

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

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PADRÕES DE OCUPAÇÃO  
RESIDENCIAIS E TIPO DE SOLO EM ENCOSTAS  
PLANARES NA GERAÇÃO DE ESCOAMENTO  
SUPERFICIAL EM ÁREAS URBANAS**

**FABIANA MACHADO DE CHECCHI AMBROZIO**

**ORIENTADOR: SÉRGIO KOIDE**

**CO-ORIENTADORA: LETÍCIA KARINE SANCHES BRITO**

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

**BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO/2019**

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

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PADRÕES DE OCUPAÇÃO  
RESIDENCIAIS E TIPO DE SOLO EM ENCOSTAS  
PLANARES NA GERAÇÃO DE ESCOAMENTO  
SUPERFICIAL EM ÁREAS URBANAS**

**FABIANA MACHADO DE CHECCHI AMBROZIO**

**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 BACHARELA EM  
ENGENHARIA AMBIENTAL.**

**APROVADA POR:**

---

**Sérgio Koide, PhD (Universidade de Brasília)  
(ORIENTADOR)**

---

**Maria Elisa Leite Costa (Universidade de Brasília)  
(EXAMINADORA EXTERNA)**

---

**Pedro Augusto Fernandes Pereira (Universidade de Brasília)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 05 de DEZEMBRO de 2019.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

AMBROZIO, FABIANA MACHADO DE CHECCHI

Análise da influência dos padrões de ocupação residenciais e tipo de solo em encostas planares na geração de escoamento superficial em áreas urbanas. [Distrito Federal] 2019.

ix, 75 p. 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2019)

Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Ambiental.

- |                          |                                |
|--------------------------|--------------------------------|
| 1. UST                   | 2. Drenagem Urbana Sustentável |
| 3. Simulação Hidrológica | 4. SWMM                        |

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AMBROZIO, F. M. C. (2019). *Análise da Influência dos Padrões de Ocupação Residenciais e Tipo de Solo em Encostas Planares na Geração de Escoamento Superficial em Áreas Urbanas*. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e AMBIENTAL, Universidade de Brasília, DF, 75 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Fabiana Machado de Checchi Ambrozio

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Análise da Influência dos Padrões de Ocupação Residenciais e Tipo de Solo em Encostas Planares na Geração de Escoamento Superficial em Áreas Urbanas.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2019.

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. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito da autora.

---

Fabiana Machado de Checchi Ambrozio  
fabianamca.amb@gmail.com

## RESUMO

A falta de planejamento urbano adequado pode causar alterações no ciclo hidrológico. Nas áreas urbanas a infiltração natural é significativamente reduzida, devido principalmente à impermeabilização das superfícies e a redução da cobertura vegetal. Os instrumentos de gestão territorial tem papel de retratar a dinâmica urbana e sua relação com aspectos ambientais, contudo, instrumentos como PDOT e ZEE estão sempre uns passos atrás da realidade local, pois tem uma visão muito ampla do espaço urbano. O *Urban Structure Type* – UST é uma metodologia que analisa os padrões urbanos em nível de bairro, e foram utilizadas como objeto de estudo, onde se selecionou dois tipos de ocupação residencial com mesma densidade populacional, mas com diferentes taxas de ocupação. Foram construídos arranjos associados às duas UST's, ao tipo do solo Latossolo (solo A) e Cambissolo (solo B), e à topografia planar de moderada declividade similar ao encontrado na área de Vicente Pires, DF, para avaliar e comparar o impacto na geração de escoamento superficial e na taxa de infiltração. Considerando a importância da drenagem sustentável, foram criados arranjos com trincheiras de infiltração para a UST RH5 (habitação unifamiliar) e valas de infiltração para a UST RB2 (habitação multifamiliar), considerando a geometria do arranjo de edifícios e taxa de área verde disponível para alocação destas técnicas. As simulações foram realizadas com chuva de projeto com tempo de retorno de 10 e 2 anos, utilizando o modelo SWMM. As simulações hidrológicas com rede de drenagem convencional mostraram que a UST RB2 inserida no solo A teve melhor desempenho na redução do escoamento superficial, como esperado. A média de redução da infiltração da água em área com solo B foi 36,1%, em relação a área com solo A. Verifica-se que as alterações no cenário de pré-desenvolvimento com a urbanização elevam em muito a vazão no exutório, levando à necessidade de soluções para o manejo de águas pluviais. As simulações obtiveram que as trincheiras de infiltração foram capazes de amortecer parte da vazão de pico, mas as valas de infiltração não apresentaram bom desempenho nessa função, o que levou à necessidade de dimensionar bacias de retenção nas duas USTs. O estudo mostrou a importância da adoção de mais de uma solução de drenagem de baixo impacto para reduzir o impacto de ocupação urbana e adequar o sistema aos parâmetros da legislação atual, considerando o tipo de relevo, solo e padrão de ocupação selecionado no estudo.

**PALAVRAS CHAVE:** UST, drenagem urbana sustentável, simulação hidrológica, SWMM.

## AGRADECIMENTOS

À minha mãe, por sempre ter com um sorriso no rosto e um abraço acolhedor para apoiar e dar forças nos momentos que preciso, especialmente nessa fase da graduação. Ao meu pai, por trazer leveza no dia a dia com suas comidas deliciosas. À minha irmã, pela sabedoria das conversas que sempre me ajudam e pela parceria incrível que temos. Também agradeço pela paciência nos momentos de estresse e desabafos escutados com carinho.

À Universidade de Brasília, pelo ambiente agradável e charmoso, por ter me permitido crescer pessoalmente e profissionalmente. Agradeço aos professores pelos conhecimentos transmitidos e oportunidades de experiências novas a cada dia. Assim como aos alunos da universidade, aqueles que se tornaram colegas queridos e a todos os outros, pela riqueza de diversidade e cultura presente.

Ao professor Koide e à Letícia, por possibilitarem a construção deste trabalho com todo o suporte necessário, além dos ensinamentos e experiências compartilhados que ajudaram a completar a minha formação acadêmica e pessoal. À Elisa, por dar suas sugestões certeiras no meu projeto final 1 e à CHI Water por fornecer a licença estudantil do programa PCSWMM.

Ao pessoal do meu estágio, na Superintendência de Abastecimento de Água e Esgoto na Adasa, pela experiência profissional e contribuição no meu desenvolvimento como cidadã. Às visitas técnicas mesmo de baixo de chuva e sol que acrescentaram minha formação prática.

À turma do meu semestre de 2/2013, pela afinidade, acolhimento e parcerias que vou levar no coração, pelos churrascos e lembranças de calourada que ficaram marcados. À todos os meus amigos e amigas, por estarem presente nessa fase da minha vida, mesmo que as vezes distante. Ao Gabriel, pelo companheirismo sincero, sempre dando força quando preciso, pelas palavras e gestos carinhosos que me ajudaram muito nesse último ano de graduação.

À todas as possibilidades e oportunidades enriquecedoras de desenvolvimento que tive dentro da universidade e por fazer parte disso tudo.

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2. OBJETIVO</b> .....	3
<b>2.1. OBJETIVO GERAL</b> .....	3
<b>2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	3
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	4
<b>3.1. URBANIZAÇÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS</b> .....	4
<b>3.2. COMPREENSÃO DA DINÂMICA URBANA</b> .....	6
<b>3.3. FATORES QUE INFLUENCIAM NO ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM BACIAS URBANAS</b> .....	9
<b>3.3.1. Morfologia Urbana</b> .....	9
<b>3.3.2. Tipo do Solo</b> .....	15
<b>3.3.3. Características Geomorfológicas</b> .....	16
<b>3.4. MEDIDAS DE CONTROLE SENSÍVEIS ÀS ÁGUAS PLUVIAIS</b> .....	18
<b>3.4.1. Medidas de Controle na Fonte</b> .....	19
<b>3.5. MODELAGEM HIDROLÓGICA</b> .....	22
<b>3.5.1. Modelo SWMM</b> .....	23
<b>3.6. SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS URBANOS</b> .....	24
<b>4. METODOLOGIA</b> .....	26
<b>4.1. CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO</b> .....	27
<b>4.1.1. Distrito Federal</b> .....	27
<b>4.1.2. Área de Estudo 1 - UST RH5</b> .....	31
<b>4.1.3. Área de Estudo 2 - UST RB2</b> .....	34
<b>4.2. SIMULAÇÕES HIDROLÓGICAS</b> .....	36
<b>4.2.1. Arranjos Simulados</b> .....	37
<b>4.2.2. Dados de Entrada das Simulações</b> .....	37
<b>4.2.3. Simulação com Chuva de Projeto</b> .....	52
<b>5. RESULTADOS</b> .....	54
<b>5.1. SIMULAÇÃO DAS UST's COM REDE CONVENCIONAL E COM CHUVA DE PROJETO</b> .....	54
<b>5.1.1. UST RH5</b> .....	54
<b>5.1.2. UST RB2</b> .....	55
<b>5.2. SIMULAÇÃO DAS UST's COM LID's E COM CHUVA DE PROJETO</b> .....	57
<b>5.2.1. UST RH5</b> .....	57
<b>5.2.1. UST RB2</b> .....	61

5.2.3. Comparações entre UST's .....	65
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES .....	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	72

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Efeito sobre o comportamento do escoamento superficial na bacia hidrográfica após a urbanização (Tucci, 2007). .....	5
Figura 3.2 - Macrozonas do Plano Diretor de Ordenamento Territorial (PDOT) do DF (Castro, 2017). .....	7
Figura 3.3 - Padrões de expansão urbana (Galster et al., 2001 apud Bessusi et al., 2010, Adaptado).....	9
Figura 3.4 - Mapa de Tipos de Estruturas Urbanas do Distrito Federal (Castro, 2017). .....	11
Figura 3.5 - Porcentagem em área permeável e impermeável quantificada por tipo de estrutura urbana (Castro, 2017).....	12
Figura 3.6 - Elementos e critérios de análise das tipologias urbanas identificadas na UH do Paranoá (Seraphim, 2018).....	14
Figura 3.7 - Distribuição das zonas homogêneas de densidade construtiva na UH do Lago Paranoá (Seraphim, 2018).....	14
Figura 3.8 - Diferentes formas tridimensionais do relevo definidas como convergentes (“a”, “b” e “c”) e divergentes (“d”, “e” e “f”) (Troch et al., 2003). .....	17
Figura 3.9 - Hidrogramas de pré urbanização, pós-urbanização e pós a urbanização com medidas de controle (Adasa, 2018).....	18
Figura 3.10 - Caracterização dos dispositivos de controle na fonte (Adasa, 2018). .....	20
Figura 3.11. Trincheira de infiltração típica (Souza, 2002 apud Schueler, 1987). .....	21
Figura 3.12 - Sistema e célula típica de biorretenção (Rossman e Huber, 2016, Adaptado). .	22
Figura 3.13 - Comparação de sistemas com implantação de LID e sem implantação de LID (Brito, 2019).....	24
Figura 3.14 - Gráfico com valores médios do IPSEU por UST para o DF (Castro, 2017). ....	25
Figura 4. 1. Fluxograma Metodológico. ....	27
Figura 4. 2. Caracterização do DF e possíveis áreas de estudo (Brito, 2018). ....	28
Figura 4. 3. Mapa de solo do Distrito Federal, na escala 1:100.000, com indicação das classes dos solos (Reatto et al., 2004).....	29
Figura 4. 4. UST RH5 obtida da região administrativa do Park Way. ....	31
Figura 4. 5. Desenho urbanístico da quadra piloto da área de estudo 1 e sua disposição em relação à curva de nível.....	32
Figura 4.6. Características topográficas selecionadas para estudo, quanto à declividade, elevação e curvatura do solo. ....	34
Figura 4. 7. UST RB2 obtida da Super Quadra Sul 405 no Plano Piloto. ....	35
Figura 4. 8. Desenho urbanístico da quadra piloto da área de estudo 2 e sua disposição em relação à curva de nível.....	36
Figura 4. 9. Desenho das quadras da UST RH5 e uso e ocupação do solo.....	39
Figura 4. 10. Desenho das quadras da UST RH5 e uso e ocupação do solo.....	40
Figura 4. 11. Localização dos perfis de rede transversais e longitudinais à curva de nível. ...	41
Figura 4. 12. Perfil transversal e longitudinal da rede da UST RH5, com dados de cada conduto (links) e PV (nodes). ....	42

Figura 4. 13. Perfil transversal e longitudinal da rede da UST RB2, com dados de cada conduto (links) e PV (nodes). .....	43
Figura 4. 14. Rede de drenagem convencional da quadra UST RH5 para solo tipo A.....	44
Figura 4. 15. Rede de drenagem convencional da quadra UST RB2 para solo tipo A.....	44
Figura 4. 16. Representação do cenário de pré-desenvolvimento para a área da quadra UST RH5. ....	46
Figura 4. 17. Representação do cenário de pré-desenvolvimento para a área da quadra UST RB2. ....	46
Figura 4. 18. Alocação das trincheiras de infiltração na UST RH5 com os valores de declividade. ....	48
Figura 4. 19. Alocação das valas de infiltração nas quadras da UST RB2.....	49
Figura 4. 20. Rede de drenagem com LID's da quadra UST RH5 para solo tipo A. ....	50
Figura 4. 21. Rede de drenagem com LID's da quadra UST RB2 para solo tipo A.....	51
Figura 4. 22. Hietograma para tempo de retorno de 10 anos. ....	52
Figura 4. 23. Hietograma para tempo de retorno de 2 anos. ....	53
Figura 5. 1. Hidrograma no Exutório 1 e taxa de infiltração para os arranjos com rede de drenagem convencional, utilizando tempo de retorno de 10 anos. ....	57
Figura 5. 2. Hidrograma no exutório 1 para os arranjos da UST RH5. ....	58
Figura 5. 3. Gráfico de taxa de infiltração da água em mm/h para os arranjos da UST RH5 com tempo de retorno de 10 anos. ....	59
Figura 5. 4. Relação da área ocupada pelas valas em cada sub-bacia e a área total da sub-bacia, no solo A.....	61
Figura 5. 5. Relação da área ocupada pelas valas em cada sub-bacia e a área total da sub-bacia, no solo B.....	62
Figura 5. 6. Hidrograma no exutório 1 para os arranjos da UST RB2 com tempo de retorno de 10 anos. ....	63
Figura 5. 7. Gráfico de taxa de infiltração da água em mm/h para os arranjos da UST RB2 com tempo de retorno para 10 anos. ....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1- Enquadramento dos tipos de solos de acordo com os grupos hidrológico de solo propostos pelo SCS (Sartori et al., 2005).....	16
Tabela 4. 1. Arranjos Simulados por parâmetros de análise.....	37
Tabela 4. 2. Valores de CN atribuído a cada uso e ocupação da quadra UST RH5. ....	39
Tabela 4. 3. Valores de CN atribuído a cada uso e ocupação da quadra UST RH5. ....	40
Tabela 4. 4. Características das redes de drenagem convencional para as quadras UST RH5 e UST RB2, para solos A e B. ....	45
Tabela 4. 5. Parâmetros de projeto utilizados no dimensionamento das trincheiras. ....	48
Tabela 4. 6. Parâmetros de projeto utilizados no dimensionamento das valas. ....	50
Tabela 4. 7. Características das redes de drenagem sem LID e com LID para as quadras UST RH5 e UST RB2, para solos A e B. ....	51
Tabela 5. 1. Vazões de pré-desenvolvimento para UST RH5 e RB2, solo A e B. ....	54
Tabela 5. 2. Vazões e tempo de pico para UST RH5 com rede convencional para chuvas de projeto de 10 e 2 anos de retorno. ....	55
Tabela 5. 3. Vazões e tempo de pico para UST RB2 com rede convencional para chuvas de projeto de 10 e 2 anos de retorno. ....	56
Tabela 5. 4. Vazões e tempo de pico para UST RH5 com rede sem e com trincheira, nos exutório 1 e 2, para tempo de retorno de 10 anos. ....	58
Tabela 5. 5. Resumo das vazões máximas totais na UST RH5, para tempo de retorno de 10 e 2 anos. ....	60
Tabela 5. 6. Volume e profundidade das bacias de detenção, e tempo de pico para cada exutório para UST RB2, solo A e B. ....	60
Tabela 5. 7. Vazões e tempo de pico para UST RB2 com uso de valas de infiltração, exutório 1 e 2, para tempo de retorno de 10 anos. ....	62
Tabela 5. 8. Resumo das vazões máximas totais na UST RB2, para tempo de retorno de 10 e 2 anos. ....	64
Tabela 5. 9. Volume e profundidade das bacias de detenção, e tempo de pico para cada exutório para UST RB2, solo A e B. ....	65
Tabela 5. 10. Comparação da máxima infiltração, em mm/hr, por tipo de solo.....	65
Tabela 5. 11. Comparação da máxima infiltração, em mm/hr, por UST. ....	66

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

Adasa - Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal  
C - Coeficiente de escoamento superficial  
CODEPLAN – Companhia de Planejamento do Distrito Federal  
CN - Curva Número  
DF - Distrito Federal  
EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
GDF – Governo do Distrito Federal  
ha - Hectares  
I - Intensidade da chuva  
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
IDF - Intensidade Duração Frequência  
km<sup>2</sup> - Quilômetro Quadrado  
LID - Low Impact Development  
LUOS – Lei de Uso e Ocupação do Solo  
MC – Medida de Controle  
mm - Milímetro  
MMA – Ministério do Meio Ambiente  
P - Precipitação total  
PCSWMM - *Personal Computer Storm Water Management Model*  
PDDU - Plano Diretor de Drenagem Urbana  
PDOT – Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal  
Q - Vazão de Escoamento  
S - Capacidade de armazenamento  
SCS - Soil Conservation Service  
SEGETH - Secretaria de Estado de Gestão do Território e Habitação  
SEMA – Secretaria de Estado do Meio Ambiente  
SEUrb – Serviços Ecológicos Urbanos  
SuDS - Sustainable Drainage Systems  
SWMM - Storm Water Management Model  
TR - Tempo de Retorno  
t - Tempo de duração da chuva  
UH - Unidade Hidrográfica  
UST – *Urban Structure Type*  
WSUD – *Water Sensitive Urban Design*  
ZEE – Zoneamento Econômico Ecológico

# 1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional em áreas urbanas ocorreu historicamente próximo aos cursos de água e logo se expandiu para outras áreas, impondo sistemas de malha viária, saneamento das áreas ribeirinhas e obras que no geral causaram a ocupação de áreas de várzeas e de alagamentos naturais. Para que o desenvolvimento das cidades seja harmônico satisfazendo expectativas ambientais, sociais e econômicas, é importante que a ocupação territorial urbana tenha um planejamento integrado das diversas infraestruturas.

Uma gestão e um manejo eficientes das águas pluviais se fazem cada vez mais necessários no Brasil atual. No Distrito Federal, onde a disponibilidade hídrica é mais restrita por estar localizado em região de cabeceiras de bacias hidrológicas, um sistema de manejo de águas pluviais adequadamente planejado, além de reduzir os riscos de alagamento e inundação, também pode contribuir para o aumento da disponibilidade hídrica (Adasa, 2018).

A compreensão da dinâmica urbana e sua morfologia são fundamentais para construir um planejamento eficiente das cidades. Apesar disso, os instrumentos da Política Urbana, conforme disposto na Lei Federal 10.257/01, possuem um olhar do território muito amplo, não favorecendo para seu retrato dinâmico. Um instrumento que tem se mostrado eficaz para o mapeamento dos padrões urbanos a partir da morfologia urbana é o denominado *Urban Structure Type* (UST). O estudo de Castro (2017) utilizou a UST para construção de mapa de uso e ocupação urbano do Distrito Federal, permitindo analisar vários serviços ecossistêmicos urbanos associados com os UST's.

Uma prática fundamental para subsidiar o planejamento de ocupação de novas áreas urbanas é a modelagem e simulação hidrológica de diferentes cenários da área, podendo abranger soluções sustentáveis de drenagem, a fim de estabelecer valores de deflúvios que servirão para a regulamentação da execução de ações baseadas em escolhas mais adequadas, objetivando harmonizar o desenvolvimento espacial com a infraestrutura existente (Riguetto, 2009).

O SWMM é um modelo hidrológico-hidráulico utilizado principalmente para simulações em áreas urbanas, ou seja, permite a análise do comportamento de uma bacia hidrográfica

urbana. Também é possível simular a utilização de medidas compensatórias inseridas ao longo da área de drenagem. Uma interface do modelo SWMM é o programa PCSWMM, disponibilizado pela CHI Water.

Utilizando o programa PCSWMM, a proposta deste trabalho foi realizar a análise de dois padrões de ocupação urbana residenciais do Distrito Federal que apresentam mesma densidade populacional e diferentes taxas de ocupação, com tipos de edificações e arranjos das áreas permeáveis e impermeáveis de maneira diferenciada. Utilizando duas UST's propostas por Castro (2017), variando o tipo de solo e selecionando o tipo de topografia planar de média declividade, presente na região administrativa de Vicente Pires, foi possível analisar qual o efeito dos padrões de urbanização sobre a geração de escoamento superficial e infiltração, dentro do manejo das águas pluviais. Também foi realizada a utilização de técnicas compensatórias, a partir da elaboração de cenários, para reduzir o escoamento superficial.

Este trabalho apresenta no Capítulo 2 os objetivos de estudo; no Capítulo 3 a fundamentação teórica e revisão bibliográfica; no Capítulo 4 a metodologia do estudo; no Capítulo 5 os resultados obtidos e discussões; e no Capítulo 6 é apresentado as considerações finais e recomendações.

## **2. OBJETIVO**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral deste estudo foi avaliar o impacto de dois padrões de ocupação urbana, RH5 (Residencial Unifamiliar de média taxa de ocupação) e RB2 (Residencial Multifamiliar de baixa taxa de ocupação), associados ao tipo do solo e geomorfologia característica do Distrito Federal, na geração de escoamento superficial e na taxa de infiltração, por meio de simulações hidrológicas no modelo SWMM.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Este estudo teve como objetivos específicos:

- Avaliar a influência do tipo do solo e geomorfologia na geração de escoamento superficial para os padrões de ocupação urbana estudados, considerando as características intrínsecas de cada padrões.
- Verificar o efeito de alocar medidas de controle sensíveis às águas pluviais selecionadas como as mais adequadas para compor o sistema de drenagem sustentável das bacias, levando em consideração as características das UST's, a geomorfologia e o tipo do solo.

### **3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Nesse capítulo será abordado assuntos relevantes para o entendimento do trabalho, por meio de revisão bibliográfica e fundamentação teórica. As sessões 3.1 e 3.2 discutem sobre a urbanização de bacias hidrográficas e a compreensão da dinâmica urbana; a sessão 3.3 aborda os três fatores que influenciam a geração de escoamento superficial em áreas urbanas, a morfologia urbana, tipo de solo e características geomorfológicas; a sessão 3.4 traz a discussão sobre as medidas de controle sensíveis às águas pluviais e a sessão 3.6 aborda brevemente a importância da análise integrada dos serviços ecossistêmicos com os padrões urbanos.

#### **3.1. URBANIZAÇÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS**

Nos países em desenvolvimento, as problemáticas envolvidas com urbanização na escala de bacia hidrográfica estão relacionadas às grandes concentrações populacionais em pequenas áreas, ao aumento da periferia das cidades de forma descontrolada e em zonas de várzeas e à existência das cidades formal e informal (Tucci, 2005).

Nas áreas urbanas a infiltração natural é significativamente reduzida, devido principalmente ao selamento por superfícies impermeáveis, à compactação do solo e à redução da cobertura vegetal arbórea (Seraphim, 2018). Esses efeitos da urbanização, principalmente pela implantação de condomínios e assentamentos não planejados, afetam zonas de recarga de aquíferos e áreas de preservação permanente (Castro, 2017).

O ciclo hidrológico pode sofrer diversas alterações decorrentes da crescente urbanização sem planejamento, como por exemplo, diminuição da evapotranspiração, devido à retirada da cobertura vegetal; diminuição da infiltração da água, com a crescente impermeabilização e compactação do solo; aumento da quantidade de água que escoar; mudanças no nível de água subterrânea; maior erosão do solo; aumento da ocorrência de enchentes; poluição das águas superficiais e subterrâneas (Santos e Santos, 2013).

À medida que a cidade se urbaniza, ocorrem variações no balanço hídrico na bacia hidrográfica devido principalmente à impermeabilização de superfícies pelos telhados, ruas, calçadas, pátios, entre outros. A parcela de água que infiltrava e escoava lentamente pelo

solo, antes da urbanização, passa a escoar pelos canais e condutos artificiais de drenagem, exigindo maior capacidade de escoamento das seções, aumento da eficiência hidráulica e velocidade de escoamento. Dessa forma, a parcela excedente de escoamento superficial ocasiona uma redução do tempo de concentração da água na bacia e o aumento do pico de vazão, como representado pela Figura 3.1 (Tucci, 2005).

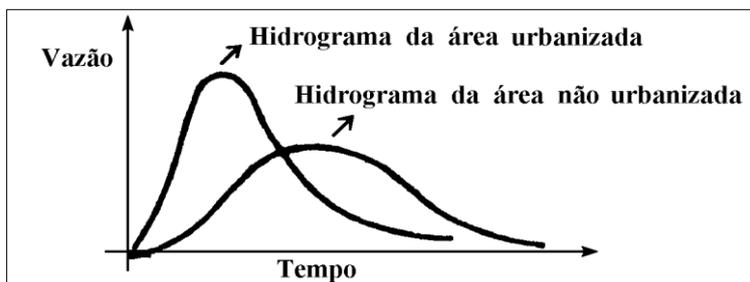


Figura 3.1 - Efeito sobre o comportamento do escoamento superficial na bacia hidrográfica após a urbanização (Tucci, 2007).

Além da impermeabilização do solo, outro efeito da urbanização que também contribui para o aumento do escoamento superficial é a redução de cobertura vegetal. A retirada da vegetação leva à diminuição da permeabilidade do solo, à diminuição da evapotranspiração, podendo causar alterações no clima, e aumento do escoamento superficial (Seraphim, 2018).

Segundo Tucci (2008), o sistema de drenagem urbana do Brasil apresenta uma visão higienista, na qual as águas pluviais são afastadas para jusante das cidades com a construção de canalizações para o escoamento. Como consequência, há grandes impactos nas fontes de água e maior ocorrência de inundações. A fase corretiva das águas urbanas, a qual dá preferência para amortecimento do escoamento, vem ganhando destaque, mas ainda deficiente.

Andrade (2014) ressalta que o Programa Drenagem Urbana Sustentável do Ministério das Cidades engloba a modernização das soluções técnicas de drenagem, envolvendo atividades de microdrenagem e macrodrenagem, a jusante e a montante, de modo a promover o escoamento regular das águas pluviais e prevenção de inundações locais, proporcionando segurança sanitária, patrimonial e ambiental. Porém, essas técnicas, muitas vezes ainda com uma mentalidade higienista, não estão associadas aos sistemas ecológicos e nem ao desenho urbano.

### **3.2. COMPREENSÃO DA DINÂMICA URBANA**

Conforme disposto na Lei Federal 10.257/01 - Estatuto das Cidades, que regulamenta o uso da propriedade urbana para o bem coletivo e para o equilíbrio ambiental, os instrumentos da Política Urbana são compostos pelas Leis de Uso e Ocupação do Solo (LUOS), Plano Diretor de Ordenamento Territorial (PDOT), Zoneamento Econômico Ecológico (ZEE), Leis de Parcelamento do Solo e Permeabilidade (Brasil, 2001).

Na escala local das cidades as Leis de Uso e Ocupação do Solo lançam diretrizes de projeto com foco nas dimensões funcionais e econômicas, não dando devida atenção a outras expectativas sociais, tais como ecológicas, bioclimáticas, afetivas, sociológicas, expressivas, estéticas e simbólicas. O resultado são ações distantes do desenho urbano sensível à água e falta de unidade nas ações, não gerando uma totalidade do sistema urbano (Andrade, 2014).

No Distrito Federal o Plano Diretor de Ordenamento Territorial (PDOT) define o uso e ocupação do solo, o qual divide a área urbana em macrozonas com limites legais do que é permitido ser feito em cada uma delas (Figura 3.2). Essas macrozonas foram construídas sob o olhar de mapas de uso e ocupação tradicionais, ou seja, apresentam um olhar do território de maneira geral e muito ampla sem considerar diferentes características que compõe cada classe, limitando a potencialidade de utilização desse dado e impossibilitando a captura do arranjo e dinâmica das diferentes áreas urbanas. O primeiro passo para se buscar soluções para os problemas urbanísticos e ambientais é entender a dinâmica e estrutura do espaço (Castro, 2017).

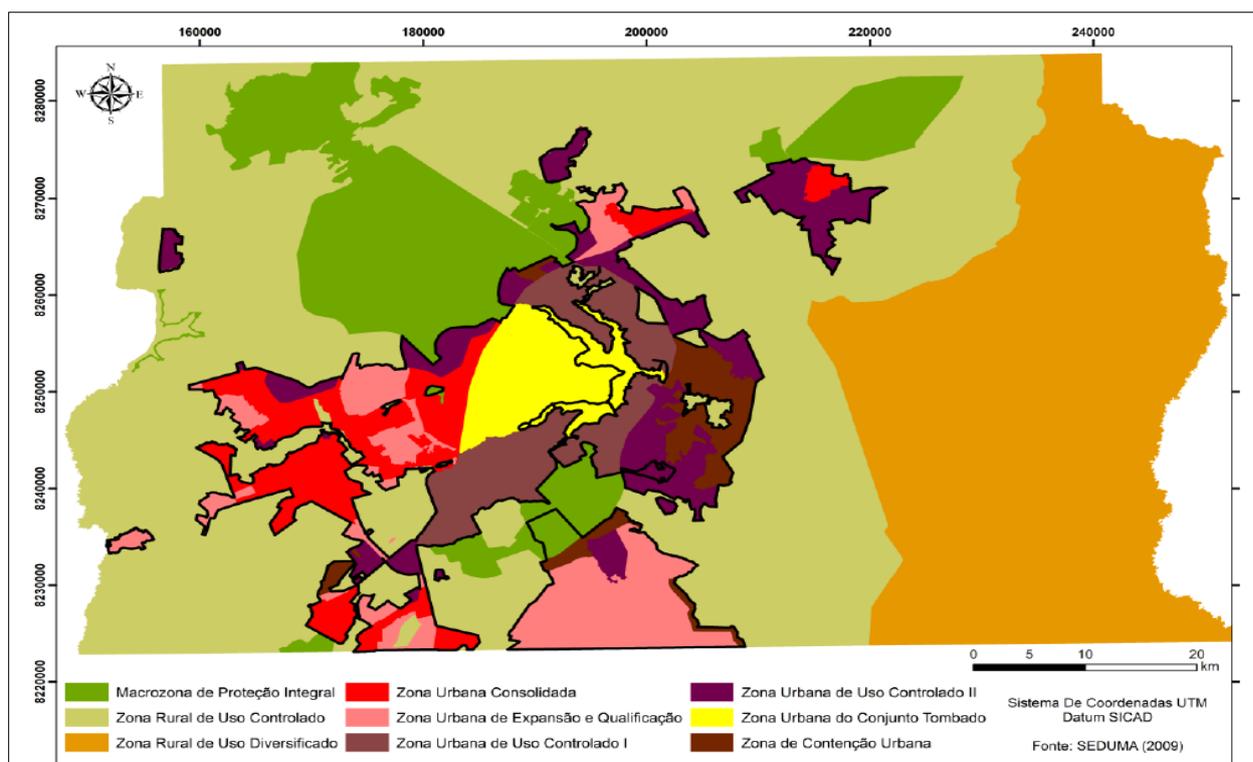


Figura 3.2 - Macrozonas do Plano Diretor de Ordenamento Territorial (PDOT) do DF (Castro, 2017).

Segundo Castro (2017), os instrumentos de gestão territorial e ambiental como o PDOT e o ZEE não têm apresentado eficácia nas suas diretrizes de planejamento, pois estão sempre um passo atrás da realidade local. Dessa forma, esses instrumentos têm apresentado falhas no retrato da dinâmica e da funcionalidade urbana e sua relação com as condições ambientais vigentes, dificultando um adequado planejamento do território. Além disso, o entendimento estrutural/funcional da trama urbana é muito importante para ampliar a análise de uma forma ecossistêmica.

Novas compreensões para abordar o mapeamento dos padrões urbanos vêm sendo estudados, buscando uma sinergia entre os tomadores de decisão nas várias esferas governamentais, a partir do uso da morfologia urbana. Um instrumento utilizado é o denominado *Urban Structure Type* – UST que é uma análise do arranjo dos elementos que compõem a cidade, agregando objetos únicos em um nível de bairro, fornecendo informações para essa agregação, como por exemplo, na quantidade e no tipo de espaços verdes, grau de impermeabilidade, tipo de construção e uso do solo (Castro, 2017).

O processo de expansão das cidades, ou seja, o desenvolvimento suburbano e das morfologias urbanas está relacionado com a dinâmica da interação espacial e o aumento do uso do solo, de modo que o transporte para acessar as diversas áreas é um importante instrumento que permite a aglomeração econômica no espaço de forma organizada (Bessusi *et al.* 2010)

A maior parte dos conhecimentos sobre a dinâmica urbana tem sido especulativa e não rigorosa, devido à ausência de dados ao longo do tempo, e por isso muitas pesquisas têm focado em explicar as estruturas e formas urbanas em um único ponto no tempo, como se estivessem em equilíbrio perpétuo. Apesar disso, novas tecnologias como o sensoriamento remoto têm contribuído com dados diários, conseguindo dar boas medidas da morfologia urbana, e como consequência controlar e gerenciar a expansão em vez de simplesmente se preocupar com o arranjo espacial do crescimento (Bessusi *et al.* 2010;).

Segundo Besussi *et al.* (2010), o Projeto SCATTER (*Sprawling Cities And Transport from Evaluation to Recommendations*), uma pesquisa patrocinada pela Comissão Europeia, é baseada em interpretações de imagens do satélite Landsat e SPOT. Seu objetivo é analisar e mensurar quantitativamente a expansão urbana do ponto de partida da interação entre infraestrutura, pessoas e economia, em que a infraestrutura de transporte é a mais importante para reforçá-la ou restringi-la. Comprova-se que o uso de sensoriamento remoto é fundamental para o entendimento da dinâmica urbana e para estudos mais profundos sobre morfologia urbana.

Galster *et al.* (2001) *apud* Besussi *et al.* (2010) apresentaram uma classificação das formas urbanas associadas ao tipo de expansão urbana. Foram propostos os tipos de expansão considerando configurações físicas e a densidade urbana e classificaram-se os padrões de expansão urbana de acordo com oito componentes: densidade, continuidade, concentração, centralidade, aglomeração, nuclearidade, uso misto do solo e proximidade. Foi demonstrado que essas medidas são úteis para identificar os principais aspectos de expansão. Na Figura 3.3 são apresentados os padrões de expansão urbana.

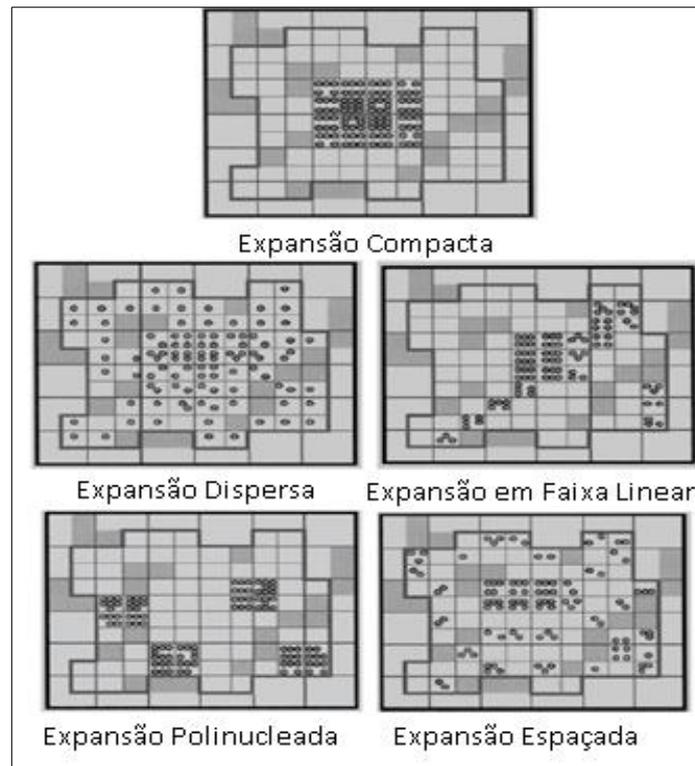


Figura 3.3 - Padrões de expansão urbana (Galster et al., 2001 *apud* Bessusi *et al.*, 2010, Adaptado).

### 3.3. FATORES QUE INFLUENCIAM NO ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM BACIAS URBANAS

A próxima seção do capítulo irá discutir fatores que influenciam na geração de escoamento superficial em bacias urbanas, os quais são a morfologia urbana, tipo do solo e características geomorfológicas.

#### 3.3.1. Morfologia Urbana

O desenho urbano convencional permitiu a implantação de sistemas urbanos não adequados, onde os conceitos urbanísticos, hidrológicos e ambientais são desarticulados ou desconsiderados durante o processo de planejamento (Andrade, 2014). Em diferentes países existe um novo olhar quanto ao desenho urbano, para a possibilidade das cidades serem construídas e adaptadas para funcionar em conjunto com a vertente ambiental, mitigando possíveis impactos, principalmente os que afetam o ciclo da água em bacias urbanas.

As formas urbanas são manifestações físicas de um contexto cultural específico. Morfologia urbana é o estudo do meio físico da forma urbana, dos processos e das pessoas que o

formataram. Esse estudo é um importante instrumento para a compreensão da dinâmica urbana e para o planejamento das cidades para futuras intervenções, considerando que permite detectar princípios, regras e tipos característicos do traçado urbano. (Rego e Meneghetti, 2011).

Seraphim (2018) aborda os elementos do desenho urbano que influenciam no desempenho hidrológico do local e no potencial de infiltração da água no solo, sendo: áreas de preservação, espaços livres de uso público, lotes ou estrutura fundiária e redes viárias. A urbanização que garanta a integridade dos sistemas naturais é importante para preservar os canais naturais de drenagem com suas áreas de amortecimento desocupadas, assim como para manter a função das zonas úmidas naturais e dos solos de alta permeabilidade e capacidade de armazenamento. Para Andrade (2014), o desenho das vias, feitas para atender à mobilidade de pedestres e o tráfego de veículos, também tem um papel fundamental e estratégico na drenagem urbana, influenciando no total de áreas impermeáveis e o planejamento hidrológico do local.

Castro (2017) apresenta uma nova metodologia para a construção de mapa de uso e ocupação urbano do Distrito Federal por meio do mapeamento de tipos de estruturas urbanas (UST), onde se busca compreender as relações espaciais entre os elementos urbanos. A proposta foi desenvolvida no intuito de integrar diversas informações para um estudo mais acurado da área urbana, se comparado ao mapeamento do PDOT-DF, de modo que vem sendo utilizada por alguns órgãos como SEMA, SEGETH e CODEPLAN e sendo pensado como uma unidade de análise socioeconômica em detrimento do setor censitário utilizado pelo IBGE.

O uso de tipo de estruturas urbanas - UST, como unidade de análise espacial, define e descreve aparências homogêneas de regiões espaciais que podem compreender tipologias de construções variadas. As classificações das UST's são obtidas em imagens orbitais, ortofotos, utilizando o sensoriamento remoto de maneira manual ou automatizada (Moon *et al.*, 2009).

O mapeamento de tipos de estruturas urbanas por Castro (2017) compartimentou o DF em cinco classes principais, 12 subclasses e 25 padrões UST, como apresentado na Figura 3.4. As classes principais, primeiro nível de classificação, foram agrupadas em Áreas Abertas, Áreas de Uso Comum, Áreas de Comércio e Indústria, Áreas Residenciais e Áreas em Consolidação. O segundo nível, as subclasses, correspondeu ao tipo mais específico de funcionalidade e o último nível de hierarquização, os padrões UST, foi definido de forma

qualitativa, considerando regiões espacialmente “homogêneas” em termos da composição e arranjo dos tipos de elementos básicos de análise.

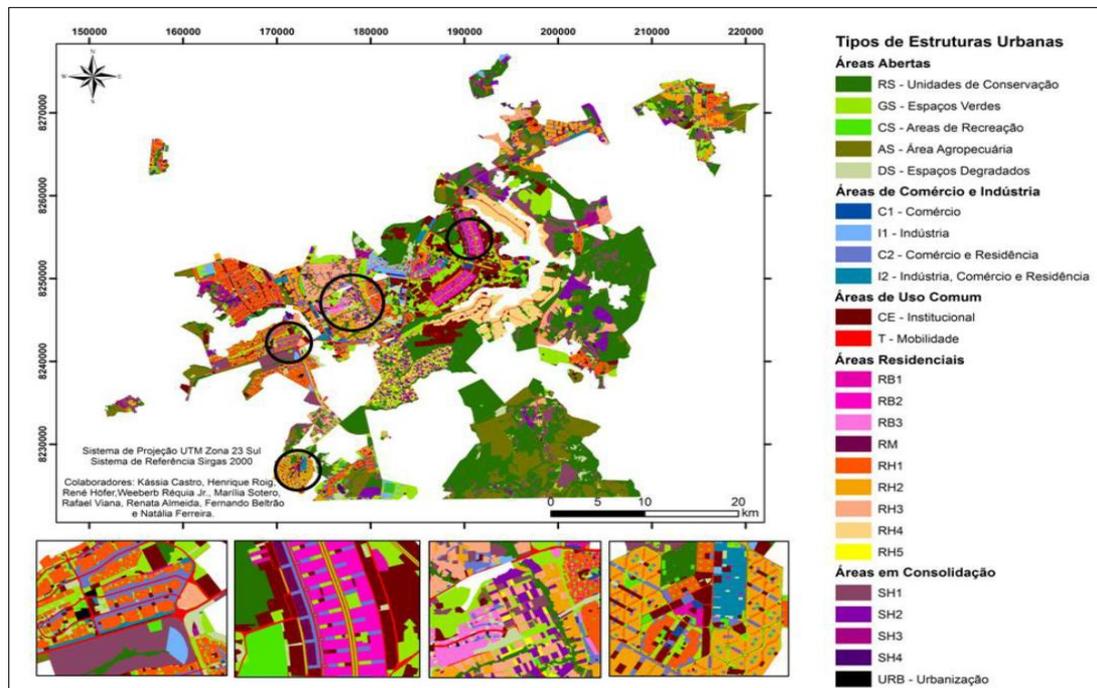


Figura 3.4 - Mapa de Tipos de Estruturas Urbanas do Distrito Federal (Castro, 2017).

Para a separação dos tipos de estruturas urbanas nas classes foram consideradas diversas características, algumas principais são: tamanho do lote, taxa de ocupação (taxa de área construída), padrão construtivo (tipo da superfície de cobertura telhado) e quantidade de área verde. Foram constatadas que as estruturas com as mais altas taxas de área impermeável são RH1 (94%), SH3 (80%), Comércio (C1 - 71%), Comércio Misto (C2 - 71%) e SH4 (65%) (Figura 3.5). A estrutura RH1 possui a situação mais crítica, sendo que quase 95% de sua área está impermeabilizada e esta possui umas das maiores áreas no DF com aproximadamente 50% da população do DF residindo nesse tipo de estrutura (Castro, 2017).

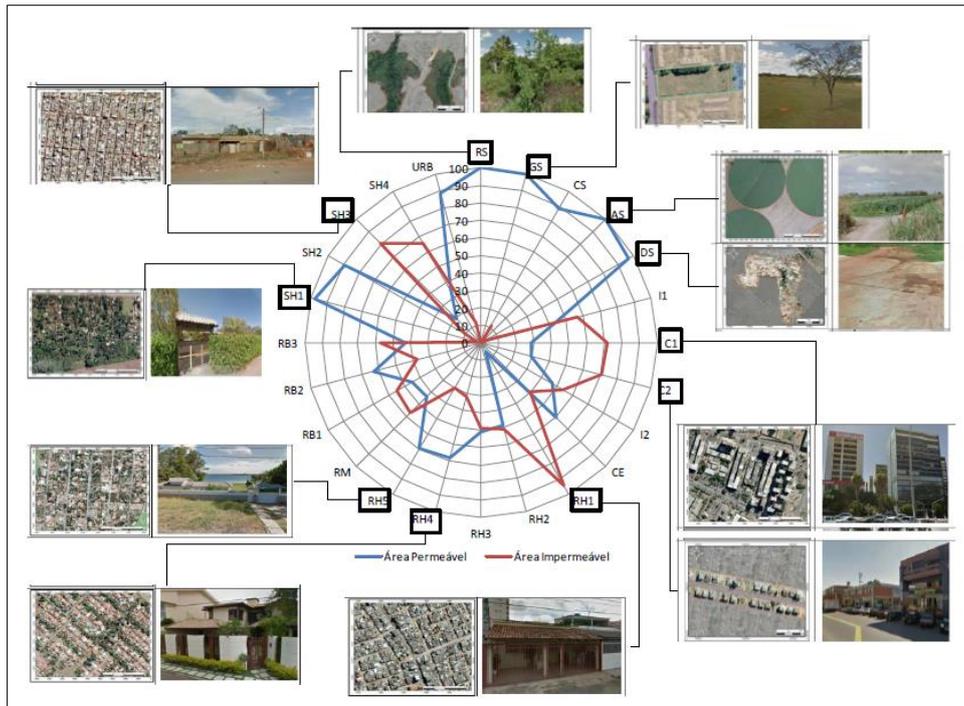


Figura 3.5 - Porcentagem em área permeável e impermeável quantificada por tipo de estrutura urbana (Castro, 2017).

A impermeabilização do solo urbano não está associada apenas a áreas cobertas por superfícies impermeáveis stricto sensu, também depende do grau de compactação do solo e seu desmatamento. Para o estudo de superfícies impermeáveis, são importantes os detalhes sobre a distribuição, extensão, conexão e localização, já que existem variações no comportamento hidrológico para diferentes áreas urbanas. Uma maneira para fazer essa análise é a separação das superfícies impermeáveis em direta e indireta, onde as diretas são diretamente conectadas com a rede de drenagem construída e a área impermeabilizada indireta é aquela que escorre em direção às superfícies permeáveis ou semipermeáveis (Seraphim, 2018).

A morfologia urbana e suas características levam a alterações no ambiente que vão além da impermeabilização do solo, como a mudança térmica e luminosa. Rocha *et al.* (2011), afirmam que existe uma diferença significativa entre as áreas com maior e menor densidade de edificações, em relação à diferenciação térmica devido à constante da radiação solar agindo sobre a camada urbana. O incremento da taxa de ocupação dos terrenos, do índice de aproveitamento e das alturas máximas permitidas, estabelece novas relações de luz e sombra, reordenando as áreas livres e modificando a paisagem, o que pode levar ao desconforto dos moradores.

O estudo de Araújo e Caram (2006) propôs uma análise ambiental bioclimática em uma área urbana de centro histórico, em que considerou um sistema de classificação em relação à sua topografia, ao uso do solo, áreas verdes e à altura dada às edificações, seguido por uma descrição quantitativa do espaço. Foi constatado que a não diversidade de altura das edificações, ruas estreitas e a falta de recuos laterais e frontais das edificações impedem a boa circulação das massas de ar nos centros urbanos.

As duas vertentes de planejamento e desenho urbano são aquelas que têm ênfase em padrões espaciais desenhados em função da paisagem e em função da cidade como habitat humano. Enquanto a primeira foca no modo disperso com baixas densidades e grandes áreas verdes, a segunda é baseada nos padrões espaciais emergentes de forma mais compacta, densidades mais altas de edificações e atividades diversas, e menos áreas verdes. No âmbito do planejamento ambiental das cidades, principalmente na drenagem urbana, o pensamento dominante tem sido a favor de ocupação urbana de densidades mais baixas, o que acaba incentivando o processo de suburbanização (Andrade, 2014).

O modelo de cidade compacta otimiza o uso do espaço, com uso racional de zonas naturais e possui transporte público eficiente, além de reduzir consumo de energia e nível de poluição, o que proporciona mecanismos de regulação e controle, dando estabilidade ao sistema (Rueda, 2000 *apud* Andrade, 2014). Por outro lado, a concentração de pessoas em áreas urbanas altera drasticamente fluxos de água, sedimentos, substâncias químicas e microrganismos, e aumenta a emissão de calor residual (Andrade, 2014).

Seraphim (2018) fez um estudo de tipologias urbanas de densidade construtiva homogênea, da unidade hidrológica do Lago Paranoá no Distrito Federal, e as classifica em cinco zonas de graus de impermeabilização relativos, representadas na Figura 3.7. Foram considerados parâmetros urbanísticos relacionados com a infiltração da água, como o percentual ocupado pelo sistema viário e pelas áreas públicas, e o tamanho/taxa de ocupação dos lotes (Figura 3.6). A coleta dos dados para os critérios de análise foi feita por meio de sistema de informações georreferenciadas, utilizando o programa Arcgis.

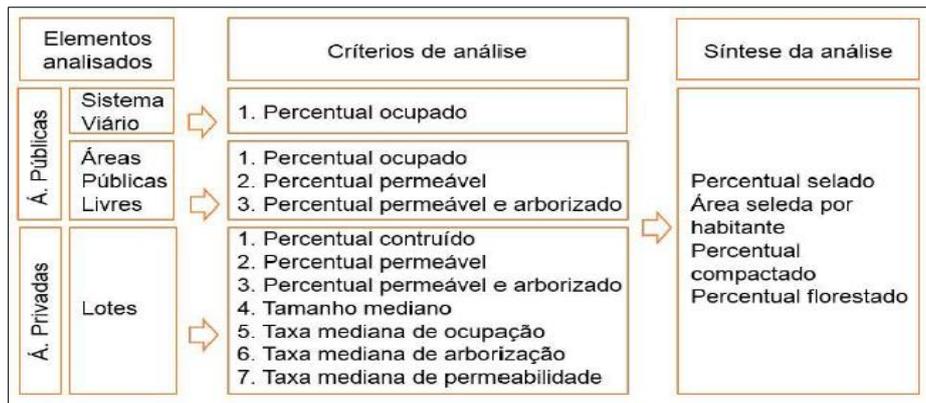


Figura 3.6 - Elementos e critrios de anlise das tipologias urbanas identificadas na UH do Paranoa (Seraphim, 2018).

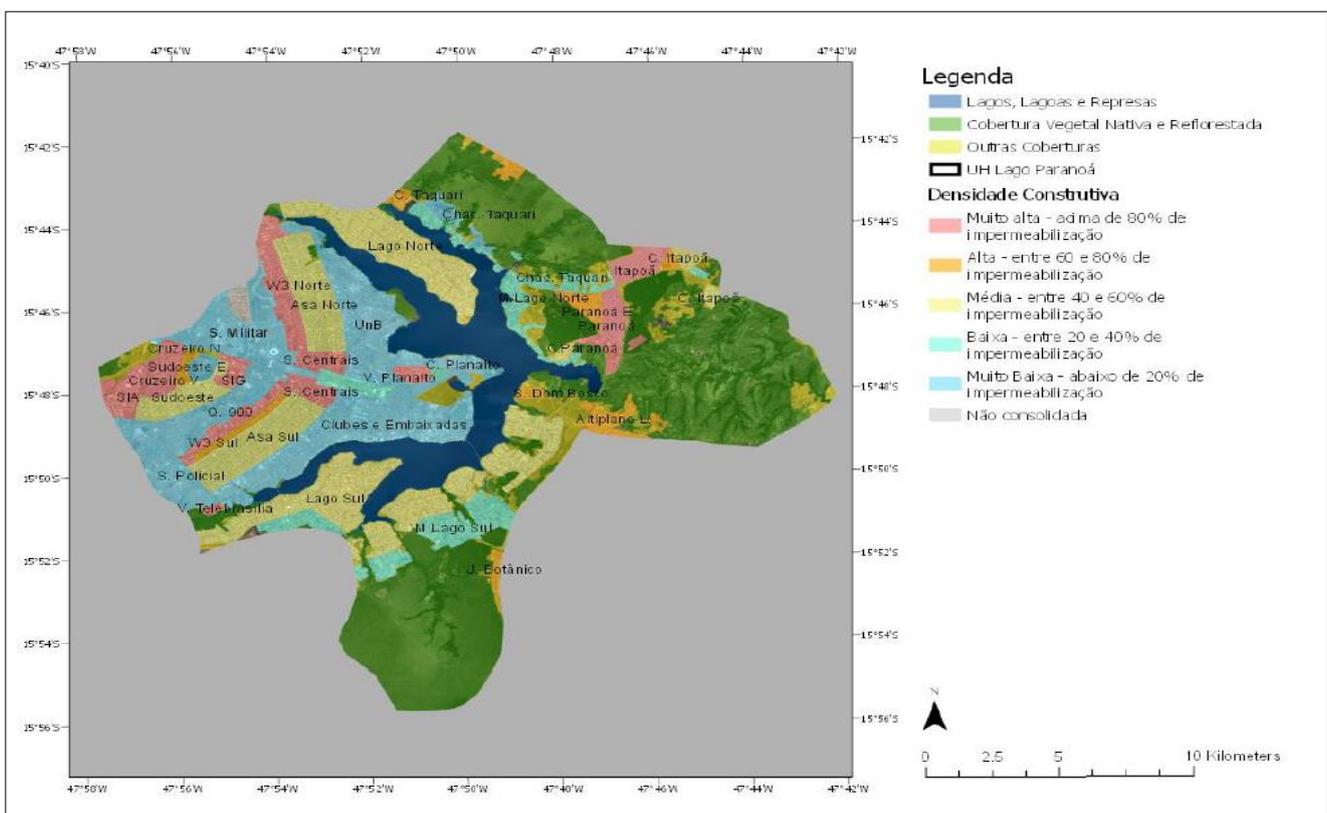


Figura 3.7 - Distribuio das zonas homogneas de densidade construtiva na UH do Lago Paranoa (Seraphim, 2018).

A anlise de Seraphim (2018) demonstrou que as duas zonas de maior extenso na UH Lago Paranoa so as de muita baixa e mdia densidade construtiva, dos quais 98,25% e 64,62%, respectivamente, se encontram sobre reas de alto e muito alto potencial de recarga de aqufero. Mesmo sendo de baixa e mdia densidade, essas reas causam impacto significativo sobre o escoamento superficial e infiltrao da gua no solo, pois c comum no haver preocupao em minimizar a perturbao do solo e direcionar o escoamento para reas permeveis com o auxlio de tcnicas de drenagem sustentvel.

### 3.3.2. Tipo do Solo

No Distrito Federal, os tipos de solos mais representativos são os Latossolos Vermelhos ocupando 38,92% da área territorial, os Latossolos Vermelho-Amarelos ocupando 15,58% e os Cambissolos Háplicos com 31%. No total os Latossolos abrangem 54,5% do solo presente do Distrito Federal. Há ainda outros tipos de solo de ocorrência mais restrita, tais como, Neossolos Quartzarênicos, Argissolos, Nitossolos, Chernossolos Plintossolos, Gleissolos e Neossolos Flúvicos (Reatto *et al.*, 2004).

Os Latossolos apresentam baixo teor de silte (entre 10 a 20%) e argila (entre 15% e 80%), podendo ser excessivamente drenado, fortemente drenado e acentuadamente drenado, de acordo com a natureza da textura, da estrutura e da situação topográfica (Reatto *et al.*, 2004). De forma geral, são solos porosos e permeáveis, também são pouco plásticos, possuindo resistência à compressão e aos processos erosivos, favorecendo a infiltração. Considerando essas características, os latossolos são favoráveis para diferentes tipos de uso urbano, como edificações de diferentes portes, subsolo e instalação de sistemas de saneamento *in situ*. Ao mesmo tempo, por possuírem os maiores valores de condutividade hidráulica vertical, apresentam as melhores condições para recarga natural e artificial (Seraphim, 2018).

Os Cambissolos Háplicos apresentam minerais primários facilmente intemperizáveis, teores elevados de silte e pequena profundidade, o que reduz significativamente a sua permeabilidade e conseqüente potencial de recarga de aquífero. Essas características favorecem o desenvolvimento de processo de erosão do solo e impõem obstáculos à mecanização. Sendo assim, o grupo dos Cambissolos deve ter prioridade para a preservação da cobertura vegetal natural, e em casos de ocupação urbana evitar a ocupação de alta densidade, dando preferência para padrões de chácaras ou mansões (Reatto *et al.*, 2004; Seraphim, 2018).

Os Neossolos Quartzarênicos, Nitossolos e Argissolos juntos ocupam 15% da área do DF. Segundo Seraphim (2018), o Neossolo Quartzarênico, diferente dos demais, possui alta condutividade hidráulica, contribuindo com a infiltração. Os Neossolos Flúvicos e os Gleissolos Háplicos possuem limitações à ocupação urbana semelhantes aos Cambissolos,

devido à sua sensibilidade a inundações e alta plasticidade, por isso devem ter destinação prioritária à preservação ambiental.

O método do Serviço e Conservação do Solo (SCS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América (USDA) enquadra o solo em quatro grandes grupos de acordo com sua capacidade de infiltração e produção de escoamento superficial. Cada grupo é representado por uma letra, A, B, C e D, indicando um acréscimo de escoamento superficial de um grupo para o outro, onde A possui maior taxa de infiltração e D menor taxa de infiltração (Sartori *et al.*, 2005).

Uma proposta de extensão para a classificação hidrológica do solo foi feita por Sartori *et al.* (2005), permitindo a análise entre os grupos de solos hidrológicos e os tipos de solos explicados anteriormente, conforme apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1- Enquadramento dos tipos de solos de acordo com os grupos hidrológico de solo propostos pelo SCS (Sartori *et al.*, 2005).

<b>Grupo de Solo Hidrológico</b>	<b>Tipo de Solo</b>
A	Latossolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Vermelho, com textura argilosa, Latossolo Vermelho-Amarelo com textura média e horizonte superficial não arenoso.
B	Latossolo Vermelho-Amarelo com textura média e horizonte superficial arenoso, Neossolo Quartzarênico, Argissolos Vermelho ou Vermelho e Amarelo de texturas diversas.
C	Argissolo de diversas texturas, Cambissolos de textura média, Cambissolo Háptico ou Húmico com características latossólicas, Espodossolos e Neossolos Flúvicos.
D	Gleissolos, Chernossolos, Argissolos com mudança estrutural abrupta, Cambissolos que não se enquadrem no grupo C.

### 3.3.3. Características Geomorfológicas

As formas do relevo são ditas como um forte fator controlador da drenagem e, conseqüentemente, da erosão. A declividade do solo, definido como plano tangente à

superfície, influencia diretamente na velocidade do fluido de água superficial e sub-superficial (Capoane *et al.*, 2015). A Embrapa (2006) classifica a declividade do solo da seguinte forma: até 3% relevo plano, entre 3 a 8% relevo suave ondulado, 8 a 20% ondulado, 20 a 45% relevo forte ondulado, entre 45 a 75% relevo montanhoso e maior que 75% relevo escarpado.

Segundo Capoane *et al.* (2015), o plano de curvatura do relevo pode ser convergente, divergente e planar, o que implica na acumulação da umidade e fluxo da água no terreno. Troch *et al.* (2003) investigou a influência de formas tridimensionais do relevo, planas e com perfis de curvatura, no escoamento superficial utilizando o modelo hidrológico de encostas de Boussinesq. Foi constatada uma drenagem mais lenta em superfícies convergentes, em comparação às superfícies divergentes, devido à diminuição do fluxo na saída da bacia (Figura 3.8). Os hidrogramas característicos de encostas convergentes durante a drenagem possuem forma típica de sino, em contraste, os hidrogramas das encostas divergentes mostram pico elevado com drenagem rápida.

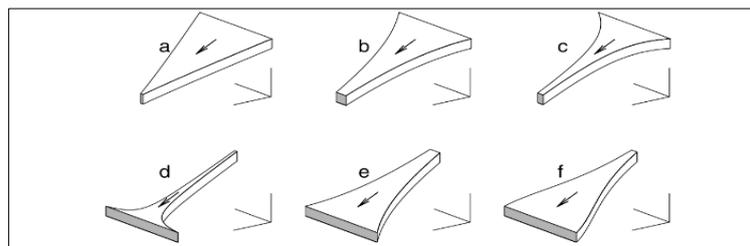


Figura 3.8 - Diferentes formas tridimensionais do relevo definidas como convergentes (“a”, “b” e “c”) e divergentes (“d”, “e” e “f”) (Troch *et al.*, 2003).

O perfil de curvatura, referente à curvatura da superfície na direção do declive, pode ser convexa, côncava ou retilínea. Tem importância na aceleração ou desaceleração do fluxo de água em uma encosta, implicando no comportamento da velocidade do escoamento superficial, na erosão, na propagação de sedimentos e em processos de inundação (Capoane *et al.*, 2015). Nas superfícies côncavas a declividade diminui na direção do aspecto (gradiente), já as superfícies convexas são aquelas em que a declividade aumenta na direção do aspecto e terrenos retos a declividade não se altera (Florinsky, 2000 *apud* Minella *et al.*, 2012). São atribuídos valores negativos para vertentes convexas e convergentes, valores positivos para vertentes côncavas e divergentes, e valores nulos às vertentes retilíneas e planas.

O estudo de Minella *et al.* (2012) propôs índices topográficos, obtidos pelo modelo numérico de elevação do terreno (MNE), para prever espacialmente zonas de acúmulo de umidade em uma bacia hidrográfica, em que levam em consideração efeitos de orientação de drenagem e declividade do terreno. Foi averiguado que a saturação da superfície do solo ocorre, em geral, nas áreas de convergência do relevo e próximas aos canais de drenagem. Também constatou que terrenos convexos têm maior suscetibilidade à desagregação e ao transporte de sedimentos, enquanto nas áreas de curvatura no perfil côncavo indica áreas preferencias de ocorrência de processos deposicionais. Beven (2012) propôs o modelo TOPMODEL distribuído espacialmente e baseia-se em pressupostos de que o gradiente hidráulico da zona saturada pode ser aproximado pelo declive topográfico de superfície do local.

### 3.4. MEDIDAS DE CONTROLE SENSÍVEIS ÀS ÁGUAS PLUVIAIS

As principais condicionantes urbanas que definem as características do projeto de implantação das medidas de controle são a presença de espaços apropriados e impermeabilização futura. O pré-dimensionamento do volume e da área a ser ocupada pelas MC's, considerando cenários futuros de urbanização e de impermeabilização, é antecedente à escolha do espaço mais propício. Outro fator importante é levar em conta os padrões geomorfológicos do solo, como por exemplo, área plana requer uma abordagem distinta do tratamento dado a uma área com declividades acentuada para reduzir riscos de alagamento (Adasa, 2018). De modo geral, a meta da utilização de medidas de controle é alcançar a vazão de restrição de escoamento superficial, definida pelo hidrograma de pré urbanização, como mostrado na Figura 3.9.

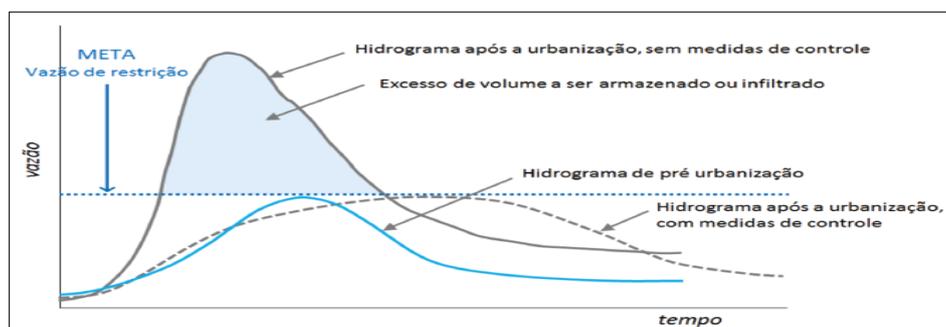


Figura 3.9 - Hidrogramas de pré urbanização, pós-urbanização e pós a urbanização com medidas de controle (Adasa, 2018).

As medidas estruturais convencionais de drenagem podem criar uma falsa sensação de segurança, permitindo a expansão urbana em áreas que deveriam ser preservadas para manter sua função hidrológica de infiltração e evitar enchentes (Tucci, 2005). Nesse sentido, com o intuito de buscar um desenho urbano mais seguro e de menor impacto à infiltração natural, nas últimas décadas, diversos países criaram manuais e documentos com a abordagem de medidas de controle (MC's) sensíveis às águas pluviais nas cidades.

O *Water Sensitive Urban Design* (WSUD) é um programa do governo australiano que busca a integração do fluxo de recursos da água ao planejamento e desenho urbano (Andrade, 2014). É uma abordagem holística englobando a minimização das superfícies impermeáveis, maximização de reutilização da água, diminuição de consumo, redução do despejo de esgoto e águas de drenagem em corpos hídricos e incorporação de técnicas que simulem sistemas naturais. Deste modo, esse sistema inclui questões tanto de quantidade como de qualidade das águas urbanas (WCC, 2013).

O Sustainable Drainage Systems (SuDs) é uma abordagem inglesa de sistemas construídos para maximizar os benefícios do manejo de águas pluviais, baseados em um manejo e uso das águas pluviais com incorporação da vegetação próximos do local onde ocorre a precipitação. Os principais benefícios estão associados à qualidade da água, à quantidade da água, manutenção da biodiversidade e criação de ambientes melhores para as pessoas viverem. Além disso, o design dos SuDs leva em consideração as características espaciais urbanas (Woods Ballard *et al.*, 2015).

Na década de 80 a Agência de Proteção Ambiental Americana – US-EPA criou o *Low Impact Development* (LID) como estratégia de manejo de águas pluviais, integrando o planejamento do desenho urbano com práticas de retenção, infiltração e tratamento da água em escalas pequenas, e aproveitando propriedades características do solo e da vegetação.

### **3.4.1. Medidas de Controle na Fonte**

As medidas de controle na fonte podem ser implantadas em lote privado e em áreas públicas com edificações, praças, pátios e vias públicas, com o objetivo de compensar o excedente de escoamento superficial causado pela impermeabilização. Para realizar esse controle são usados dispositivos de infiltração e/ou armazenamento (retenção) temporário das águas

precipitadas, visando o rearranjo da vazão e do volume de escoamento superficial. Essas técnicas também podem ser classificadas quanto às características geométricas, podendo ser, pontual ou linear (Figura 3.10) (Adasa, 2018; Baptista *et al.*, 2005).

Dispositivo	Processo de abatimento de vazão		Características geométricas	
	Por Infiltração*	Por Armazenamento	Linear	Localizada ou pontual
Pavimento permeável	●	●		●
Trincheira de infiltração	●	●	●	
Vala de infiltração	●		●	
Poço de Infiltração	●	●		●
Microrreservatório		●		●
Telhado reservatório		●		●
Reservatório de detenção aberto	●	●		●
Reservatório de retenção aberto	●	●		●
Reservatório subterrâneo pontual		●		●
Reservatórios subterrâneo linear		●	●	
Faixa gramada	●		●	

\* No DF, a utilização de medidas de controle que promovam a infiltração deve ser feita com cuidado, devido a ocorrência de solos colapsíveis, sujeitos ao fenômeno do piping. O projeto de MCs por infiltração deve ser precedido de ensaios de colapsividade conforme especificados na NBR 14.114 - Solos argilosos dispersivos - identificação e classificação por meio do ensaio do furo de agulha (Pinhole test). Caso se constate suscetibilidade à colapsividade, a solução por infiltração deve ser abandonada.

Figura 3.10 - Caracterização dos dispositivos de controle na fonte (Adasa, 2018).

As bacias de detenção, em contexto urbano, são amplamente usadas no Brasil principalmente para a função de amortecimento de cheias. Outras funções das bacias de detenção são a redução de volume de escoamento superficial para os casos de bacias com estrutura para infiltração, e como objetivo complementar, diminuir a poluição difusa de origem pluvial. Por outro lado, o objetivo principal das bacias de retenção é fazer a decantação de partículas sólidas e, como consequência a remoção de cargas poluentes presentes (Baptista *et al.*, 2005).

As trincheiras e valas de infiltração são lineares e bastantes versáteis, podendo ser usadas em canteiros centrais e passeio, ao longo do sistema viário, junto a estacionamentos, jardins e em áreas verdes no geral. Suas funções são recolher as águas pluviais de afluência perpendicular a seu comprimento e a evacuação da água captada. No caso das trincheiras de infiltração, a evacuação é feita por infiltração no solo através da base e paredes laterais, já nas valas de infiltração a evacuação pode ocorrer por infiltração ou por deságue no corpo receptor. Existem também as trincheiras de detenção, nas quais a evacuação é feita por descarga a

jusante ou por dispositivo de deságue com controle de vazão. A vantagem da trincheira de infiltração em relação a de detenção se dá pelo fato de conseguir diminuir os volumes de escoamento superficial, além do controle de vazão (Baptista *et al.*, 2005).

As trincheiras são constituídas por valetas preenchidas por material granular, em que a porosidade depende do material utilizado, e no fundo um filtro de areia ou geotêxtil equivalente. É importante que todo o material seja envolvido por um filtro geotêxtil para impedir a entrada de materiais finos no sistema e para evitar contaminação do solo (Souza, 2002). As valas não possuem material granular como as trincheiras e por isso possuem menor capacidade de infiltração. A Figura 3.11 apresenta uma trincheira de infiltração típica.

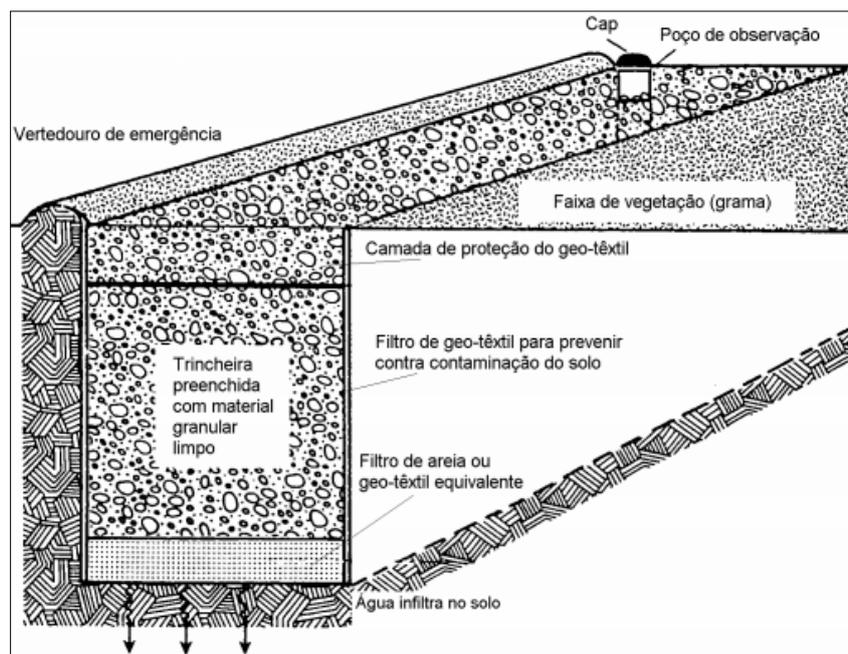


Figura 3.11. Trincheira de infiltração típica (Souza, 2002 apud Schueler, 1987).

A técnica de biorretenção em áreas úmidas, que visam imitar processos naturais (Ballard *et al.*, 2015), é uma importante medida de controle. É uma prática integrada que engloba propriedades químicas, biológicas e físicas de plantas e do solo, como o objetivo de transformar, remover ou reter poluentes do escoamento superficial de águas pluviais. As instalações de biorretenção são dimensionadas de acordo com o tratamento da qualidade da água pluvial e controle do fluxo da água desejado, podendo incluir específicas misturas de solo, grupos variados de plantas, sub-drenos e estruturas de controle. Os sub-drenos são

opcionais nos casos em que o fundo é aberto e permitem a infiltração da água para o subsolo (Hinman, 2012). A Figura 3.12 ilustra um sistema e a célula de biorretenção.

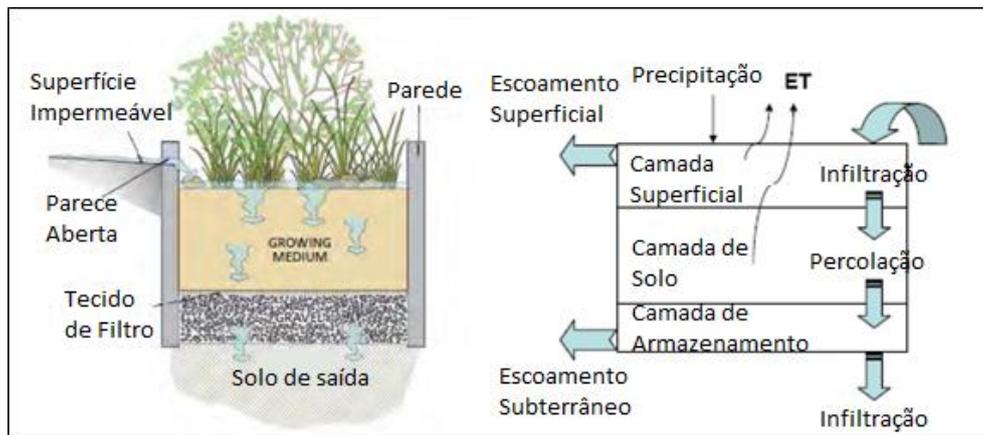


Figura 3.12 - Sistema e célula típica de biorretenção (Rossman e Huber, 2016, Adaptado).

### 3.5. MODELAGEM HIDROLÓGICA

Uma prática relevante para o planejamento da expansão urbana é a realização de simulações hidrológicas para a área pré e pós urbanizada podendo usar diferentes cenários, a fim de estabelecer valores de deflúvios que servirão para a regulamentação da execução de ações voltadas à drenagem da área. No geral, modelos computacionais são muito usados tanto para o planejamento, como para o dimensionamento e manutenção corretiva de projetos na gestão das águas pluviais (Riguetto, 2009).

Para fácil entendimento, Riguetto (2009) associa os modelos de drenagem com modelos tipo chuva-vazão e modelos de propagação de escoamentos (em canais ou galerias). Os modelos do tipo chuva-vazão simulam os processos de escoamento na bacia determinado pela precipitação, a interceptação, a infiltração, a evapotranspiração e a interação destes processos com a rede de drenagem de águas pluviais. Aliadas à modelagem, outras ferramentas, como o geoprocessamento, contribuem para a entrada de dados e representação espacial, facilitando a melhor visualização dos resultados.

Existem alguns modelos para estimar o escoamento superficial como, modelo de Horton, Green-Ampt e da Curva Número (CN). O modelo matemático Curva-número (CN), desenvolvido pelo Serviço de Conservação do Solo e Recursos Naturais dos Estados Unidos (SCS), estabelece diferentes valores tabelados para a curva média de infiltração da água (CN) que variam de 0 (solo muito permeável) até 100 (solo completamente impermeável) de

acordo com cenários de ocupação do solo. O SCS é um método experimental que possui limites no modelo, sendo importante conhecê-los para entender possíveis erros que podem ser obtidos. Esse método é utilizado para calcular a precipitação efetiva por meio da Equação 3.1, onde Q é a vazão de escoamento, P é a precipitação total e S é a capacidade de armazenamento do solo (USDA, 1986).

$$Q = \frac{(P - 0,2 * S)^2}{P + 0,8 * S}$$

(Equação 3.1)

O CN (Curva Número) é o principal parâmetro deste método, em que depende do tipo de superfície e uso do solo, e das condições antecedentes de umidade. A capacidade de armazenamento de água no solo é dada em função do CN (Equação 3.2) (USDA, 1986).

$$S = 25,4 * \left( \frac{100}{CN} - 10 \right)$$

(Equação 3.2)

### 3.5.1. Modelo SWMM

O *Storm Water Management Model* (Modelo de Gestão de Drenagem Urbana – SWMM) desenvolvido pela USEPA (*United States Environmental Protection Agency*) é um modelo dinâmico chuva-vazão que possibilita estudos quantitativos e qualitativos da água pluvial dentro de sub-bacias, com maior foco em centros urbanos. Com a entrada de dados é possível simular e visualizar o comportamento hidrológico, hidráulico e a qualidade da água em diferentes formatos. (Righetto, 2009; Rossman, 2010).

Segundo Righetto (2009), o SWMM é formado por módulos, sendo o módulo de cálculo computacional o Runoff, referente à transformação de chuva em vazão, e o módulo de transporte hidráulico que simula o caminho da água pela rede de drenagem, segundo os conceitos da onda cinemática, como também, da onda dinâmica. O programa tem três possibilidades para modelos de infiltração: modelo de Horton, Green-Ampt ou da Curva Número (CN), adotado pelo *Soil Conservation Service* (SCS) para estimar o escoamento superficial. No presente estudo foi escolhido o modelo Curva Número.

A modelagem se inicia com a criação dos diversos objetos da área de estudo no SWMM e inserção das propriedades destes objetos (Rossman, 2010) A variabilidade espacial é obtida dividindo-se a área de estudo em áreas menores e espacialmente homogêneas, denominadas sub-bacias. Os dados de entrada para funcionamento do modelo são: precipitação pluviométrica; áreas de contribuição: declividade média, área e percentual permeável do solo etc.; poços de visita: cotas, profundidade, entre outros; tubulações: seção, diâmetro, comprimento e outros mais; nível do lençol freático, etc (Righetto, 2009).

O software SWMM apresenta interface com o uso de LID's (*Low Impact Development*), de modo a permitir a comparação de sistemas com e sem implantação de medidas de redução de impacto, como mostrado na Figura 3.13.

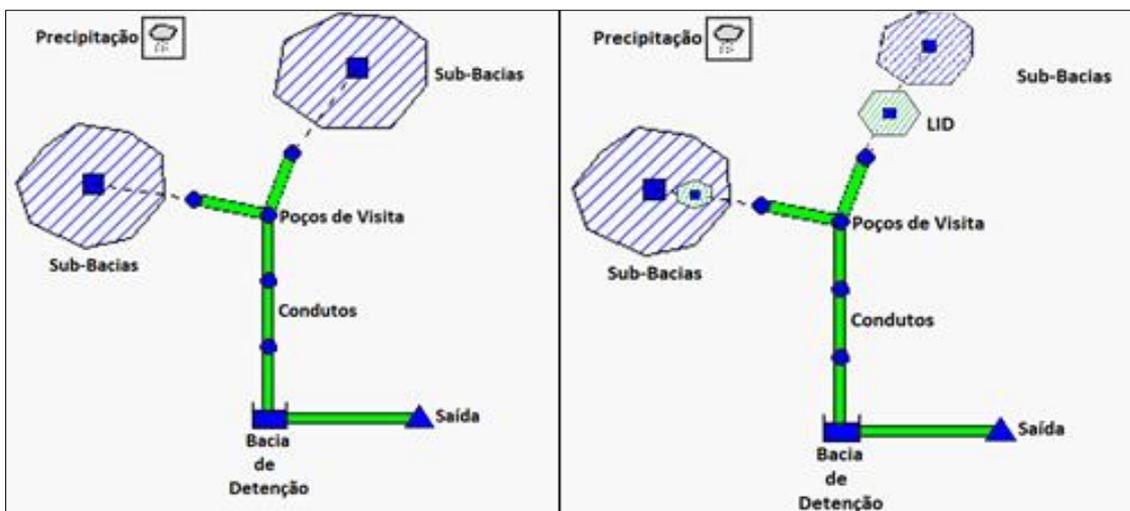


Figura 3.13 - Comparação de sistemas com implantação de LID e sem implantação de LID (Brito, 2019).

### 3.6. SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS URBANOS

Os benefícios providos dos ecossistemas à própria natureza e à população humana são conhecidos hoje como serviços ecossistêmicos urbanos (SEUrb). A análise integrada dos serviços ecossistêmicos com os padrões urbanos possibilita ter uma visão mais clara de como a dinâmica urbana impacta o meio em que está inserida e assim, identificar e mitigar os principais problemas para um planejamento e monitoramento desse espaço de modo mais eficiente (Castro, 2017).

O estudo de Castro (2017) verificou os padrões urbanos que têm ajudado na melhoria da qualidade de vida e o bem-estar humano, abordando diferentes serviços ecossistêmicos, de modo que a chave para entender os serviços está na capacidade de definir os limites e a escala da morfologia urbana. Todos os SEUrb analisados atuam na manutenção do ciclo hidrológico, porém todas as alterações na área urbana trazem consequências para o seu funcionamento.

Dentre os SEUrb abordados por Castro (2017), os que se destacam para o presente trabalho são o Serviço de Escoamento Superficial e o Potencial de Recarga de Aquífero, em que os indicadores usados foram taxa de escoamento superficial e taxa de recarga, respectivamente. Quanto ao Potencial de Prestação de Serviço Ecossistêmico Urbano (PSEU) de Escoamento Superficial, a UST Espaços Verdes (GS) apresentou a melhor situação, e a pior situação foi encontrada na UST Sistema Viário (T). Foi constatado que em relação às estruturas que compõem a área urbana consolidada, as UST's com maior PSEU são as classes RB2, SH1, RH5, SH2 e RH4, que são também as áreas com funcionalidade residencial que possuem as maiores taxas de área verde. As estruturas com menor PSEU são de modo geral, classes com altas taxas de impermeabilização. Também foi calculado o Índice do Potencial de Prestação de Serviços Ecossistêmicos Urbanos (IPSEU) nas áreas urbanas do DF, a partir da igual ponderação e integração dos PSEU. A Figura 3.14 mostra os valores médios do IPSEU por UST, em que as áreas com maior IPSEU coincidem com os espaços urbanos não impermeabilizados.

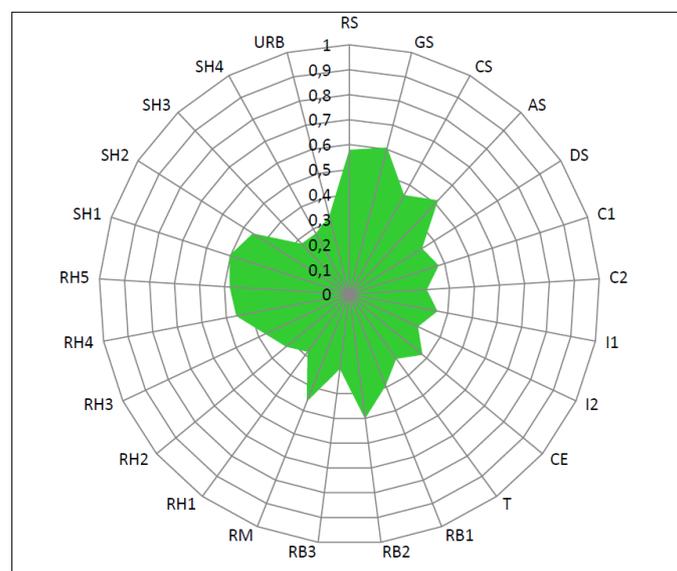


Figura 3.14 - Gráfico com valores médios do IPSEU por UST para o DF (Castro, 2017).

## 4. METODOLOGIA

Este capítulo aborda os aspectos metodológicos do trabalho a fim de chegar aos resultados esperados, conforme o fluxograma apresentado na Figura 4.1, na qual é apresentada cada etapa que leva à análise quantitativa do escoamento superficial e capacidade de infiltração nos respectivos arranjos escolhidos, os quais serão explicados nesse capítulo. Primeiramente os dados de entrada foram estudados e organizados em séries hidrológicas, uso e ocupação do solo, tipo do solo, geomorfologia e traçado de rede de drenagem. Em seguida os dados foram importados no modelo para obtenção dos hidrogramas. Neste capítulo é feita a caracterização das áreas de estudo, assim como a caracterização da simulação hidrológica.

Dentre as diferentes possibilidades de padrões de ocupação urbana do Distrito Federal, também chamadas de UST's, classificadas por Castro (2017), foram escolhidas para análise duas UST's residenciais, a UST RH5 e a UST RB2. A UST RH5 é uma padrão habitacional unifamiliar que se repete em algumas regiões administrativas do Distrito Federal e a UST RB2 é encontrada em quadras do Plano Piloto, possuindo habitações multifamiliares. O motivo de escolher esses dois padrões é explicado pela possibilidade de comparar o comportamento da vazão de pico e taxa de infiltração, sabendo que a densidade populacional entre eles é semelhante, mas a taxa de ocupação e o grau de impermeabilidade do solo são distintos. A densidade populacional adotada foi aproximadamente 40 habitantes por hectare, baseado no valor de 4 habitantes por unidade domiciliar.

Além disso, foram adotados dois tipos de solo para análise, Latossolo Vermelho e o Cambissolo Háptico, que juntos ocupam 70% do território do DF. A topografia escolhida foi a encosta planar que representa um relevo retangular-plano de declividade moderada média de 3,8%. Essa escolha da topografia é justificada por permitir a simulação em uma condição crítica com alta velocidade de escoamento nos condutos da rede de drenagem. No total formaram-se quatro arranjos, além dos cenários de pré-desenvolvimento.

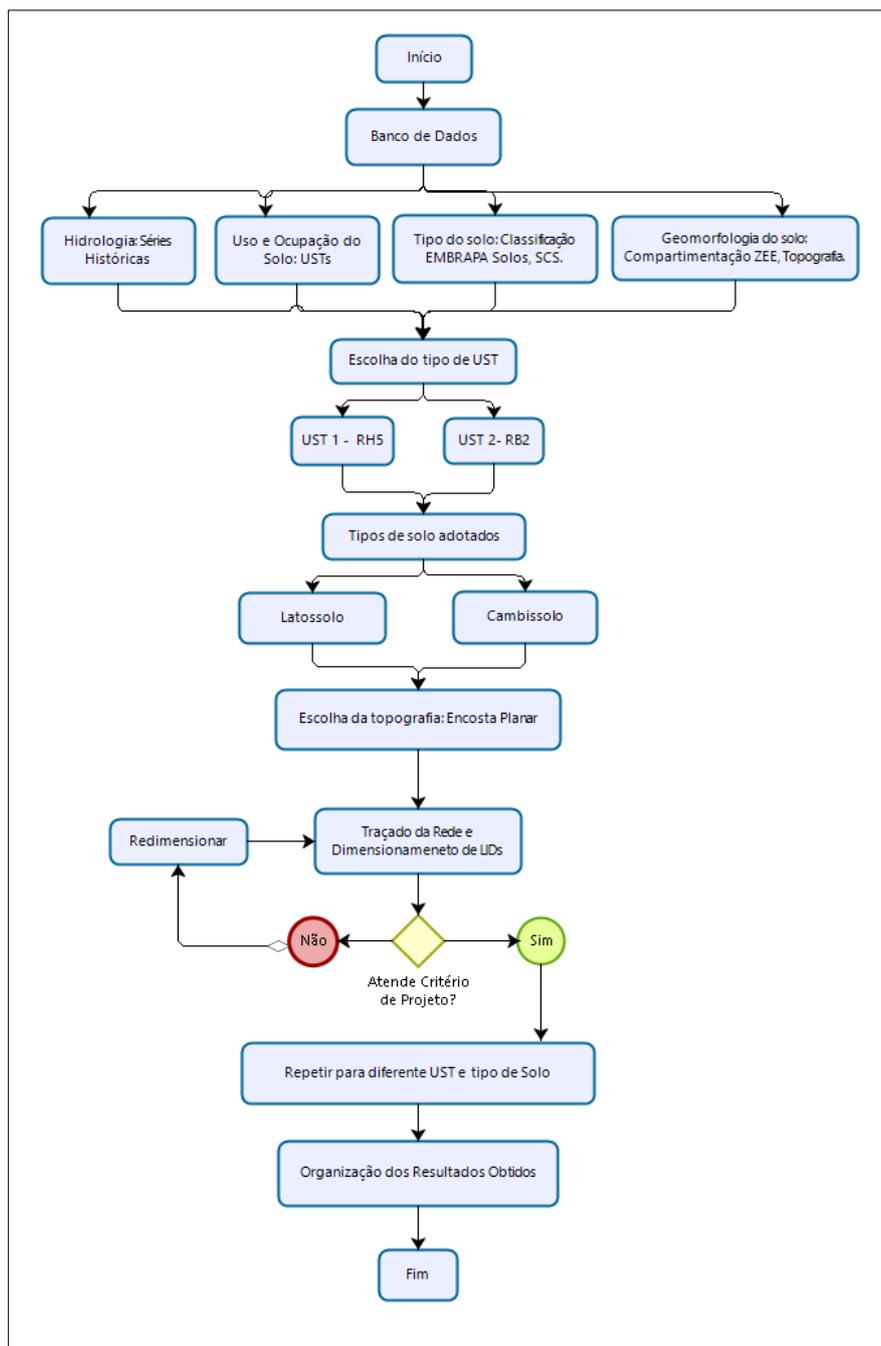


Figura 4. 1. Fluxograma Metodológico.

## 4.1. CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

### 4.1.1. Distrito Federal

A morfologia urbana do Distrito Federal possui padrões de ocupação diversificados e segundo Castro (2017) é possível classifica-los em 25 UST's agrupas em áreas abertas, áreas

de uso Comum, áreas de comércio e indústria, áreas residenciais e áreas em consolidação. Existem algumas UST's residenciais com situação crítica de ocupação, chegando a quase 95% de sua área impermeabilizada, como a RH1 que ocupando extensas áreas e como consequência tem alta densidade populacional.

As duas áreas de estudo foram escolhidas a partir dos diferentes tipos de ocupação urbana, ou seja, das UST's presentes no território do Distrito Federal, conforme mostrado na Figura 4.2. Nessa sessão é feita uma breve caracterização do Distrito Federal com levantamento de dados sócio econômicos, dados climáticos, solo, vegetação, relevo e hidrografia, por meio de pesquisa bibliográfica.

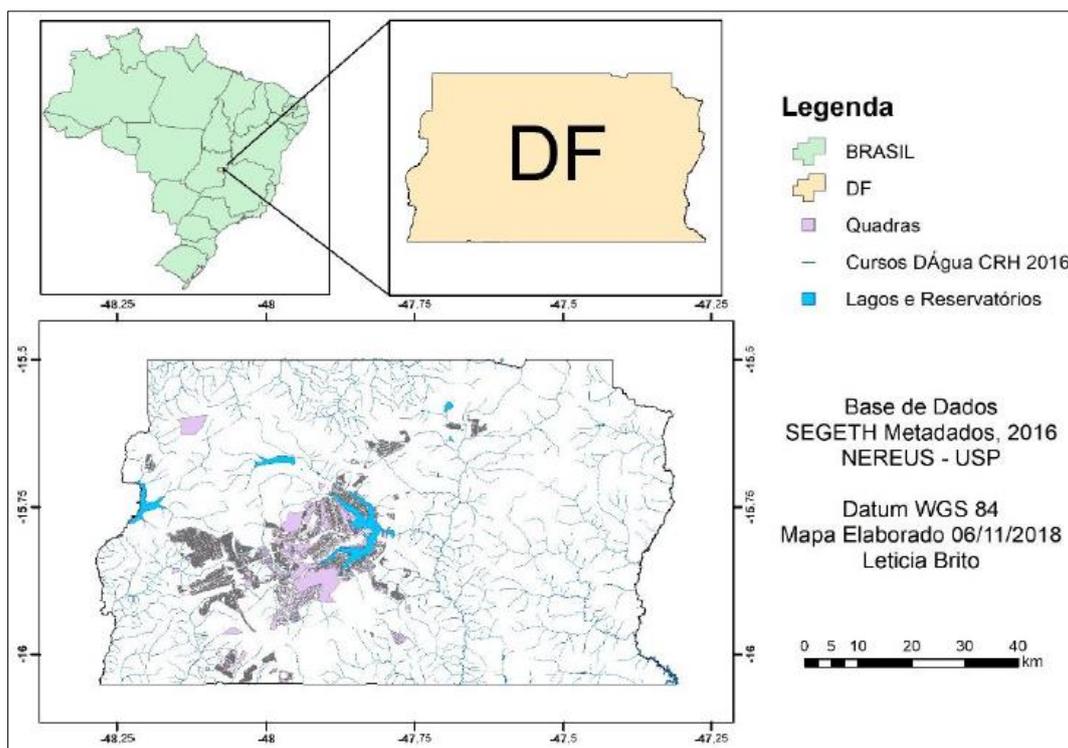


Figura 4. 2. Caracterização do DF e possíveis áreas de estudo (Brito, 2018).

### Tipo do Solo

Os tipos de solos mais representativos no território do DF são os Latossolos Vermelhos abrangendo 38,92% da área, os Latossolos Vermelho-Amarelos ocupando 15,58% da área e os Cambissolos Háplicos com 31% da área, como representado na Figura 4.3. No total os Latossolos abrangem 54,5% do solo do Distrito Federal (Reatto *et al.*, 2004). Na análise comparativa das UST's foi adotado o Latossolo Vermelho e o Cambissolo Háplico, pois

juntos ocupam 70% do território do Distrito Federal. Esse dado é necessário para o cálculo da infiltração pelo método da Curva-Número.

Os Latossolos são favoráveis para ocupações urbanas, como edificações de diferentes portes e subsolo, mas ao mesmo tempo com restrições, por possuírem os maiores valores de condutividade hidráulica vertical e as melhores condições para recarga natural e artificial. Os Cambissolos apresentam teores elevados de silte e pequena profundidade, o que reduz significativamente a sua permeabilidade e consequente potencial de recarga de aquífero.

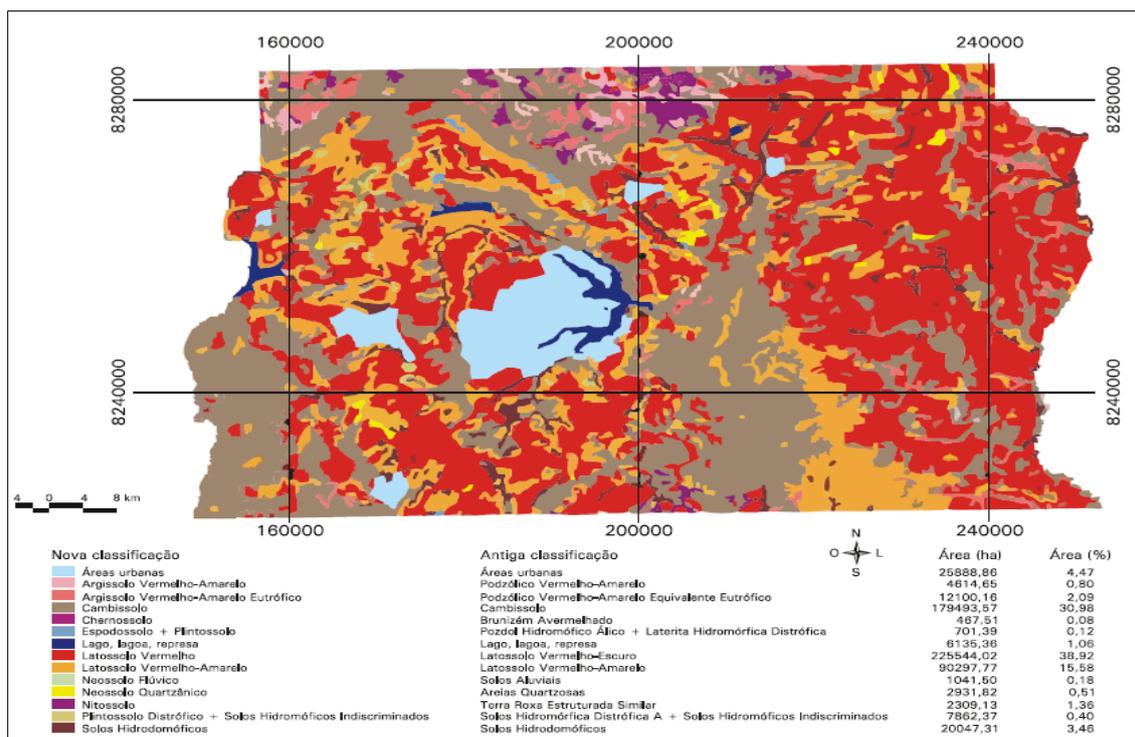


Figura 4. 3. Mapa de solo do Distrito Federal, na escala 1:100.000, com indicação das classes dos solos (Reatto et al., 2004).

## Geomorfologia

Quanto à classificação geomorfológica, as classes mais presentes no território do DF são o Plano intermediário, Plano Elevado e Vale Dissecado. O Vale Dissecado apresenta relevo ondulado a forte ondulado, declividade superior a 20% e cotas altimétricas inferior a 800m. O Plano Intermediário tem declividade inferior a 12% e cota altimétrica entre 950 e 1.050m, enquanto que o Plano Elevado tem declividade inferior a 10% e cota altimétrica superior a 1.110m. (Seraphim, 2018).

## **Hidrografia e Clima**

A região do DF é drenada por cursos d'água pertencentes a três das mais importantes bacias hidrográficas brasileiras: São Francisco (Rio Preto), Tocantins/Araguaia (Rio Maranhão) e Paraná (rios São Bartolomeu e Descoberto). Todos os rios das regiões hidrográficas são de planalto, sendo as principais bacias identificadas por um padrão de drenagem radial. Dois cursos d'água delimitam o território do DF, o Rio Preto a Leste e o Rio Descoberto a Oeste.

A Região hidrográfica do Paraná é responsável pela maior área drenada do DF com aproximadamente 64% de toda a porção territorial, ocupando cerca de 3658 km<sup>2</sup> com uma descarga de 64m<sup>3</sup>/s. Dessa forma, essa bacia hidrográfica é muito importante para a região, onde estão localizadas todas as áreas urbanas e todas as captações de água para abastecimento público (Fonseca *et al.*, 2001).

O clima do DF apresenta sazonalidade com dois períodos distintos, seco de maio a setembro com baixas taxas de precipitação e altas taxas de evaporação, além da baixa umidade relativa do ar, e o período chuvoso entre outubro e abril. Segundo a classificação de Köpen o clima do Distrito Federal é Tropical de Savana, porém pode haver variação de acordo com a altitude. A precipitação média anual pode variar entre 1200 a 1700 mm, em que o período chuvoso representa 84% do total anual, com maior quantidade de chuvas entre Novembro e Janeiro, e o mês mais chuvoso é Dezembro. O período seco normalmente se estende de Maio a Setembro (Fonseca *et al.*, 2001).

## **Vegetação**

O DF está localizado em sua totalidade dentro do bioma Cerrado que possui ecologia e fisionomia de savanas da América. A Fitoecologia se caracteriza por Savanas Parque, Savanas Gramíneo – Lenhosa, Áreas de Influência Urbana e Agricultura (MMA, 2006). Para o presente trabalho foram considerados apenas alguns tipos de vegetação: gramado, campo limpo com espécies arbustivas, herbáceas e árvores, mata de galeria, áreas alagáveis, solo exposto devido à remoção da camada vegetal.

#### 4.1.2. Área de Estudo 1 - UST RH5

De acordo com o estudo de Castro (2017), a UST RH5 pertence às áreas residenciais mapeadas no Distrito Federal. Esse padrão caracteriza-se por: ser tipo de habitação unifamiliar, ter baixa taxa de ocupação, geralmente presente em condomínios, ter terrenos com tamanho igual ou superior a 500 m<sup>2</sup>, edificações em sua maioria com dois andares e, em relação à quantidade de área verde, há pouca disponibilidade e áreas disponíveis restritas aos canteiros das vias. Esse padrão de ocupação urbana é característico das regiões administrativas de São Sebastião, Riacho Fundo, Park Way e parte do Vicente Pires. A Figura 4.4 representa essa UST obtida na região do Park Way.



Figura 4. 4. UST RH5 obtida da região administrativa do Park Way.

A área de estudo 1 ocupa 115 ha e apesar de ter baixa taxa de ocupação a área impermeabilizada média é de 82,2%, a qual foi calculada a partir dos coeficientes de escoamento recomendados pela Novacap, sendo: 0,9 para áreas impermeabilizadas, 0,7 para as áreas urbanas com áreas verdes, 0,3 para áreas de solo natural com recobrimento de brita e 0,15 para áreas com declividade inferior a 5% integralmente gramada ou com jardim ou vegetação natural.

Cada quadra residencial da RB2 tem 3 tipos de quarteirões, cada um contendo 10, 12 e 20 lotes residenciais, além das calçadas e vias, uma área verde no centro da vizinhança e vias com canteiros centrais nas laterais. O desenho urbanístico das quadras junto às curvas de nível é apresentado na Figura 4.5, considerando que os valores das curvas de nível decrescem na esquerda para a direita.

A disposição dos lotes residenciais em relação às curvas de nível foi adotada como sendo paralela, como em parte de Vicente Pires, em detrimento da disposição perpendicular. Justifica-se essa escolha na decisão de fazer a análise do escoamento superficial dentro da condição mais crítica e desfavorável para o padrão de loteamento habitacional. No caso adotado, as vias principais transversais estão perpendiculares às curvas de nível, ou seja, na mesma direção que o escoamento superficial e por isso contribuindo para aumentar a velocidade de escoamento.

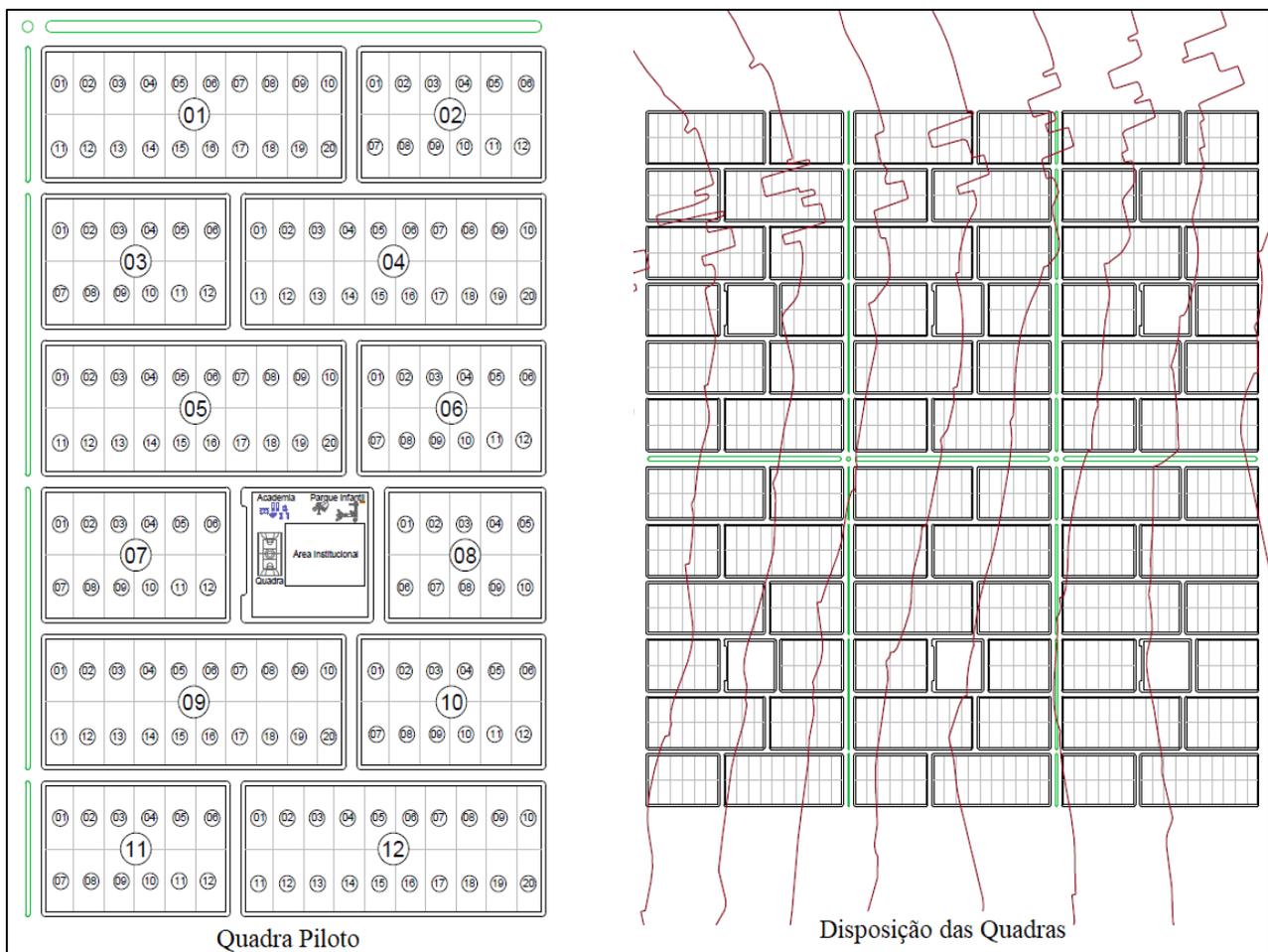


Figura 4. 5. Desenho urbanístico da quadra piloto da área de estudo 1 e sua disposição em relação à curva de nível.

## **Geomorfologia e Tipo do Solo**

A escolha da topografia no estudo implica no comportamento da velocidade do escoamento superficial e em processos de inundação. Dessa forma, foi selecionado o relevo de uma área da região administrativa de Vicente Pires, permitindo simular as UST's em um relevo real. A declividade de Vicente Pires pode variar dependendo do local, de baixa, sendo favorável para ocupação, até muito alta, possuindo restrição à ocupação.

O relevo selecionado de Vicente Pires se caracteriza por ter curvatura do plano planar e a curvatura do perfil do solo retilínea com declividade moderada média de 3,8%. Como foi escolhida uma topografia de encosta planar e declividade moderada, era esperado que o comportamento da velocidade de escoamento superficial na rede de drenagem se apresentasse elevada, considerando que a declividade tem forte influência nesse processo e valores próximos de 5% já se caracterizam por ser declividade alta, sendo fundamental o manejo da água pluvial para favorecer a ocupação urbana residencial.

Os dados de declividade, elevação, curvatura do perfil e curvatura do plano do solo foram gerados no Arcgis a partir das curvas de nível de 5 metros de 2009 da SEDUH/DF que posteriormente foram interpoladas e geraram-se as curvas de nível de 1 metro. A Figura 4.6 mostra as imagens geradas, obtendo a variação da elevação da área entre 1226,66 metros e 1065,12 metros, a declividade na faixa de 0,0062% e 20,94% mas predominando entre 2,5% e 5% e declividade média de 3,8%. O índice de curvatura prevaleceu como zero, que são as vertentes retilíneas e planares.

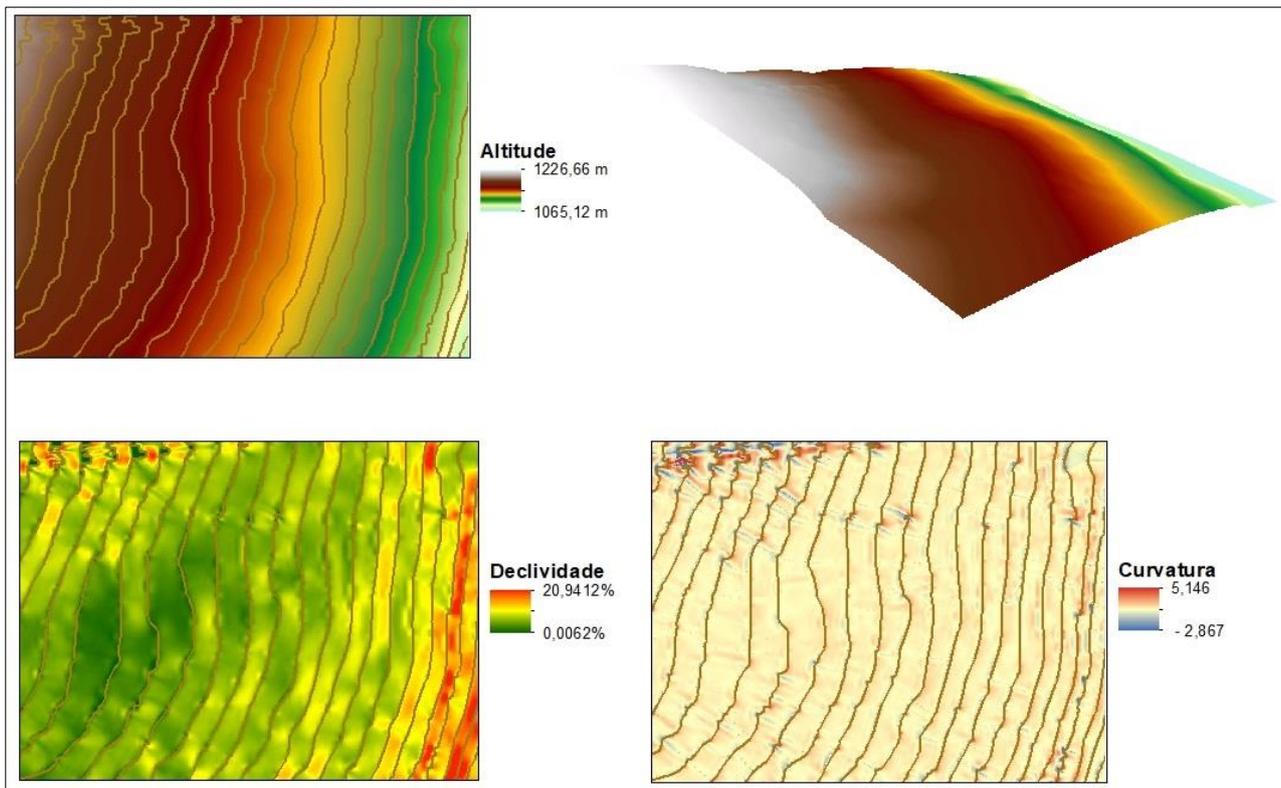


Figura 4.6. Características topográficas selecionadas para estudo, quanto à declividade, elevação e curvatura do solo.

Para facilitar a análise dos arranjos, os Latossolos foram chamados como solo tipo A e os Cambissolos como solo tipo B. O solo A se caracteriza por produzir baixo escoamento superficial e alta infiltração, possuem os maiores valores de condutividade hidráulica vertical e são favoráveis para diferentes tipos de uso urbano, como edificações de diferentes portes. Já o solo B são solos menos permeáveis com tendência à processos erosivos e por isso deve ter prioridade para a preservação da cobertura vegetal natural, e em casos de ocupação urbana evitar a ocupação de alta densidade. A realização do estudo com os dois tipos de solos favorece a comparação do escoamento da água nos padrão de ocupação urbana inseridos nesses solos.

#### 4.1.3. Área de Estudo 2 - UST RB2

Assim como a UST RH5, a UST RB2 também pertence às áreas residenciais, mas se caracteriza por ter média taxa de ocupação e possuir habitações multifamiliares. Os padrões construtivos são edificações retangulares de até seis andares, possuindo cinturões verdes aos arredores. Essa forma de ocupação urbana é presente nas Super Quadras da Asa Sul do Plano Piloto, de modo que foi utilizada a disposição dos edifícios de forma similar para a

construção da quadra de estudo. A Figura 4.7 mostra o padrão de ocupação urbana característico da UST RB2.

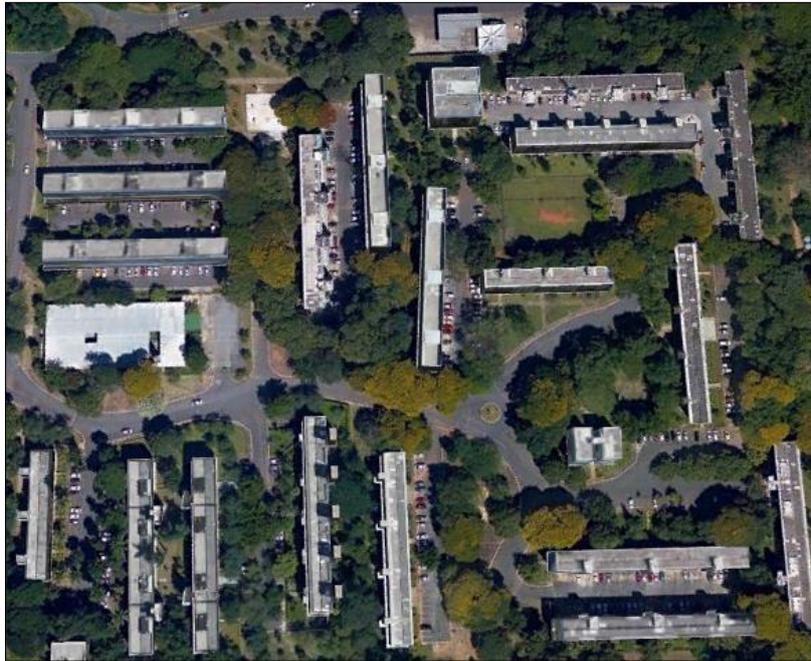


Figura 4. 7. UST RB2 obtida da Super Quadra Sul 405 no Plano Piloto.

A área de estudo 2 abrange 107 ha, tendo maior taxa de ocupação e maior taxa de permeabilidade que a UST RH5, devido ao padrão construtivo e às áreas verdes pouco restritas. A taxa de impermeabilidade é de 69,6%, calculada a partir dos coeficientes de escoamento da NovaCap e é aproximadamente 15% menor que a taxa de impermeabilidade da UST RH5. O desenho urbanístico das quadras junto às curvas de nível, as quais decrescem da esquerda para a direita, é apresentado na Figura 4.8. Cada quadra residencial tem 10 blocos residenciais dispostos próximos de áreas verdes e espaços públicos, como praças, quadras poliesportivas, parquinho infantil e academia da terceira idade, permitindo maior interação e entre os moradores.

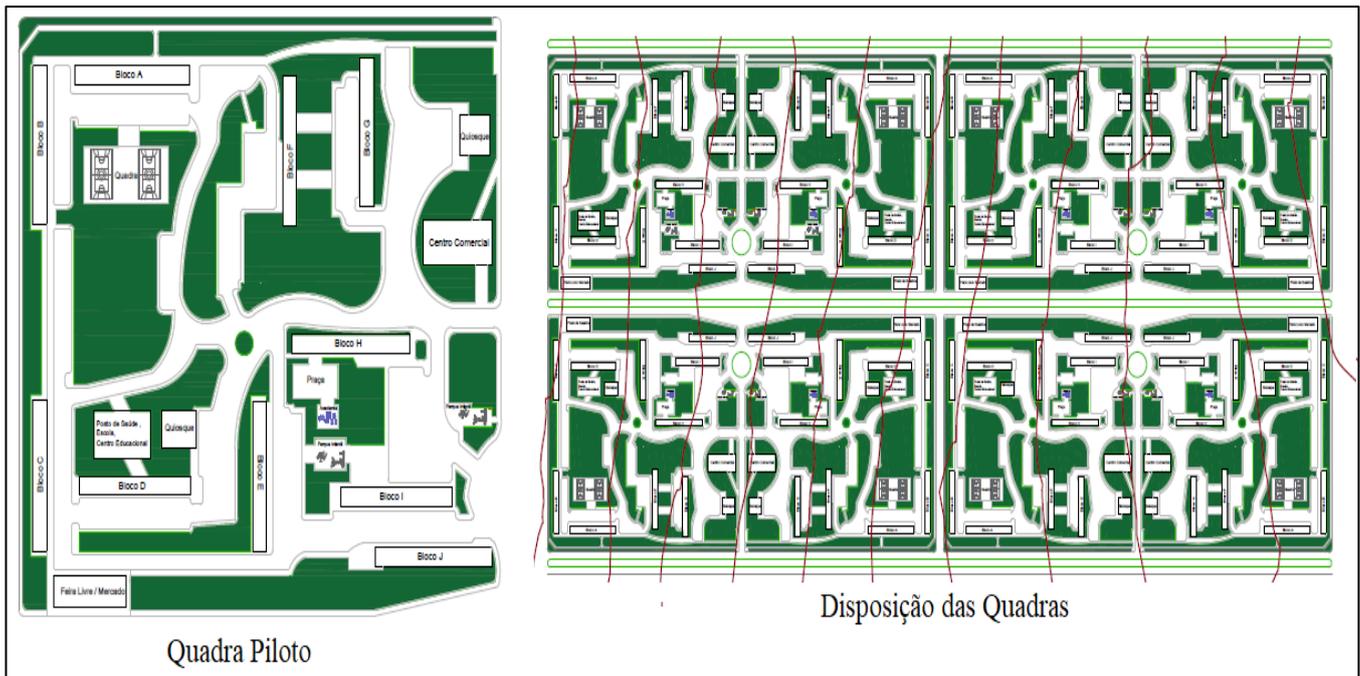


Figura 4. 8. Desenho urbanístico da quadra piloto da área de estudo 2 e sua disposição em relação à curva de nível.

A geomorfologia e tipos de solos usados para a área de estudo 2 foram os mesmos para a área de estudo 1, caracterizados na sessão 4.1.2.

#### 4.2. SIMULAÇÕES HIDROLÓGICAS

O estudo fez uso de dois softwares para auxiliar na adequação dos dados de entrada para a modelagem, o Autocad e o Arcgis, e ao realizar a modelagem hidrológica foi utilizado o modelo SWMM na versão PCSWMM, permitindo simular o comportamento dos processos hidrológicos para os arranjos, que serão mais bem detalhados na sessão seguinte. No PCSWMM é possível explorar variados recursos, dentre eles a calibração de parâmetros para buscar o melhor ajuste de modo que as respostas dos modelos computacionais sejam satisfatoriamente representativas da realidade. Contudo, neste trabalho não foi feita a calibração e verificação do modelo, justificando possíveis erros nos resultados obtidos.

O método usado no modelo para quantificar o escoamento superficial e a infiltração foi o método da Curva Número (método SCS) e para o transporte da propagação da onda de cheia foi utilizado o método da onda dinâmica, já que este considera todos os componentes da equação de Saint-Venant e assim, promove uma simulação mais correta dos fenômenos de escoamento superficial. As simulações foram feitas com chuva de projeto com tempo de

retorno de 10 anos, como recomendado pelo PDDU-DF (2009), e posteriormente comparadas com tempo de retorno de 2 anos.

Além disso, com o objetivo de alcançar a vazão de pré-desenvolvimento e atenuar o maior volume de escoamento superficial, foram verificadas quais as medidas de controle sensíveis às águas pluviais são mais adequadas para cada arranjo simulado.

#### 4.2.1. Arranjos Simulados

Na construção dos arranjos simulados foram estabelecidos alguns parâmetros: tipo do solo, topografia e tipo de projeto de drenagem que pode ser convencional ou sustentável com utilização de medidas de baixo impacto (LID's). Como explicado nas sessões 4.1.2. **Área de Estudo 1 - UST RH5** e 4.1.3. **Área de Estudo 2 - UST RB2** a UST RH5 possui habitação unifamiliar, a UST RB2 possui habitação multifamiliar e o solo A e B são os Latossolos e Cambissolos, respectivamente. Além disso, na UST RH5 a disposição dos lotes residências em relação à curva de nível foi considerada como paralela. A Tabela 4.1 apresenta os diferentes arranjos.

Tabela 4. 1. Arranjos Simulados por parâmetros de análise.

UST	Arranjo	Topografia	Tipo de Solo	Tipo de Projeto de Drenagem
RH5	1	Planar	A	Pré-desenvolvimento
		Planar	B	Pré-desenvolvimento
	2	Planar	A	Convencional
		Planar	B	Convencional
	3	Planar	A	Sustentável
		Planar	B	Sustentável
RB2	4	Planar	A	Pré-desenvolvimento
		Planar	B	Pré-desenvolvimento
	5	Planar	A	Convencional
		Planar	B	Convencional
	6	Planar	A	Sustentável
		Planar	B	Sustentável

#### 4.2.2. Dados de Entrada das Simulações

Os dados de entrada utilizados nas simulações do presente estudo correspondem às camadas de alguns componentes de drenagem, sendo as camadas de sub-bacias, poços de visita (PVs),

condutos e exutórios. Além disso, a chuva de projeto é arquivo de entrada para todos os arranjos. Os componentes de drenagem foram trabalhados com a finalidade de obter dados de entrada adequados para as simulações e os processos para isso são detalhados nessa sessão. Foi estruturado dois blocos de componentes de drenagem, uma para cada UST estudada.

As sub-bacias são as áreas de contribuição para os PV's e um de seus atributos mais importantes é o CN, utilizado no cálculo da infiltração pelo método SCS. O valor do CN foi atribuído para cada sub-bacia e foi usado o valor de CN conforme a Tabela 4.2, o qual varia dependendo do tipo do solo e do uso e ocupação do solo. Dessa forma, os arranjos da UST RH5 e da RB2, terão CN distintos por possuírem uso e ocupação do solo diferente. Para obtenção dos valores de CN para os arranjos foi realizada uma série de procedimentos com auxílio do software Autocad e Arcgis, como detalhado a seguir.

Tabela 4. 2. Valores do parâmetro CN para diferentes condições de cobertura vegetal, uso do solo e tipos de solo em bacias urbanas (Collischonn & Dornelles, 2013, adaptado).

Utilização da Cobertura do Solo		Tipo do 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 aterros em más condições		68	79	86	89
Baldios Boas condições		39	61	74	80
Prado em boas condições		30	58	71	78
Bosques em zonas florestais	Cobertura ruim	45	66	77	83
	Cobertura boa	25	55	70	77
Espaços abertos 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 escritório		89	92	94	95
Zonas industriais		81	88	91	93
Zonas residenciais					
Lotes de m <sup>2</sup>	% 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

No Autocad foi feito o desenho urbanístico da UST e a disposição das quadras, assim como o desenho das sub-bacias que foram divididas de acordo com a divisão dos quarteirões

seguindo as bissetrizes das esquinas. Esses desenhos foram importados para o software Arcgis, permitindo fazer o traçado do uso e ocupação do solo das quadras (Figuras 4.9 e 4.10), de modo que se pudesse atribuir os valores de CN para cada tipo de uso e ocupação (Tabelas 4.3 e 4.4). Posteriormente se calculou o CN das sub-bacias pela média ponderada, de acordo com a porcentagem de cada tipo de uso e cobertura do solo que se tem nela. A declividade média das sub-bacias foi calculada a partir das curvas de nível de 5 metros de 2009 da SEDUH/DF, com que se gerou o modelo digital de elevação (MDE).

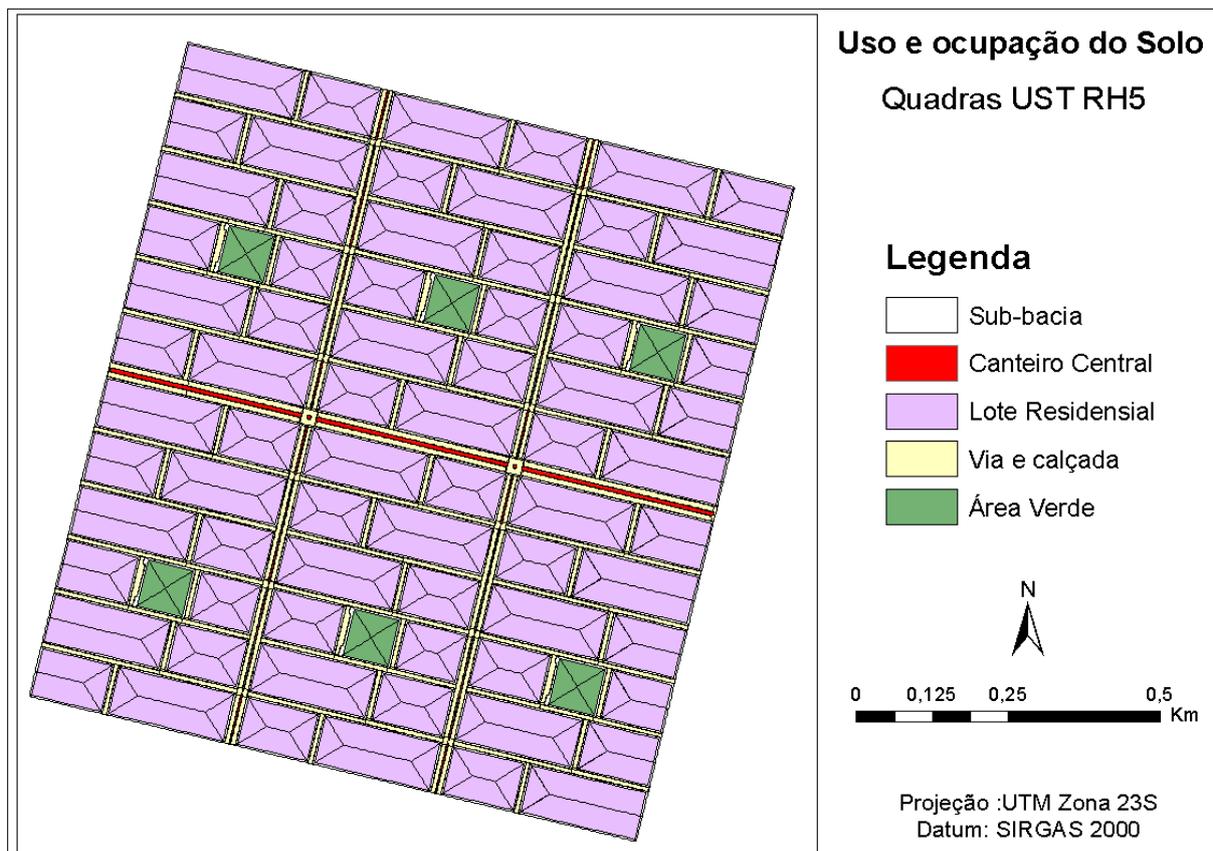


Figura 4. 9. Desenho das quadras da UST RH5 e uso e ocupação do solo.

Tabela 4. 3. Valores de CN atribuído a cada uso e ocupação da quadra UST RH5.

Uso e ocupação	Solo A	Solo B
Área Verde	49	69
Calçada	98	98
Canteiro Central	30	58
Lote Residencial	77	85
Rua	98	98

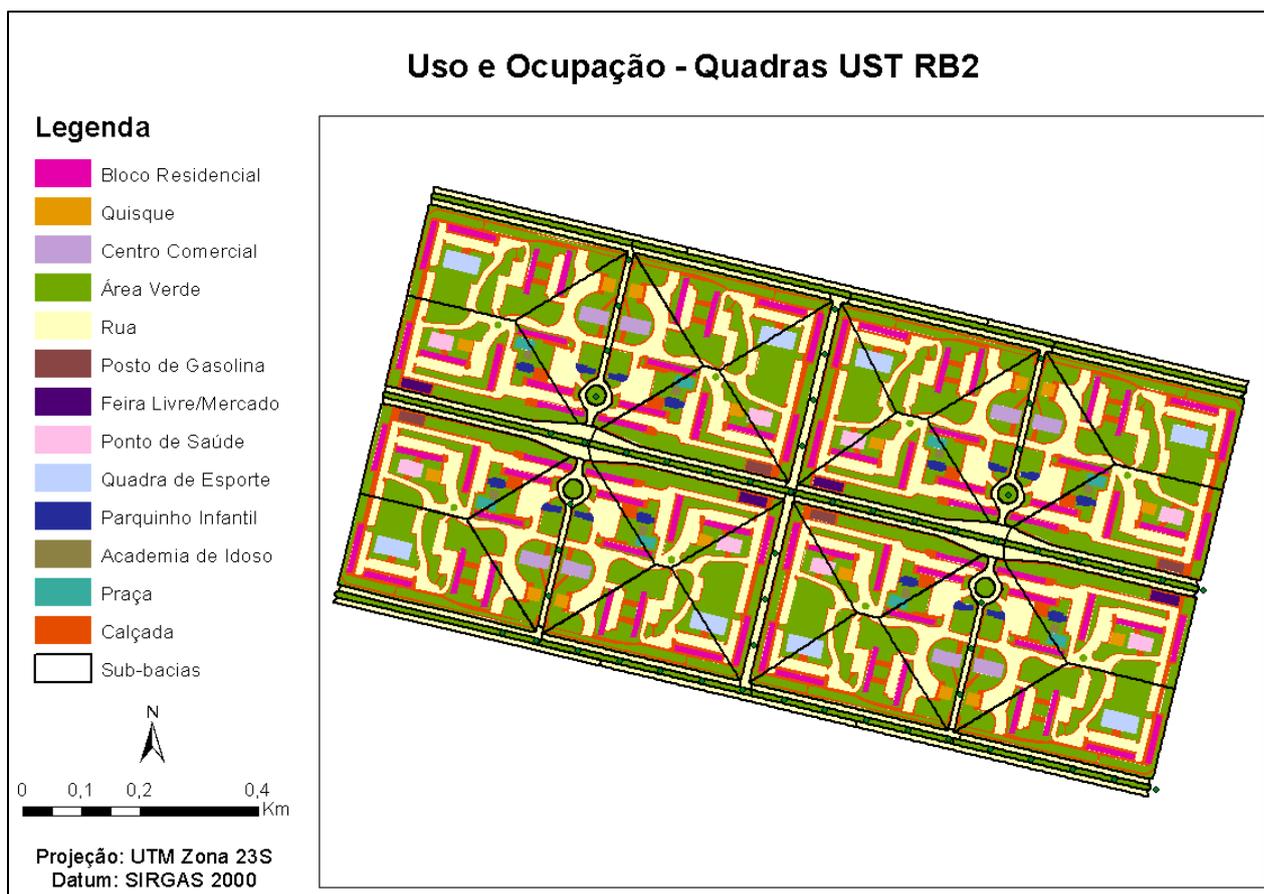


Figura 4. 10. Desenho das quadras da UST RH5 e uso e ocupação do solo.

Tabela 4. 4. Valores de CN atribuído a cada uso e ocupação da quadra UST RH5.

Uso e ocupação	Solo A	Solo B	Uso e ocupação	Solo A	Solo B
Academia de Idoso	98	98	Parquinho Infantil	72	82
Área Verde	30	58	Ponto de Saúde	89	92
Bloco Residencial	98	98	Posto de Gasolina	98	98
Calçada	98	98	Praça	49	69
Centro Comercial	89	92	Quadra de Esporte	98	98
Feira Livre/mercado	89	92	Quiosque	98	98
Rua	98	98	-	-	-

Deve-se observar alguns parâmetros das sub-bacias, para o caso de utilizar o método SCS no cálculo de infiltração do modelo. Rossman e Huber (2016) recomendam que: para as áreas permeáveis das sub-bacias a porcentagem deve ser nula, considerando que a impermeabilidade de cada sub-bacia já é considerada no coeficiente CN; a rugosidade de Manning deve ser nula, a fim de evitar atraso no fluxo do escoamento; e a lâmina de armazenamento em depressões para as áreas permeáveis deve ser definida pela abstração

inicial de perdas calculada pela Equação 3.2, sendo o valor dessa lâmina igual a 20% do armazenamento S.

Os poços de visita foram desenhados com auxílio do software Autocad e sua localização seguiu recomendação da Novacap e da Adasa, usando distância média entre os poços de visita de 60 metros (NovaCap, 2019). O desenho dos PV's foi importado para o software Arcgis com a finalidade de fazer o seu traçado e calcular a elevação do terreno de cada PV.

Por fim, após as sub-bacias e PV's serem importados para o software PCSWMM, os condutos foram traçados no próprio software, foi adotando coeficiente de rugosidade de 0,015, segundo termo de referência da Novacap, considerando a fórmula de Manning para cálculo da velocidade de escoamento, e o dimensionamento dos PV's foi feito com auxílio de planilha Excel, de modo que os requisitos de projetos foram atendidos. As Figuras 4.12 e 4.13 mostram os perfis mais críticos de rede, transversais e longitudinais à curva de nível, e a linha d'água das duas UST's. A Figura 4.11 representa a localização dos perfis.

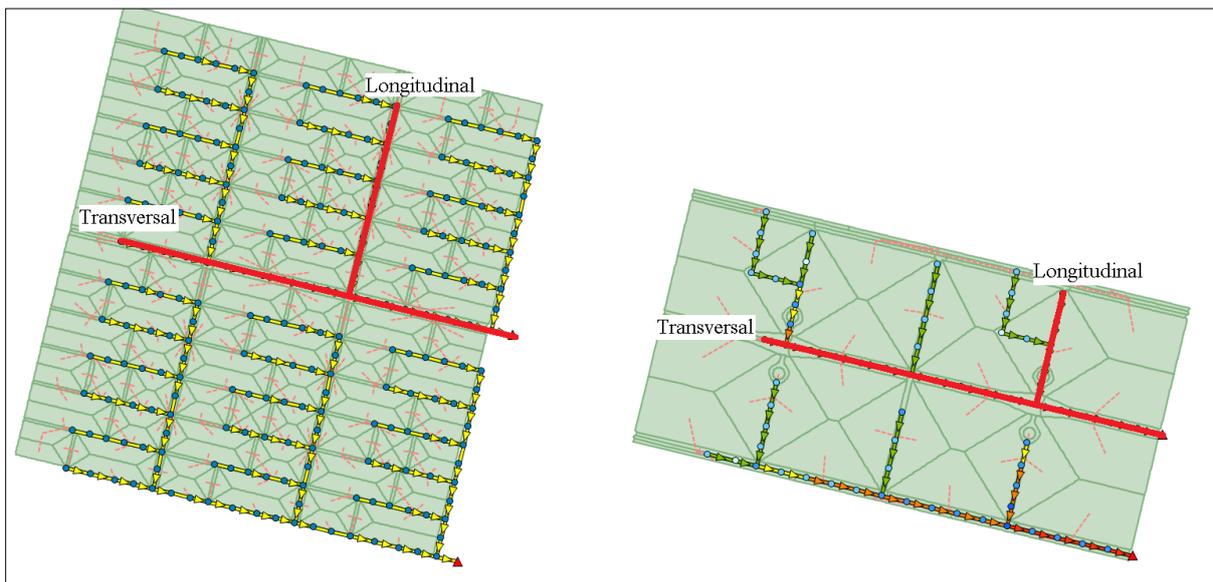


Figura 4. 11. Localização dos perfis de rede transversais e longitudinais à curva de nível.

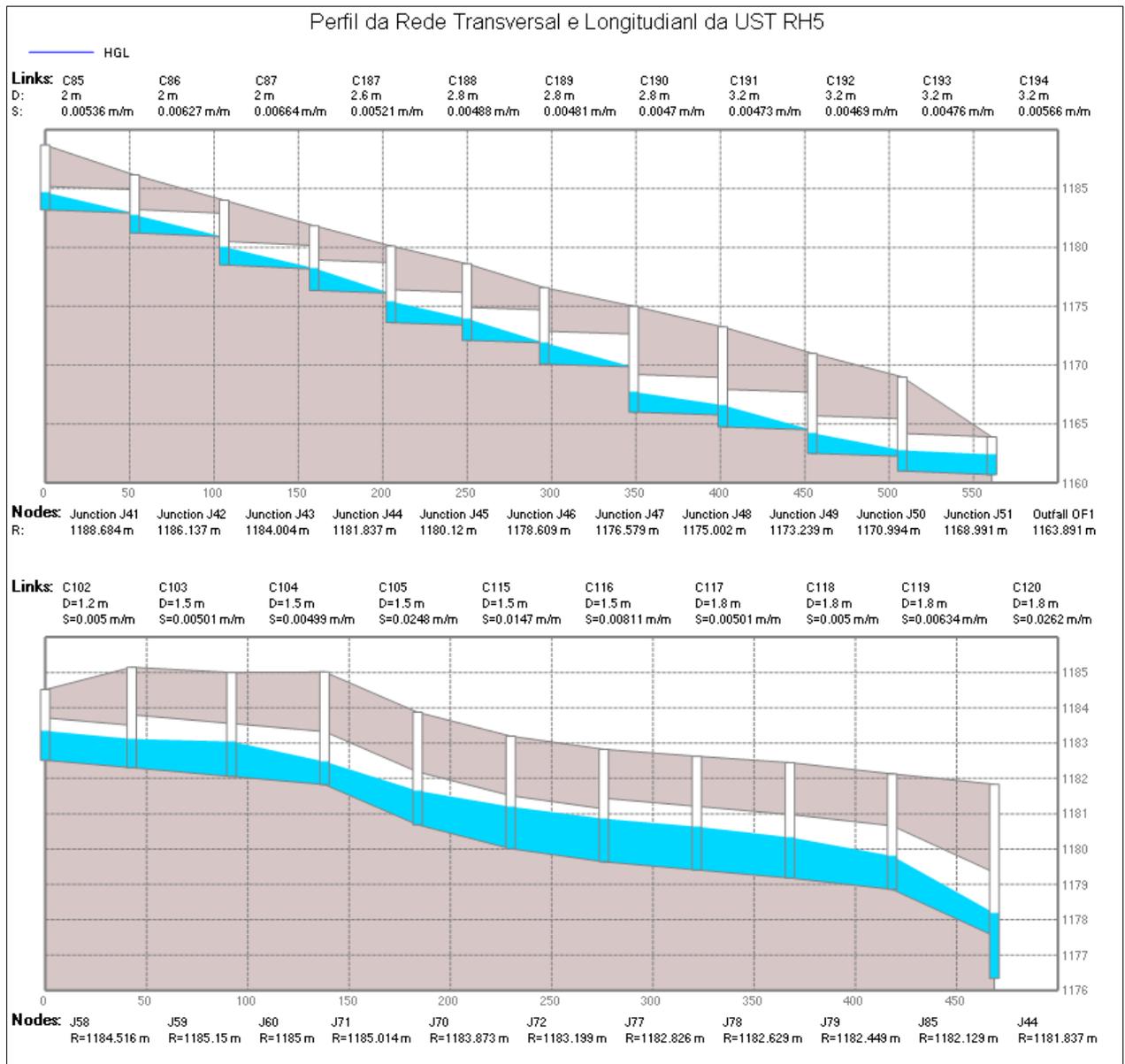


Figura 4. 12. Perfil transversal e longitudinal da rede da UST RH5, com dados de cada conduto (*links*) e PV (*nodes*).

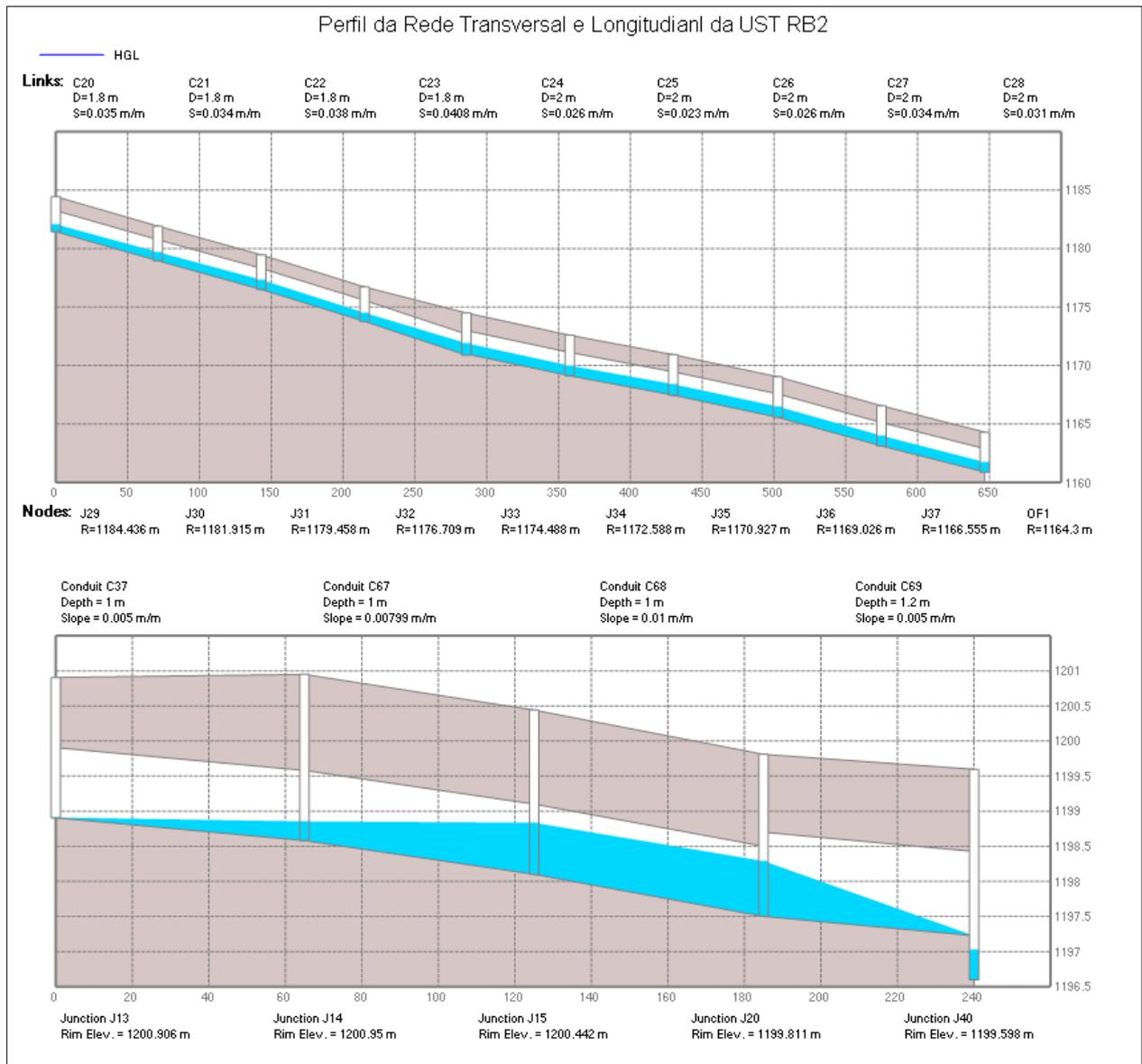


Figura 4. 13. Perfil transversal e longitudinal da rede da UST RB2, com dados de cada conduto (*links*) e PV (*nodes*).

As Figuras 4.14 e 4.15 mostram as redes projetadas para os cenários das quadras UST RH5 e RB2 inseridas no solo tipo A e com curvas de nível. As mesmas redes foram dimensionadas para solo tipo B, sendo necessário aumentar o diâmetro de alguns condutos devido o aumento da sobrecarga dos condutos nesse solo, e assim satisfazer os requisitos de projeto. Em alguns pontos da rede, mas especificamente próximo ao exutório, foi preciso usar condutos com diâmetro maior que 2 metros, de modo a estabelecer uma capacidade de escoamento equivalente a quantidade de volume gerado.

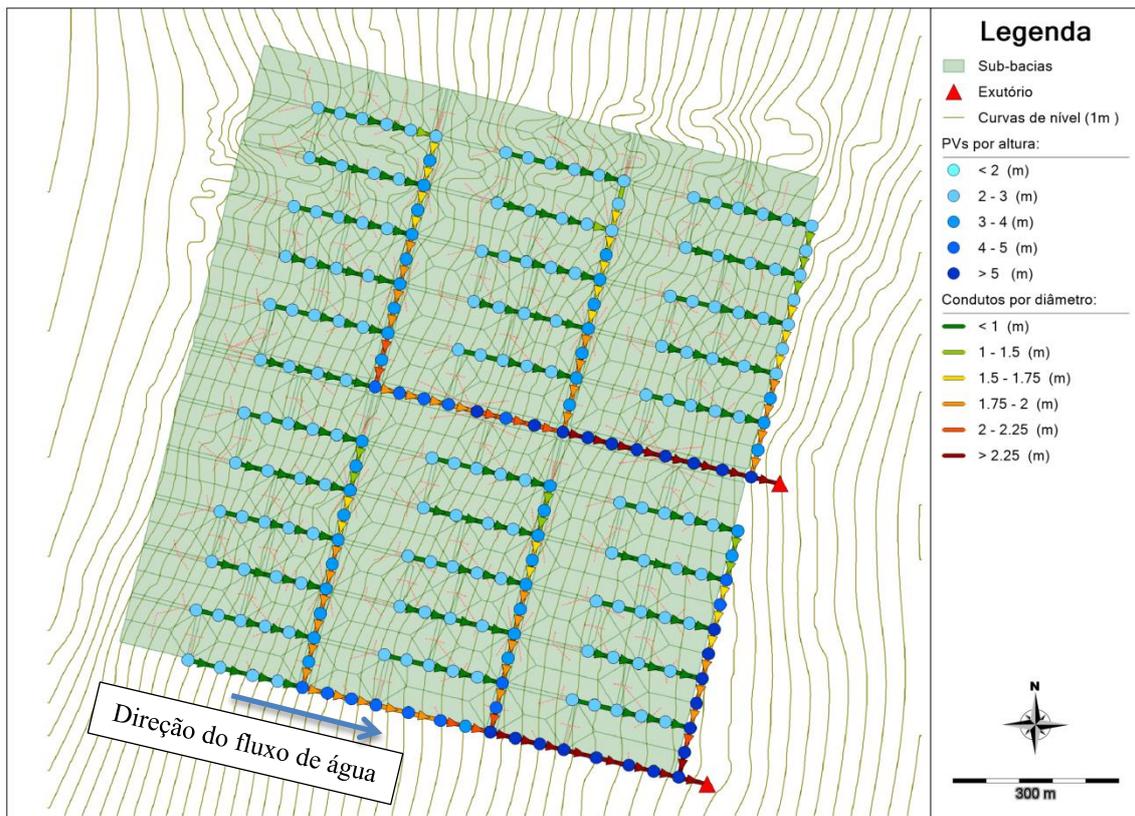


Figura 4. 14. Rede de drenagem convencional da quadra UST RH5 para solo tipo A.

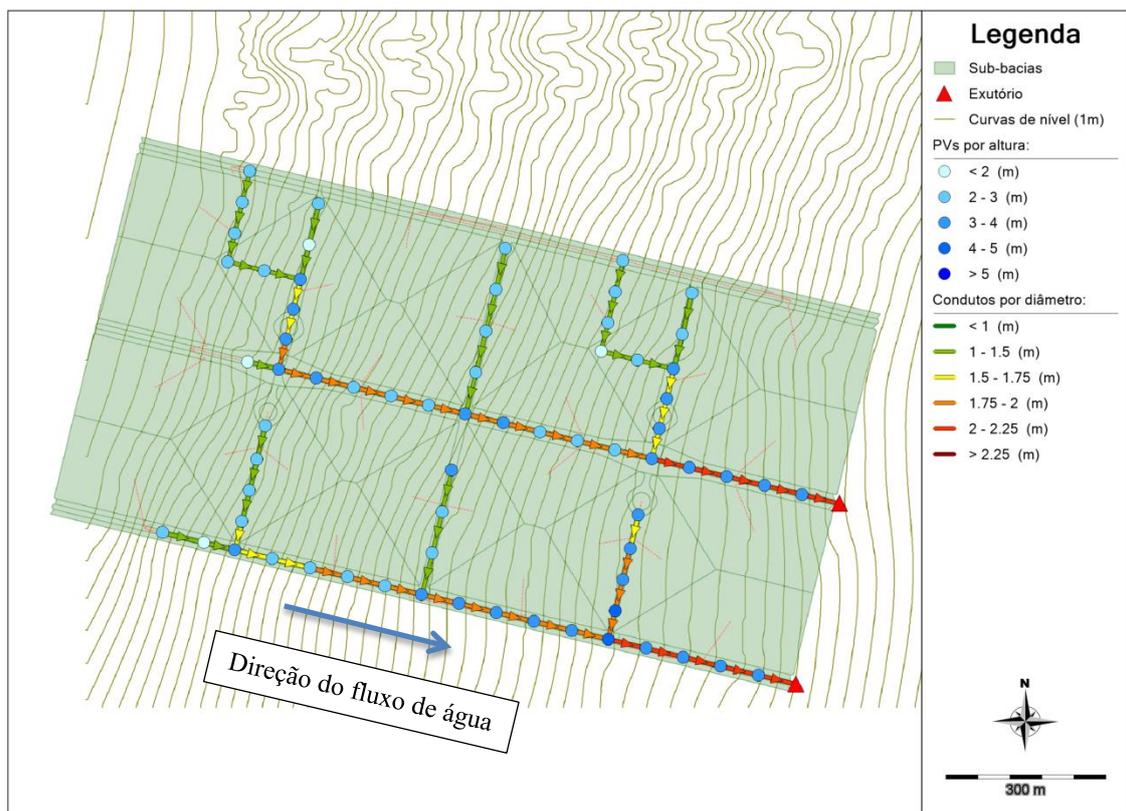


Figura 4. 15. Rede de drenagem convencional da quadra UST RB2 para solo tipo A.

As características das redes convencionais e os CNs médios das áreas de estudo, de acordo com tipo de solo, foram calculados e obtidos conforme disposto na Tabela 4.5. O CN médio na UST RH5 teve pouca variação do solo A para o solo B. A extensão da rede de drenagem convencional da UST RH5 é 58,3% maior do que a rede da UST RB2. Não houve alteração do diâmetro mínimo e máximo na UST RH5 no arranjo do solo A para o solo B, já na UST RB2 o diâmetro máximo aumento 0,2 m no solo B.

Tabela 4. 5. Características das redes de drenagem convencional para as quadras UST RH5 e UST RB2, para solos A e B.

	UST RB2 SOLO A	UST RB2 SOLO B	UST RH5 SOLO A	UST RH5 SOLO B
CN médio	72	82,3	80,5	87,9
Diâmetro mínimo (m)	1	1	0,6	0,6
Diâmetro máximo (m)	2	2,2	3,2	3,2
Extensão da rede (m)	4665,95	4665,95	11192,1	11192,1

### **Cenários de pré-desenvolvimento**

Nos cenários de pré-desenvolvimento, ilustrados nas Figuras 4.16 e 4.17, foi usada uma única sub-bacia de drenagem e seu exutório. A vazão de pré-desenvolvimento foi calculada seguindo duas metodologias, utilizando primeiramente a vazão de restrição da Resolução n° 09/2011 da ADASA, que se limita a vazão de contribuição específica de cada área para rede de drenagem urbana em 24,4 l/s.ha, e em sequência utilizando o método SCS no modelo SWMM. O CN adotado foi referente a uma ocupação de solo de cerrado sem vegetação arbórea com CN igual a 45 para solo tipo A e 66 para solo tipo B.

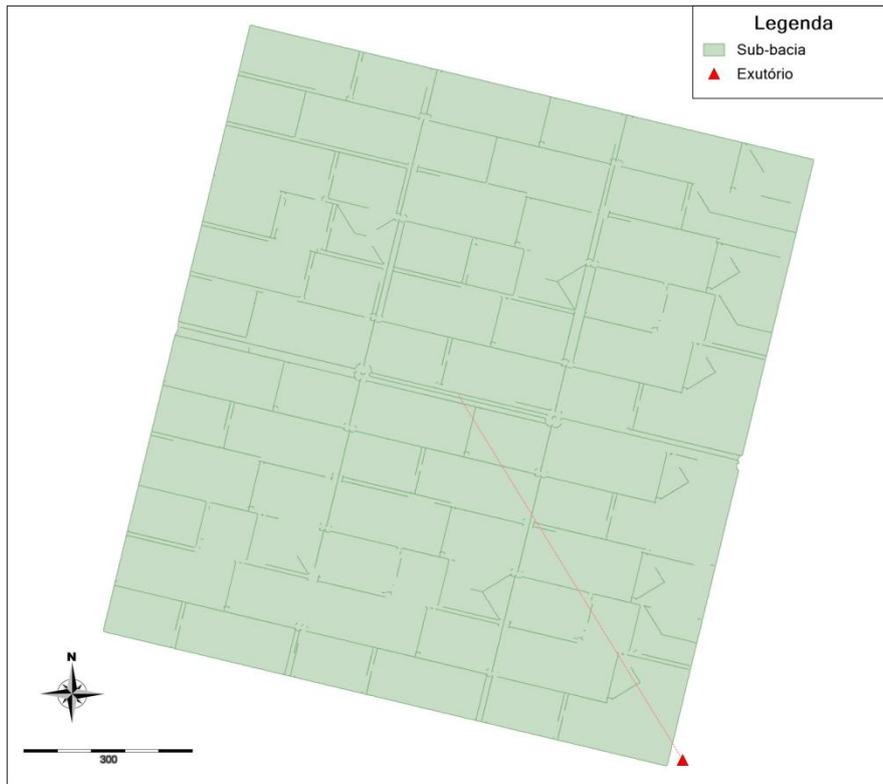


Figura 4. 16. Representação do cenário de pré-desenvolvimento para a área da quadra UST RH5.

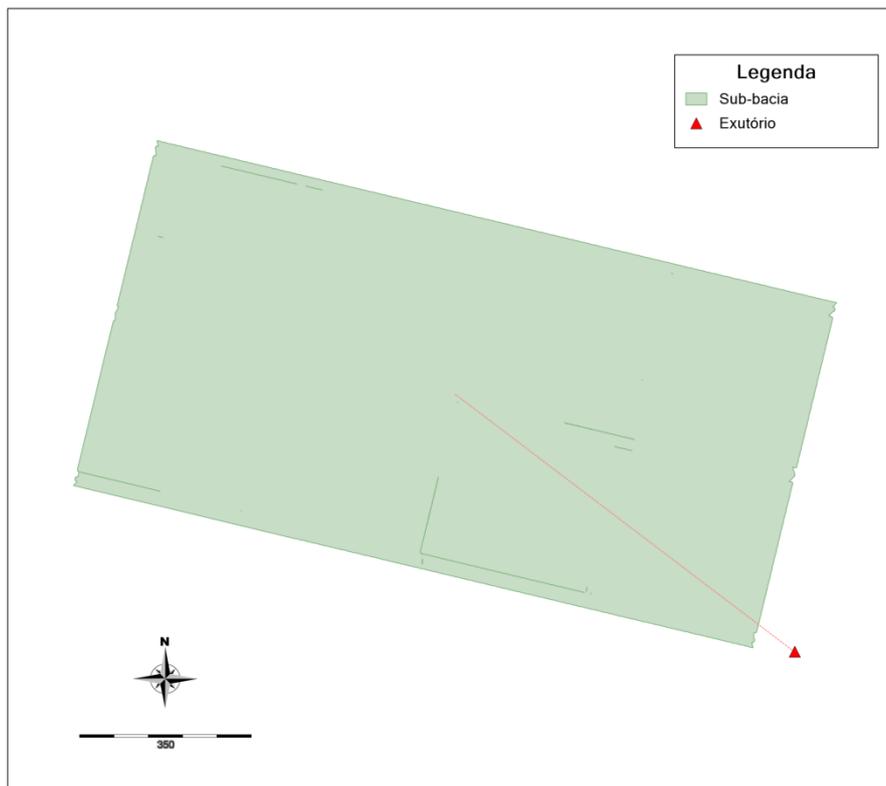


Figura 4. 17. Representação do cenário de pré-desenvolvimento para a área da quadra UST RB2.

## **Inserção de Solução de Baixo Impacto**

Com o objetivo de reduzir as vazões de enchente e incrementar a infiltração aproveitando as áreas verdes disponíveis nas áreas de estudo, foram desenvolvidos os arranjos com projeto de drenagem sustentável utilizando LID's. Primeiramente foram verificadas quais as possíveis medidas de controle sensíveis às águas pluviais mais adequadas para cada UST simulada para posteriormente serem selecionadas.

Na UST RH5 a implantação de LID's em nível de lote privado poderia possibilitar maior retenção da lâmina precipitada por ter as áreas privadas mais abrangentes do que as áreas públicas. Algumas soluções na fonte que favorecem a infiltração e que poderiam ser usadas no lote privado e em áreas públicas seriam as trincheiras e poços de infiltração, jardins de chuva, biorretenção e entre outros. Por outro lado, como a UST RB2 possui apenas áreas públicas para alocar as LID's, foi escolhido optar por serviços públicos de manejo de água pluvial nas duas UST's. As bacias de retenção são soluções de maior escala e foram consideradas como última opção para o rearranjo da vazão e do volume de escoamento superficial.

Sendo assim, foi adotado o uso de trincheiras de infiltração para a UST RH5 devido dois fatores, pouco espaço público disponível para instalar outros tipos de soluções e a necessidade de uma profundidade considerável para conseguir coletar e infiltrar o maior volume possível de água. As trincheiras foram inseridas nas sub-bacias dos canteiros centrais das vias (Figura 4.17), ocupando todo o espaço da bacia, já que era o único local onde seria possível a inserção das medidas de baixo impacto sem a supressão de lotes. A somatória das áreas de LID inseridas totalizou 1,13% da área total da bacia.

Os parâmetros usados na modelagem das trincheiras de infiltração são referentes à sua área e profundidade: altura da berma, vegetação, declividade, coeficiente de Manning equivalente a uma superfície de brita segundo Porto (2006), altura da camada granular, volume de vazios e infiltração do solo, de acordo com Lima et al. (2013), sendo considerados os mesmos para o solo A e B. O fator de colmatação que foi considerado zero, ou seja, o sistema funcionando perfeitamente. A Tabela 4.6 apresenta os valores dos parâmetros da trincheira, sendo que a declividade de cada trincheira equivale a declividade da sub-bacia. A Figura 4.18 apresenta a

disposição de cada trincheiras e seus respectivos valores de declividade, sendo a declividade máxima obtida de 4,766%.

Tabela 4. 6. Parâmetros de projeto utilizados no dimensionamento das trincheiras.

Parâmetro	Valor adotado
Altura da Berma	1 m
Fração Vegetal	0%
Declividade Longitudinal	Segue terreno
Coefficiente de Manning	0,022
Altura camada de brita	2,5 m
Volume de vazios	0,4
Infiltração do solo	142,42 mm/h
Fator de colmatação	0

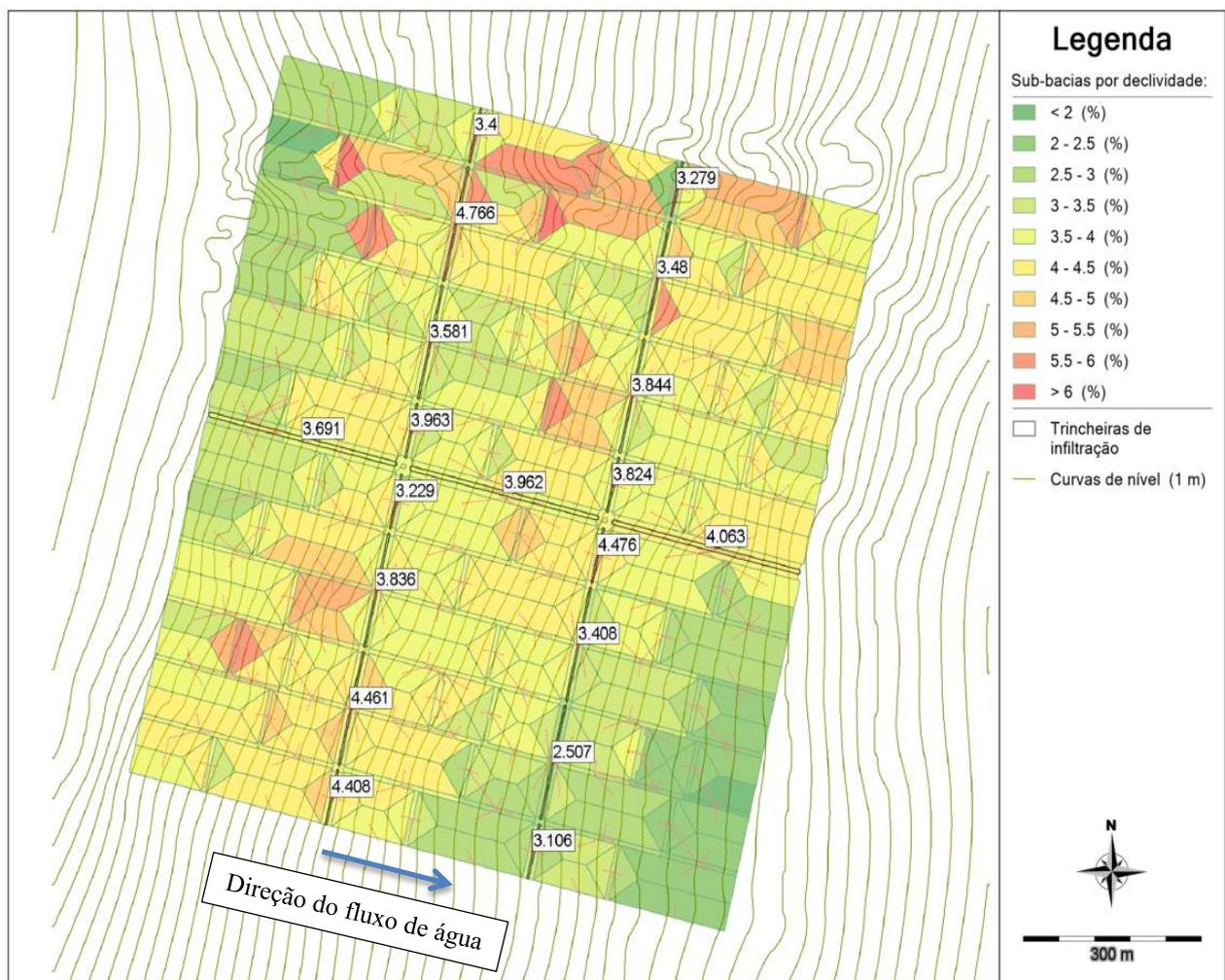


Figura 4. 18. Alocação das trincheiras de infiltração na UST RH5 com os valores de declividade.

Quanto às possibilidades de LID's para a UST RB2, a técnica de biorretenção seria uma solução adequada para área pública, porém ela tem função principal de reter e tratar poluentes e no caso foi priorizado técnicas de infiltração. Já o uso de poços de infiltração como única solução seria mais limitado, devido à existência de questões paisagísticas relacionadas às áreas residenciais. Dessa forma, foi escolhida a solução de valas de infiltração pela disponibilidade de áreas verdes, o que possibilita dimensionar valas mais largas e menos profundas e de modo a favorecer uma disposição mais harmônica com a paisagem. As valas foram inseridas e replicadas em uma porcentagem das sub-bacias, ou seja, não foi usada uma sub-bacia exclusiva para as valas como foi feito para as trincheiras. A alocação das valas ocupando as áreas verdes disponíveis e paralelas às curvas de nível, de modo a reter a maior quantidade de escoamento superficial possível, é apresentada na Figura 4.19.

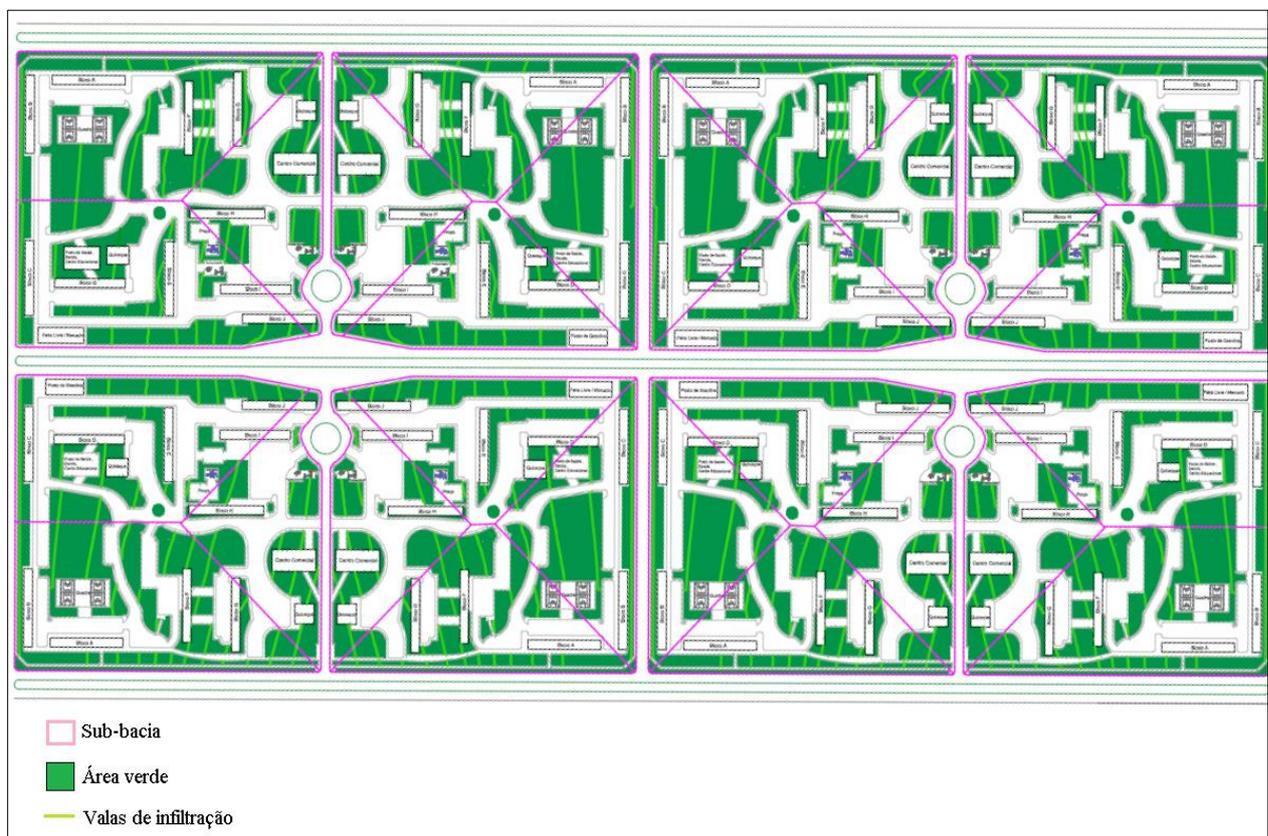


Figura 4. 19. Alocação das valas de infiltração nas quadras da UST RB2.

Na modelagem das valas os parâmetros usados são os relacionados à sua superfície: altura da vala, volume de vegetação, rugosidade de Manning da superfície de grama segundo Porto (2006), declividade e relação horizontal:vertical do talude (Tabela 4.7). Foi definida a altura máxima de água dentro da vala e sua largura de acordo com o tipo de solo A e B. A

declividade longitudinal das valas foi considerada próxima de zero, já que elas foram colocadas paralelas às curvas de nível. O volume de vegetação foi desconsiderado, já que as valas são revestidas por grama.

Tabela 4. 7. Parâmetros de projeto utilizados no dimensionamento das valas.

Parâmetro	Valor adotado – Solo A	Valor adotado – Solo B
Altura da vala	0,7 m	1,5 m
Largura da vala	1,5 m	2 m
Fração Vegetal	0%	0%
Declividade Longitudinal	0,001	0,001
Coefficiente de Manning	0,015	0,015
Inclinação do Talude	3:1	3:1

No dimensionamento da rede de drenagem sustentável das quadras não foi alterado o traçado da rede convencional, a altura dos PV's foi mantida a mesma, porém houve uma diminuição do diâmetro dos condutos pelo menor volume de escoamento nos condutos, devido parte ser retida pela LID's. As Figuras 4.20 e 4.21 mostram o traçado da rede para UST RH5 e UST RB2 no solo A e as faixas de diâmetro utilizadas.

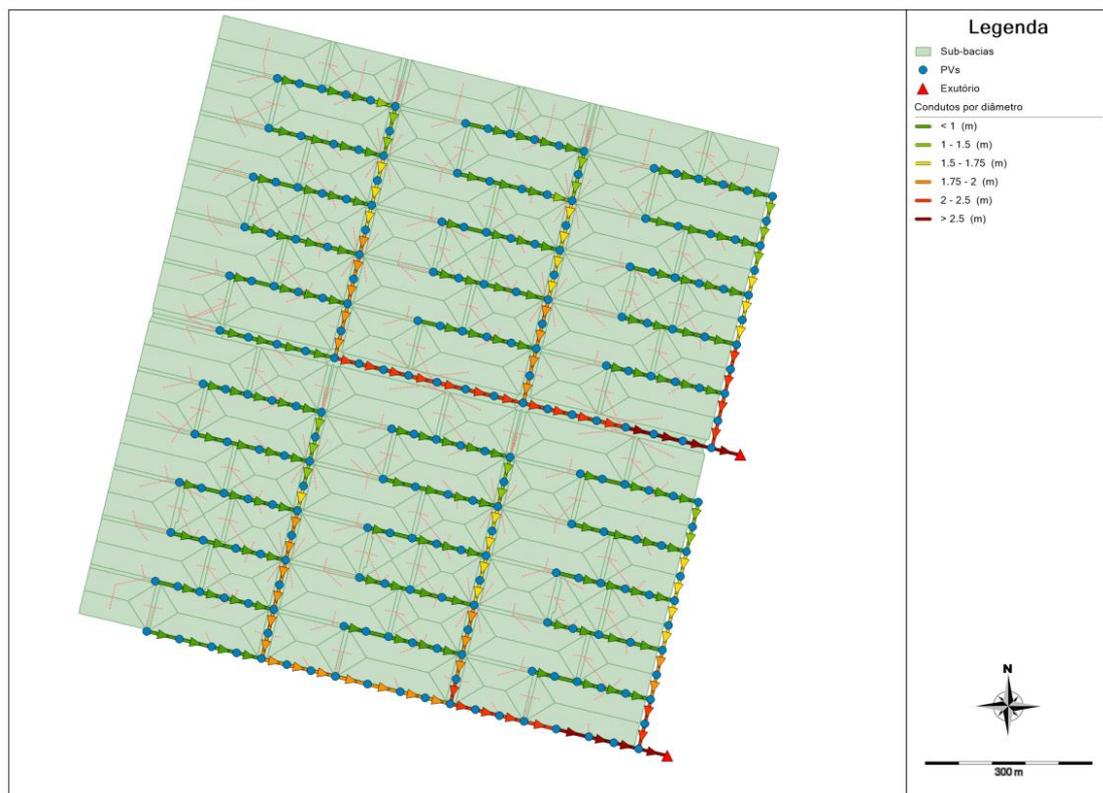


Figura 4. 20. Rede de drenagem com LID's da quadra UST RH5 para solo tipo A.

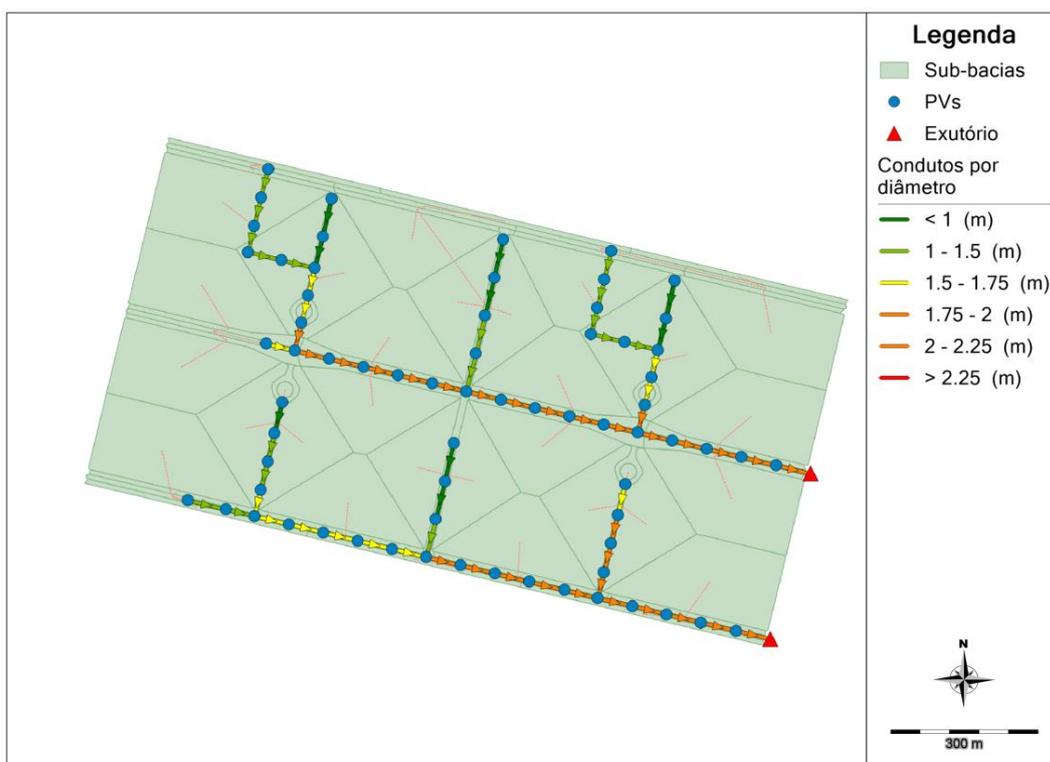


Figura 4. 21. Rede de drenagem com LID's da quadra UST RB2 para solo tipo A.

Conforme os dados apresentados na Tabela 4.8, o diâmetro máximo da rede com uso de LID's reduziu em 0,2 m para a UST RB2 e 0,4 m para a UST RH5.

Tabela 4. 8. Características das redes de drenagem sem LID e com LID para as quadras UST RH5 e UST RB2, para solos A e B.

UST	Tipo de Rede	Diâmetro mínimo (m)	Diâmetro máximo (m)
UST RB2 SOLO A	Rede sem LID	1	2
	Rede com LID	0,6	1,8
UST RB2 SOLO B	Rede sem LID	1	2,2
	Rede com LID	0,6	2
UST RH5 SOLO A	Rede sem LID	0,6	3,2
	Rede com LID	0,6	2,8
UST RH5 SOLO B	Rede sem LID	0,6	3,2
	Rede com LID	0,6	2,8

### 4.2.3. Simulação com Chuva de Projeto

Para a determinação da chuva de projeto foi utilizada a curva Intensidade-Duração-Frequência (IDF), onde  $I$  é a intensidade da chuva (mm/h);  $TR$  é o tempo de retorno em anos; e  $t$  é a tempo de duração da chuva (min), conforme apresentado pelo Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal (GDF, 2009) (Equação 4.1).

$$I = \frac{1574,70 * TR^{0,207}}{(t + 11)^{0,884}}$$

(Equação 5.1)

Em princípio foi usado tempo de retorno de 10 anos e, para comparação das vazões de pico nas simulações e desempenho das LID's, foi usado tempo de retorno de 2 anos, com duração da chuva de 24h. A chuva de projeto foi organizada com o método dos blocos alternados com intervalo de discretização de 5 minutos e então foram obtidos os hietogramas para os dois tempos de retorno, como mostrado nas Figuras 4.22 e 4.23.

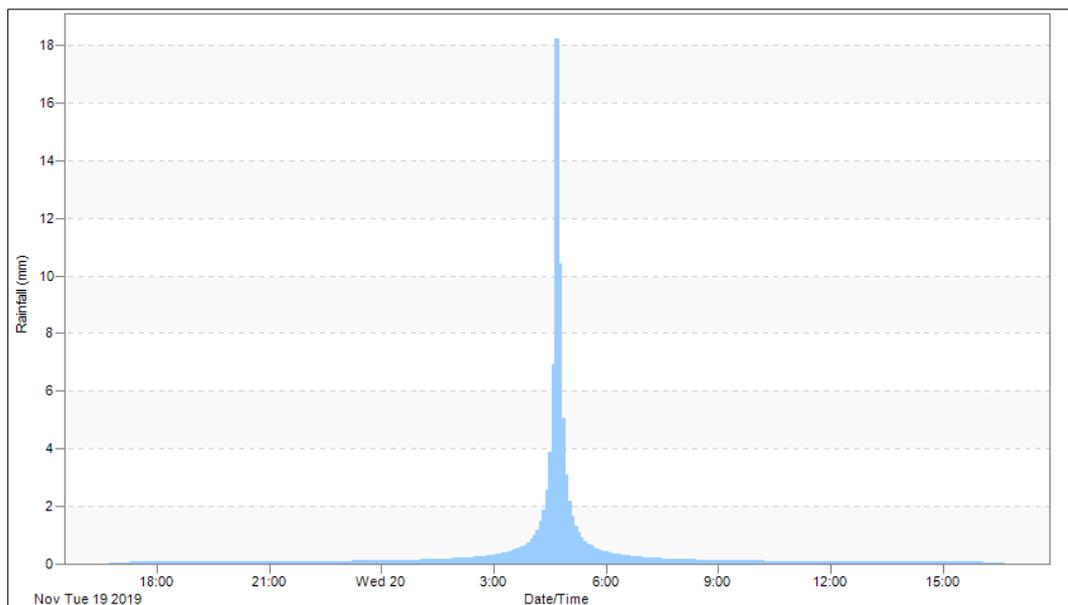


Figura 4. 22. Hietograma para tempo de retorno de 10 anos.

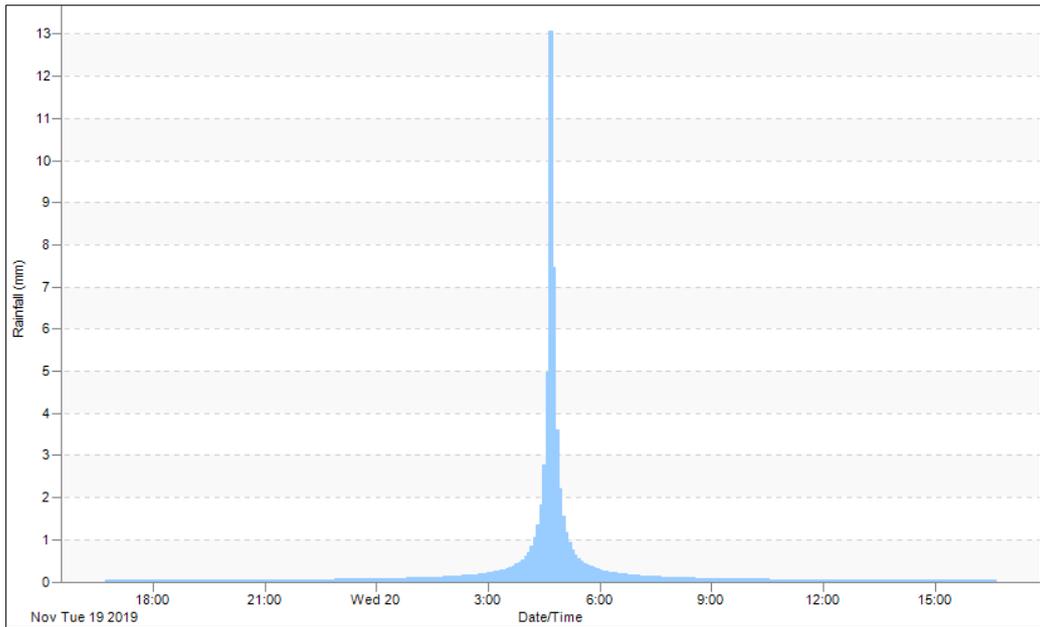


Figura 4. 23. Hietograma para tempo de retorno de 2 anos.

## 5. RESULTADOS

Feitas as simulações hidrológicas dos diferentes arranjos no software PCSWMM, são obtidos os hidrogramas e as taxas de amortecimento e infiltração para cada UST, podendo visualizar qual arranjo dispõem de melhores condições para um manejo de águas pluviais, levando em consideração o desempenho das soluções propostas de drenagem sustentáveis. Deve-se considerar que o modelo usado no PCSWMM para o presente trabalho não foi calibrado, sendo importante fazer a análise dos resultados por meio das taxas de amortecimento e infiltração.

Nos cenários de pré-desenvolvimento, associados à cobertura natural do solo, da UST RH5 e RB2 com o solo A, toda a água precipitada infiltrou no solo e não gerou escoamento, já para o solo B houve geração de escoamento. Isso pode ser explicado pela diferença do valor do CN para os dois solos, em que o solo A apresentou maior capacidade de infiltração. A Tabela 5.1 apresenta os valores das vazões de escoamento obtidas no exutório de cada bacia.

Tabela 5. 1. Vazões de pré-desenvolvimento para UST RH5 e RB2, solo A e B.

UST	RH5	RH5	RB2	RB2
	Solo A	Solo B	Solo A	Solo B
Vazão (m <sup>3</sup> /s)	0	6,8	0	6,12

Fazendo-se a comparação com a vazão de pré-desenvolvimento estabelecida pela Resolução Adasa 09/2011, que é 2,4 m<sup>3</sup>/s para uma área de 100 há e considerando uma média das áreas de estudo de 111ha, as vazões de pré-desenvolvimento obtidas para o solo B na simulação são superiores ao valor da resolução.

### 5.1. SIMULAÇÃO DAS UST's COM REDE CONVENCIONAL E COM CHUVA DE PROJETO

#### 5.1.1. UST RH5

Os valores de vazão e tempo de pico para cada exutório foram obtidos conforme a Tabela 5.2, com tempo de retorno de 10 e 2 anos, respectivamente, considerando que a extensão de rede que drena para o exutório 1 e 2 são iguais e todos os requisitos de projeto da Novacap foram atendidos.

Nas simulações com tempo de retorno 10 anos, na UST RH5 com a rede convencional projetada nos solos A e B, as vazões obtidas foram elevadas, devido à elevada impermeabilidade e com isso diminuição das lâminas de infiltração e armazenamento. Para o solo A, a infiltração atingiu 37% da lâmina precipitada, o escoamento foi de 51% e o restante ficou armazenado no solo. No solo B, a infiltração chegou a 27% da lâmina precipitada e o escoamento chegou a 66%. A vazão de pico chegou a aumentar 21,5% do solo A para o solo B e o tempo de pico foi até 6min menor no solo B. Com tempo de retorno de 2 anos, o comportamento das vazões obtidas foi semelhante ao tempo de retorno de 10 anos, mas apresentando maior variação da vazão entre os solos A e B.

Tabela 5. 2. Vazões e tempo de pico para UST RH5 com rede convencional para chuvas de projeto de 10 e 2 anos de retorno.

Tempo de Retorno (anos)	Exutório	Vazão (m <sup>3</sup> /s) - Solo A	Vazão (m <sup>3</sup> /s) - Solo B	Tempo de pico (h) - Solo A	Tempo de pico (h) - Solo B
10	1	24,34	25,35	07h e 23 min	7h e 19 min
	2	22,93	29,21	07h e 24 min	7h e 18 min
2	1	10,91	16,77	5h e 57 min	5h e 52 min
	2	9,77	18,5	5h e 55 min	5h e 52 min

### 5.1.2. UST RB2

Para os arranjos da UST RB2, com a rede convencional projetada nos solos A e B, as vazões obtidas foram no geral menores do que para a UST RH5, o que pode ser explicado pela maior diversidade no uso e ocupação do solo e maior quantidade de áreas verdes que permitem a infiltração da água no solo.

Simulando com o tempo de retorno de 10 anos no solo A, a infiltração atingiu 48, % da lâmina precipitada, o escoamento atingiu 29,% e 23,% ficaram armazenadas no solo. Para o solo B, a infiltração foi de 35% da lâmina precipitada, o escoamento atingiu 54% e 11% ficaram armazenadas. Houve diferença considerável entre as vazões dos exutórios 1 e 2 (Tabela 5.3), pelo motivo da rede que drena o escoamento para o exutório 1 ser mais extenso, drenando maior volume de água para ele.

A relação entre as vazões de pico para os solos A e B foi como esperada para os dois tempos de retorno simulados, tendo uma elevação considerável da vazão do solo B, chegando a aumentar 72,8% no tempo de retorno de 10 anos e 94% no tempo de retorno de 2 anos. Assim como o tempo de pico que foi até 34 min mais rápido no solo B.

Tabela 5. 3. Vazões e tempo de pico para UST RB2 com rede convencional para chuvas de projeto de 10 e 2 anos de retorno.

Tempo de Retorno (anos)	Exutório	Vazão (m <sup>3</sup> /s) - Solo A	Vazão (m <sup>3</sup> /s) - Solo B	Tempo de pico - Solo A	Tempo de pico - Solo B
10	1	12	30,92	6h e 33 min	6h e 02 min
	2	4,54	16,69	6h e 36 min	6h e 02 min
2	1	1,33	17,07	4h e 46 min	4h e 28 min
	2	0,42	7,64	4h e 48 min	4h e 46 min

Comparando juntamente as duas UST's, simuladas com tempo de retorno de 10 anos, referente as vazões de pico e taxas de infiltração, o arranjo da UST RB2 inserida no solo A foi a que apresentou melhor desempenho para infiltração da água no solo e menor vazão de pico nos exutórios (Figura 5.1). A UST RH5 inserida no solo B foi o arranjo com a pior condição de infiltração e maior vazão de pico no exutório 1. O hidrograma da Figura 5.1 foi analisado apenas para o exutório 1 e por isso a RB2 no solo B foi o que apresentou maior vazão de pico.

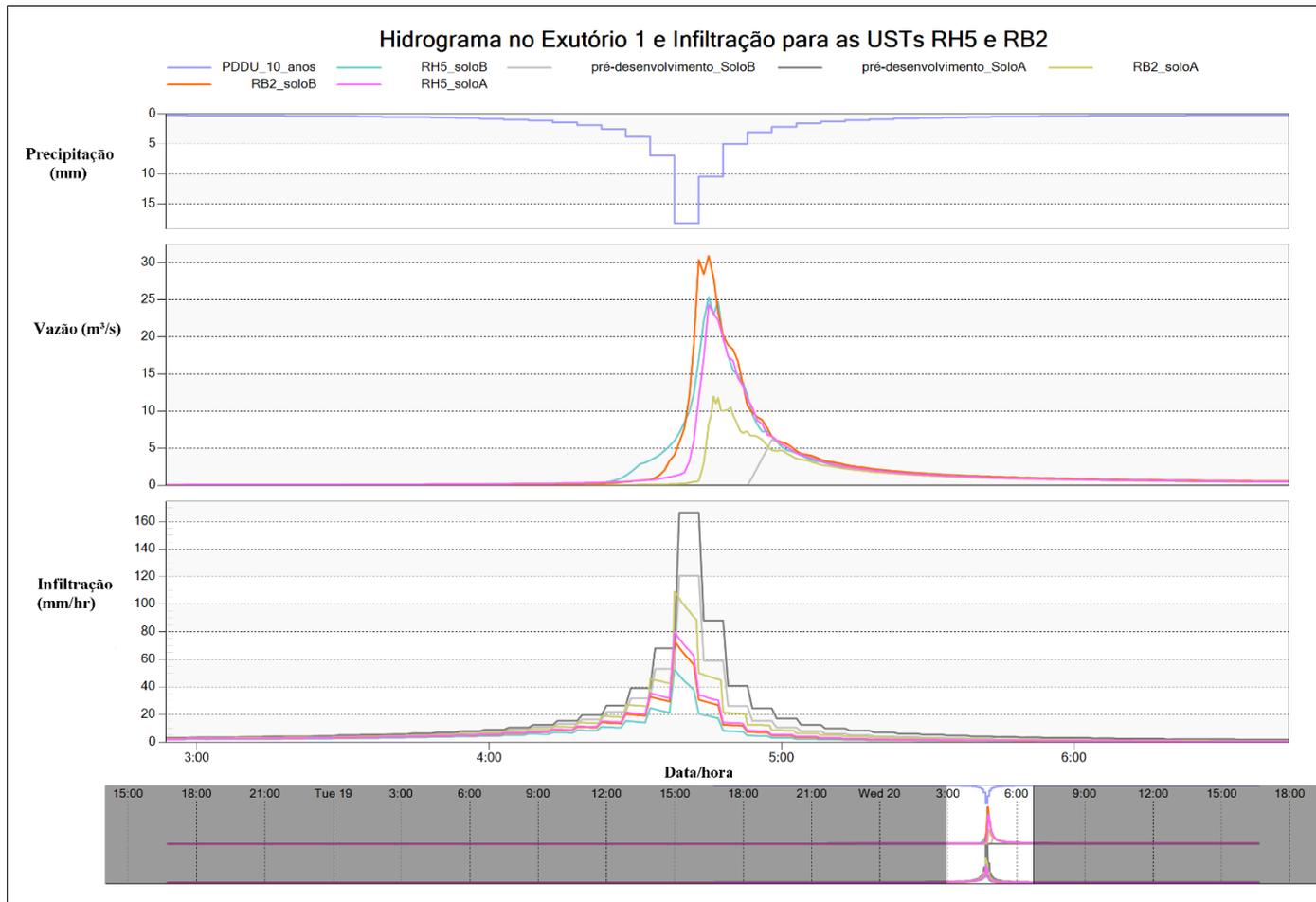


Figura 5. 1. Hidrograma no Exutório 1 e taxa de infiltração para os arranjos com rede de drenagem convencional, utilizando tempo de retorno de 10 anos.

## 5.2. SIMULAÇÃO DAS UST's COM LID's E COM CHUVA DE PROJETO

### 5.2.1. UST RH5

A simulação da rede de drenagem com uso de LID da UST RH5, foi realizada primeiramente com chuva de projeto com tempo de retorno de 10 anos, para verificar a capacidade das soluções de drenagem em amortecer chuvas mais intensas, e posteriormente foi comparado os resultados usando o tempo de retorno de 2 anos, com a precipitação menos intensa.

Na simulação com tempo de retorno de 10 anos, o uso de trincheiras de infiltração nos canteiros centrais das vias pavimentadas mostrou capacidade de reduzir parcela da vazão de escoamento superficial na UST, mas o tempo de pico nos exutórios teve pouco variação (Tabela 5.4). O maior abatimento de vazão da trincheira inserida no solo B, constata a maior

retenção de água por ela, por conta do maior volume de escoamento superficial gerado nesse solo. As Figuras 5.2 e 5.3 apresentam o hidrograma de vazão no exutório 1 e o comportamento da infiltração dos arranjos da UST RH5 para a chuva de projeto de 10 anos de retorno.

Tabela 5. 4. Vazões e tempo de pico para UST RH5 com rede sem e com trincheira, nos exutório 1 e 2, para tempo de retorno de 10 anos.

Exutório	UST RH5 Solo A				UST RH5 Solo B			
	Rede sem trincheira		Rede com trincheira		Rede sem trincheira		Rede com trincheira	
	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Tempo de pico	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Tempo de pico	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Tempo de pico	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Tempo de pico
1	24,34	07h e 23 min	18,13	7h e 21 min	25,35	7h e 19 min	17,13	7h e 17 min
2	22,93	07h e 24 min	20,57	7h e 24 min	29,21	7h e 18 min	16,5	7h e 18 min

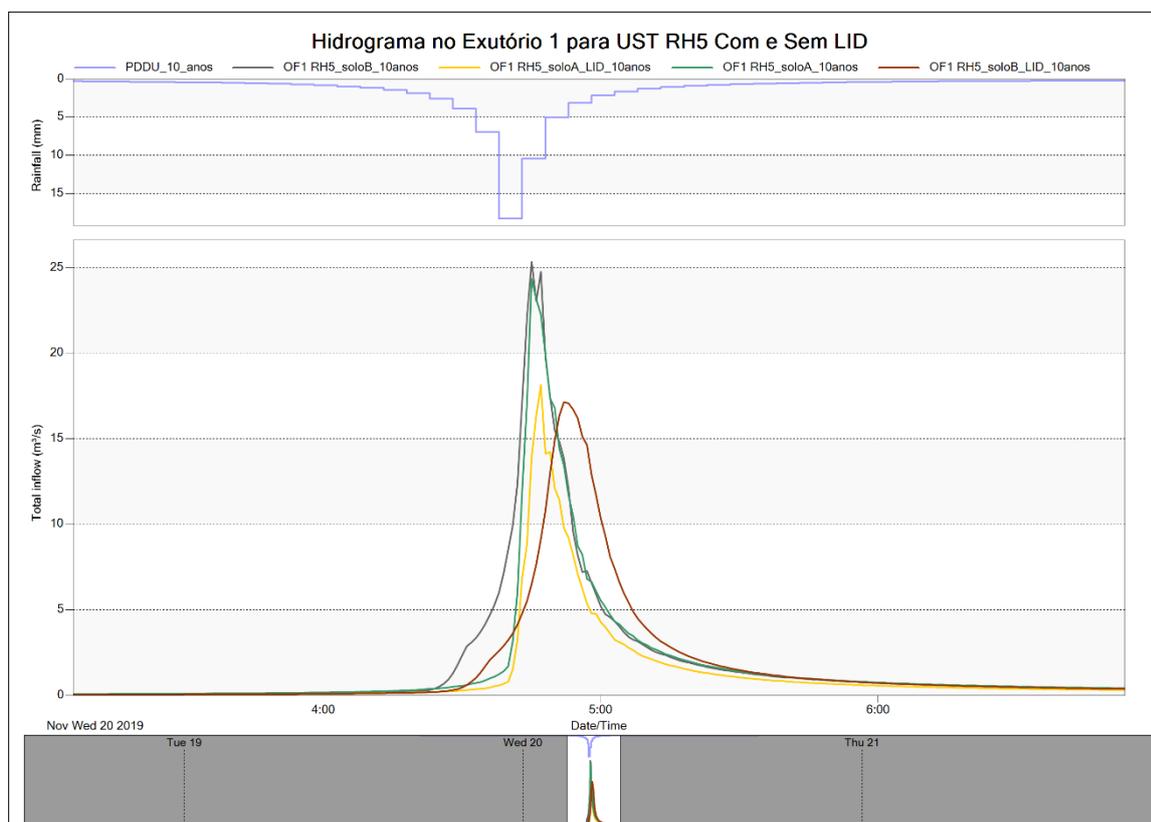


Figura 5. 2. Hidrograma no exutório 1 para os arranjos da UST RH5.

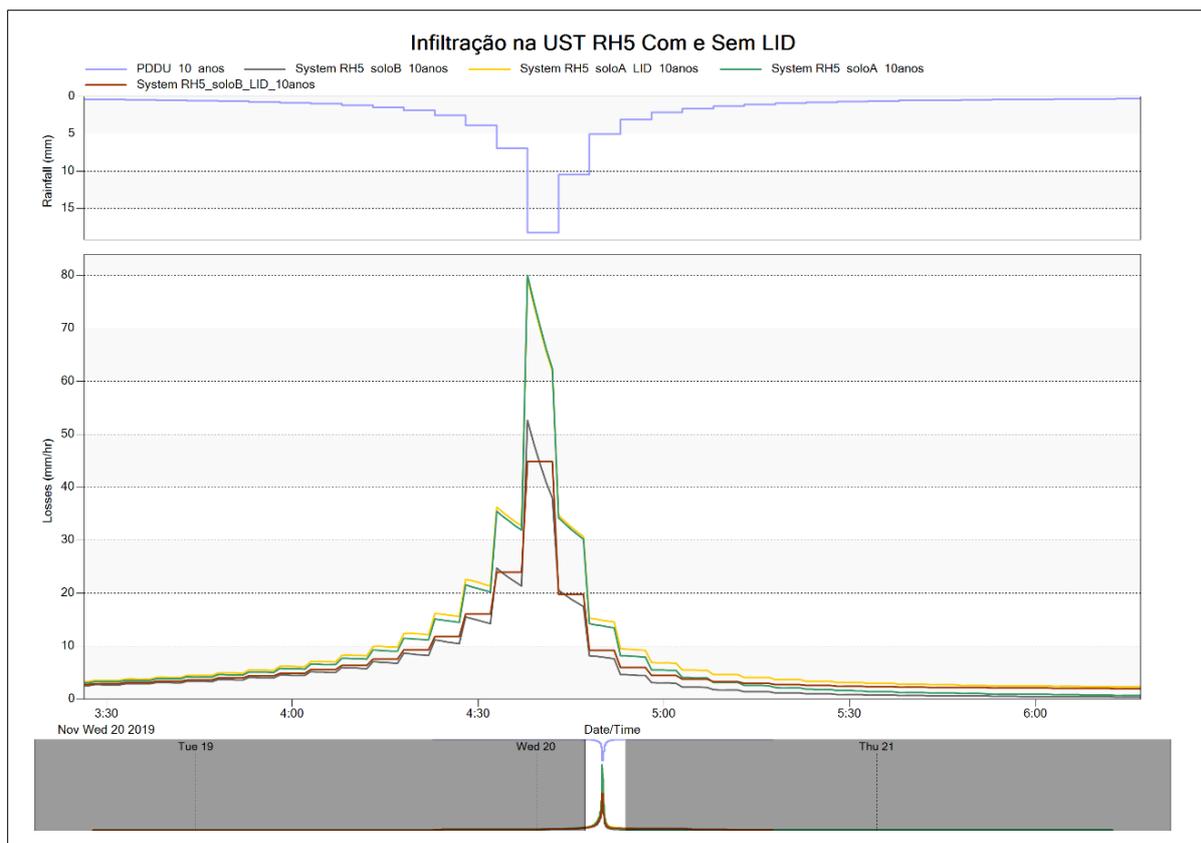


Figura 5. 3. Gráfico de taxa de infiltração da água em mm/h para os arranjos da UST RH5 com tempo de retorno de 10 anos.

Para comparar o funcionamento e eficiência das trincheiras de infiltração no desempenho de amortecimento do escoamento superficial e infiltração da água, o arranjo com rede sustentável foi simulado com chuva de projeto com período de retorno de dois anos. A Tabela 5.5 apresenta o resumo das vazões máximas obtidas nas simulações com tempo de retorno de 10 e 2 anos, de modo que foi somada a vazão nos dois exutórios, e as respectivas taxas de amortecimento. Obteve-se, pela Tabela 5.5, que nos dois tempos de retorno o solo B apresentou maior taxa de amortecimento da vazão de pico do que o solo A, para a UST RH5, pelo motivo de maior volume de escoamento superficial ser gerado no solo B e por isso ter maior sensibilidade às trincheiras.

Tabela 5. 5. Resumo das vazões máximas totais na UST RH5, para tempo de retorno de 10 e 2 anos.

Tempo de Retorno (anos)	Cenário	Vazão Sem LID (m <sup>3</sup> /s)	Vazão Com LID (m <sup>3</sup> /s)	Amortecimento (%)
10	Solo A	47,27	38,7	18,13
	Solo B	54,56	33,63	38,36
2	Solo A	20,68	19,03	7,98
	Solo B	35,27	21,3	39,61

Nas simulações com tempo de retorno de 10 e 2 anos, as vazões obtidas com as trincheiras ainda são maiores ao valor da vazão máxima permitida pela resolução da Adasa, implicando na necessidade de adotar outras formas de soluções de drenagem para amortecer a vazão de pico para esse tipo de arranjo. Sendo assim, foi dimensionada uma bacia de detenção para cada exutório no mesmo cenário das trincheiras. Essa solução foi escolhida pelo espaço limitado à área verde central na quadra da UST RH5 e pela alta vazão que necessita ser amortecida.

Cada bacia de detenção foi dimensionada para ter vazão de lançamento de 1,22 m<sup>3</sup>/s e ocupar metade da área verde central, 2982,06 m<sup>2</sup>, localizada próxima do exutório. No solo B, por ser um solo menos permeável, a dimensão das bacias teve uma escala maior do que a dimensão das bacias no solo A (Tabela 5.6).

Tabela 5. 6. Volume e profundidade das bacias de detenção, e tempo de pico para cada exutório para UST RB2, solo A e B.

Exutório	Solo A			Solo B		
	Volume (m <sup>3</sup> )	Profundidade (m)	Tempo de pico	Volume (m <sup>3</sup> )	Profundidade (m)	Tempo de pico
1	12.195,17	4,09	08h e 09 min	18.951,44	6,35	8h e 01 min
2	12.724,03	4,27	08h e 03 min	18.676,88	6,26	08h e 02 min

### 5.2.1. UST RB2

No arranjo da UST RB2 com uso de valas de infiltração, as unidades de valas de cada sub-bacia foram replicadas em até três vezes para o solo A e no solo B em quatro vezes, com o objetivo de obter resultados de vazões mais satisfatórios. As Figuras 5.4 e 5.5 representa a proporção da área ocupada pelas valas nas sub-bacias no solo A e B, sendo uma proporção discrepante.

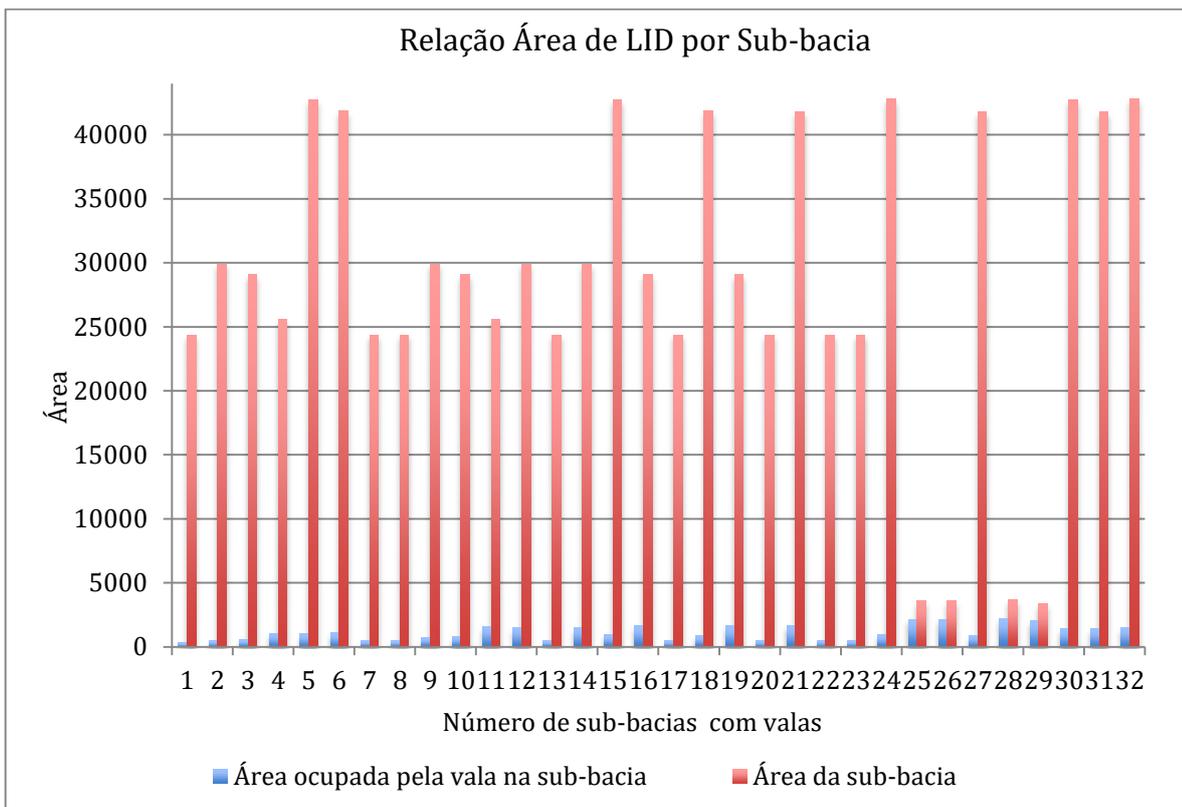


Figura 5. 4. Relação da área ocupada pelas valas em cada sub-bacia e a área total da sub-bacia, no solo A.

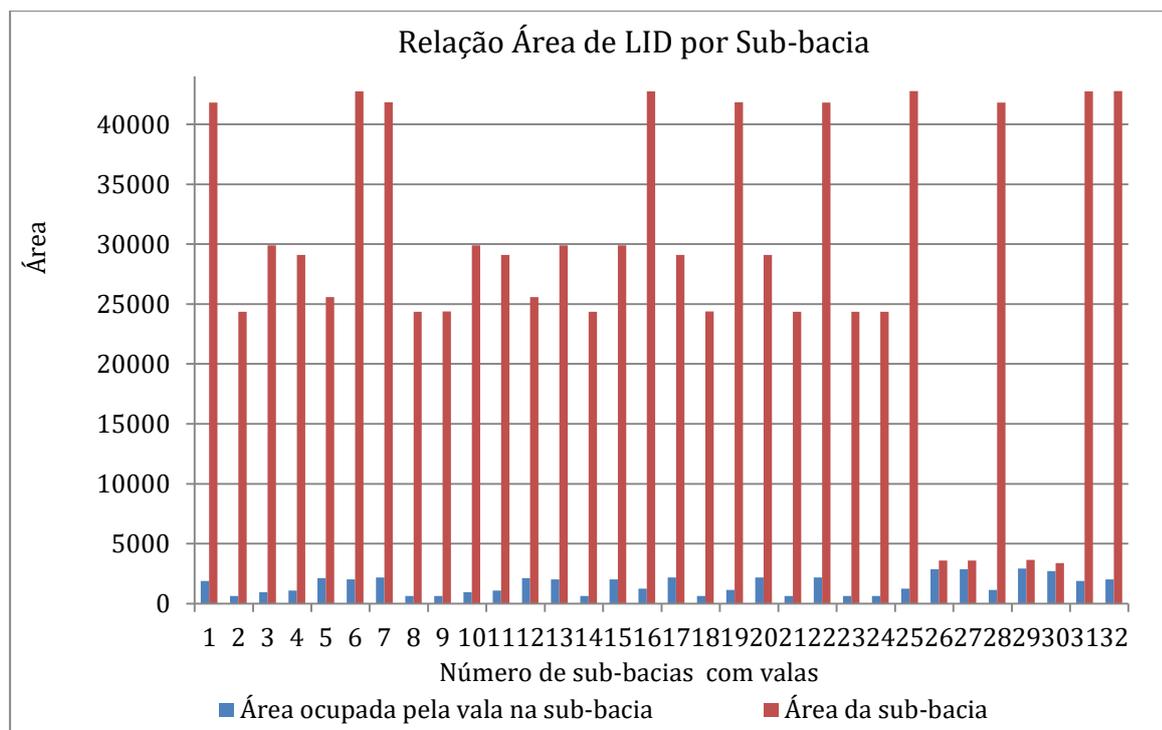


Figura 5. 5. Relação da área ocupada pelas valas em cada sub-bacia e a área total da sub-bacia, no solo B.

Na simulação usando tempo de retorno de 10 anos, as valas não se mostraram eficientes para prolongar o tempo de pico das ondas de cheias e quanto às vazões de pico não houve alterações consideráveis (Tabela 5.7). Os hidrogramas de vazão no exutório 1 e as taxas de infiltração dos arranjos da UST RB2 são ilustrados nas Figuras 5.6 e 5.7. Obteve-se que mesmo replicando as valas, elas não melhoraram a situação de infiltração para os dois solos.

Tabela 5. 7. Vazões e tempo de pico para UST RB2 com uso de valas de infiltração, exutório 1 e 2, para tempo de retorno de 10 anos.

	UST RB2 Solo A				UST RB2 Solo B			
	Rede sem valas		Rede com valas		Rede sem valas		Rede com valas	
Exutório	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Tempo de pico	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Tempo de pico	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Tempo de pico	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Tempo de pico
1	12	6h e 33 min	11,3	6h e 43 min	30,92	6h e 2 min	30,01	6h e 3 min
2	4,54	6h e 36 min	4,4	6h e 45 min	16,69	6h e 1 min	15,88	6h e 3 min

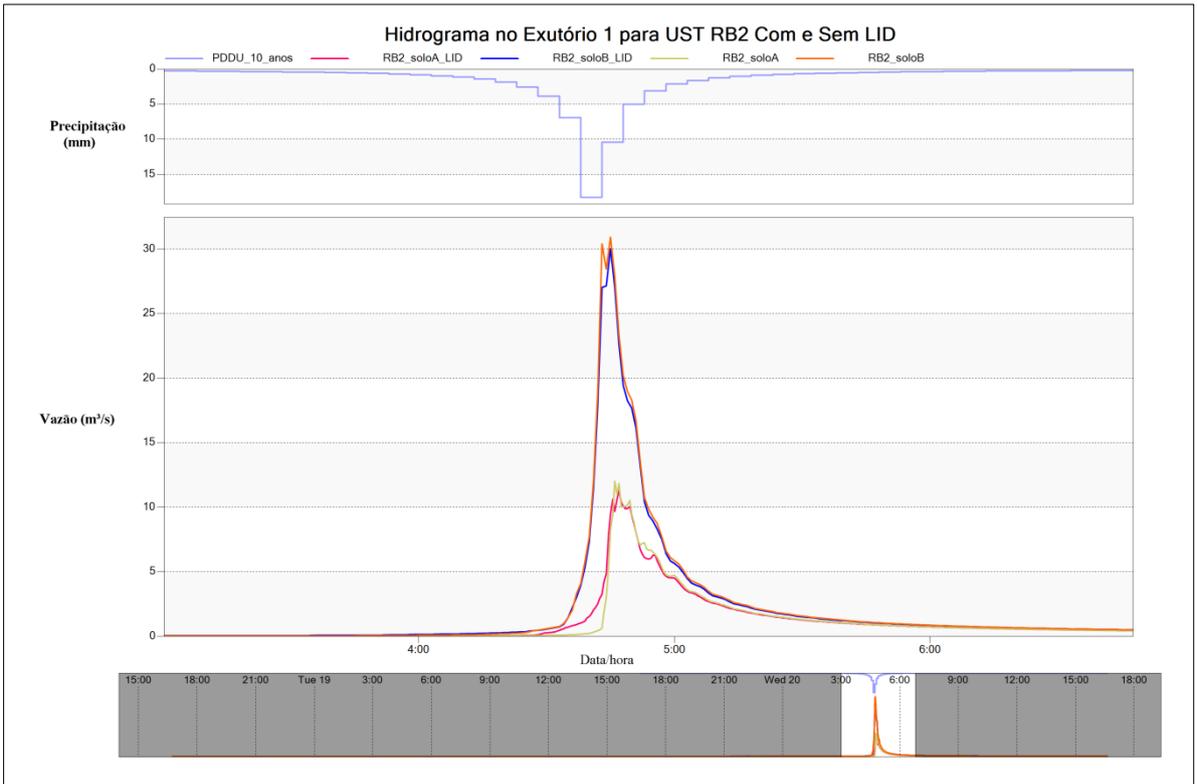


Figura 5. 6. Hidrograma no exutório 1 para os arranjos da UST RB2 com tempo de retorno de 10 anos.

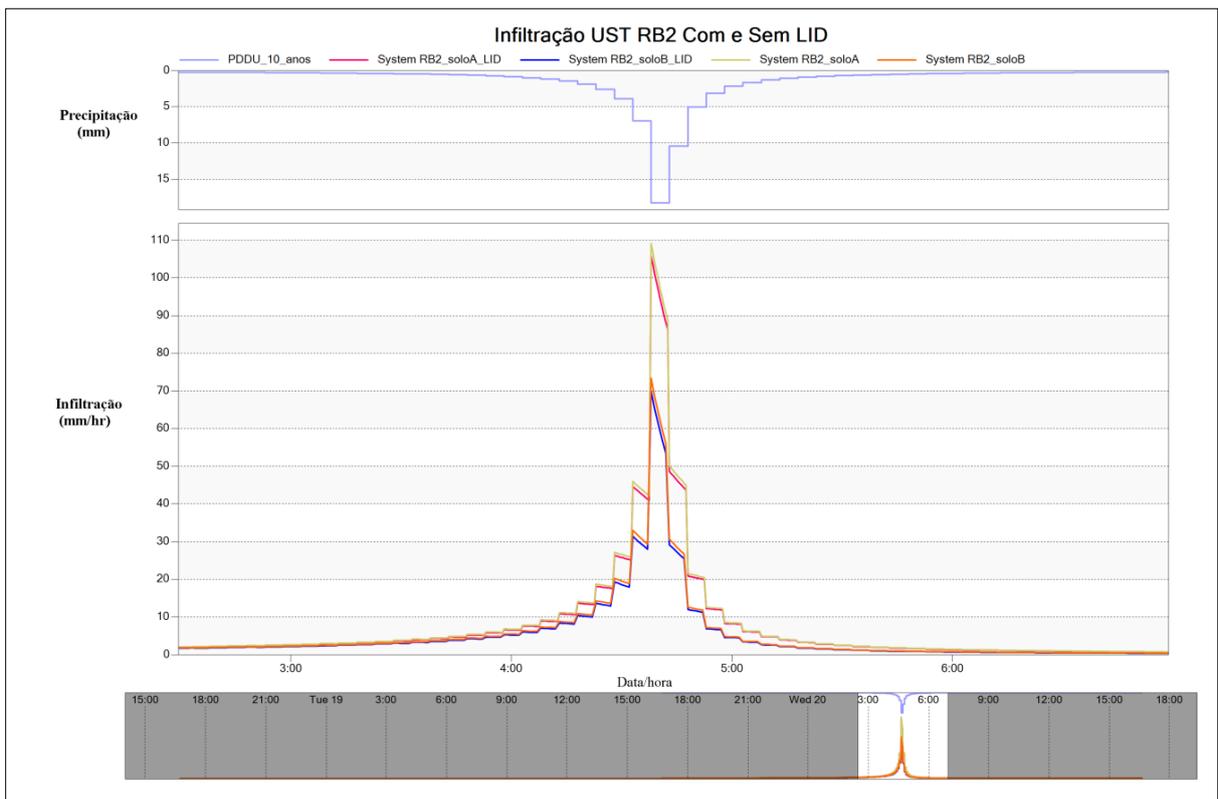


Figura 5. 7. Gráfico de taxa de infiltração da água em mm/h para os arranjos da UST RB2 com tempo de retorno para 10 anos.

Para comparar o funcionamento e eficiência das LID's, o arranjo com rede sustentável foi simulado com chuva de projeto com período de retorno de 2 anos. Era esperado que as LID's tivessem um melhor funcionamento com tempo de retorno de 2 anos, devido a quantidade de escoamento superficial ser menor, mas conforme as taxas de amortecimento obtidas isso não pôde ser constatado. A Tabela 5.8 mostra a taxa de amortecimento das vazões máximas para cada tempo de retorno, sendo que nos dois casos obtiveram-se baixos amortecimentos. No caso do solo A com tempo de retorno de 2 anos, não houve amortecimento, o que pode ser justificado pelos parâmetros usados no modelo não terem sido ajustados e calibrados.

Tabela 5. 8. Resumo das vazões máximas totais na UST RB2, para tempo de retorno de 10 e 2 anos.

Tempo de Retorno (anos)	Cenário	Vazão Sem LID (m <sup>3</sup> /s)	Vazão Com LID (m <sup>3</sup> /s)	Amortecimento (%)
10	Solo A	16,54	15,7	5,07
	Solo B	47,61	45,89	3,61
2	Solo A	1,75	2,7	-
	Solo B	24,71	24,16	2,23

Constatou-se que a solução de valas de infiltração adotada nas simulações da UST RB2 teve baixo desempenho no amortecimento da vazão de pico, não sendo suficiente para reduzir o escoamento superficial de forma significativa, a fim de atingir a vazão máxima permitida pela Adasa. Isso se repetiu para o tempo de retorno de 10 anos e de 2 anos. Dessa forma, a justificativa para as valas de infiltração não terem contribuído para a infiltração e amortecimento, pode estar relacionada à forma utilizada de inserção das valas na sub-bacia durante a modelagem hidrológica, em que não foi criada uma sub-bacia separada para cada vala impedindo seleciona-las como áreas receptoras das águas ao invés dos poços de visita. Sendo assim, o escoamento não convergiu para as valas impedindo analisar efetivamente seu funcionamento.

Foi preciso dimensionar outra solução de drenagem para amortecimento da vazão de pico junto ao cenário das valas. Dentre as possíveis soluções adaptadas ao espaço da UST RB2,

além das valas, foram escolhidas bacias de retenção inseridas para cada exutório, assim como na UST RH5. As bacias de retenção são recomendadas para reduzir as vazões elevadas no contexto urbano e para atenuar os volumes de escoamento por meio da infiltração.

As bacias foram dimensionadas para ocupar o espaço das quadras esportivas próximas a cada exutório, ocupando uma área de 1829,12 m<sup>2</sup>, e vazão final de pré-desenvolvimento de 1,22 m<sup>3</sup>/s de acordo com a resolução da Adasa. No solo B, por ser um solo menos permeável, a dimensão das bacias teve uma escala maior do que a dimensão das bacias no solo A (Tabela 5.9).

Tabela 5. 9. Volume e profundidade das bacias de retenção, e tempo de pico para cada exutório para UST RB2, solo A e B.

Exutório	Solo A			Solo B		
	Volume (m <sup>3</sup> )	Profundidade (m)	Tempo de pico	Volume (m <sup>3</sup> )	Profundidade (m)	Tempo de pico
1	9.663,14	5,28	12h e 24 min	22.617,95	12,36	12h e 30 min
2	2.458,91	1,34	12h e 24 min	10.177,14	5,56	12 e 30 min

### 5.2.3. Comparações entre UST's

A seguir é mostrado o resumo da análise da infiltração nos quadros arranjos estudado, para as simulações com tempo de retorno de 10 anos. A Tabela 5.10 apresenta comparações percentuais da máxima infiltração no sistema por tipo de solo nas UST's com e sem LID, não considerando as bacias de retenção. Obtém-se em média 36,1% de redução da infiltração da água no solo tipo B para os arranjos.

Tabela 5. 10. Comparação da máxima infiltração, em mm/hr, por tipo de solo.

Solo	RH5	RH5 LID	RB2	RB2 LID
A	80,01	79,44	109,1	105,9
B	52,68	44,88	73,43	69,97
Comparação Solo (%)	↓34,27	↓43,5	↓32,7	↓33,92

A Tabela 5.11 compara os valores de infiltração por UST com e sem o uso de LID's. Sem o uso de LID, tem-se em média 27,46% de elevação da infiltração no padrão de ocupação da

UST RB2 em relação ao padrão de ocupação da UST RH5, já com o uso de LID, a média de elevação da infiltração passa para 30,42%.

Tabela 5. 11. Comparação da máxima infiltração, em mm/hr, por UST.

Solo	LID	RH5	RB2	Comparação UST (%)
A	Sem	80,01	109,1	↑26,66
B	Sem	52,68	73,43	↑28,26
A	Com	79,44	105,9	↑24,98
B	Com	44,88	69,97	↑35,85

Em relação ao amortecimento da vazão de pico para as simulações com tempo de retorno de 10 anos, a Figura 5.8 compara, por meio do gráfico, as vazões de pico para os quatro arranjos com a taxa de impermeabilidade, considerando 69,6% de impermeabilidade da UST RB2 e 82,2% da UST RH5. De forma geral, o gráfico mostrou que a vazão de pico cresceu com a taxa de impermeabilidade e o arranjo “RH5 Com LID solo B” obteve maior amortecimento da vazão em relação a UST RB2. Pôde-se concluir que as trincheiras na UST RH5 tiveram, portanto, um melhor desempenho na simulação do que as valas inseridas na UST RB2, considerando que a RH5 é mais sensível à implementação da LID por ter maior taxa de impermeabilidade.

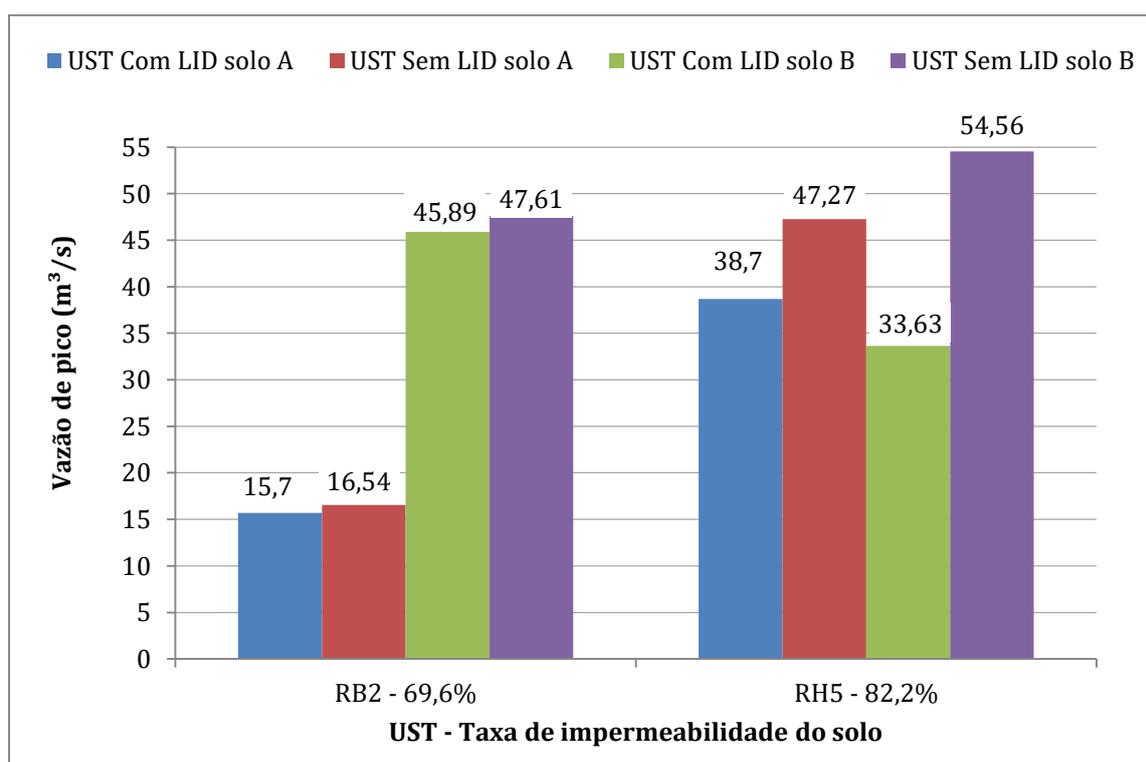


Figura 5.8. Relação das vazões de pico, para os quatro, arranjos com a taxa de impermeabilidade das UST's, considerando tempo de retorno de 10 anos.

A mesma análise gráfica de vazão de pico feita no tempo de retorno de 10 anos foi realizada também com as simulações de 2 anos de retorno (Figura 5.9). Nas duas séries temporais, as trincheiras conseguiram amortecer maior vazão de pico do que as valas, mesmo estando em um solo mais impermeável, além de que, com 2 anos de retorno não houve amortecimento de vazão das valas no solo A, constatando a necessidade de melhorar a modelagem hidrológica das valas na UST RB2.

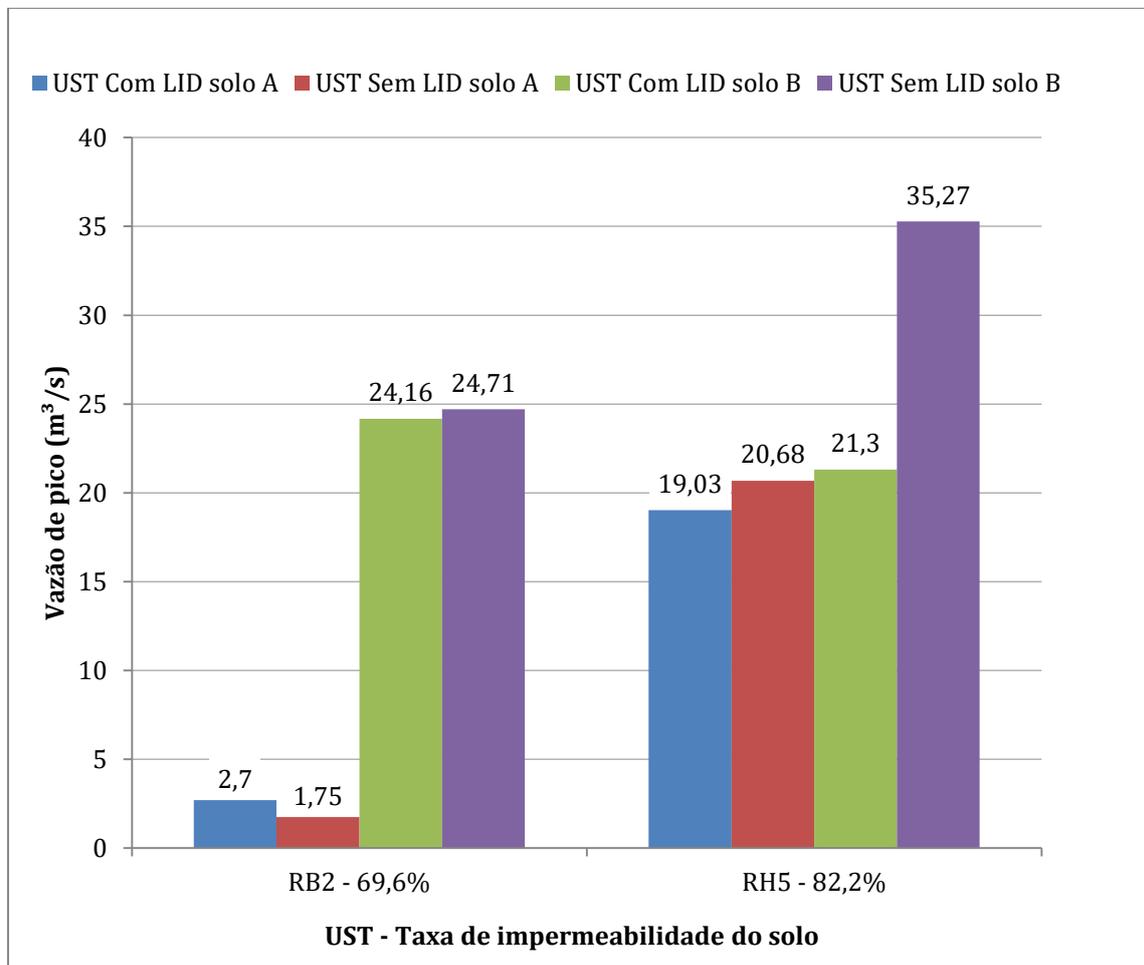


Figura 5.9. Relação das vazões de pico, para os quatro arranjos, com a taxa de impermeabilidade das UST's, considerando tempo de retorno de 2 anos.

O gráfico da Figura 5.10 faz a análise do comportamento das LID's para as duas séries temporais simuladas, de acordo com suas áreas ocupadas na UST. No geral, as simulações com tempo de retorno 2 anos tiveram menor amortecimento, podendo ser explicada pela menor lâmina precipitada que gera menores vazões. A área ocupada pelas trincheiras foi a mesma para os dois solos, 1,13%, sendo uma proporção menor do que as áreas das valas, 3,84% e 5,44%, e mesmo assim, apresentaram melhor desempenho no amortecimento da vazão de pico.

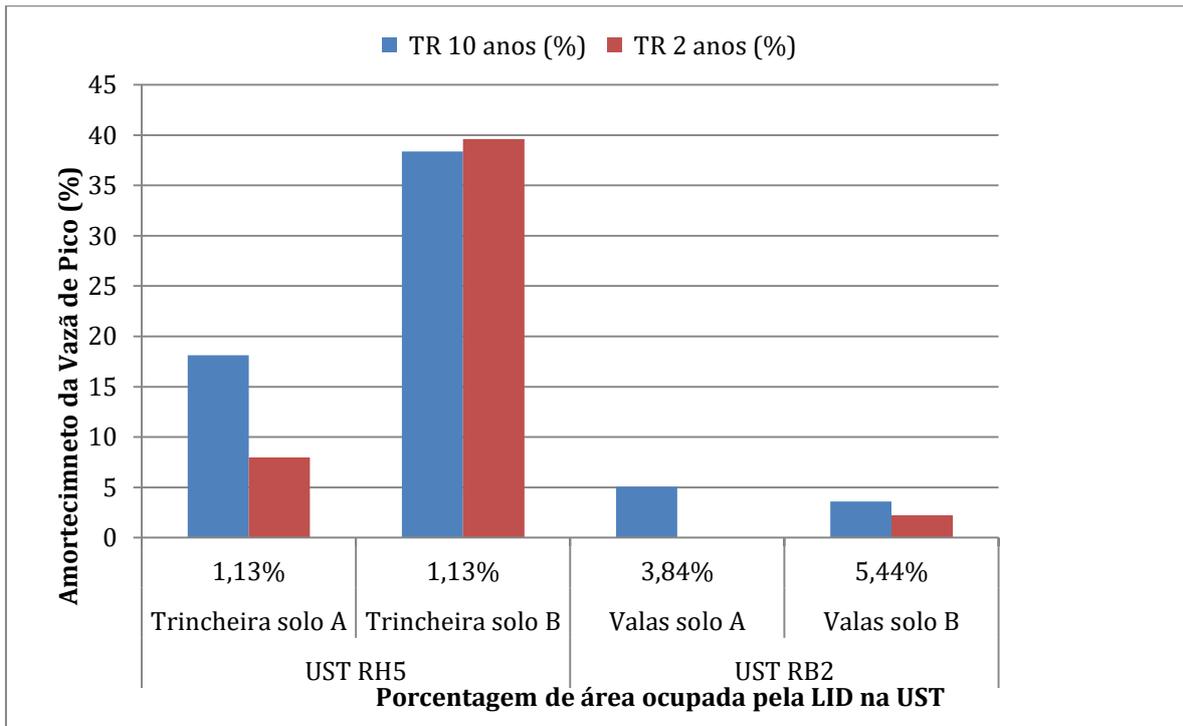


Figura 5.10. Relação percentual do amortecimento da vazão de pico com a área ocupada pela LID na UST, para tempos de retorno de 2 e 10 anos.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

A realização da modelagem hidrológica com o modelo SWMM na versão PCSWMM, foi satisfatória sendo uma ferramenta bem completa que permitiu avaliar os comportamentos dos processos hidrológicos dos arranjos e fazer comparações desses cenários, quanto ao sistema de drenagem, tipo do solo e padrão de ocupação urbana.

As simulações hidrológicas com rede de drenagem convencional, realizadas neste trabalho, mostraram que o padrão de ocupação urbana da UST RB2 no solo A obteve vazões de escoamento superficiais mais reduzidas e taxas de infiltração da água no solo mais elevadas. A diversidade do uso e ocupação do solo e maior disposição de áreas verdes na UST RB2 foram fundamentais para garantir um melhor controle das águas pluviais na UST RB2. Além disso, a UST RH5 tem taxa de impermeabilidade do solo 15% maior do que na UST RB2. Quanto ao impacto do tipo de solo no escoamento superficial, obteve-se em média 36,1% de redução da infiltração da água no solo tipo B, em relação ao solo A.

É bom lembrar que para efetuar uma modelagem adequada é fundamental compreender os parâmetros de simulação, considerando que os modelos têm limitações de representação de situações reais. Dessa forma, para diminuir os possíveis erros cometidos recomenda-se um estudo mais aprofundado dos parâmetros utilizados e dos limites dos modelos usados nas simulações, para assegurar a correspondência com a realidade. Além disso a calibração do modelo não

A avaliação da geomorfologia foi relevante no estudo, considerando que o relevo usado nas bacias foi o planar com declividade moderada e curvatura do relevo próximo de zero. Os padrões de ocupação urbana analisados neste trabalho e inseridos nessa geomorfologia tem tendência de gerar alta velocidade de escoamento nas tubulações, tornando muito importante a implantação de uma rede de drenagem que vai além do convencional e usando soluções adaptadas que favorecem a infiltração da água no solo. Dessa forma, o relevo planar pode ser favorável para a ocupação urbana, mas os custos de drenagem são em geral elevados pela necessidade de dissipação de energia ou uso de materiais com maior rugosidade. Para analisar efetivamente a influência da geomorfologia na geração de escoamento superficial, é recomendado fazer simulações dos mesmos arranjos desse estudo com outro tipo de geomorfologia.

Na simulação com rede de drenagem sustentável, o uso de trincheiras de infiltração foi capaz de amortecer parte da vazão de pico, mas não o suficiente para atender à regulamentação da Adasa. As valas de infiltração acabaram não apresentando eficiência significativa na redução de picos de vazão para os dois tempos de retorno, assim como no papel de aumentar a taxa de infiltração nas bacias. Recomenda-se nos próximos estudos, fazer simulações do comportamento do escoamento superficial entre USTs usando a mesma LID nos dois padrões de ocupação, a fim de obter dados mais coerentes para análise comparativa.

Nas simulações com os dois tempos de retorno, o solo B apresentou maior amortecimento. A UST RH5 no solo B foi o arranjo que teve maior amortecimento de vazão de pico com uso de LID's, cerca de 40%. Isso pode ser explicado pela maior retenção de água nas trincheiras no solo B, devido esse solo geral maior volume de escoamento superficial. Dessa forma, foi preciso adicionar outra solução de drenagem para tornar os padrões de ocupação urbanos mais adequados para o manejo de águas pluviais, dentro do tipo de relevo e solo selecionado no estudo. A adição de bacias de detenção teve capacidade de amortecer o volume excedente de escoamento, atendendo à vazão de lançamento de regulação da Adasa.

Em relação ao comportamento da infiltração nos arranjos em simulação com tempo de retorno de 10 anos, houve em média 27,46% de elevação da infiltração na UST RB2, quando comparada com a infiltração na UST RH5, e já com o uso de LID, essa média de elevação da infiltração passa para 30,42%. É um comportamento esperado pela maior quantidade de áreas verdes e menor taxa de impermeabilidade no UST RB2.

O desempenho dessas medidas compensatórias pode ser explicado pelo tempo de retorno da chuva adotado, sendo que as LID's não tem capacidade de suportar grandes vazões. Esperava-se que no tempo de retorno de 2 anos houve-se maior taxa de amortecimento de vazão, mas de modo geral isso não foi constatado. A baixa eficiência das valas se repetiu para o tempo de retorno de 10 anos e de 2 anos, o que pode estar relacionada à forma que as valas foram inseridas no modelo simulado, mostrando a necessidade de melhorar a modelagem hidrológica das valas na UST RB2.

Para uma possível continuação do trabalho, recomenda-se, a simulação hidrológica com chuva de base contínua, pois permite usar registros reais de precipitação com longo período.

Além disso, a simulação contínua é indicada para dimensionar LID's, já que representa mais fidedignamente dos processos hidrológicos de uma série temporal.

O estudo reforçou a importância do planejamento do uso e ocupação do solo, devido às consequências causadas pela impermeabilização de superfícies em bacias hidrográficas urbanas. Tal planejamento urbano deve ter a competência de compreender e retratar de forma dinâmica e real os tipos de padrão urbano associados com as condições ambientais de relevo e solo. Esse planejamento tem potencial de intervenções futuras positivas e seguras no manejo de águas pluviais, favorecendo o equilíbrio do ciclo hídrico e dos fenômenos hidrológicos nas bacias urbanas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adasa – Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal (2018). Manual de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas do Distrito Federal. Edição revista e atualizada. Brasília, DF: Adasa.
- Andrade, L. M. S. de. (2014). *Conexão dos Padrões Espaciais dos Ecossistemas Urbanos: A construção de um método com enfoque transdisciplinar para o processo de desenho urbano sensível à água no nível da comunidade e da paisagem*. Tese de Doutorado em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 544 p.
- Araújo, B. C. D.; Caram, R. (2006). “Análise Ambiental: Estudo Bioclimático Urbano em Centro Histórico”. *Ambiente & Sociedade*, **9**(1).
- Baptista, M., Nascimento, N., Barraud, S. (2005). *Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana*. 2 ed. Porto Alegre: ABRH.
- Besussi, E.; Chin, N.; Batty, M. & Longley, P. (2010). Chapter 2: The Structure and Form of Urban Settlements. In: Rashed, T. & Jürgens, C. (eds). *Remote Sensing of Urban and Suburban Areas*, Springer Science+Business Media, London, UK.
- Beven, K. J. (2012). *Rainfall-runoff modelling: the primer*. John Wiley & Sons, Ltd. 2. ed. Lancaster University, UK.
- Brasil. (2001). Lei Federal N° 10.257, de 10 de Julho de 2001, Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências – Estatuto das Cidades. Brasília, DF.
- Brito, L. K. S. (2019). Imagem. Comparação de sistemas com implantação de LID e sem implantação de LID.
- Capoane, V.; Santos, L. J. C.; Santos, D. R.; Tiecher, T. (2015). “Uso de Atributos Topográficos para Predição de Áreas Propensas a Perda e a Deposição de Sedimentos em uma Bacia Hidrográfica do Planalto do Rio Grande do Sul”. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. **16**(3).
- Castro, K. B. (2017). *Segurança Hídrica Urbana: Morfologia Urbana e Indicadores de Serviços Ecossistêmicos, Estudo de Caso do Distrito Federal, Brasil*. Tese de Doutorado em Geociências Aplicadas, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 207 p.

- Collischon, W.; Dornelles, F. (2013). Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais. Porto Alegre, RS.
- Computacional Hydraulics INT. (Canadá). Continuous simulation. Disponível em: <<https://support.chiwater.com/77690/continuous-simulation>>. Acesso em: 14 nov. 2018.
- Chi Water. (2019). PCSWMM Support. Disponível em: <https://support.chiwater.com/>. Acesso em: 06 jun.
- Fonseca, F. O. (2001). *Olhares sobre o lago Paranoá*. Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Brasília, DF.
- GDF, Governo do Distrito Federal; GREENTEC. (2011). ZEE - Subproduto 3.1 – Relatório do Meio Físico e Biótico. Brasília: [s.n.]. Disponível em: <http://www.zee-df.com.br>. Acesso em 20 mai. 2019.
- GDF – Governo do Distrito Federal. (2009). Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal. Brasília: Secretaria de Estado de Obras do DF.
- Henman, C. (2012). *Low Impact Development: Technical Guidance Manual for Puget Sound*. Washington State University Extension Faculty.
- Lima, J. E. F. W.; Silva, E. M.; Strauch, M.; Lorz, C. (2013). “Desenvolvimento de Base de Solos para a Aplicação no Modelo SWAT em Bacias do Bioma Cerrado”. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH. Bento Gonçalves, RS.
- Minella, J. P. G.; Merten, G. H. (2012). “Índices topográficos aplicados à modelagem agrícola e ambiental”. *Ciência Rural*. **42**(9).
- Moon, K. D., Downes, N. K., Rujner, H., & Storch, H. (2009) “Adaptation of the urban structure type approach for vulnerability assessment of climate change risks in Ho Chi Minh City”. In: *E-Proceedings 45th ISOCARP Congress 2009 on Low Carbon Cities*, Porto, Portugal, 7 p.
- MMA, Ministério do Meio Ambiente. (2006). Cobertura Vegetal dos Biomas Brasileiros, Mapa de Cobertura Vegetal do Bioma Cerrado. Secretaria de Biodiversidade e Florestas, Planaltina – DF, Embrapa Cerrados; Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia; Goiânia: Universidade Federal de Goiás (eds.).
- NOVACAP (Companhia Urbanizadora da Nova Capital do Brasil). Termo de Referência e Especificação para Elaboração de Projeto de Sistema de Drenagem Pluvial no Distrito Federal. Brasília: Novacap, 2019.
- Reatto, A.; Martins, E. de S.; Farias, M. F. R.; Silva, A. V. da & Carvalho Jr., O. A. de. (2004). Mapa Pedológico Digital – SIG Atualizado do Distrito Federal, Escala

- 1:100.000 e uma Síntese do Texto Explicativo. EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Planaltina, DF.
- Rego, R. L.; Meneguetti, K. S. (2011). “A respeito de morfologia urbana. Tópicos básicos para estudos da forma da cidade”. *Acta Scientiarum Technology*. v.33, n.2, 123-127 p.
- Righetto, A. M. (coord.). (2009). *Manejo de Águas Pluviais*. Projeto PROSAB, ABES, Rio de Janeiro, RJ, 398 p.
- Rocha, L. M. V.; Souza, L.C.L.; Catilho, F. J. V. (2011). “Ocupação do solo e ilha de calor noturna em avenidas marginais a um córrego urbano”. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, **11**(3), 161-175 p.
- Rossman, L. A. & Huber, W. C. (2016). *Storm Water Management Model Reference Manual*, vol. III, Water Quality. US EPA – United States Environmental Protection Agency, 161 p.
- Rossman, L. A. (2010). *EPA SWMM 5.0 Modelo de Gestão de Drenagem Urbana: manual do usuário*. Tradução Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento. Versão brasileira. João Pessoa, Paraíba: UFPB.
- Santos, Carolina; Santos, Valdevino. (2013) “A evolução da urbanização e os processos de produção de inundações urbanas”. *Estação Científica*. UNIFAP. V(N), X -X.
- Sartori, A.; Lombardi Neto, F.; Genovez, A. M. (2005). “Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação de Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação”. In: *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, **10**(4), 05-18.
- Seraphim, A. P. A. C. C. (2018). *Planejamento Urbano e o Gestão das Águas na cidade: Relação entre Tipologia de Ocupação Urbana e Recarga de Aquífero no Distrito Federal*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAU), Universidade de Brasília. Brasília, DF. 207 p.
- Souza, V. C. B. (2002). *Estudo experimental de trincheiras de infiltração no controle da geração do escoamento superficial*. Tese (Doutorado em Engenharia). Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- Troch, P. A.; Paniconi, C.; Loon, E. E. van. (2003). “Hillslope-storage Boussinesq model for subsurface flow and variable source areas along complex hillslopes: 1. Formulation and characteristic response”. In: *Water Resources Research*, **39**(11), 1316.
- Tucci, C. E. M. (2005). *Gestão de Inundações Urbanas*. Ministério das Cidades, Global Water Partnership, World Bank, Unesco.

- Tucci, C. E. M. (2008). “Águas Urbanas”. In: Estudos Avançados, São Paulo, **22**(63), 97-112.
- USDA - United States Department Of Agriculture. (1986). Urban Hydrology for Small Watersheds: Technical Release 55. 2. ed. USDA.
- Woods Ballard, B., et al. (2015). The SuDS Manual. v. 5. Londres: CIRIA.
- Wellington City Council (2013). Water Sensitive Urban Design: A Guide for WSUD Stormwater Management in Wellington. Wellington, New Zealand, 74 p.