o funcionamento dos poços de infiltração pode se dar de modo difuso ou localizado. Enquanto esse modo pressupõe a condução do escoamento diretamente por ação da topografia ao poço, aquele recebe contribuição de uma rede de drenagem. A água é, então, evacuada por infiltração no solo ou por injeção direta no lençol subterrâneo, contribuindo para a alimentação do lençol subterrâneo. No caso de injeção direta, é aconselhado o uso de dispositivos de pré-tratamento para minimizar riscos associados à qualidade da água infiltrada. Um tipo de dispositivo de pré-tratamento é exemplificado na Figura 3.9.

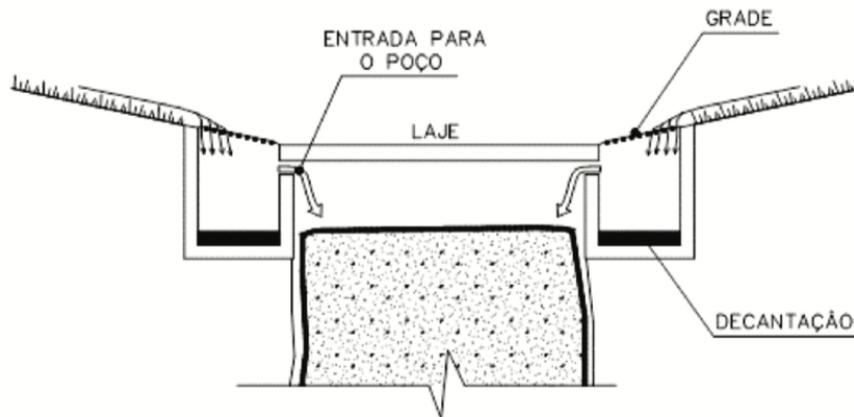


Figura 3.9: Esquema de configuração de poços de infiltração com sistema de decantação (ADASA, 2018).

Ferreira, Barbassa e Moruzzi (2018) conduziram estudo de modificação da configuração tradicional de poços do tipo P-SC de infiltração fechados e de funcionamento localizado, que recebem vazões apenas por condutos, como esquematizado na Figura 3.10. A alteração se deu incorporando orifícios nas paredes laterais, na tampa e no fundo da estrutura de concreto, como exemplificado na Figura 3.11. Pela realização de ensaios com chuvas simuladas, verificou-se maior desempenho do poço modificado P-GHidro, que apresentou esvaziamento em tempos 4% menores e armazenamento 25% menor quando comparado com os poços convencionais.

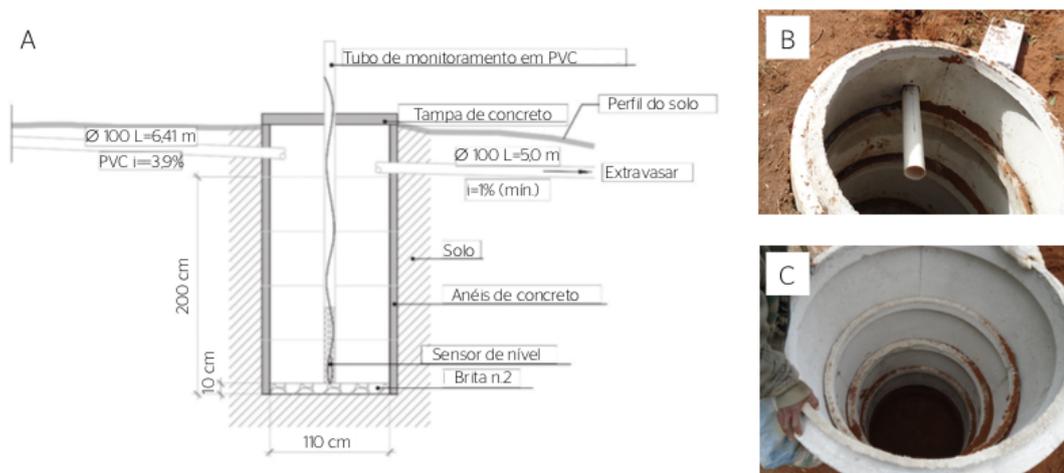


Figura 3.10: (A) Esquema de configuração de poços de infiltração fechados P-SC; (B) Anéis de concreto; (C) Configuração da tubulação (FERREIRA; BARBASSA; MORUZZI, 2018).

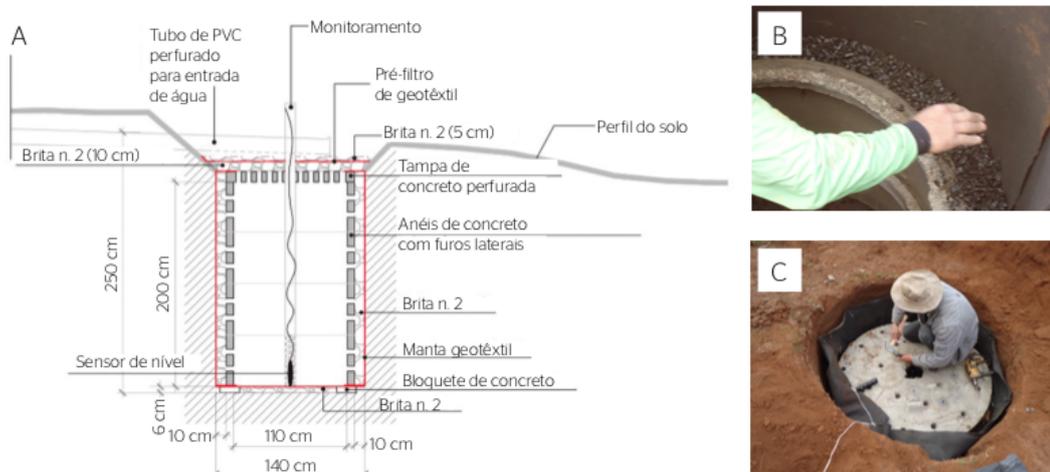


Figura 3.11: (A) Esquema de configuração de poços de infiltração adaptados P-GHidro; (B) Anéis de concreto com brita nas laterais; (C) Tampa modificada (FERREIRA; BARBASSA; MORUZZI, 2018).

Potencialidades e desafios da aplicação da tecnologia de poços de infiltração no manejo de águas pluviais são apresentados na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Potencialidades e desafios no uso de poços de infiltração.

Potencialidades	Desafios
Pequena ocupação de área superficial;	Necessidade de manutenção onerosa, que deve ser realizada regularmente para evitar a colmatção;
Aplicável em áreas de menor permeabilidade em camadas superficiais e maior em camadas profundas;	Necessidade de dispositivo de pré-tratamento no caso de injeção localizada;
Alimentação da vegetação e do lençol subterrâneo;	Risco de poluição do lençol subterrâneo.
Boa integração no ambiente urbano;	
Flexibilidade de construção, podendo ser de concreto armado, fibrocimento e alvenaria.	

3.5.2 Técnicas lineares

3.5.2.1 Pavimentos permeáveis

Em regiões densamente ocupadas, as áreas destinados à rolagem de automóveis podem corresponder a cerca de 30% da bacia de drenagem (BAPTISTA, 2005). Assim, a substi-

tuição da pavimentação impermeável por pavimentos drenantes pode causar impactos significativos no manejo de águas pluviais. Quanto aos custos de implantação, Baptista (2005) afirma que as duas estratégias de pavimentação apresentam necessidade de investimentos na mesma ordem de valores e que a nova tecnologia agrega ganhos para a circulação viária, como maior adesão dos pneus ao pavimento em épocas de chuva e diminuição nos ruídos.

A tecnologia pode ser aplicada de diferentes formas no controle do escoamento. Baptista (2005) cita os princípios gerais dos diferentes tipos de pavimentos. De acordo com o trabalho, a incorporação de água, que fica armazenada temporariamente no corpo do pavimento, pode se dar pela sua superfície ou por difusores. Esse processo pode conferir ganho na qualidade da vazão escoada, pela filtração que ocorre no corpo do pavimento. Quanto à evacuação, essa pode ocorrer por infiltração no solo ou por drenagem para sistemas a jusante.

ADASA (2018) detalha a etapa de projeto de pavimentos permeáveis, ressaltando a importância das investigações geotécnicas já citadas e o cuidado que se deve tomar enquanto realizando as obras, para que não se promova a compactação do solo, que pode comprometer sua permeabilidade. Assim como outras técnicas que pressupõem a infiltração, a colmatação deve ser evitada com emprego de geotêxteis e manutenção periódica. A Figura 3.12 esquematiza uma configuração de pavimento permeável.

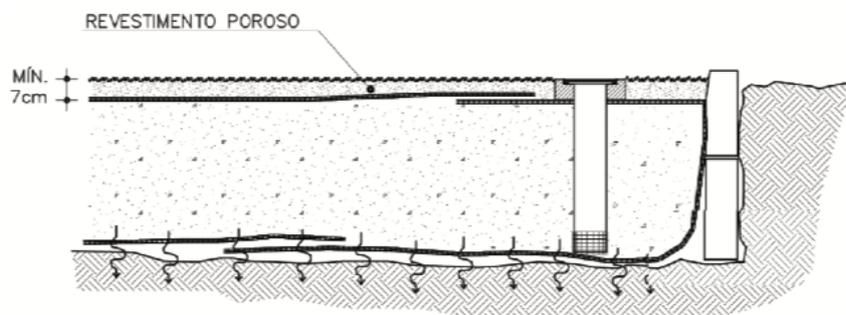


Figura 3.12: Esquema de configuração de pavimentos permeáveis (ADASA, 2018).

A aplicação dos pavimentos permeáveis se dá, preferencialmente, em áreas de tráfego leve ou naquelas destinadas à circulação de pedestres e ciclistas, dada a fragilidade de revestimentos permeáveis (SOUZA; CRUZ; TUCCI, 2012). Todavia, na aplicação em vias rápidas, além de se observar uma diminuição em acidentes durante a ocorrência de chuvas, a estrutura apresenta menor desenvolvimento de colmatação, dada a atuação autolimpante do contato dos pneus com a superfície pavimentada (BAPTISTA, 2005).

Sun et al. (2014) avaliaram, por meio de aplicação do modelo SWMM, a implementação de LIDs em Lenexa, Kansas, nos Estados Unidos da América. A modelagem incorporou

diferentes cenários, avaliando os potenciais de infiltração e de escoamento de cada tecnologia. O estudo registrou alta eficiência na aplicação da tecnologia de pavimentos permeáveis no controle de escoamento em eventos de baixa precipitação, registrando também o melhor desempenho no controle de pico de cheias.

Potencialidades e desafios dos pavimentos permeáveis são citadas na tabela 3.3.

Tabela 3.3: Potencialidades e desafios no uso de pavimentos permeáveis.

Potencialidades	Desafios
Custos equivalentes aos da pavimentação convencional; Melhoria do contato entre pneus e superfície e redução de ruídos, ganhos para a circulação viária; Ganho na qualidade de água infiltrada por ação da passagem pela estrutura; Aplicabilidade em grandes áreas do meio urbano.	Colmatação na superfície e no corpo do pavimento; Risco de poluição do lençol subterrâneo; Fragilidade de revestimentos asfálticos permeáveis; Necessidade de manutenções para a garantia da longevidade.

3.5.2.2 Trincheiras de infiltração

Tipicamente aplicadas na superfície ou com pequena profundidade, as trincheiras de infiltração são elementos em que a dimensão de comprimento predomina sobre as outras (BAPTISTA, 2005). Segundo Baptista (2005), os dispositivos podem ser aplicados em uma variedade de espaços urbanos, desde avenidas a praças e jardins, conferindo a valorização do espaço urbano.

Seu funcionamento é similar ao de outras medidas compensatórias que promovem infiltração. Por meio de condução direta pela topografia ou por sistemas de drenagem convencional, o dispositivo recebe águas pluviais que serão destinadas à infiltração no solo natural (BAPTISTA, 2005).

A tecnologia é implementada por meio de escavações no solo, e preenchimento com material graúdo de granulometria uniforme envolvido em geotêxtil ou filtro de areia para diminuir a entrada de sedimentos (BAPTISTA, 2005). Outra medida que pode ser importante para a redução do processo de colmatação é a instalação de faixa vegetada ou dispositivo de sedimentação (ADASA, 2018). Por essas razões, a aplicação das trincheiras é mais recomendada em regiões já urbanizadas. As figuras 3.14 e 3.13 esquematizam a configuração típica desse tipo de dispositivo.

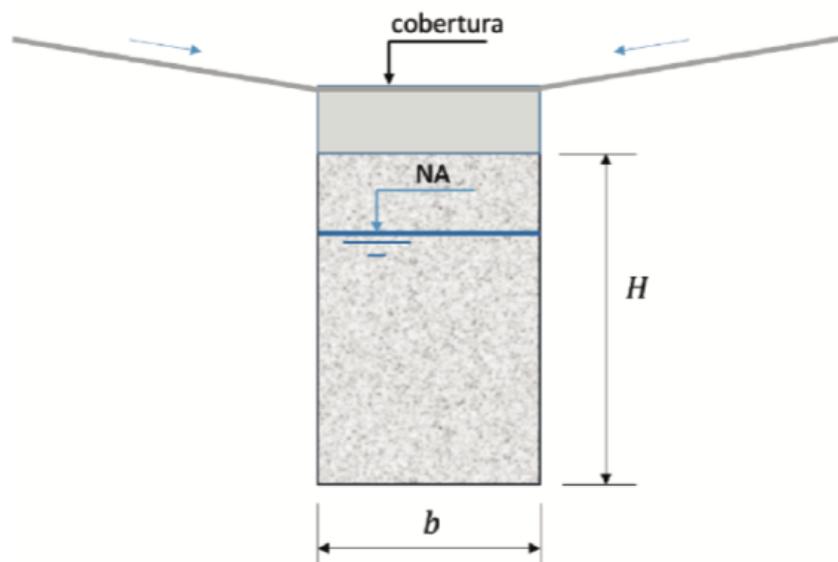


Figura 3.13: Esquema de configuração de trincheiras de infiltração, corte transversal (ADASA, 2018).

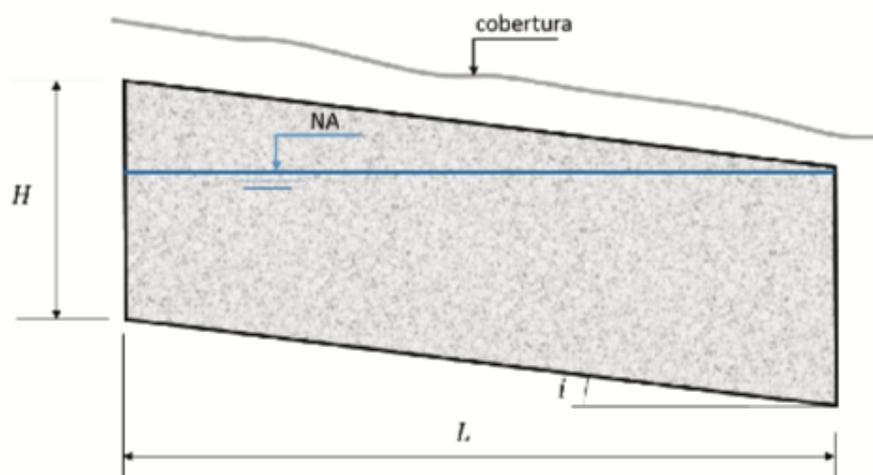


Figura 3.14: Esquema de configuração de trincheiras de infiltração, corte longitudinal (ADASA, 2018).

A qualidade da água infiltrada, que pode promover a recarga de aquíferos subterrâneos, é melhorada pelo processo de filtração, que ocorre pela penetração da água na estrutura (BAPTISTA, 2005). Esse processo, todavia, pode provocar contaminação do lençol e a colmatagem da estrutura, que pode ser controlada com manutenções periódicas.

Ahmed et al. (2017) conduziram estudo de implementação de trincheiras de infiltração no campus da *University Technology Malaysia* por meio de modelagem com SWMM. O estudo avaliou cenários com e sem a LID, o que permitiu a verificação do impacto da sua implementação. Os resultados indicaram redução na faixa de 17,5% a 20% do pico de cheia nas sub-bacias delimitadas na área de estudo.

Potencialidades e desafios da aplicação de trincheiras de infiltração são citados na tabela 3.4.

Tabela 3.4: Potencialidades e desafios no uso de trincheiras de infiltração.

Potencialidades	Desafios
Ganho paisagístico, boa integração na paisagem urbana; Simples e barata implementação; Ganho na qualidade de água infiltrada por ação da passagem pela estrutura; Aplicabilidade em grandes áreas do meio urbano.	Possibilidade de colmatação; Risco de poluição do lençol subterrâneo; Menor eficiência em regiões de maior declividade; Necessidade de manutenções para a garantia da longevidade.

3.5.2.3 Valas e planos de infiltração

A diferença entre valas e planos se dá na configuração dos sistemas. Enquanto as valas apresentam maior profundidade e predominância da dimensão longitudinal em relação às demais, os planos são caracterizados menor profundidade e maior equivalência entre as dimensões longitudinal e transversal (BAPTISTA, 2005).

A tecnologia consiste em depressões escavadas no solo para a captação, armazenamento, condução e infiltração de águas pluviais (BAPTISTA, 2005), a vazão pode ser recebida por escoamento direto ou por tubulações. O dispositivo deve, segundo ADASA (2018), promover a infiltração de toda a vazão que exceda aquela anterior ao desenvolvimento para eventos com tempo de retorno de 10 anos. Assim, a vazão excedente pode ser conduzida a outros dispositivos conectados.

Uma vez realizadas as investigações geotécnicas já mencionadas, a aplicação da tecnologia é simples e de baixo custo, consistindo na escavação do solo de modo a configurar depressões. São, geralmente, revestidos por vegetação para redução do carreamento de sedimentos. Para melhor funcionamento hidráulico e redução de erosão, podem ser instaladas canaletas no fundo dos dispositivos, como observado no esquema da Figura 3.15, o que reduz sua capacidade de infiltração (BAPTISTA, 2005).

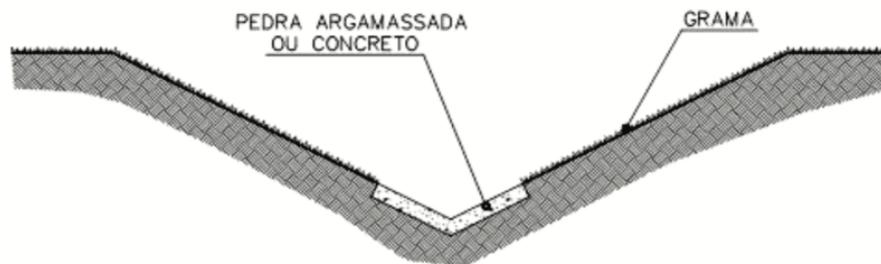


Figura 3.15: Esquema de valas de infiltração dotadas de revestimento de fundo (ADASA, 2018).

Valas e planos de infiltração apresentam melhor funcionamento em regiões de baixa declividade, que potencializam infiltração em detrimento do escoamento superficial (ADASA, 2018). Quando observadas maiores declividades, podem ser implantados barramentos dotados de dispositivos de controle do escoamento (ADASA, 2018). Todavia, a estagnação da água não infiltrada é uma preocupação que deve ser levada em conta quando do emprego de valas e planos de infiltração (BAPTISTA, 2005).

A aplicação desse tipo de tecnologia apresenta boa integração com a paisagem urbana, com destaque para a implementação de planos de inundação em regiões de estacionamentos. Apesar da necessidade de manutenção periódica, os dispositivos possuem fácil acesso, o que diminui os custos desse processo (BAPTISTA, 2005).

Os dispositivos podem promover pré-tratamento da água pelos mecanismos de sedimentação, filtração e adsorção, que ocorrem na vegetação e no solo (BUTLER; DAVIES, 2004). Apresentando diferentes trabalhos que avaliam os níveis de remoção, (BAPTISTA, 2005) explicita a variabilidade observada na literatura nos níveis de remoção promovidos por valas e planos.

O estudo conduzido por Sañudo-Fontaneda et al. (2020) realizou monitoramento de vala de infiltração em Ryton, no Reino Unido, durante três anos. Durante o período de estudo, foram registradas 25 ocorrências de tempestades e apenas um evento de inundação, o que evidenciou a robustez da medida implementada. A pesquisa tratou, além do desempenho da infraestrutura, de questões relacionadas à proliferação de espécimes dado o acúmulo de água proveniente de falta de adequada manutenção, comparando o sistema resultante da falta de manutenção a uma *wetland*.

Potencialidades e desafios da aplicação de valas e planos de infiltração são citados na tabela 3.5.

Tabela 3.5: Potencialidades e desafios no uso de valas e planos de infiltração.

Potencialidades	Desafios
Estruturas simples, baixo custo de implementação; Flexibilidade de construção e aplicação; Boa integração com a paisagem urbana.	Melhor funcionamento em regiões de baixa declividade e necessidade de espaço dedicado; Necessidade de manutenção; Acúmulo de volumes e estagnação.

3.5.3 Técnicas para controle centralizado

As técnicas de controle centralizado são caracterizadas por áreas de drenagem de maior porte, tratando-se, assim, de infraestrutura de maior importância no cenário urbano. A literatura apresenta, segundo Baptista (2005), divergências quanto à caracterização e à diferenciação dos dispositivos de detenção e retenção, o que demonstra a flexibilidade que esse tipo de tecnologia pode apresentar a depender dos fins de interesse no processo de manejo de águas pluviais.

Pour et al. (2020) ressalta a eficiência de medidas de controle centralizado no que diz respeito aos custos de implementação e desempenho das estruturas. O estudo aponta, contudo, para a possibilidade de elevação dos custos associados à manutenção, que podem tornar esse tipo de solução menos favorável que as soluções de sistemas clássicos.

Baptista (2005) elenca diferentes configurações que podem ser empregadas quanto à forma, podendo a bacia ser coberta, subterrânea ou implementada a céu aberto. Nesse último caso, podem ser secas (bacias de detenção), apresentar zonas úmidas, semelhantes a várzeas, ou espelhos d'água permanentes (Bacias de retenção). Bacias subterrâneas são aplicadas com maior frequência em áreas já consolidadas, onde não se pode prescindir de grandes áreas. Contudo, para a construção de dispositivos subterrâneos, maiores desafios econômicos e construtivos são enfrentados.

As bacias podem ser implementadas, ainda, em modo *on-line* ou *off-line*, de modo que nesse caso há a inundação do leito e da área contígua, enquanto neste se faz a condução por meio de canal para um reservatório dissociado do leito principal. Os dispositivos podem promover ou não infiltração, que pode realizar a totalidade ou parte da evacuação do volume afluente (ADASA, 2018). A seguir serão expostos alguns conceitos encontrados na literaturas para as tecnologias de detenção e retenção.

3.5.3.1 Reservatórios de detenção

Segundo ADASA (2018), os reservatórios, ou as bacias, de detenção são dispositivos mantidos secos durante os períodos de estiagem e que, na ocorrência de chuvas, liberam continuamente os afluentes, necessitando de dispositivo contíguo que promova a redução do aporte de sedimentos e outros poluentes. Já para Baptista (2005), a redução de cargas é um objetivo complementar, não sendo registrada a obrigatoriedade de dispositivos que promovam esse tratamento.

As bacias de detenção atuam retendo temporariamente volumes escoados e promovendo sua liberação gradual. Assim, tem-se uma redução nos níveis de vazão no tempo e um adiamento da ocorrência do pico de vazão. Trata-se de tecnologia amplamente aplicada em sistemas de manejo de águas pluviais dada a sua eficiência de controle dos efeitos do escoamento a montante. Todavia, a implantação de bacias *on-line* altera o regime de escoamento, o que pode, enquanto solucionando a questão de drenagem a montante, criar novos problemas a jusante.

A integração urbana do dispositivo pode ser estimulada para que sua implementação seja menos impactante para o ambiente construído e para redução de investimentos associados, uma vez conhecidos os altos custos de áreas urbanas. Assim, é comum a tentativa de criação de bacias multifuncionais, que estimulem outras atividades nessas estruturas, estabelecendo áreas de práticas desportivas ou mesmo praças, como observado na Figura 3.16. Todavia, alguns usos improvisados podem ser prejudiciais à população dada baixa qualidade da água, como a utilização das bacias para atividades balneárias (BAPTISTA, 2005).



Figura 3.16: Bacias de detenção integradas ao espaço urbano (TUCCI, 2005).

A água afluyente pode apresentar, principalmente nas primeiras chuvas após estiagem, grande aporte de sedimentos. A instalação de dispositivos de tratamento ou a destinação

a estações de tratamento se faz necessária enquanto lidando com a questão da qualidade efluente (BAPTISTA, 2005). Há ainda que se considerar o tempo de detenção da bacia, que deve ser inferior àquele necessário para a proliferação de espécimes locais (ADASA, 2018).

Rodríguez e Teixeira (2021) conduziram estudo de avaliação das bacias de detenção do município de São Carlos verificando que, em todas as 26 bacias estudadas, o único uso identificado foi o hidrológico, de modo que o conceito de usos múltiplos não foi explorado. Além disso, os autores apontam para as más condições de manutenção dos dispositivos, que apresentaram vegetação excessiva e presença de resíduos sólidos.

Uma avaliação de desempenho de medidas compensatórias foi realizado por Xing et al. (2021). No estudo, foram incorporados parâmetros ambientais, sociais e econômicos. Promovendo uma análise que incorporou a avaliação do processo construtivo das infraestruturas, o estudo chegou à conclusão de que bacias de detenção apresentam o desempenho mais bem distribuído dentre as alternativas, uma vez que o processo produtivo de diversas medidas pode significar impactos muitas vezes não considerados na avaliação ambiental. O estudo não incorporou, contudo, integração urbana na análise.

O estudo realizado por Li, Yan e Duan (2019) apresentou a modelagem de uma proposta de arranjo de LIDs e bacias de detenção para a composição de um plano de drenagem de águas pluviais. Os resultados, em comparação com um cenário sem a implementação de medidas de controle de drenagem, apresentaram uma diminuição de quase 92% da vazão de pico.

Potencialidades e desafios da aplicação de bacias de detenção são citados na tabela 3.6.

Tabela 3.6: Potencialidades e desafios no uso de bacias de detenção.

Potencialidades	Desafios
Amortecimento de grandes volumes; Flexibilidade de construção e aplicação; Permite integração à paisagem urbana.	Risco de proliferação de espécimes; Necessidade de grandes áreas; Acúmulo de volumes e estagnação, riscos à população.

3.5.3.2 Reservatórios de retenção

Para ADASA (2018) o diferencial dos reservatórios, ou bacias, de retenção em relação às de detenção é o fato dessas manterem, permanentemente, um volume de água no fundo, que pode contribuir para a qualidade da água efluente por meio da mistura. O tempo de detenção do volume deve ser calculado, segundo ADASA (2018), entre 2 e 4 semanas, para garantia da qualidade do volume permanente. A Figura 3.16 esquematiza configuração típica desse

tipo de dispositivo.

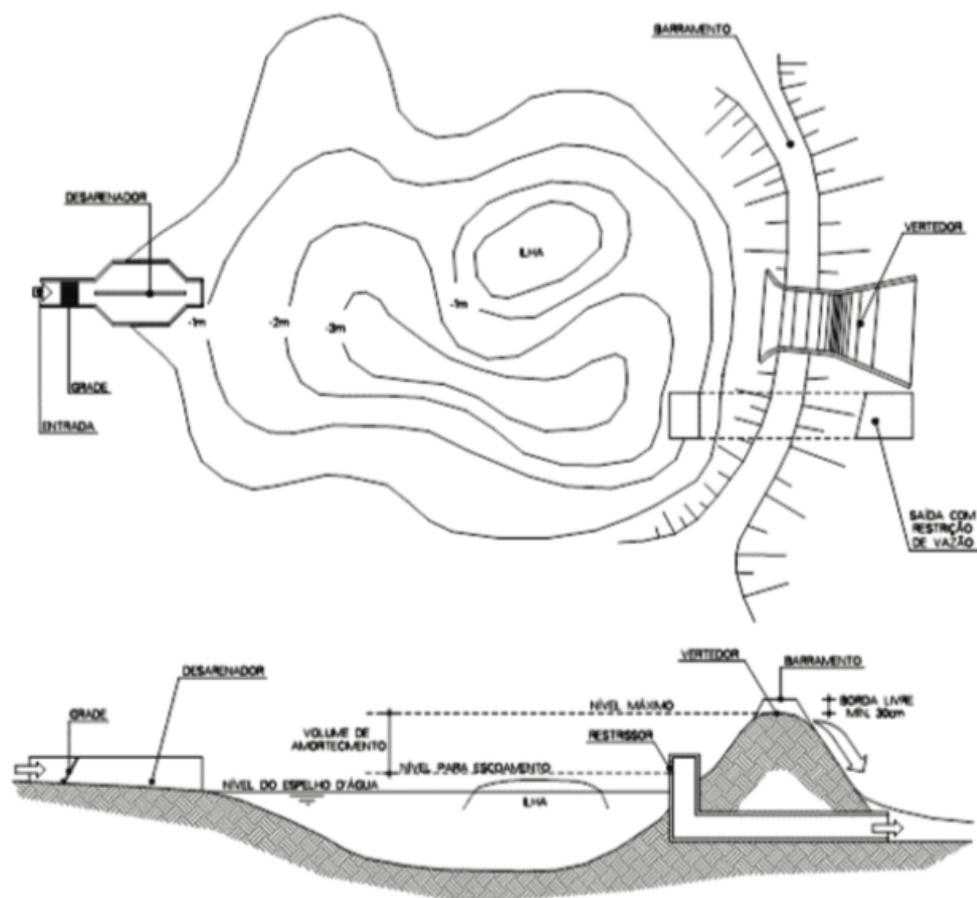


Figura 3.17: Bacia de retenção integrada ao espaço urbano (ADASA, 2018).

O dispositivo pode contar, assim como no caso de bacias de detenção, com usos múltiplos, comumente ligados ao paisagismo e à prática desportiva (BAPTISTA, 2005). Para controle da proliferação de espécimes, ADASA (2018) recomenda a introdução de peixes e anfíbios adaptados no ambiente.

No que diz respeito à qualidade da água efluente, assim como em bacias de detenção, faz-se necessário o uso de tecnologias a jusante para a redução do aporte de sedimentos, resíduos e cargas de poluição (ADASA, 2018).

Tabela 3.7: Potencialidades e desafios no uso de bacias de retenção.

Potencialidades	Desafios
Amortecimento de grandes volumes;	Menor risco de proliferação de espécimes;
Flexibilidade de construção e aplicação;	Necessidade de grandes áreas;
Maior integração à paisagem urbana;	Acúmulo de volumes e estagnação, riscos à população.
Ganho na qualidade pela mistura da vazão afluente com o volume permanente.	

3.6 MODELAGEM EM DRENAGEM URBANA

Para que se possa definir as soluções adequadas a serem implementadas enquanto realizando um estudo de drenagem, é necessário que algumas etapas sejam seguidas. A realização de diagnóstico da infraestrutura existente e da situação vigente do sistema é importante para que se possa propor objetivos claros a serem alcançados (BAPTISTA, 2005).

A construção de hidrogramas é fundamental para a análise dos impactos provocados pela implantação de determinado tipo de estrutura. Assim, podem ser realizadas comparações de desempenho para cada proposta (BAPTISTA, 2005).

3.6.1 Vazão de restrição

Para a etapa de concepção, faz-se necessário o conhecimento da dinâmica hidrológica da região. Assim, é importante que sejam coletados dados de vazões e precipitações, de modo a permitir a proposição de risco hidrológico e vazão de restrição a serem empregados (BAPTISTA, 2005).

As vazões de escoamento superficial utilizadas para o dimensionamento no projeto de drenagem urbana são calculadas com base na vazão de restrição. Ela orienta o dimensionamento de infraestruturas uma vez que é a vazão que se quer alcançar após a instalação das infraestruturas. A vazão de restrição é tida, no Brasil, como sinônimo de vazão máxima de pré-urbanização, que pode ser obtida pela aplicação do método racional (PEPLAU; NEVES, 2014).

3.6.2 Tempo de retorno

Obras de engenharia, no campo da hidrologia, são com frequência desenvolvidas com base em estatísticas. Isso se deve à dificuldade de se realizarem previsões quando tratando de variáveis climáticas e à necessidade de se ajustar o nível de investimento realizado à redução de riscos a ele associada (ADASA, 2018). Nesse sentido, conceito de tempo de retorno é importante para a definição do porte que determinada estrutura proposta deve apresentar (BAPTISTA, 2005).

Verificando o histórico de eventos hidrológicos, pode-se observar a ocorrência de evento de determinada intensidade. A relação entre o número de vezes em que esse evento é superado ou igualado e o número total de eventos registrados é uma forma de estimar probabilidade associada à ocorrência desse evento. Exemplificando, se tomado o segundo maior evento observado de um total de 50 eventos, obtém-se probabilidade de 4% para aquele evento na média.

O tempo de retorno pode ser definido como o tempo necessário em média para que determinado evento seja igualado ou superado. Seu valor pode ser calculado pelo inverso da probabilidade, de modo que, se um evento possui probabilidade de 4% de ocorrência em um ano, seu tempo de retorno será 25 anos.

Se uma infraestrutura é dimensionada para ter tempo de retorno de 25 anos, isso significa que o evento correspondente a esse tempo de retorno será o balizador para o dimensionamento da estrutura, de modo que eventos de menor magnitude serão comportados pela estrutura e os de maior magnitude irão superar sua capacidade. Isso não significa, contudo, que a cada 25 anos a capacidade da estrutura será superada. A informação que se pode desprender é que, na teoria, espera-se a ocorrência, na média, de um evento de magnitude igual ou superior àquele utilizada para o dimensionamento a cada 25 anos, de modo que o evento crítico pode ocorrer mais de uma vez nesse intervalo de tempo ou mesmo não ocorrer (ADASA, 2018).

3.6.3 Modelos hidrológicos

Para a realização de projetos em drenagem urbana, dada a complexidade dos sistemas, é necessário verificar o comportamento da dinâmica hidrológica da área estudada e as suas especificidades (ADASA, 2018). Assim, são utilizados modelos que permitem a compreensão dos sistemas para realizar propostas mais adequadas (TUCCI, 2001).

Existem diversos métodos que buscam determinar vazões superficiais e subterrâneas dada a ocorrência de uma precipitação. A simples análise do hidrograma permite realizar essa

estimativa graficamente. Há modelos que promovem a representação do escoamento por meio de idealizações, como os modelo de Horton, Green-Ampt, método de Santa Bárbara e o modelo SCS. A aplicação desses é limitada pelas variabilidades geomorfológicas observadas nas bacias hidrográficas e pela disponibilidade das informações necessárias (TUCCI, 2001). Estudos de drenagem urbana se utilizam de modelos hidrológicos combinados a modelos hidráulicos para simular cenários e proposições.

3.7 SWMM E PCSWMM

O *Storm Water Management Model* (SWMM) é um modelo hidrológico e hidráulico computacional desenvolvido em 1971 pela *Environmental Protect Agency* (EPA). Desde a sua criação, o modelo contou com diversas atualizações. Trata-se de programa de livre acesso, que vem sendo amplamente utilizado na área de saneamento para a simulação de comportamento dos sistemas hidráulicos e hidrológicos (RIGHETTO, 2009).

A modelagem ocorre pela promoção do fluxo de água entre diferentes sistemas ambientais. O sistema atmosférico considera a presença de poluentes, o sistema composto pela superfície do solo recebe os volumes precipitados, o sistema de águas subterrâneas recebe os volumes infiltrados e transfere parte desse volume ao sistema de transporte que, por sua vez, recebe contribuições de vazões e cargas de poluentes de origem superficial ou subterrânea e promove a condução ao exutório (ROSSMAN, 2010).

A avaliação realizada pelo modelo, que se dá por análise chuva-vazão, tanto para quantidade quanto para qualidade do escoamento, permite simulação de efeitos de precipitação pontual ou de eventos hidrológicos contínuos, de longo prazo (ROSSMAN, 2010). A modelagem ocorre pela análise dos fenômenos em áreas de características homogêneas subdivididas na área de estudo, chamadas sub-bacias (ROSSMAN, 2010). As sub-bacias são, portanto, dotadas de características homogêneas de topografia e características de escoamento, e conduzem o escoamento para um mesmo ponto de descarga.

Fenômenos observados na bacia urbana quando da ocorrência de um evento chuvoso são representados pelo modelo por meio da simulação em diferentes camadas representativas de distintos sistemas ambientais. Os parâmetros de entrada para a realização de simulações são precipitação, delimitação e caracterização de áreas de contribuição e a configuração do sistema de drenagem (RIGHETTO, 2009).

Podem ser especificados, no sistema de drenagem incorporado ao modelo, diversos elementos, como condutos, poços de visita, exutórios, pontos de armazenamento e bocais para descarga. Cada parâmetro pode ser caracterizado com especificações particulares (ROSS-

MAN, 2010).

Diversos são os eventos hidrológicos quantitativos que podem ser simulados no modelo, a saber, dentre outros, precipitações variáveis no tempo, evaporação de águas empoçadas, interceptação de precipitações por armazenamento em depressões, infiltração em camadas não saturadas de solo, percolação da água infiltrada, troca de fluxo entre aquíferos e sistema de drenagem (ROSSMAN, 2010). São constituintes do modelo, também, os processos hidráulicos que ocorrem na rede e em dispositivos de controle de escoamento, como redes e infraestruturas de manejo (RIGHETTO, 2009).

O cálculo da infiltração pode ser realizado, no SWMM, pelos métodos de Horton, Green e Ampt, e SCS (ROSSMAN, 2010), descritos por Tucci (2001). Pela simplicidade de aplicação, dada a necessidade de menor número de entradas e a confiabilidade dos resultados, é comum a utilização do método SCS para simulações hidrológicas.

A análise da infiltração, que permite a determinação da precipitação efetiva, é realizada considerando as condições do solo. O método admite infiltração e percolação ao lençol para os solos não saturados (RIGHETTO, 2009). Pode-se também especificar percentuais de impermeabilização do solo, de modo a restringir para cada sub-bacia estudada uma área permeável, em que a vazão será infiltrada até a condição de saturação, e uma área impermeável, que pode apresentar retenção volumes em depressões, que podem ser especificadas, ou conduzir o volume em forma de escoamento superficial.

O programa computacional PCSWMM implementa o modelo SWMM em interface gráfica dinâmica, de modo que potencializa seu uso. O *software* é distribuído pela *Computational Hydraulics Int.* e permite a incorporação de um sistema de informações geográficas (SIG), o que potencializa o processo de modelagem, permitindo alcançar melhores resultados uma vez que permite a incorporação de dados georreferenciados como declividade e uso do solo da região estudada.

3.8 MODELO SCS

O modelo SCS é baseado no método do hidrograma unitário (ADASA, 2018). Foi desenvolvido pelo Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos e permite estimar a precipitação efetiva por meio de interpretação do hidrograma a partir do coeficiente Curva Número, parâmetro principal do modelo. As equações do modelo, 3.1 e 3.2, descritas por Maidment (1993), com unidades adaptadas, permitem obter a precipitação excedente e a retenção potencial do solo.

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (3.1)$$

$$S = 25,4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (3.2)$$

Em que:

- P_e = Precipitação efetiva (escoamento superficial), *mm*
- P = Precipitação total, *mm*
- I_a = Abstração inicial, aproximada pela equação $I_a = 0,2S$, *mm* (MAIDMENT, 1993)
- S = Capacidade de armazenamento de água no solo, *mm*
- CN = coeficiente curva número, adimensional

Abstração inicial pode ser compreendida como a parcela de água que não é direcionada ao escoamento superficial. Estão inclusos nesse parâmetro, volumes de água infiltrada, evaporada e retida pela vegetação ou por depressões no solo (MAIDMENT, 1993). No modelo SWMM, a abstração inicial é computada no parâmetro *Dstore Perv*, que representa a lâmina de armazenamento em depressões na área permeável da sub-bacia.

O coeficiente curva número é um parâmetro adimensional relacionado ao tipo de solo e à ocupação da superfície. Quanto ao tipo de solo, Tucci (2001) identifica 4 classificações, apresentadas na tabela 3.8.

Tabela 3.8: Grupos de solos e características (TUCCI, 2001).

Grupo Hidrológico do Solo	Características do solo
A	Solos que produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração. Solos arenosos profundos com pouco silte e argila.
B	Solos menos permeáveis do que o anterior, solos arenosos menos profundo do que o tipo A e com permeabilidade superior à média.
C	Solos que geram escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média, contendo percentagem considerável de argila e pouco profundo.
D	Solos contendo argilas expansivas e pouco profundos com muito baixa capacidade de infiltração, gerando a maior proporção de escoamento superficial.

Com relação à condição de umidade do solo, Tucci (2001) e Genovez, Neto e Sartori (2005) caracterizam as três situações possíveis para a definição do coeficiente curva número, que são denominadas como *Antecedent Moisture Condition* (AMC) I, II e III.

- AMC I – Solo seco mas não o suficiente para o murchamento da vegetação.
- AMC II – Situação intermediária, em que o solo apresenta umidade próxima à capacidade de campo.
- AMC III – Solo em situação próxima à de saturação, com a ocorrência de precipitações consideráveis nos 5 dias anteriores.

É comum encontrar na literatura valores de CN referentes apenas ao estado AMC II. A conversão entre os valores pode ser realizada com as equações 3.3 e 3.4 propostas por Hawkins, Hjelmfelt e Zevenbergen (1985).

$$CN_I = \frac{CN_{II}}{2,281 - 0,01281CN_{II}} \quad (3.3)$$

$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0,427 - 0,00573CN_{II}} \quad (3.4)$$

Valores padronizados para o parâmetro podem ser encontrados na literatura (United States Soil Conservation Service (SCS), 1972). A tabela 3.9 apresenta os valores do coeficiente curva número no estado AMC II propostos por Tucci (2001) para diferentes usos e coberturas do solo.

Tabela 3.9: Valores do parâmetro CN_{II} para diferentes usos de solo urbano (TUCCI, 2001).

Utilização ou cobertura do solo			Grupo de Solo			
			A	B	C	D
Zonas cultivadas	Sem conservação do solo		72	81	88	91
	Com conservação do solo		62	71	78	81
Pastagens ou terrenos baldios	Em más condições		68	79	86	89
	Em boas condições		39	61	74	80
Prados em boas condições			30	58	71	78
Bosques ou zonas florestais	Cobertura ruim		45	66	77	83
	Cobertura boa		25	55	70	77
Espaços abertos. Relvados, parques, campos, campos de golfe, cemitérios, boas condições.	Com relva em mais de 75% da área		39	61	74	80
	Com relva de 50% a 75% da área		49	69	79	84
Zonas comerciais e de escritórios			89	92	94	95
Zonas industriais			81	88	91	93
Zonas residenciais	Lotes de (m ²)	% média impermeável				
	<500	65	77	85	90	92
	1000	38	61	75	83	87
	1300	30	57	72	81	86
	2000	25	54	70	80	85
4000	20	51	68	79	84	
Parques de estacionamento, telhados, viadutos, etc.			98	98	98	98
Arruamentos e estradas asfaltadas e com drenagem de águas pluviais			76	85	89	91
Paralelepípedos			72	82	87	89
Terra			72	82	87	89

O parâmetro CN de uma área determinada pode ser estimado pela média dos valores de CN nela observados ponderada pela porção ocupada por cada tipo de solo. O cálculo do CN médio pode ser, assim, determinado para cada sub-bacia no modelo SWMM.

O modelo SCS tem sua aplicação, no Brasil, dificultada pelo desafio da classificação hidrológica do solo (GENOVEZ; NETO; SARTORI, 2005), uma vez que a classificação proposta por United States Soil Conservation Service (SCS) (1972) muitas vezes não abarca as características observadas nos solos brasileiros. Apesar das limitações, para a realização de estudos hidrológicos em bacias urbanas, o uso de modelos permite compreender melhor os processos hidrológicos em diferentes cenários, assim, sua aplicação é recomendada por ADASA (2018).

4

METODOLOGIA

O presente estudo se propôs a verificar os impactos provocados pela ocupação da região do Assentamento 26 de Setembro, DF, e a decorrente impermeabilização do solo no manejo de águas pluviais. Para tanto, foi traçada a condução metodológica registrada na Figura 4.1.

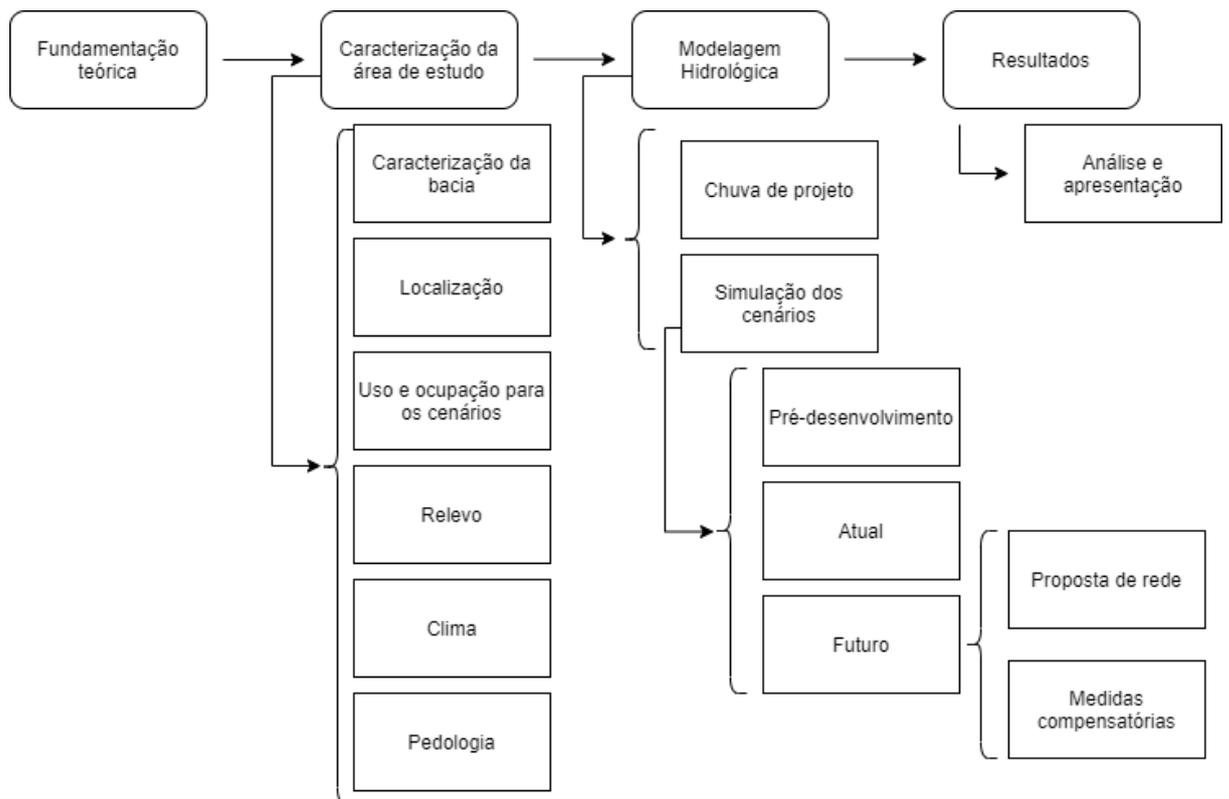


Figura 4.1: Fluxograma das etapas de projeto.

Uma vez que a região, que está em pleno desenvolvimento, não conta com infraestruturas de drenagem, foi traçada uma rede preliminar em concordância com as diretrizes do Termo de Referência da Novacap (NOVACAP, 2019) de modo a viabilizar a simulação hidrológica.

Deu-se, então, a simulação de diferentes cenários, levando em conta a ocupação do solo e a implantação de medidas de controle de escoamento. Quanto ao uso do solo, foram consideradas ocupação atual, ocupação equivalente àquela indicada pelo Plano de Ordenamento Territorial do Distrito Federal, e a ocupação consolidada, com padrão de uso do solo equivalente ao observado em Vicente Pires, região que apresentou processo de urbanização semelhante ao hoje observado na área de estudo.

Este capítulo conta com apresentação de dados levantados sobre a área de estudo e o detalhamento do processo de obtenção dos parâmetros a serem aplicados para a realização das modelagens hidrológicas.

4.1 LOCALIZAÇÃO E HISTÓRICO

O Assentamento 26 de Setembro está localizado próximo à região central de Brasília. Está inserido na cabeceira de duas importantes unidades hidrográficas do Distrito Federal, Riacho Fundo e Córrego do Bananal, como explicitado na Figura 4.2. 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, como observado na Figura 4.3.

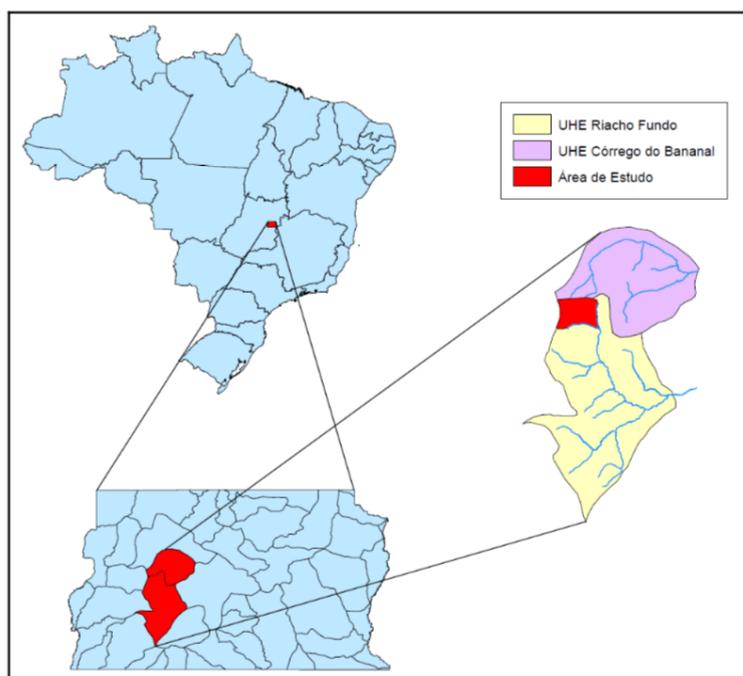


Figura 4.2: Localização do Assentamento 26 de Setembro (de Vito et al., 2020).

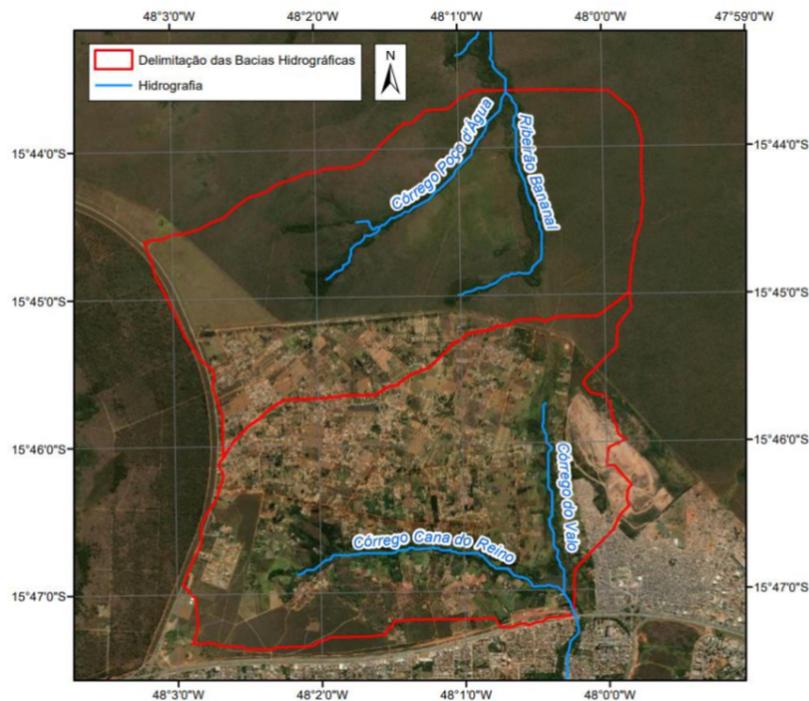


Figura 4.3: Divisores de água naturais da região em que se encontra o Assentamento 26 de Setembro (de Vito et al., 2020).

Riacho Fundo e Córrego Bananal são tributários de importantes mananciais do DF, o Lago Paranoá e o Lago Santa Maria respectivamente. Esse último está inserido dentro do Parque Nacional de Brasília, criado para proteger suas águas. Assim, sabendo da vocação à expansão urbana observada na região, é fundamental que se busque a manutenção da qualidade da água afluente ao manancial.

A área de estudo é enquadrada como área rural no Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal (PDOT) (DF, 2009). A área aparece destacada na Zona Rural de Uso Controlado - 1, com indicação de ocupação para atividades agropastoris, de subsistência e comerciais. O uso da região está, de acordo com o PDOT, sujeito a restrições dada a sensibilidade ambiental em função da existência de mananciais destinados à captação de água para abastecimento humano. O documento recomenda ainda a adoção de medidas de monitoramento e controle para combater ocupações irregulares. Contudo, o processo de parcelamento irregular de glebas rurais para fins urbanos vem se intensificando desde 2009 na região.

A área de estudo é delimitada, portanto, com base no desenvolvimento urbano, com especial interesse no desenho de rede de drenagem adequada para a região, que preserve o manancial Santa Maria dos lançamentos de efluentes. A superfície, de 13,16 km², é repre-

sentada na Figura 4.4.



Figura 4.4: Área de estudo (de Vito et al., 2020).

4.2 CARACTERIZAÇÃO

4.2.1 Clima

O clima do Distrito Federal foi estudado por Cardoso, Marcuzzo e Barros (2014), implementando a metodologia Köppen-Geiger. Segundo o estudo, o clima local pode ser classificado como tropical com período seco no inverno. As mínimas temperaturas na região, alcançando valores médios de 20,8°C são verificadas nos meses de junho e julho. As máximas, de média de 25,3°C, ocorrem no mês de outubro, e a média anual é de 23,4°C. Quanto ao regime pluviométrico, o período chuvoso se inicia em outubro e o período de seca tem início em maio. A média anual, ainda segundo o estudo de Cardoso, Marcuzzo e Barros (2014), é de aproximadamente 1500 milímetros.

4.2.2 Pedologia

O mapeamento de solos realizado por Reatto et al. (2004) definiu a classe dominante na região estudada como Latossolos Vermelhos. Esse tipo de solo apresenta alto teor de quartzo, o que confere o caráter arenoso e a baixa capacidade de armazenamento de água. Os Latossolos Vermelhos contém, ainda, baixo teor de silte, entre 10% e 20%, e o teor de argila pode variar entre 15% e 80%.

Tratam-se, segundo o estudo, de solos altamente permeáveis a depender de natureza, textura, estrutura e situação topográfica (REATTO et al., 2004). A definição do grupo de solos verificado na área de estudo influi nos valores adotados para o parâmetro Curva Número quando aplicado o método SCS.

4.2.3 Uso e ocupação do solo

A definição do valor do parâmetro Curva Número do modelo SCS se dá com base nas características de tipo de solo e uso e ocupação. Para estabelecer o valor do parâmetro CN, pode ser estimado um valor médio para um determinado tipo de uso, que é aplicado como representativo para toda a área estudada. Alternativamente, podem ser realizados estudos de uso e ocupação, que analisam mais minuciosamente, em escala de píxel de imagens de satélite, a cobertura de toda a região. Estudos de uso e ocupação do solo podem ser elaborados com o auxílio de ferramentas de identificação e classificação de tipos de cobertura do solo a partir de imagens de satélite. Para a elaboração dos mapas de uso e ocupação aqui apresentados, foram utilizadas imagens de bandas multi-espectrais do satélite *LANDSAT 8*, de resolução espacial de 30 metros.

Foi realizada classificação supervisionada no programa QGIS usando o *Dzetsaka: Classification tool*. A partir de uma imagem de composição de bandas RGB o programa foi alimentado com amostras dos diferentes tipos de uso do solo. A classificação do CN para cada tipo de cobertura se deu de acordo com os valores propostos por Tucci (2001) para o grupo hidrológico de solos pertinente.

Uma vez que o estudo se propôs a verificar o comportamento dos sistemas de drenagem da área de estudo para uma ocupação semelhante à observada na região de Vicente Pires, realizou-se, também, a classificação da cobertura de solo dessa região. A fim de produzir uma simulação com padrões de ocupação mais diversa, optou-se por não utilizar apenas o valor médio de CN obtido a partir da classificação dos usos de solo, mas por incorporar, na área de estudo, os dados *raster* gerados de áreas de ocupação consolidada de Vicente Pires. Buscou-se, então, formular um arquivo *raster* contendo um recorte do mapa de uso

e ocupação gerado para a área de Vicente Pires que pudesse ser reposicionado sobre a área de estudo, de modo a permitir uma simulação com essa configuração na região. O arquivo é referido no presente relatório como "padrão de ocupação futuro da área de estudo".

Para a formulação do padrão de ocupação futuro para a área de estudo, a região recortada da área urbana de Vicente Pires, ilustrada na Figura 4.5, foi escolhida, uma vez que apresenta malha urbana consolidada e não incorpora cursos d'água ou rodovias. A área representa bem a configuração final da instalação dos condomínios horizontais, que ocorreu na região e que atualmente se dá na área de estudo. Adicionalmente, foram incorporadas parcelas de uso e ocupação do mapa da área de estudo que se espera que se mantenham inalteradas. Essas áreas são ilustradas na Figura 4.5 e foram mantidas de modo a gerar um uso de solo futuro representativo, que mantivesse as características locais de vegetação ciliar.

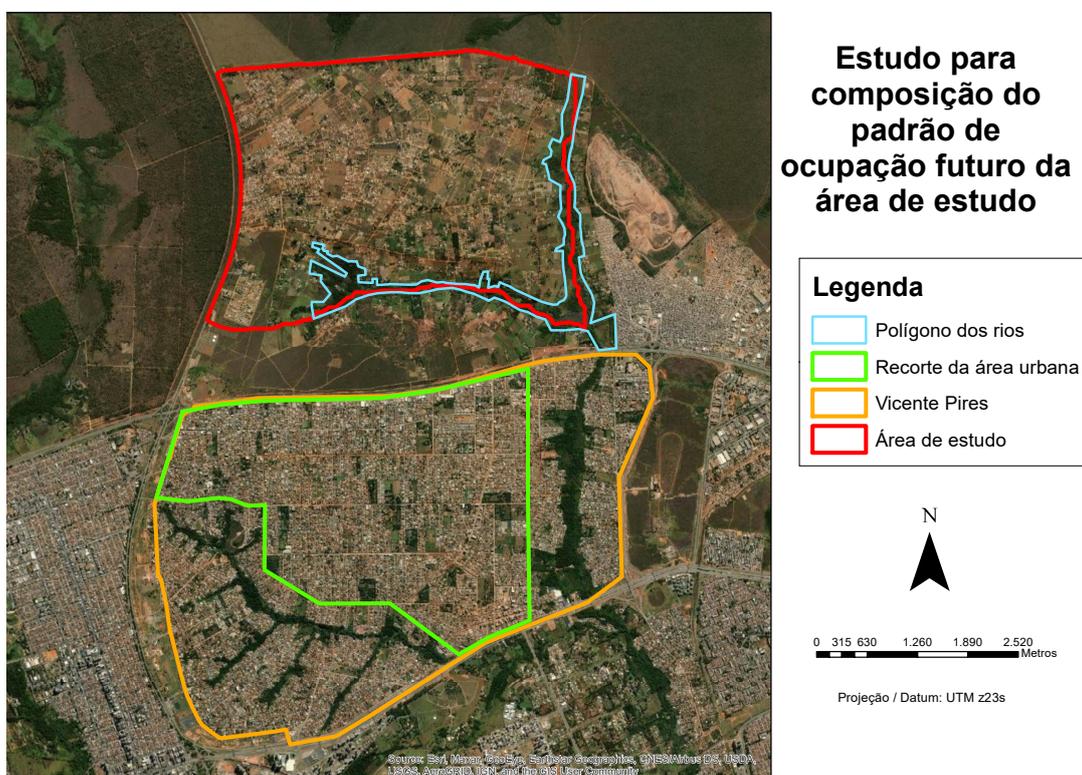


Figura 4.5: Área urbana de Vicente Pires e delimitação da região extraída no estudo.

O fluxograma apresentado na Figura 4.6 ilustra o processo empregado na geração do padrão de ocupação futuro da área de estudo. Foi realizada uma composição de duas unidades recortadas da área urbana, uma vez que a simples sobreposição da área recortada de Vicente Pires não seria suficiente para o recobrimento de toda a área de estudo.

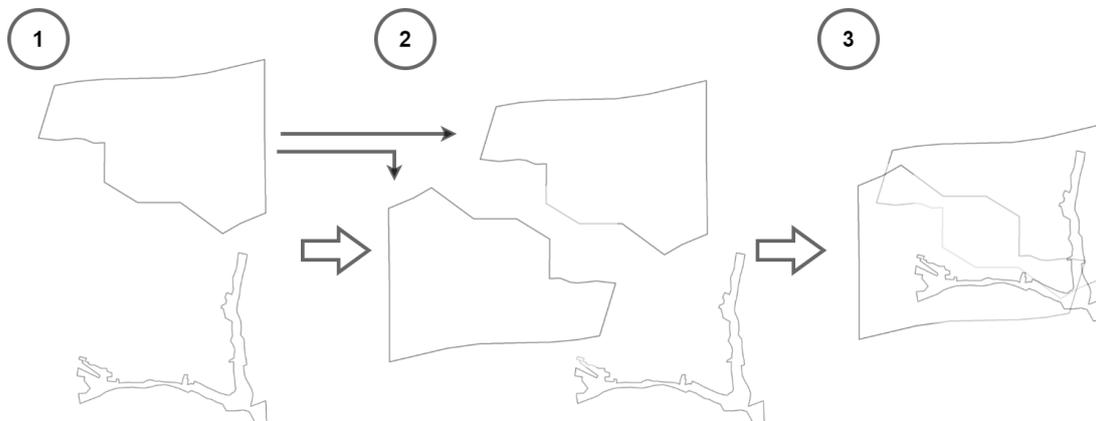


Figura 4.6: Área urbana de Vicente Pires e delimitação da região extraída no estudo.

A etapa 1 do fluxograma ilustra as camadas do recorte urbano de Vicente Pires e da área ocupada pelos cursos d'água na área de estudo. A partir dessas camadas, promoveu-se a extração dos arquivos *raster* de uso e ocupação de Vicente Pires e da área de estudo respectivamente. Na etapa 2, utilizando o *plugin Freehand Raster Georeferencer* do QGIS, foram movimentadas 2 cópias da camada do recorte urbano de Vicente Pires para a região do Assentamento 26 de Setembro. Essas camadas foram combinadas de modo a preencher toda a área de estudo e, então, foram sobrepostas pela camada de rios da área de estudo. Finalmente, foi realizada uma combinação das três camadas de recorte urbano no software ArcGIS por meio de criação de um mosaico utilizando a ferramenta *Mosaic Dataset*. A combinação foi feita por sobreposição de áreas, de modo que, quando da ocorrência de sobreposições, apenas os dados da camada superior foram considerados.

4.2.4 Rede de drenagem

A região do Assentamento 26 de Setembro não possui redes de drenagem de águas pluviais. Assim, foi necessário realizar um traçado preliminar para a comparação dos cenários de ocupação da área de estudo seguindo as diretrizes do Termo de Referência da Novacap (2019) e do Manual de Drenagem da Adasa (ADASA, 2018). Trata-se de proposta de rede preliminar, com o foco principal de estudar hidrogramas de cheias na bacia. Assim, o traçado não foi realizado para configurar infraestrutura a ser implantada na área de estudo, mas uma rede que permitisse avaliar o avanço do processo de impermeabilização.

Sistemas tradicionais de drenagem são compostos por elementos localizados na rede viária. Desse modo, é comum que galerias e tubulações estejam instaladas nas proximidades das vias de rolagem ou mesmo sobre elas. Uma vez que a área de estudo não apresenta sua configuração de pleno desenvolvimento, não se tem um traçado de vias definitivo. Pode-se,

contudo, verificar uma tendência de traçado viário que deve ser consolidado, com avenidas ainda não pavimentadas paralelas às curvas de nível e transversais promovendo sua conexão, como ilustrado no mapa da Figura 4.7.

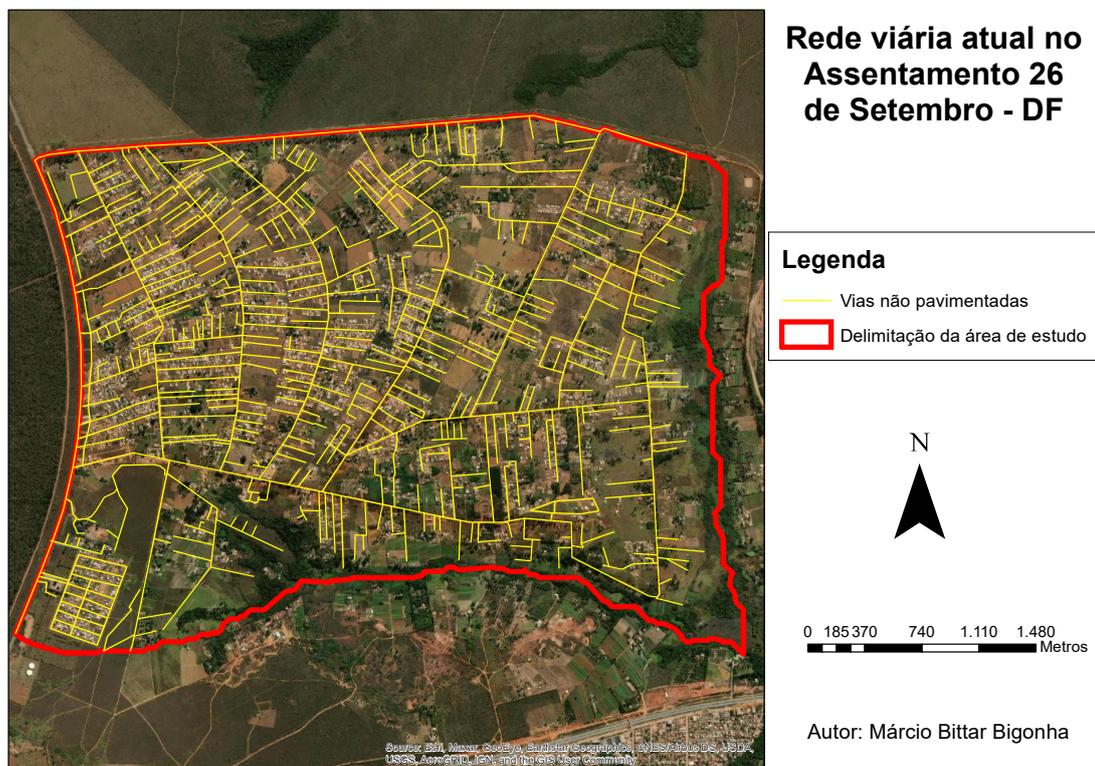


Figura 4.7: Mapa do traçado viário existente.

4.3 FORMULAÇÃO DOS CENÁRIOS

Os cenários propostos para o trabalho diferem quanto a nível de urbanização, padrão de ocupação e aplicação de medidas compensatórias. Foram estudados quatro cenários, dentre os quais apenas um com a inclusão de medidas de controle. Foram eles:

- C1 Cenário de ocupação atual;
- C2 Cenário de ocupação consolidada segundo a recomendação do uso estabelecido no Plano Diretor de Ordenamento Territorial;
- C3 Cenário de urbanização consolidada com características similares às observadas na região administrativa de Vicente Pires;

C4 Cenário de urbanização consolidada com características similares às observadas na região administrativa de Vicente Pires adotando medidas de controle para o abatimento da vazão de pico.

4.4 MODELAGEM

As análises hidrológicas foram realizadas por meio de simulações dos cenários com auxílio programa PCSWMM, na versão 7.3 Profissional disponibilizada pela *CHIWATER*. Para a realização das simulações, foi utilizado o modelo hidrológico SCS, dada a disponibilidade dos parâmetros necessários. O modelo de transporte hidráulico que se optou por utilizar foi o modelo da Onda Dinâmica, que representa, pela implementação das equações de Saint Venant, a propagação de ondas dinâmicas de cheia de maneira integrada em toda a rede de drenagem no decorrer do tempo (GOMES, 2006).

A processo de simulação ocorreu em quatro etapas. Primeiramente foram formuladas as propostas de configuração de sub-bacias e de rede de drenagem, em seguida esses dados foram importados para o PCSWMM e foram ajustados os coeficientes adequados. Posteriormente, incorporada a chuva de projeto à modelagem, foram verificados os resultados.

4.4.1 Configuração das sub-bacias

O trabalho se propôs a estudar o impacto de uma ocupação consolidada na área de estudo semelhante àquela observada em Vicente Pires. Assim, foram delimitados para a área de estudo, a partir da rede viária e da ocupação já observada na região, lotes habitacionais semelhantes aos encontrados em Vicente Pires, condomínios horizontais fechados com residências unifamiliares.

A Figura 4.8 é uma fotografia aérea da região central de Vicente Pires. A unidade condominial destacada apresenta dimensões de comprimento e largura de aproximadamente 305 por 98 metros, resultando em área de aproximadamente 3 hectares. Embora a região apresente certa variabilidade de configurações tipológicas de unidades condominiais, a característica padrão de ocupação é de predominância da dimensão de comprimento sobre a de largura.

A região do Assentamento 26 de Setembro já vem apresentando em seu processo de ocupação irregular configuração tipológica semelhante à observada em Vicente Pires. A Figura 4.9 apresenta uma fotografia aérea de região, que já apresenta processo de ocupação mais adiantado, dada a sua proximidade em relação à rodovia.



Figura 4.8: Ocupação de Vicente Pires, lote tipo.



Figura 4.9: Processo de ocupação do Assentamento 26 de Setembro, configuração de lotes.

Uma vez que cada sistema condominial nesse tipo de configuração urbana apresenta semelhanças topográficas e convergência do escoamento de águas pluviais, os limites dos lotes foram considerados coincidentes com os limites das sub-bacias urbanas. Os lotes foram traçados na aplicação Civil3D, que permite o desenho *Computer-Aided Design* (CAD) e a inclusão de informações de projeto *Building Information Modeling* (BIM). Posteriormente, foram importados para o PCSWMM.

Foram determinados, em sequência, para cada sub-bacia, os parâmetros de declividade, comprimento de escoamento e permeabilidade, incluindo o parâmetro de abstração inicial do modelo SCS. A declividade foi determinada pela aplicação da ferramenta *slope from DEM* do programa. Nas simulações, definiu-se área impermeável zero para todas as sub-bacias em todos os cenários, de modo a fazer com que o escoamento fosse regido unicamente pelas características de permeabilidade dos mapas de uso e ocupação.

A permeabilidade foi, então, obtida pela média ponderada dos parâmetros CN da área, realizada pela ferramenta *Spatial Weighting*. Um coeficiente de Manning para o escoamento superficial foi especificado segundo (ENGMAN, 1986) para cada tipo de solo e, como o CN, foi calculado por média ponderada para cada sub-bacia e introduzido no parâmetro *NPerv*. O parâmetro *Dstore Perv* foi preenchido com a abstração inicial do modelo SCS, considerando, para o cálculo, a conversão para CNIII indicada em 3.8, de modo a considerar as condições de umidade observadas em períodos chuvosos.

4.4.2 Configuração da rede de drenagem

A rede de drenagem foi formulada com a finalidade de viabilizar o avanço dos processos de impermeabilização e os impactos nos hidrogramas de cheia. Assim, foi configurada com base no traçado viário da região e buscando respeitar o caimento do terreno. Assim, foi proposta a rede de condutos com comprimento de até 60 metros conectados por poços de visita (PVs) sempre que da afluência de redes secundárias e na ocorrência de mudanças de direção, como estipulado pelo termo de referência da Novacap (2019). Ainda segundo o termo de referência, o diâmetro mínimo das tubulações foi de 600 milímetros e o coeficiente de rugosidade de Manning adotado para os cálculos foi de 0,013.

O desenho dos condutos da rede foi realizado no programa Civil3D. Posteriormente, o traçado foi importado para a aplicação ArcGIS, em que foi possível a incorporação de pontos nas intersecções dos condutos, que configurariam os poços de visita. Finalmente, a rede foi exportada para o PCSWMM e foram atribuídos às camadas de *Links* e *Nodes* os elementos criados.

O pré dimensionamento da rede se deu com base na configuração de ocupação do Cenário

3, de ocupação semelhante à de Vicente Pires, de modo que para os outros cenários a mesma rede foi utilizada. O processo foi realizado pela aplicação das ferramentas *Set Slope*, para a determinação de declividade, e método iterativo de dimensionamento para a definição do diâmetro das tubulações. A rede foi, ainda, ajustada pela geratriz superior com o uso da ferramenta *Align Conduit Crowns*.

A determinação dos diâmetros da tubulação se deu de maneira iterativa. Para dar início ao dimensionamento, foram configuradas as características hidrológicas de projeto, bem como a declividade dos condutos utilizados e seus coeficientes de escoamento. Em seguida, determinou-se, para todos os condutos da rede, um diâmetro máximo para o qual as vazões escoadas fossem comportadas sem gerar inundações. Configurado o cenário, o dimensionamento se deu de montante para jusante, ajustando os diâmetros dos condutos para aqueles que se adequassem à vazão recebida.

4.4.3 Chuva de projeto

Um modelo precipitação baseado na curva Intensidade-Duração-Frequência (IDF) pode ser empregado para a realização de simulações hidrológicas. A curva IDF de Brasília, descrita pela equação 4.1, é estabelecida no Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal e é recomendada por ADASA (2018) para a formulação de estudos de drenagem. Seguindo essas recomendações, foi utilizada no presente estudo precipitação de tempo de retorno de 10 anos, organizada pelo método dos Blocos Alternados, de duração de 24 horas discretizada em intervalos de tempo de 5 minutos.

$$I = \frac{(1574,70 \cdot T_R^{0,207})}{(t + 11)^{0,844}} \quad (4.1)$$

Em que:

- I = Intensidade da precipitação, $mm \cdot h^{-1}$
- T_R = Tempo de retorno, *anos*
- t = Duração da chuva, *minutos*

4.4.4 Vazão de restrição do DF

No Distrito Federal, a Resolução Nº 9 de 8 de abril de 2011 (ADASA, 2011) estabelece critérios para a outorga de lançamento de águas pluviais em corpos hídricos. O documento leva em consideração a vazão máxima gerada pelo empreendimento para tempo de retorno

de 10 anos, condições de retenção do aumento do escoamento do empreendimento e área máxima impermeabilizada.

Segundo ADASA (2011) a outorga de lançamento decorrente de impermeabilização deve se limitar à vazão específica de até $24,4 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$. Assim, a vazão máxima efluente de determinado empreendimento deve ser obtida levando em conta a vazão específica fixada, a área do terreno e a área impermeabilizada, de modo a garantir condições no corpo hídrico equivalentes àquelas observadas na situação anterior à modificação do loteamento. Tais diretrizes foram seguidas e foram propostas soluções para volumes excedentes de escoamento.

4.4.5 Medidas compensatórias

Medidas compensatórias foram incorporadas à modelagem no cenário 4, como citado em 4.3. Reservatórios de retenção foram posicionados no final das redes de drenagem, de modo a receber toda a vazão conduzida. A configuração adotada foi de Reservatório de Detenção impermeável que recebe a vazão total do último conduto do subsistema.

O volume do reservatório foi obtido pela ferramenta *Storage*, disponível no programa PCSWMM. A Figura 4.10 exemplifica o processo de determinação do volume a ser armazenado por um dispositivo de retenção pela ferramenta *Storage* do programa PCSWMM, realizado pela comparação das áreas dos hidrogramas.

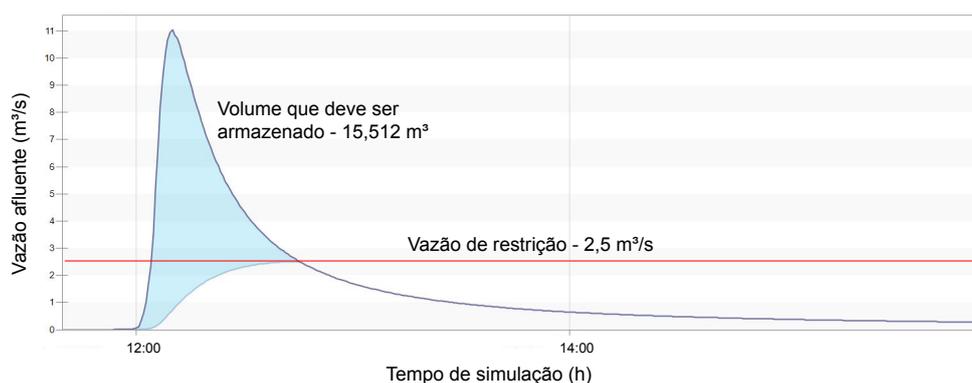


Figura 4.10: Dimensionamento do reservatório pela ferramenta *Storage* do PCSWMM

O dimensionamento se deu para alcançar a vazão de restrição estabelecida por ADASA (2011). Assim, para cada sistema de drenagem proposto, foi verificada a vazão limite ad-

mitida e foi, então, pré-dimensionado o volume de armazenamento necessário para o abastecimento da vazão de pico.

Para a estimativa de área ocupada pelos reservatórios, foi proposta a configuração de dispositivos com altura do volume útil de 3 metros. Fixando a dimensão de altura, verificou-se a área em planta para cada reservatório, o que permitiu traçar *sketches* das áreas ocupadas pelo volume útil dos reservatórios.

5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O estudo foi desenvolvido conforme a sequência lógica apresentada na Metodologia. Para a realização da avaliação pelo estudo objetivada, foi realizada a coleta e o tratamento de dados, os resultados dessa etapa são detalhados na seção 5.1. A partir dos dados de caracterização foi possível formular proposições, apresentadas na seção 5.2, para o sistema de drenagem da região. Na seção 5.3 são detalhados os resultados da modelagem realizada no programa PCSWMM que incorporou os resultados prévios na sua composição.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A etapa de caracterização foi realizada com base em dados coletados no portal de dados espaciais do Distrito Federal, Geoportal. O processamento dos dados foi realizado com o uso de ferramentas de sistemas de informação geográfica. No presente trabalho foram utilizadas as aplicações ArcGIS Desktop 10.7.1, da Esri Inc., e QGIS 3.16 Hannover, de livre acesso.

5.1.1 Hipsometria

A análise de dados hipsométricos é de grande importância para avaliação e proposição de sistemas de drenagem. A carta hipsométrica exibida na Figura 5.1 foi elaborada com dados disponíveis no Geoportal do DF de curvas de nível de 5 metros levantados em 2009. A partir das curvas foi elaborado o modelo de elevação do terreno, que varia da altitude de 1250 metros em relação ao nível do mar no ponto mais alto, localizado no extremo leste da área, a aproximadamente 1085 metros no mais baixo, localizado no encontro dos cursos d'água que delimitam a área de estudo.

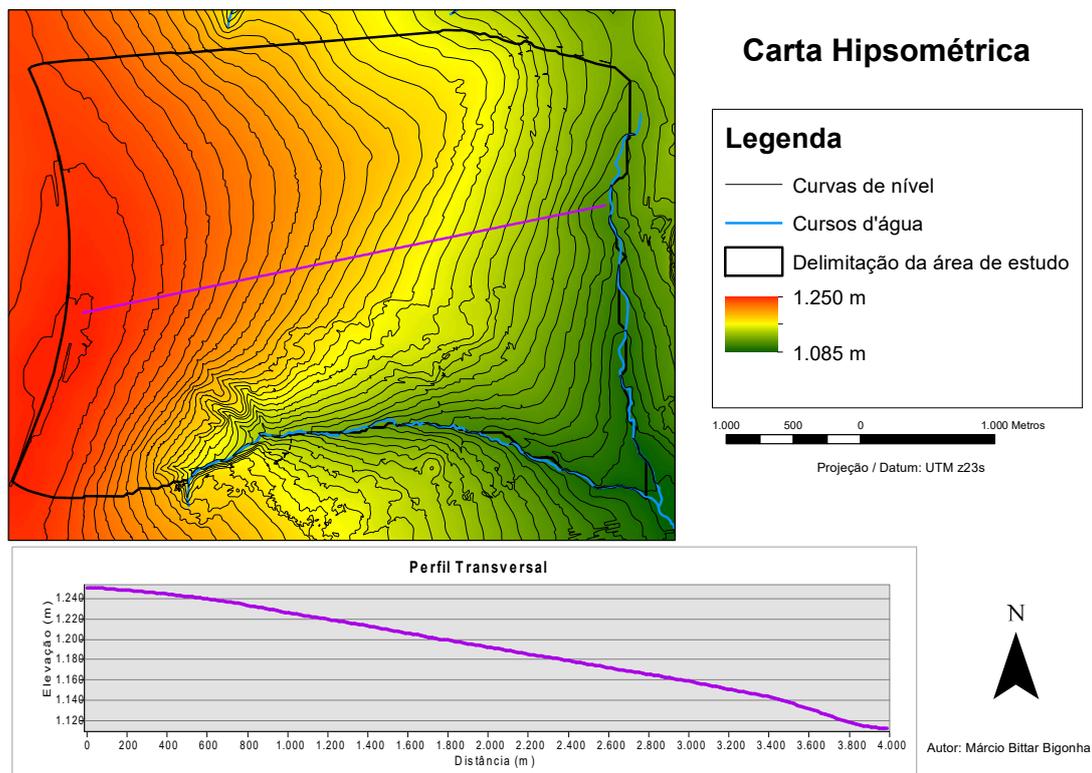


Figura 5.1: Carta hipsométrica da área de estudo com perfil transversal.

5.1.2 Pedologia

O solo da região foi definido como pertencente ao grupo de Latossolos Vermelhos. Caracterizados por solos arenosos e com baixa capacidade de produção de escoamento superficial, os Latossolos Vermelhos são encontrados em regiões de declividade moderada e suave-ondulada e favorecem o processo de recarga de aquíferos (REATTO et al., 2004).

O grupo hidrológico, segundo (TUCCI, 2001), pode ser definido então como Grupo A, uma vez que apresentam baixo potencial de provocar escoamento superficial, promovendo maior infiltração, como verificado na tabela 3.8.

5.1.3 Uso e ocupação do solo

A elaboração de estudo de uso e ocupação do solo é importante para a compreensão do comportamento dos padrões de escoamento. Juntamente com a informação do grupo hidrológico de solo, o nível de impermeabilização superficial permite estimar a quantidade de água que será convertida em escoamento superficial durante eventos pluviométricos.

Para a realização do presente estudo, enfrentou-se dificuldade inicial da obtenção de imagens com alta resolução espacial. Uma vez que se trata de região com destinação de ocupação rural, não são realizados e disponibilizados com tanta frequência levantamentos de dados precisos. Assim, foram utilizadas imagens do satélite LANDSAT 8, de resolução espacial de 30 metros, não muito elevada.

A partir da definição do solo da região como pertencente ao grupo hidrológico de solos "A", foram propostos os valores exibidos na tabela 5.1 para os diferentes usos segundo Tucci (2001). A tabela conta ainda com valores do coeficiente de rugosidade de Manning (n) para escoamento superficial em cada tipo de solo, propostos por Engman (1986).

Tabela 5.1: Valores adotados para os parâmetros Curva Número e n de Manning no estudo de uso e ocupação.

Classificação	CN	n
Zonas florestais com boa cobertura	25	0.4
Vegetação rasteira	45	0.15
Solo exposto	72	0.03
Zonas de urbanização baixa	61	0.04
Zonas de urbanização alta	77	0.011

Os mapas de uso e ocupação da área de estudo e da região de Vicente Pires foram elaborados a partir do mesmo vetor de classificação supervisionada e são exibidos nas figuras 5.2 e 5.3 respectivamente. Um mapa adicional foi elaborado como uma hipótese para o uso e ocupação futuro da região do Assentamento 26 de Setembro caso siga o padrão de urbanização consolidada na região de Vicente Pires, Figura 5.4.

O padrão de uso do mapa de ocupação futura hipotética foi obtido a partir do perfil de uso e ocupação de Vicente Pires pela extração da área "Recorte da área urbana", destacado na Figura 5.3. Essa área foi selecionada uma vez que não engloba os córregos da região de Vicente Pires e contém tipologia de ocupação bastante homogênea, com configuração de condomínios fechados horizontais e poucas áreas verdes. A composição se deu pela combinação de dois elementos extraídos da área urbana de Vicente Pires e a adição da área de córregos original, preservada no mapa de uso e ocupação futuro da área de estudo, como detalhado na metodologia.

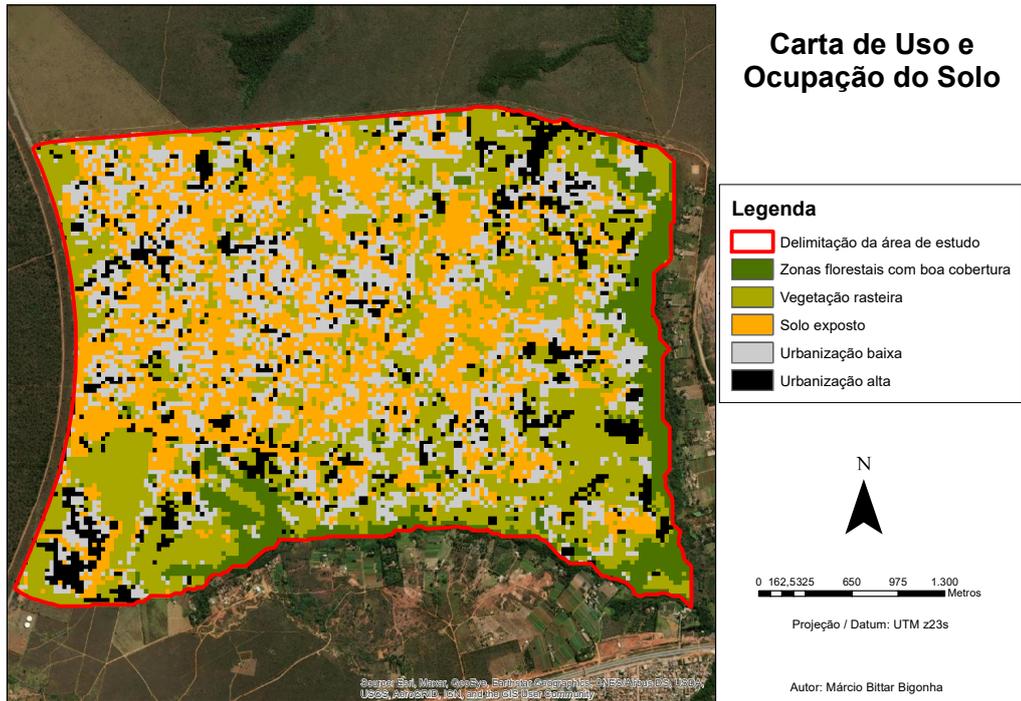


Figura 5.2: Mapa do uso e ocupação atual da área de estudo, utilizado no cenário C1.

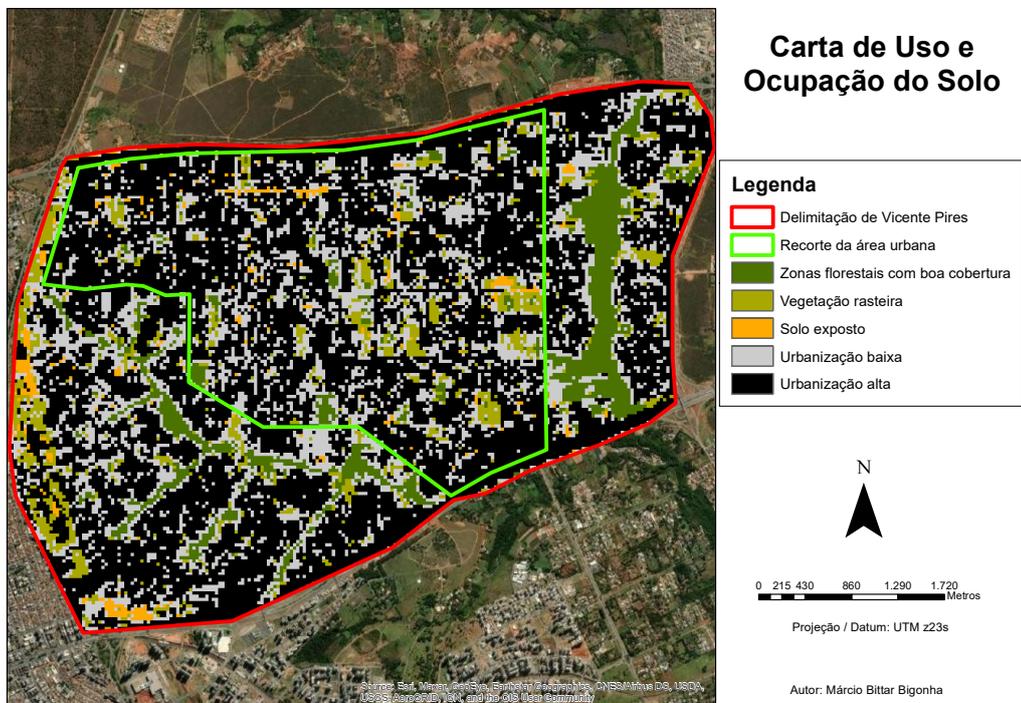


Figura 5.3: Mapa do uso e ocupação atual da área de Vicente Pires.

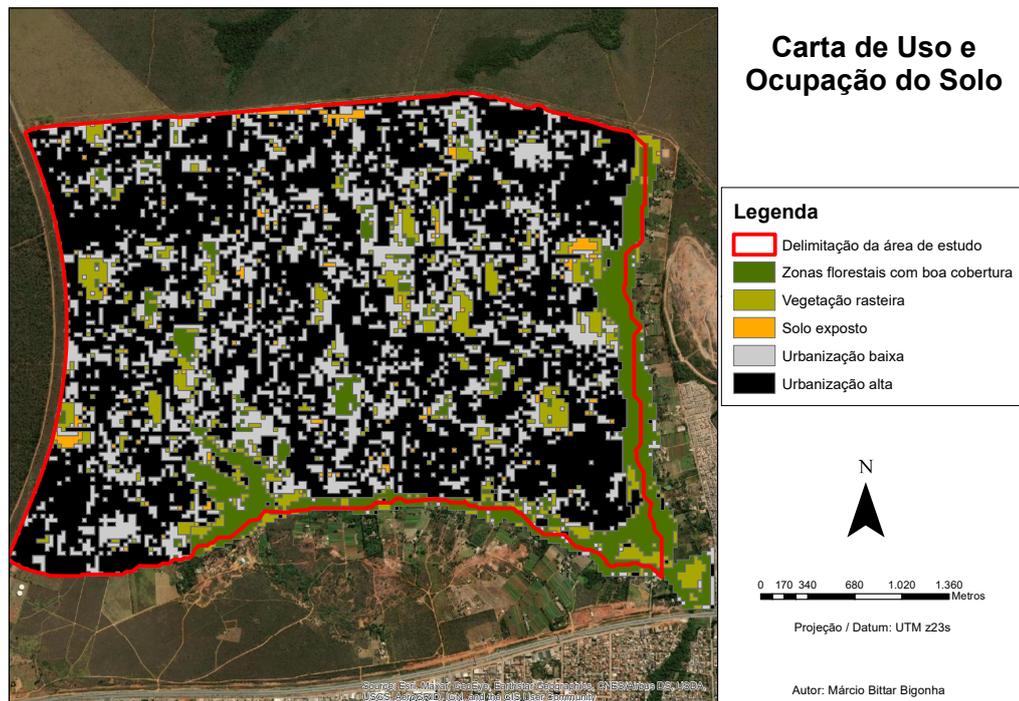


Figura 5.4: Mapa do uso e ocupação proposto para os cenários C3 e C4.

A porcentagem de áreas observadas no estudo de uso e ocupação do solo para cada classe nos cenários C1 (i) e C3 e C4 (ii) para a área de estudo são explicitados na tabela 5.2.

Tabela 5.2: Comparativo dos tipos de uso obtidos no estudo de uso e ocupação.

Área	Porcentagem de cada tipo de uso (%)				
	Zonas florestais	Vegetação rasteira	Solo exposto	Urbanização baixa	Urbanização alta
(i) Área de estudo - C1	7	33	27	23	10
(ii) Área de estudo - C3 e C4	10	7	1	25	57
Variação	+3	-26	-26	+2	+47

O alto valor apresentado pela classe de solo exposto em (i) representa bem a condição da área de estudo na atualidade. A região tem sido intensamente ocupada e o número de obras é crescente, o que pressupõe a movimentação de terra. Além disso, as vias não contam ainda com pavimentação, assim, estradas de terra são contabilizadas no campo de solo exposto.

O aumento na porcentagem de áreas florestais pode ser justificado por alguns fatores. A existência de pequenas áreas com vegetação mais consolidada em Vicente Pires pode ser apontada, vegetação essa composta por tipologia eventualmente mais densa do que a dos

campos de cerrado. Mas há também a questão superestimação das áreas florestais. Uma vez que o programa utilizado realiza a classificação por meio de imagem superficial, ao identificar copas de árvores é computado o dado de zona florestal e não o verdadeiro uso do solo, que é obstruído pelas copas.

A pouca variação da classe de urbanização baixa e o grande aumento na porcentagem de urbanização alta, bem como a diminuição da vegetação rasteira, apontam para a tendência de ocupação de alto teor de impermeabilização das áreas disponíveis. Esse padrão de ocupação tem o potencial de gerar aumento significativo nos volumes escoados na ocorrência de chuvas.

Para o estudo dos cenários C1, C3 e C4 foram, portanto, obtidos resultados de uso e ocupação e foi, assim, possível estimar os dados de CN. Para o estudo do cenário 2 não foi possível aplicar o mesmo procedimento, uma vez que não foi localizada área de características semelhantes com a tipologia urbana de interesse. Assim, para o cenário 2 foi aplicado CN médio 55 para todas as sub-bacias urbanas, valor intermediário dentre os apontados na tabela 3.9 para zonas cultivadas com conservação do solo e pastagens em boas condições, uso de solo indicado no PDOT (DF, 2009). A tabela 5.3 apresenta os valores médios de CN para toda a área de estudo para os diferentes cenários estudados.

Tabela 5.3: Tabela de valor médio do parâmetro CN para toda a área de estudo nos cenários C1, C2, C3 e C4

Cenário	CN médio
C1	58
C2	55
C3	67
C4	67

5.1.4 Precipitação

A chuva de projeto de 24 horas foi discretizada em intervalos de 5 minutos e organizada segundo o método dos Blocos Alternados, de acordo com o preconizado por ADASA (2018). O hietograma apresentado na Figura 5.5 ilustra a precipitação de projeto aplicada para as sub-bacias do modelo, formulada a partir da curva IDF de Brasília para tempo de retorno de 10 anos. O valor máximo dessa chuva apresenta o valor aproximado de 18,2 mm.

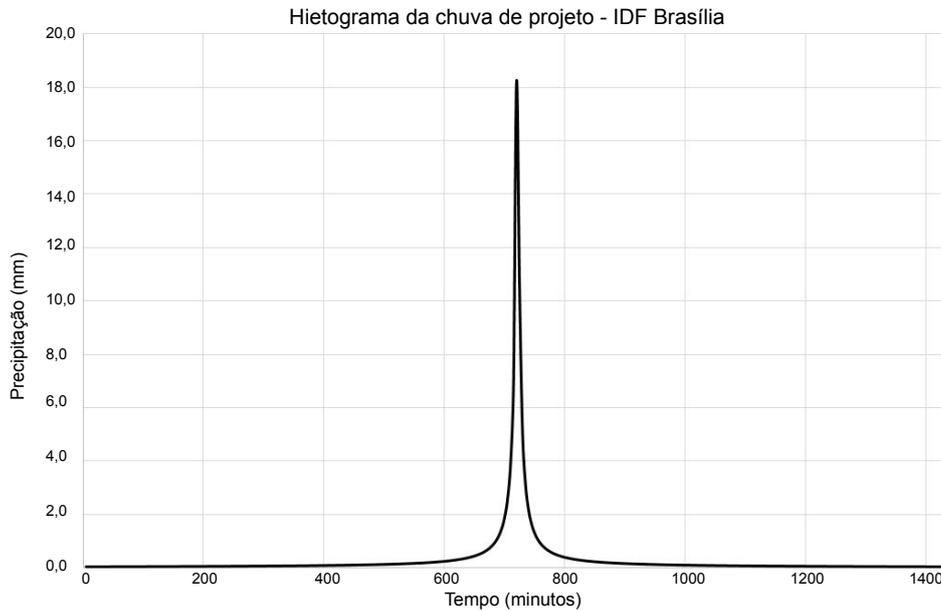


Figura 5.5: Hietogramada chuva de projeto de Brasília com Tempo de Retorno de 10 anos pelo método dos blocos alternados.

5.2 SISTEMA PROPOSTO

5.2.1 Configuração das sub-bacias

Foram traçados, na aplicação Civil3D, 481 lotes de área média de 2,1 hectares. Buscou-se seguir a tendência atual de ocupação da área, de traçado de lotes entre curvas de nível, tipologia que é também observada na área já estabelecida de Vicente Pires, e levando em consideração o sistema viário.

O traçado foi proposto buscando ainda manter configuração com a dimensão de comprimento predominando sobre a de largura. Alguns lotes com maiores dimensões foram mantidos pois, por apresentarem áreas de características rurais mais consolidadas, podem resistir ao processo de parcelamento e ocupação irregular. As áreas mais próximas dos cursos d'água foram poupadas do loteamento, uma vez que, segundo o Código Florestal Brasileiro, os 30 metros de faixas marginais são áreas de preservação que não devem ser ocupadas (Brasil, 2012).

A Figura 5.6 apresenta a configuração formulada de instalação de lotes na área de estudo. Dadas as similaridades topográficas e a integração que confere unidade a cada loteamento, os limites dos lotes formulados foram considerados coincidentes com os limites das sub-bacias

urbanas para a modelagem.

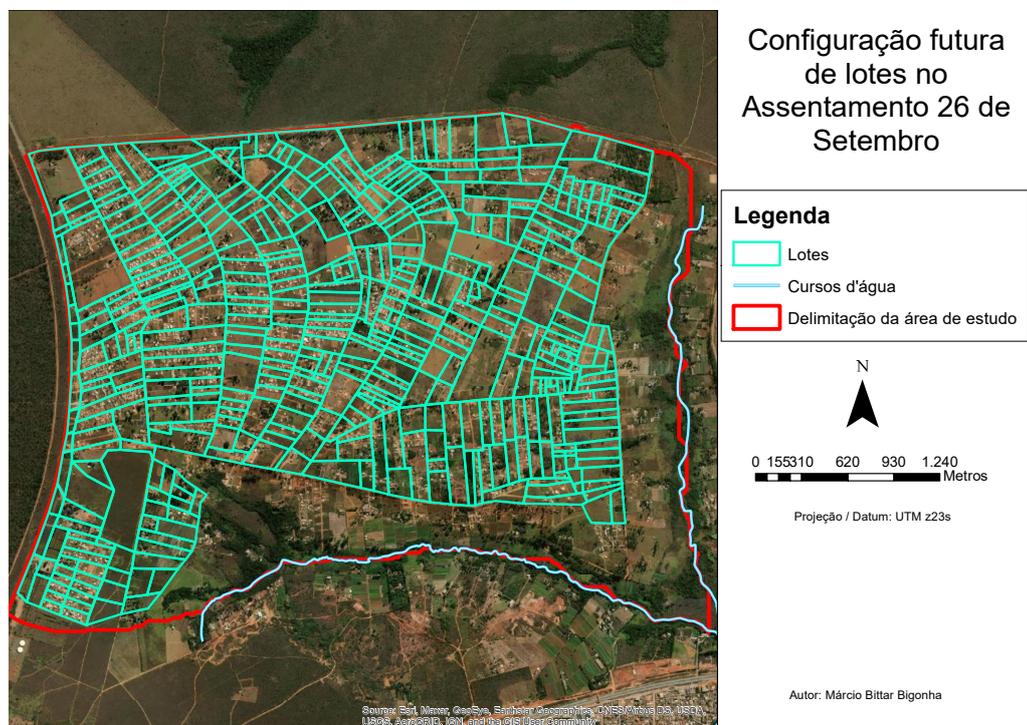


Figura 5.6: Proposta de configuração de lotes no Assentamento 26 de Setembro.

5.2.2 Configuração da rede de drenagem

Para o traçado da rede, foram seguidas as recomendações de Novacap (2019) e ADASA (2018). A configuração alcançada, em sobreposição à delimitação de sub-bacias, é exibida na Figura 5.7. O traçado formulado promove a captação de toda área de estudo por meio da subdivisão da em 8 subsistemas independentes, com cobertura e ponto de lançamento próprios.



Figura 5.7: Proposta de rede de drenagem traçada no programa PCSWMM.

A rede foi dimensionada para o cenário C3 e foi utilizada a mesma configuração para a simulação dos 4 cenários. Características gerais da rede são exibidas na tabela 5.4.

Tabela 5.4: Características gerais da rede de drenagem.

Características da Rede	
Área (<i>ha</i>)	1001
sub-bacias	481
Poços de Visita	1886
Conduitos	1178
Diâmetro (<i>m</i>)	0,6 a 3,8
Declividade dos conduitos	0,5%
Elevação Máxima (<i>m</i>)	1250,33
Elevação Mínima (<i>m</i>)	1113,83

Os exutórios foram identificados numericamente antecidos da sigla OF, como registrado na Figura 5.7. A tabela 5.5 exhibe as áreas de contribuição de cada subsistema proposto e os respectivos valores de CN médio pra cada cenário estudado.

Tabela 5.5: Áreas dos subsistemas propostos e respectivos CNs

	OF1	OF2	OF3	OF4	OF5	OF6	OF7	OF8
Área de contribuição (<i>ha</i>)	102,5	39,0	170,0	191,7	82,2	49,0	167,4	199,2
CN médio C1	57,3	67,5	63,5	64,8	59,2	54,1	61,7	58,4
CN médio C2	55	55	55	55	55	55	55	55
CN médio C3	71,1	70,8	68,1	70,3	68,0	67,9	67,7	71,0
CN médio C4	71,1	70,8	68,1	70,3	68,0	67,9	67,7	71,0

Os valores médios observados para as áreas de contribuição dos subsistemas nos diferentes cenários apresentam baixa variabilidade. Em C3, o menor valor apresentado é de 67,7 e o maior, 71,1. A pequena variação indica a homogeneidade da configuração proposta para o estudo da ocupação futura. Já no cenário atual, C1, a variação entre o maior e o menor valor, 67,5 e 54,1 respectivamente, representa a variabilidade de níveis de impermeabilização, uma vez que a região que se encontra em processo de ocupação, e esse não atinge igualmente toda a extensão da área de estudo.

A comparação dos valores de CN de OF2 nos cenários C1 e C3 permite verificar que a área de contribuição da rede se encontra na condição mais agravada de impermeabilização em relação às demais áreas. Os valores de C1 e C3 para essa área, 67,5 e 70,8, indicam que é possível que as vazões nela geradas na atualidade já estejam próximas às que seriam observadas no caso de ocupação formulada para o cenário C3.

5.3 RESULTADOS DA MODELAGEM NO PCSWMM

Os parâmetros apontados na metodologia e os resultados preliminares descritos nos primeiros tópicos da seção de resultados foram utilizados para a realização de simulações no programa PCSWMM.

Foram obtidos resultados para todos os segmentos do sistema. Na apresentação para os diferentes cenários propostos, o sistema do exutório 1 foi o escolhido para a apresentação gráfica, enquanto os demais resultados obtidos foram no presente estudo registrados apenas numericamente em forma tabular.

5.3.1 Análise dos cenários C1, C2 e C3

A modelagem permitiu simular o comportamento hidrológico e hidráulico da região considerando os seus padrões atuais de ocupação e as características da rede proposta. A tabela

5.6 registra os valores máximos alcançados nos exutórios para os diferentes cenários e a vazão máxima admitida pela resolução da Adasa (ADASA, 2011). É importante lembrar que os valores foram obtidos a partir de modelagem sem calibração. Assim, apesar da precisão numérica, não devem ser considerados os valores absolutos, mas a tendência que os resultados apresentam.

Tabela 5.6: Vazões máximas dos subsistemas propostos.

	OF1	OF2	OF3	OF4	OF5	OF6	OF7	OF8
C1 (m^3/s)	3,82	2,07	7,49	11,06	1,93	0,51	6,03	4,78
C2 (m^3/s)	1,01	0,30	1,51	2,07	0,79	0,48	1,77	2,26
C3 (m^3/s)	11,04	3,02	13,82	21,45	6,68	4,39	15,97	24,32
Adasa (m^3/s)	2,50	0,95	4,15	4,68	2,01	1,20	4,08	4,86

Pode-se verificar, pela análise dos resultados do cenário C1, que o processo de ocupação já apresenta impactos no regime de escoamento do Assentamento 26 de Setembro. Nesse cenário, os valores de vazão máxima já superam, em 6 dos 8 pontos de lançamento, o valor máximo admitido.

Os valores obtidos para o cenário C2 estão associados a uma ocupação com uso do solo em conformidade com o preconizado no plano de ordenamento territorial da região (DF, 2009). Assim, como esperado, os valores de escoamento se apresentaram abaixo do limite estabelecido pela agência reguladora. Trata-se de importante constatação, que indica que a ocupação prevista para a área não geraria acréscimos de vazões, atestando a coerência da política pública de ordenamento territorial.

A comparação do cenário C1 com o cenário C2 permite verificar o distanciamento que a região já apresenta no processo de impermeabilização e aumento de padrão de escoamento com relação ao que lhe era proposto pelo PDOT. No caso da tendência apresentada pelas vazões em OF2, verifica-se que, para o cenário C1, a vazão escoada já apresentam um excedente próximo ao obtido em C3.

O cenário C3 apresentou, para todos os exutórios, vazões que superam os limites estabelecidos por ADASA (2011). O pontos de maior distanciamento do limite preconizado, OF8, apresentou vazão efluente aproximadamente cinco vezes maior do que a vazão fixada pela agência reguladora. O exutório OF1 apresentou vazão máxima que supera em 4,5 vezes a vazão indicada.

A Figura 5.8 apresenta os hidrogramas resultantes da modelagem no exutório OF1 para os diferentes cenários. Percebe-se o impacto promovido pelas alterações da impermeabilização do solo tanto no aumento da vazão escoada quanto na antecipação da ocorrência do pico

de cheia. Na figura, pode-se verificar que a situação de atual ocupação da área já acarreta em acréscimo de vazão que supera a preconizada por ADASA (2011). A condição observada no cenário C3 apresenta o potencial elevado de acréscimo de vazão quando considerando a situação de ocupação com alta impermeabilização do solo.

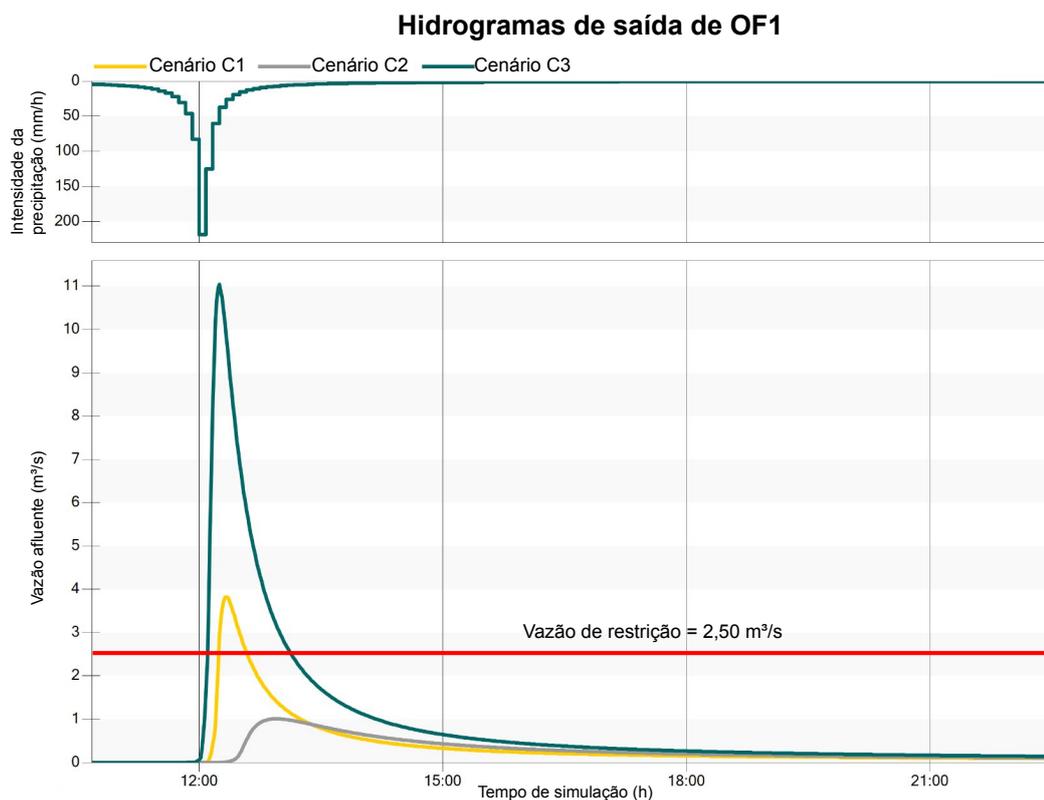


Figura 5.8: Hidrogramas de saída no exutório OF1 para os cenários C1, C2 e C3.

O subsistema do exutório OF1 é apresentado mais detalhadamente na Figura 5.9. O perfil do trecho destacado na Figura 5.9 é exibido na Figura 5.10, com vazões próximas às de pico do cenário C3.

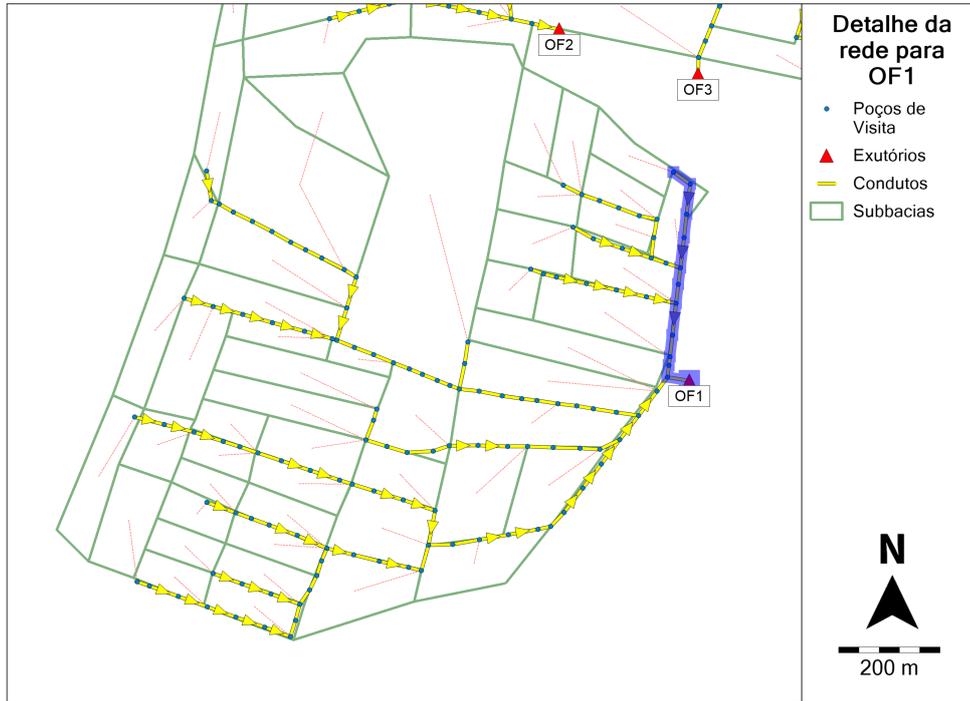


Figura 5.9: Proposta de rede de drenagem traçada no programa PCSWMM, detalhe do sub-sistema de OF1.

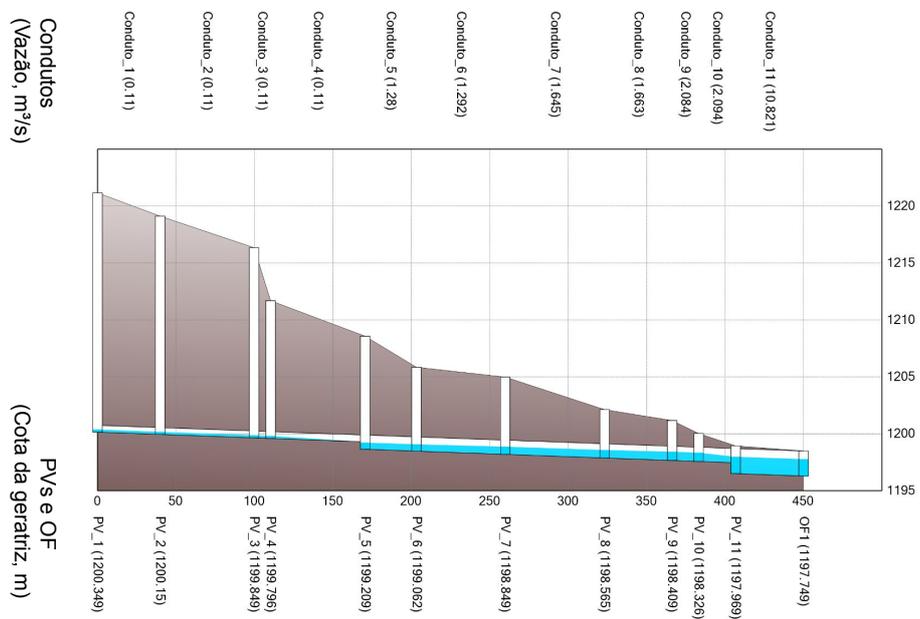


Figura 5.10: Perfil do trecho destacado na Figura 5.9.

Pode-se verificar, pela Figura 5.10, que a declividade mínima de 0,5% fixada por ADASA (2018) imprime a formação de grandes profundidades na rede. Para essas profundidades excessivas, deveriam ter sido introduzidas quedas nos poços de visita de modo a reduzir eventuais custos de escavação no processo de implementação. Isso não foi realizado por conferir pouco efeito nos hidrogramas e demandar grande esforço para a adequação de toda a rede.

5.3.2 Análise dos cenários C3 e C4

A partir da modelagem do cenário C3, verificou-se a condição extrema que pode ser alcançada na dinâmica do escoamento na ocorrência de chuvas na área. Foi, então, proposta, no cenário C4, a inclusão de medidas de controle no final de cada subsistema da rede de drenagem, de modo a reduzir os impactos do aumento de vazões em áreas a jusante.

A dimensão dos dispositivos propostos se deu em função da necessidade de fazer com que as vazões máximas para os oito exutórios da rede se adequassem ao padrão de lançamentos fixado por ADASA (2011). Assim, pela aplicação da ferramenta *Storage* do programa PCSWMM, obteve-se o volume necessário para o amortecimento das vazões excedentes. Os valores obtidos são explicitados na tabela 5.7. A tabela conta ainda com extensões de áreas em planta demandadas para o volume útil supondo reservatórios construídos com geometria retangular apresentando altura da lâmina d'água de 3 metros.

Tabela 5.7: Tabela de dimensões dos reservatórios incorporados na modelagem

	OF1	OF2	OF3	OF4	OF5	OF6	OF7	OF8
Volume útil (m^3)	15.512	4.975	17.579	28.789	8.949	5.848	18.409	29.714
Altura (m)	3	3	3	3	3	3	3	3
Área em planta (m^2)	5.170	1.658	5.860	9.596	2.983	1.950	6.136	9.905

Com a incorporação dos reservatórios, a vazão obtida se adequou aos padrões de lançamento. Os valores registrados na Tabela 5.8 confirmam a eficiência hidrológica dos dispositivos para a adequação das vazões efluentes.

Tabela 5.8: Vazões dos subsistemas propostos com a incorporação de bacias de detenção.

	OF1	OF2	OF3	OF4	OF5	OF6	OF7	OF8
C3 (m^3/s)	11,04	3,02	13,82	21,45	6,68	4,39	15,97	24,32
C4 (m^3/s)	2,43	0,84	4,12	4,55	1,90	1,10	3,81	4,80
Adasa (m^3/s)	2,50	0,95	4,15	4,68	2,01	1,20	4,08	4,86

O comportamento do hidrograma de saída dos reservatórios é apresentado na Figura 5.11, que ilustra resultados dos cenários C3 e C4 para o exutório OF1. Pode-se perceber que em C4 a vazão de pico é amortecida até valor ligeiramente abaixo da vazão de restrição e que a ocorrência da vazão máxima é retardada. É importante ressaltar que o volume escoado para os dois cenários é o mesmo, uma vez que o dispositivo incorporado não promove a infiltração, mas apenas a retenção do volume escoado.

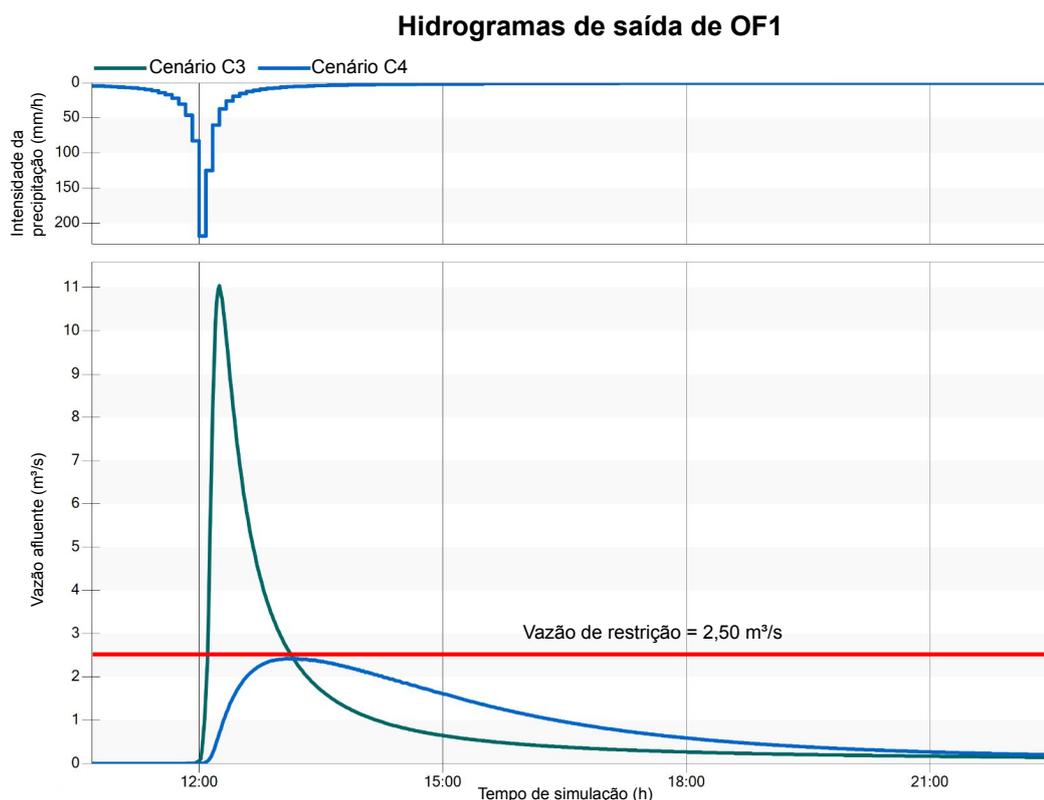


Figura 5.11: Hidrogramas de saída no exutório OF1 para os cenários C3 e C4.

O sistema de drenagem obtido é ilustrado nas figuras 5.12 e 5.13, que apresenta a rede proposta e a incorporação das bacias de detenção. Os *sketches* apresentados foram incluídos para permitir a melhor compreensão da importância que têm no ambiente urbano as áreas ocupadas pelos dispositivos necessários para o controle das vazões de lançamento. A configuração se deu em escala e de acordo com as áreas em planta registradas na tabela 5.7.



Figura 5.12: Proposta de sistema de drenagem formulado no programa PCSWMM.



Figura 5.13: Detalhe do sistema de drenagem para OF1.

6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O trabalho se propôs a estudar os impactos provocados pela urbanização na região do Assentamento 26 de Setembro no manejo de águas pluviais. Verificada a inexistência de redes de drenagem na área de estudo, foi proposto sistema desenvolvido segundo diretrizes da Novacap e da Adasa. Realizou-se ainda, com base na rede proposta e na análise de ocupação, o estudo de impacto da incorporação de medidas compensatórias para controle centralizado das vazões escoadas. A adoção das medidas se deu para que fosse alcançada condição que se adequasse à preconizada por ADASA (2011).

A ocupação do solo da área de estudo foi verificado a partir de imagens do satélite LANDSAT por meio de classificação supervisionada. Constatou-se processo avançado de transformação da cobertura superficial, que apresentou grandes áreas de solo exposto e urbanização baixa. Foi proposta, ainda, uma configuração hipotética para a ocupação futura da área, seguindo padrões de ocupação equivalentes àqueles observados na região central de Vicente Pires. A comparação entre a ocupação atual e a ocupação proposta permitiu concluir que o processo de urbanização já se configura de maneira acentuada e, em algumas regiões, já apresenta padrões elevados de impermeabilização.

O estudo analisou as características do escoamento produzido na área para uma chuva de tempo de retorno de 10 anos gerada a partir da curva IDF de Brasília (ADASA, 2018). Assim, foi possível verificar a tendência do aumento das vazões para os cenários propostos. O cenário C1, que simulou as condições atuais de ocupação do solo, evidenciou um aumento de vazões que já supera em 6 dos 8 subsistemas propostos a condição de lançamento fixada por ADASA (2011). O cenário C3, que incorporou as características da área urbana de Vicente Pires, geraram vazões até aproximadamente cinco vezes maiores que a imposta pela Adasa. A configuração de ocupação proposta pelo PDOT do Distrito Federal foi também estudada, no cenário C2, e as vazões associadas a ela mostraram o baixo impacto provocado por essa configuração, coerente com a região em que se encontra, nas proximidades de mananciais.

Pode-se verificar que, segundo ADASA (2011), para os cenários estudados, pode-se solucionar o problema de escoamento excedente pela incorporação de bacias de retenção. Todavia, a construção de infraestrutura urbana direcionada para a geração de menores alterações nas vazões escoadas pode significar a geração de impactos de menores dimensões, com sistemas de drenagem que considerem soluções distribuídas.

Os sistemas propostos foram traçados de acordo com uma concepção tradicional de drenagem urbana, que pressupõe a incorporação de infraestruturas subterrâneas para captação

de vazões, e a adoção de medidas de controle centralizado a jusante para o controle da vazão efluente. Para a instalação desses sistemas, faz-se necessária a movimentação de grandes volumes de solo, em escavação e transporte, e são dispendidas áreas de considerável relevância, por vezes as infraestruturas são implementadas em áreas próximas a cursos d'água, de grande importância para a preservação ambiental. Esse processo pode significar, portanto, custos altos de execução e elevados danos ambientais, que devem ser considerados para a formulação de soluções definitivas.

As medidas compensatórias propostas para o controle das vazões no cenário C4 se mostraram eficientes do ponto de vista hidrológico, uma vez que foram capazes de assimilar as vazões escoadas e liberar efluentes dentro do limite estabelecido pela Adasa (ADASA, 2011). Do ponto de vista da implementação, contudo, as técnicas de controle centralizado ocuparam grandes áreas, de modo que se torna um desafio a promoção de usos múltiplos para sua incorporação ao meio urbano.

Para futuros trabalhos, o aprimoramento dos resultados pode ser alcançado pela calibração do modelo aplicado. Além disso, a utilização de imagens de satélite de maior resolução espacial e dados topográficos de maior precisão traria benefícios à análise, uma vez que o modelo SWMM utiliza ambas informações em diversos parâmetros na simulação. A configuração dos subsistemas pode também ser reavaliada, de modo que se alcance proposta com áreas de contribuição menos díspares para cada exutório. Adicionalmente, o volume dos reservatórios necessários para o amortecimento das vazões de cheia pode ser reduzido pela adoção de medidas compensatórias para controle na fonte, que promovam a infiltração e que se adaptem melhor ao ambiente urbano.

Dessa forma, com base no trabalho desenvolvido, sugere-se, para futuros trabalhos, o estudo do efeito de incorporação de medidas compensatórias distribuídas e soluções de baixo impacto com objetivo de potencializar a infiltração e reduzir os picos de cheia.

Referências Bibliográficas

ADASA. Resolução no 9, de 8 de abril de 2011. *Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal*, 2011.

ADASA. *Manual de drenagem e manejo de águas pluviais*. Edição revisada e atualizada. Brasília, DF, 2018.

AHMED, K. et al. Effective design and planning specification of low impact development practices using water management analysis module (WMAM): Case of malaysia. *Water*, MDPI AG, v. 9, n. 3, p. 173, fev. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/w9030173>>.

ANA. *Atlas de vulnerabilidade a inundações*. Brasília: ANA, 2014. ISBN 9788582100257.

ANDRADE, L. M. S. de. *Conexões dos padrões espaciais dos ecossistemas urbanos*. Tese (Doutorado) — Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, Brasília, 6 2014.

ARMUS, D. O discurso da regeneração. espaço urbano, utopias e tuberculose em buenos aires, 1870–1930. *Estudos históricos. Cultura e historia urbana*, Río de Janeiro, v. 8, n. 2, p. 201–213, 7 1995. Nº 16.

BAPTISTA, M. *Técnicas compensatórias em drenagem urbana*. 1. ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH, 2005. ISBN 8588686155.

BARBASSA, A. P.; SOBRINHA, L. A.; MORUZZI, R. B. Poço de infiltração para controle de enchentes na fonte: avaliação das condições de operação e manutenção. *Ambiente Construído*, FapUNIFESP (SciELO), v. 14, n. 2, p. 91–107, jun. 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/s1678-86212014000200007>>.

BARBOSA, A.; FERNANDES, J.; DAVID, L. Key issues for sustainable urban stormwater management. *Water research*, v. 46, 05 2012.

Brasil. *Código Florestal Brasileiro [on line] - Lei 12.651, de 25 de Maio de 2012*. 2012.

BURNS, D. et al. Effects of suburban development on runoff generation in the croton river basin, new york, USA. *Journal of Hydrology*, Elsevier BV, v. 311, n. 1-4, p. 266–281, set. 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.01.022>>.

BUTLER, D.; DAVIES, J. W. *Urban drainage*. 11 New Fetter Lane, London EC4P 4EE: Spon Press, 2004. ISBN 9780415306072.

CALUX, J.; THOMAZ, E. L. Intercepção e precipitação interna: Comparação entre floresta ombrófila mista e pinus elliottii var. elliotti. *Geoambiente On-line*, n. 19, p. 01–16 pág., jan. 2013. Disponível em: <<https://www.revistas.ufg.br/geoambiente/article/view/26049>>.

CARDOSO, M.; MARCUZZO, F.; BARROS, J. Classificação climática de köppen-geiger para o estado de goiás e o distrito federal. *Acta geographica*, v. 18, p. 40–55, 03 2014.

CHESHMEHZANGI, A.; BUTTERS, C. Sustainable living and urban density: The choices are wide open. *Energy Procedia*, Elsevier BV, v. 88, p. 63–70, jun. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.020>>.

CHRISTOFIDIS, D.; ASSUMPÇÃO, R. d. S. F. V.; KLIGERMAN, D. C. A evolução histórica da drenagem urbana: da drenagem tradicional à sintonia com a natureza. *Saúde Debate*, scielo, v. 43, p. 94 – 108, 12 2019. ISSN 0103-1104. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-11042019000700094&nrm=iso>.

COSTA, M. E.; TSUJI, T.; KOIDE, S. Análise do fenômeno first flush numa bacia urbana do df. In: . [S.l.: s.n.], 2018.

CRUZ, M. A. S. et al. Valorização da água no meio urbano: um desafio possível. 01 2001.

CRUZ, M. A. S.; SOUZA, C. F.; TUCCI, C. E. M. Controle da drenagem urbana no brasil: avanços e mecanismos para sua sustentabilidade. Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH, 2007.

de Vito, C. S. et al. Análise do impacto hidrológico da ocupação do assentamento 26 de setembro – df. Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH, 2020.

DF. *Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal (PDOT) - Lei Complementar Nº 803, 25 de abril de 2009*. 2009.

Distrito Federal. Plano diretor de drenagem urbana (pddu-df). *Secretaria de Obras do Distrito Federal*, 2009.

ENGMAN, E. T. Roughness coefficients for routing surface runoff. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, American Society of Civil Engineers (ASCE), v. 112, n. 1, p. 39–53, fev. 1986. Disponível em: <[https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(1986\)112:1\(39\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(1986)112:1(39))>.

FATIMA, M. de. *Impactos da drenagem urbana na saúde pública em municípios de pequeno porte no Estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife - PE, 2013.

FELDMAN, S. *Planejamento e zoneamento : São Paulo, 1947-1972*. São Paulo, Brasil: FAPESP EDUSP, 2005. ISBN 9788531408489.

FENNER, R. et al. Achieving urban flood resilience in an uncertain future. *Water*, MDPI AG, v. 11, n. 5, p. 1082, maio 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/w11051082>>.

FERREIRA, T. S.; BARBASSA, A. P.; MORUZZI, R. B. Controle de enchentes no lote por poço de infiltração de água pluvial sob nova concepção. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, scielo, v. 23, p. 437 – 446, 06 2018. ISSN 1413-4152. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522018000300437&nrm=iso>.

FILENI, F. de M.; COSTA, M. E. L.; ALVES, C. de M. A. The application of LIDs in savanna region for mitigation of flooded areas. *RBRH*, FapUNIFESP (SciELO), v. 24, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920180177>>.

FLETCHER, T. et al. Suds, lid, bmps, wsud and more – the evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, v. 12, p. 525–542, 12 2014.

GENOVEZ, A.; NETO, F.; SARTORI, A. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do serviço de conservação do solo dos estados unidos parte 1: Classificação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, FapUNIFESP (SciELO), v. 10, n. 4, p. 5–18, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.21168/rbrh.v10n4.p5-18>>.

GOMES, V. U. *Estudo comparativo dos modelos da onda cinemática e da onda difusiva na análise de propagação de cheias, em função dos parâmetros hidráulicos da bacia*. Dissertação (Mestrado) — Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Recursos Hídricos)-Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Fortaleza, 2006.

GONÇALVES, L.; RIBEIRO, R.; BAPTISTA, L. O uso de técnicas compensatórias de drenagem para controle dos impactos da urbanização. In: . [S.l.: s.n.], 2016.

GOONETILLEKE, A. et al. Understanding the role of land use in urban stormwater quality management. *Journal of Environmental Management*, Elsevier BV, v. 74, n. 1, p. 31–42, jan. 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.08.006>>.

HAWKINS, R. H.; HJELMFELT, A. T.; ZEVENBERGEN, A. W. Runoff probability, storm depth, and curve numbers. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, American Society of Civil Engineers (ASCE), v. 111, n. 4, p. 330–340, dez. 1985. Disponível em: <[https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(1985\)111:4\(330\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(1985)111:4(330))>.

IBGE. *Perfil dos municípios brasileiros: 2017*. [S.l.]: IBGE, 2017. ISBN 9788524044625.

LI, F.; YAN, X.-F.; DUAN, H.-F. Sustainable design of urban stormwater drainage systems by implementing detention tank and LID measures for flooding risk control and water quality management. *Water Resources Management*, Springer Science and Business Media LLC, v. 33, n. 9, p. 3271–3288, jun. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11269-019-02300-0>>.

LI, J. et al. Comprehensive benefit evaluation system for low-impact development of urban stormwater management measures. *Water Resources Management*, Springer Science and Business Media LLC, v. 31, n. 15, p. 4745–4758, jul. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11269-017-1776-5>>.

MAIDMENT, D. *Handbook of hydrology*. 1. ed. New York: McGraw-Hill, 1993. ISBN 9780070397323.

Nithila Devi, N.; SRIDHARAN, B.; KUIRY, S. N. Impact of urban sprawl on future flooding in chennai city, india. *Journal of Hydrology*, v. 574, p. 486 – 496, 2019. ISSN 0022-1694. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169419303816>>.

NOOR, M. et al. Uncertainty in rainfall intensity duration frequency curves of peninsular malaysia under changing climate scenarios. *Water*, MDPI AG, v. 10, n. 12, p. 1750, nov. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/w10121750>>.

NOVACAP. *Termo de Referência e Especificações para Elaboração de Projetos de Sistema de Drenagem Pluvial no Distrito Federal*. Brasília, DF, 2019.

O'LOUGHLIN, G. et al. On-site stormwater detention systems in sydney. *Water Science and Technology*, v. 32, n. 1, p. 169 – 175, 1995. ISSN 0273-1223. Innovative Technologies in Urban Storm Drainage. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/027312239500552X>>.

PALIAGA, G. et al. A clustering classification of catchment anthropogenic modification and relationships with floods. *Science of The Total Environment*, Elsevier BV, v. 740, p. 139915, out. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139915>>.

PEPLAU, G.; NEVES, M. Análise de critérios para a determinação da vazão de restrição ao escoamento superficial urbano. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, FapUNIFESP (SciELO), v. 19, n. 4, p. 97–106, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.21168/rbrh.v19n4.p97-106>>.

POUR, S. H. et al. Low impact development techniques to mitigate the impacts of climate-change-induced urban floods: Current trends, issues and challenges. *Sustainable Cities and Society*, Elsevier BV, v. 62, p. 102373, nov. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102373>>.

REATTO, A. et al. *Mapa Pedológico Digital - SIG Atualizado do Distrito Federal Escala 1:100.000 e uma Síntese do Texto Explicativo*. Planaltina, DF: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2004.

RICHARDSON, B. W. Hygeia, a city of health (classics revisited - 1876). *Hygeia - Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde*, v. 1, n. 1, 1876, 2005. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/hygeia/article/view/16836>>.

RIGHETTO, A. M. *Manejo de Águas Pluviais Urbanas*. 1. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2009. ISBN 9788570221629.

ROCHA, M. A. da. *PAISAGEM URBANA INTEGRADA ÀS TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS DE DRENAGEM: SOLUÇÃO PARA OS ALAGAMENTOS EM BRASÍLIA*. Tese (Doutorado) — Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

RODRÍGUEZ, C. A. M.; TEIXEIRA, B. A. do N. Avaliação de bacias de retenção de águas pluviais implantadas no município de são carlos (SP), brasil. *Engenharia Sanitaria*

e Ambiental, FapUNIFESP (SciELO), v. 26, n. 1, p. 143–150, fev. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/s1413-415220190034>>.

ROGERS, R. *Cidades para um pequeno planeta*. Barcelona: Gustavo Gili, 2001. ISBN 8425218896.

ROSE, S.; PETERS, N. E. Effects of urbanization on streamflow in the atlanta area (georgia, USA): a comparative hydrological approach. *Hydrological Processes*, Wiley, v. 15, n. 8, p. 1441–1457, 2001. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/hyp.218>>.

ROSSMAN, L. A. *STORM WATER MANAGEMENT MODEL – USER’S MANUAL Version 5.0*. CINCINNATI, OH 45268, U.S.A.: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, 2010. Traduzido para a língua portuguesa (versão brasileira) por Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento Universidade Federal da Paraíba, UFPB, BRASIL.

SAÑUDO-FONTANEDA, L. A. et al. Descriptive analysis of the performance of a vegetated swale through long-term hydrological monitoring: A case study from coventry, UK. *Water*, MDPI AG, v. 12, n. 10, p. 2781, out. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/w12102781>>.

SILVA, D. F. *Análise da influência de microrreservatórios em um loteamento e seus efeitos em escala de bacia*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

SILVA, G. J. A. A. d.; ROMERO, M. A. B. Cidades sustentáveis: uma nova condição urbana a partir de estudos aplicados a Cuiabá, capital do estado de Mato Grosso, Brasil. *Ambiente Construindo*, scielo, v. 13, p. 253 – 266, 09 2013. ISSN 1678-8621. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212013000300015&nrm=iso>.

SILVA, G. J. A. da. *Cidades sustentáveis : uma nova condição urbana : estudo de caso : Cuiabá-MT*. Tese (Doutorado) — Universidade de Brasília, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Brasília - DF, 2011.

SOUZA, C.; CRUZ, M.; TUCCI, C. Desenvolvimento urbano de baixo impacto: Planejamento e tecnologias verdes para a sustentabilidade das águas urbanas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, FapUNIFESP (SciELO), v. 17, n. 2, p. 9–18, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.21168/rbrh.v17n2.p9-18>>.

SOUZA, C.; TUCCI, C. E. M. Desenvolvimento urbano de baixo impacto. In: . [S.l.: s.n.], 2005.

SUN, Y. wei et al. Hydrological simulation approaches for bmps and lid practices in highly urbanized area and development of hydrological performance indicator system. *Water Science and Engineering*, v. 7, n. 2, p. 143 – 154, 2014. ISSN 1674-2370. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674237015302751>>.

TAVANTI, D.; BARBASSA, A. Análise dos desenvolvimentos urbanos de baixo impacto e convencional. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, FapUNIFESP (SciELO), v. 17, n. 4, p. 17–28, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.21168/rbrh.v17n4.p17-28>>.

TUCCI, C.; CLARKE, R. Impactos das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, FapUNIFESP (SciELO), v. 2, n. 1, p. 135–152, 1997. Disponível em: <<https://doi.org/10.21168/rbrh.v2n1.p135-152>>.

TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. 2. ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH, 2001. ISBN 8570252986.

TUCCI, C. E. M. *Gestão de Águas Pluviais Urbanas*. [S.l.]: Ministério das Cidades, 2005.

TUCCI, C. E. M. Águas urbanas. *Estudos Avançados*, v. 22, n. 63, p. 97–112, jan. 2008. Disponível em: <<https://www.revistas.usp.br/eav/article/view/10295>>.

TUCCI, C. E. M.; MENDES, C. A. *Avaliação ambiental integrada de bacia hidrográfica*. 2. ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente SQA., 2006. ISBN 8577380475.

United States Soil Conservation Service (SCS). *National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology*. [S.l.]: The Service, 1972.

VISSMAN, J. W. et al. *Introduction to Hydrology*. 2. ed. 10 East 53rd Street, New York, NY: Harper Row, 1977. ISBN 0700224971.

VILLANUEVA, A. et al. Gestão da drenagem urbana, da formulação à implementação. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH, v. 8, n. 1, p. 5–18, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.21168/rega.v8n1.p5-18>>.

XING, Y.-J. et al. Comprehensive performance evaluation of green infrastructure practices for urban watersheds using an engineering–environmental–economic (3e) model. *Sustainability*, MDPI AG, v. 13, n. 9, p. 4678, abr. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su13094678>>.