

NATASKA SCHINCARIOL PONTREMOLEZ

Estudo das inundações em cenários alternativos de uso e ocupação do solo na
bacia hidrográfica do Córrego do Mineirinho em São Carlos, SP

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos, SP

2013

NATASKA SCHINCARIOL PONTREMOLEZ

Estudo das inundações em cenários alternativos de uso e ocupação do solo na
bacia hidrográfica do Córrego do Mineirinho em São Carlos, SP

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos, da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para obtenção do título
de Mestre em Ciências: Engenharia Hidráulica e
Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. João Luiz Boccia Brandão

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos, SP

2013

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

P811e Pontremolez, Nataska Schincariol
Estudo das inundações em cenários alternativos de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Córrego do Mineirinho em São Carlos, SP / Nataska Schincariol Pontremolez; orientador João Luiz Boccia Brandão. São Carlos, 2013.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.

1. inundações urbanas. 2. modelação hidráulico-hidrológica. 3. manchas de inundação. 4. comparação de cenários. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **NATASKA SCHINCARIOL PONTREMOLEZ**.

Título da dissertação: "Estudo das inundações em cenários alternativos de uso e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do Córrego do Mineirinho em São Carlos, SP.".

Data da defesa: 25/10/2013

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. **João Luiz Boccia Brandão (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADA

Prof. Dr. **Ademir Paceli Barbassa**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADA.

Prof. Dr. **Rubem La Laina Porto**
(Escola Politécnica/USP)

APROVADA

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:

Profa. Associada **Maria Bernadete A. Varesche Silva**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. João Luiz Boccia Brandão, por ter me concedido seu apoio, instrução, paciência e amizade.

Ao Prof. Dr. Rubem La Laina Porto, por contribuir para a formulação do tema deste trabalho.

Aos meus pais, por terem me ensinado a ter coragem e perseverança nos momentos de dificuldade.

Às minhas irmãs, pelo amor e amizade, e por me apoiarem sempre.

Ao meu querido Raphael, pelo apoio em todos os momentos, paciência, dedicação e ajuda inclusive nas questões técnicas.

Aos amigos Patrik, Thiago e André, pois sua ajuda nos trabalhos de campo, na execução dos modelos computacionais e na solução de dúvidas contribuíram de forma muito importante para a realização desse trabalho.

Às amigas Giovanna, Priscila, Thays e Marília, pela amizade e compreensão.

Aos meus companheiros de trabalho, pela paciência e disposição em ajudar.

Ao Paulo, técnico do Departamento de Engenharia de Transportes da EESC - USP, pela ajuda nos levantamentos topobatimétricos.

A todos os funcionários do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC – USP, que sempre ofereceram ajuda quando foi necessário.

A todos os meus professores da Graduação e Pós-Graduação, cujos ensinamentos me possibilitaram realizar esse trabalho.

“A alienação percebida por Macunaíma também expressa o alheamento do produtor em relação aos bens produzidos. Uma característica do ser histórico é produzir coisas, expressar-se em objetos produzidos. Na medida em que perde o controle desses objetos, ele se aliena de si próprio, afastando-se da natureza na qual vive, bem como da sociedade que o cerca. Um exemplo? As pessoas que não enxergam as ruas e o que está à sua volta, mesmo que passem diariamente por avenidas poluídas e tomadas por gente miserável. Só enxergam para dentro de seus veículos, no conforto do ar condicionado. Ou então canalizam os rios. Exemplo disso é a retificação dos rios Tietê e Pinheiros e as marginais, que os emparedaram. Quase que diariamente as pessoas os veem, mas o que era rio transformou-se em esgoto. E as pessoas nem enxergam; sua capacidade de olhar – e cheirar – desaparece, elas são tomadas por um sentimento de distanciamento.”

Célio Turino, Na Trilha de Macunaíma – Ócio e Trabalho na Cidade

RESUMO

PONTREMOLEZ, N.S. **Estudo das inundações em cenários alternativos de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Córrego do Mineirinho em São Carlos, SP.** 2013. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

No Brasil, o processo de urbanização iniciado na década de 1950 ocorreu sem o planejamento adequado, e resultou em impactos sobre os sistemas de drenagem das bacias hidrográficas. Essas alterações no escoamento, associadas à ocupação humana das áreas de várzea, resultam em inundações com enormes prejuízos materiais e não materiais. Na falta de uma visão mais global dos processos que ocorrem na bacia, muitas vezes os problemas de enchentes urbanas são combatidos com obras que visam expulsar a água o mais rápido possível. Tais soluções acabam por transferir o problema para regiões à jusante da bacia, além de estimular a ampliação da ocupação das planícies de inundação dos cursos de água. Em 1945, em sua tese de doutorado, o pesquisador Gilbert F. White analisou os prejuízos materiais e não materiais causados por inundações nos Estados Unidos e concluiu que, sempre que possível, a ocupação humana deve se adaptar às enchentes. A partir desse princípio, foi criado em 1969 o *Urban Drainage and Flood Control District* (UDFCD), com o objetivo de ajudar governos locais da região metropolitana de Denver, nos EUA, na redução do risco de inundações. O presente trabalho teve como objetivo principal o estudo das inundações geradas por precipitações de diferentes tempos de retorno em cenários alternativos de ocupação da bacia hidrográfica do Córrego do Mineirinho. Um dos cenários estudados foi desenvolvido à luz dos princípios e diretrizes do UDFCD para o controle de inundações. A modelação hidráulico-hidrológica foi utilizada para construir hidrogramas de cheia e manchas de inundação para a bacia, e assim possibilitar a comparação entre os cenários alternativos. Os resultados demonstraram que o Plano Diretor Municipal de São Carlos não considera o controle de inundações, e caso a região se desenvolva segundo suas diretrizes, ocorrerá ampliação das inundações na bacia e aumento nas vazões descarregadas no exutório, em relação à situação atual. Caso seja construído o reservatório de retenção previsto no Plano Diretor de Drenagem Urbana, as vazões no exutório diminuirão drasticamente, reduzindo o impacto nas bacias à jusante; no entanto, a inundação atingirá áreas residenciais, causando problemas aos habitantes. Caso a região se desenvolva segundo os princípios e diretrizes do UDFCD para o controle de inundações, as vazões no exutório da bacia diminuirão em relação à situação atual, e as áreas inundadas não atingirão a população.

Palavras-chave: inundações urbanas, modelação hidráulico-hidrológica, manchas de inundação, comparação de cenários.

ABSTRACT

PONTREMOLEZ, N.S. **Study of floods under alternative scenarios for the land use and occupation in the watershed of the stream Mineirinho, in Sao Carlos, SP.** 2013. 131 f. Master of Science Degree Thesis. (MSc degree in Hydraulic and Sanitary Engineering) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

In Brazil, the urbanization process started in the 1950s occurred without proper planning, and resulted in negative impacts on the hydrologic systems, such as increased frequency of flooding and peak flow volumes. The changes in runoff associated with human occupation of floodplains result in floods with huge losses. In the absence of a more global view of the processes occurring in the watersheds, often the problems of urban flooding are countered with works that aim to expel the water as quickly as possible. Such solutions end up transferring the problem to regions downstream of the watershed, and stimulate the occupation of floodplains. In 1945, Gilbert F. White analyzed the material and non-material damage caused by floods in the United States and concluded that whenever possible, human occupation must adapt to floods. From that idea, in 1969 was created the Urban Drainage and Flood Control District (UDFCD), with the goal of helping local governments in Denver metropolitan area, USA, in reducing the risk of flooding. This work aimed to study the floods generated by rainfall of different return periods under alternative scenarios for the land use and occupation of the watershed of stream Mineirinho, in Sao Carlos, SP. A particular scenario of land use and occupation was developed under the principles and guidelines of UDFCD for flood control. Hydraulic-hydrological modeling was performed to construct hydrographs and flood maps for the watershed, enabling a comparison between the alternative scenarios. The results demonstrated that the Master Plan of Sao Carlos does not consider flood control, and if the region is developed according to their guidelines, the flow rate and flood areas will be increase, in comparison to the current situation of land use and occupation. If the detention reservoir provided for Master Plan for Urban Drainage is built, flow rates will decrease drastically, reducing the impact on the watersheds downstream. However, the flood will reach residential areas, causing problems for the population. If the region is developed according to the principles and guidelines of UDFCD for flood control, the outflow will decrease compared to the current situation, and the flooded areas will not reach the population.

Keywords: urban floods, hydraulic-hydrological modeling, flood zone maps, scenario comparison.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Efeito da urbanização no hidrograma hipotético	21
Figura 2 - Triângulo do risco. Fonte: Crichton (1999)	23
Figura 3 - Etapas da gestão do risco de inundações. Fonte: Graciosa e Mendiondo (2007).....	24
Figura 4 - Visão geral das medidas para gestão do risco de inundações, na escala da bacia hidrográfica	25
Figura 5 - Medidas estruturais e não estruturais para gestão do risco de inundações, na escala de bairro ou comunidade.....	26
Figura 6 - Resumo dos valores dos coeficientes apresentados no Plano Diretor de São Carlos. Fonte: PMSC (2005).....	35
Figura 7 - Bible Park em Denver, EUA. Integração entre o sistema de drenagem, prevenção de inundações, recreação e espaços abertos demonstra integração entre engenheiros, arquitetos, urbanistas e planejadores. Fonte: UDFCD (2001).....	48
Figura 8 - Bacia do Mineirinho. Fonte: Bressiani (2011).....	52
Figura 9 - Modelo Digital de Elevação da bacia do Córrego do Mineirinho. Fonte: Aprígio (2012)	54
Figura 10 - Indicação dos locais onde as seções transversais foram levantadas	55
Figura 11 - Delimitação das sub-bacias do Córrego do Mineirinho. Fonte: Aprígio (2012)	56
Figura 12 - Hietograma da chuva de projeto com tempo de retorno de 25 anos.....	61
Figura 13 - Hietograma da chuva de projeto com tempo de retorno de 50 anos.....	61
Figura 14 - Hietograma da chuva de projeto com tempo de retorno de 100 anos.....	62
Figura 15 - Mapa de uso e ocupação do solo para o Cenário 1 - atual. Fonte: Aprígio (2012)	65
Figura 16 - Zoneamento da bacia do Córrego do Mineirinho de acordo com o Plano Diretor Municipal. Fonte: Aprígio (2012).....	67
Figura 17 - Mapa de uso e ocupação do solo para o Cenário 2 – futuro tendencial. Fonte: Aprígio (2012) .	68
Figura 18 – Reservatório do córrego do Mineirinho, proposto no Plano Diretor de Drenagem Ambientalmente Sustentável. Fonte: PMSC (2011).....	70
Figura 19 - Curva cota-descarga do reservatório R0	71
Figura 20 - Curva cota-volume do reservatório R0. Adaptado de PMSC (2011)	72
Figura 21 - Localização dos reservatórios propostos no Cenário 4 - futuro alternativo	76
Figura 22- Perfil da barragem do reservatório R1	79
Figura 23 - Curva cota-volume do reservatório R1	79
Figura 24 - Curva cota-descarga do reservatório R1	80
Figura 25 - Perfil do vertedor WES do reservatório R1	80
Figura 26 – Perfil da barragem do reservatório R2.....	81
Figura 27 - Curva cota-volume do reservatório R2	81
Figura 28 - Curva cota-descarga do reservatório R2	82
Figura 29 - Traçado do perfil do vertedor WES do reservatório R2	82
Figura 30 - Perfil da barragem do reservatório R3	83
Figura 31 - Curva cota-volume do reservatório R3	83

Figura 32 - Curva cota-descarga do reservatório R3	84
Figura 33 - Traçado do perfil do vertedor WES do reservatório R3	84
Figura 34 - Mapa de uso e ocupação do solo para o Cenário 4 - futuro alternativo.....	86
Figura 35 - Topologia do sistema para o Cenário 1 - atual e Cenário 2 - futuro tendencial.....	88
Figura 36 - Topologia do sistema para o Cenário 3 - futuro tendencial com Plano Diretor de Drenagem Urbana	88
Figura 37 - Topologia do sistema para o Cenário 4 - futuro alternativo	89
Figura 38 - <i>Layout</i> resultante da etapa de pré-processamento de dados para geração das manchas de inundação.....	92
Figura 39 - Galeria de jusante da rotatória da Av. Bruno Ruggiero Filho	93
Figura 40 - Layout dos dados geométricos após sua edição no HEC-RAS	94
Figura 41 - Exemplo de perfil de superfície da água, resultante da simulação hidráulica	95
Figura 42 - Hidrogramas calculados para o exutório da área de estudo, para o tempo de retorno de 25 anos	98
Figura 43 - Hidrogramas calculados para o exutório da área de estudo, para o tempo de retorno de 50 anos	98
Figura 44 - Hidrogramas calculados para o exutório da área de estudo, para o tempo de retorno de 100 anos	99
Figura 45 - Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório R0 para o Cenário 3 - futuro tendencial com Plano Diretor de Drenagem Urbana, com tempo de retorno de 100 anos	101
Figura 46 - Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório R1 para o Cenário 4 - futuro alternativo, com tempo de retorno de 100 anos	102
Figura 47 - Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório R2 para o Cenário 4 - futuro alternativo, com tempo de retorno de 100 anos	102
Figura 48 - Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório R3 para o Cenário 4 - futuro alternativo, com tempo de retorno de 100 anos	103
Figura 49 - Mancha de inundação para o Cenário 1 - atual, com tempo de retorno de 25 anos	104
Figura 50 - Mancha de inundação para o Cenário 2 – futuro tendencial, com tempo de retorno de 25 anos	105
Figura 51 - Mancha de inundação para o Cenário 3 – futuro tendencial com Plano Diretor de Drenagem Urbana, com tempo de retorno de 25 anos.....	105
Figura 52 - Mancha de inundação para o Cenário 4 – futuro alternativo, com tempo de retorno de 25 anos	106
Figura 53 - Mancha de inundação para o Cenário 1 - atual, com tempo de retorno de 50 anos	106
Figura 54 - Mancha de inundação para o Cenário 2 – futuro tendencial, com tempo de retorno de 50 anos	107
Figura 55 - Mancha de inundação para o Cenário 3 – futuro tendencial com Plano Diretor de Drenagem Urbana, com tempo de retorno de 50 anos.....	107

Figura 56 - Mancha de inundação para o Cenário 4 - futuro alternativo, com tempo de retorno de 50 anos	108
Figura 57 - Mancha de inundação para o Cenário 1 - atual, com tempo de retorno de 100 anos	108
Figura 58 - Mancha de inundação para o Cenário 2 – futuro tendencial, com tempo de retorno de 100 anos	109
Figura 59 - Mancha de inundação para o Cenário 3 – futuro tendencial com Plano Diretor de Drenagem Urbana, com tempo de retorno de 100 anos.....	109
Figura 60 - Mancha de inundação para o Cenário 4 - futuro alternativo, com tempo de retorno de 100 anos	110
Figura 61 - Área de lazer contígua à nascente do Córrego do Mineirinho, próximo à Rua Olavo Godoy..	121
Figura 62 – Cultura de milho na Área de Preservação Permanente do Córrego do Mineirinho, próximo à Rua Lourenço Cerri.....	121
Figura 63 - Vista do Campus II da USP a partir da Rua Osvaldo Perez. No primeiro plano nota-se a presença de resíduos líquidos e sólidos na margem do Córrego do Mineirinho, situado mais ao fundo	122
Figura 64 - Vista do campus II da USP. A vegetação mais próxima é a mata ciliar do Córrego do Mineirinho. Mais adiante, o outro sulco no relevo é por onde corre um de seus afluentes	122
Figura 65 - Vista da Avenida Odete dos Santos. À direita tem-se a mata ciliar do Córrego do Mineirinho, e ao fundo, cultivo de <i>Pinus sp.</i>	123
Figura 66 - Área de gramíneas às margens da Avenida Bruno Ruggiero Filho.....	123
Figura 67 - Vista da Avenida João Stella, uma via de uso misto (residencial e comercial)	124
Figura 68 - Vista da Avenida Bruno Ruggiero Filho. À direita tem-se um condomínio fechado, à esquerda área ocupada por gramíneas, e ao fundo, o bairro Parque Santa Mônica (situado na bacia do Córrego do Gregório)	124
Figura 69 – Vista da seção M5 do levantamento topobatimétrico realizado no Córrego do Mineirinho	125
Figura 70 - Vista da seção M4 do levantamento topobatimétrico realizado no Córrego do Mineirinho.....	125
Figura 71 - Vista da seção M2 do levantamento topobatimétrico realizado no Córrego do Mineirinho.....	126
Figura 72 - A foz do Córrego do Mineirinho.....	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de CN em função da cobertura e do tipo hidrológico do solo. Fonte: PORTO (1995) ...	41
Tabela 2 - Conversão das curvas CN para as diferentes condições de umidade do solo. Fonte: Porto (1995)	42
Tabela 3 - Valores de área e declividade média das sub-bacias. Fonte: Aprígio (2012)	56
Tabela 4 - Valores de CN utilizados. Adaptado de USDA (1986).....	64
Tabela 5 - Porcentagem de área impermeável e CN médio das áreas permeáveis para as cinco sub-bacias e para a Bacia do Mineirinho no Cenário 1 - atual. Fonte: Aprígio (2012)	66
Tabela 6 - Porcentagem de área impermeável e CN médio das áreas permeáveis para as cinco sub-bacias e para a Bacia do Mineirinho no Cenário 2 – futuro tendencial. Fonte: Aprígio (2012)	69
Tabela 7 - Características principais dos vertedores dos reservatórios R1, R2 e R3	77
Tabela 8 - Características principais das galerias de descarregamento de fundo dos reservatórios R1, R2 e R3.....	77
Tabela 9 - Tempo de esvaziamento e valores do coeficiente “a” para cálculo do WQCV	78
Tabela 10 - Porcentagem de área impermeável e CN médio das áreas permeáveis para as cinco sub-bacias e para a Bacia do Mineirinho no Cenário 4 – futuro alternativo.	87
Tabela 11 - Comprimento do percurso hidráulico, declividade e tempo de concentração das sub-bacias	89
Tabela 12 - Vazões máximas (m ³ /s) dos hidrogramas calculados para a área de estudo.....	99
Tabela 13 - Picos de vazão (m ³ /s) para cada ponto do córrego do Mineirinho no Cenário 4 - futuro tendencial.....	104
Tabela 14 - Área (m ²) das manchas de inundação.....	110

LISTA DE SÍMBOLOS

a - Coeficiente correspondente ao tempo de drenagem do volume de armazenamento

A – Área da bacia (m^2)

A_{IMP} – Taxa de impermeabilidade da bacia

A_o – Área do orifício (m^2)

C – Coeficiente de descarga

C_d – Coeficiente de vazão

CN – *Curve Number*

I – Intensidade (mm/h)

I_a - Perdas iniciais por retenção de chuva na bacia (mm)

g – Aceleração da gravidade (m/s^2)

H – Carga hidráulica (m)

H_d – Carga estática de projeto (m)

K – Tempo de trânsito da onda de cheia (h)

L_s – Largura da soleira (m)

L – Comprimento do percurso hidráulico desde o ponto mais distante até o exutório (m)

n – Coeficiente de rugosidade de *Manning*

NA – Nível d'água (m)

NA máx – Nível d'água máximo (m)

NA máx max – Nível d'água máximo maximorum (m)

P - Precipitação total (mm)

P_e - Precipitação efetiva (mm)

Q – Vazão (m^3/s)

S - Potencial de retenção do solo (mm)

S_c - Declividade do percurso hidráulico (m/m)

S_m – Declividade média da bacia (m/m)

T – Duração da chuva (min)

T_c – Tempo de concentração (min)

TR – Período de retorno (anos)

X – Coeficiente de amortecimento do método de Muskingum

x - Coordenada horizontal da soleira, com origem no ponto mais alto do perfil (m)

y - Coordenada vertical da soleira, com origem no ponto mais alto do perfil (m)

WQCV – Volume de armazenamento para qualidade da água (m^3)

LISTA DE SIGLAS

ABC6 – Análise de Bacias Complexas 6
APA – Área de Proteção Ambiental
APP – Área de Proteção Permanente
CA – Coeficiente de Aproveitamento
CDCC – Centro de Divulgação Científica e Cultural
CHREA – Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada
CO – Coeficiente de Ocupação
CP – Coeficiente de Permeabilidade
CV – Coeficiente de Cobertura Vegetal
EESC – Escola de Engenharia de São Carlos
EUA – Estados Unidos da América
FUPAM – Fundação para Pesquisa Ambiental
HEC – *Hydrologic Engineering Center*
HMS – *Hydrologic Modeling System*
IDF – Intensidade-Duração-Frequência
IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas
MDT – Modelo Digital de Terreno
NRCS – *Natural Resources Conservation Service*
ONG – Organização Não Governamental
PDDU – Plano Diretor de Drenagem Urbana
PMSC – Prefeitura Municipal de São Carlos
RAS – *River Analysis System*
SB – Sub-bacia
SCS – *Soil Conservation Service*
SIG – Sistema de Informação Geográfica
SMHDU – Secretaria Municipal de Habitação e Desenvolvimento Urbano (São Carlos)
SP – São Paulo
SWMM – *Storm Water Management Model*
TR – Tempo de Retorno
UFSCAR – Universidade Federal de São Carlos
UDFCD – *Urban Drainage and Flood Control District*

USACE – *U.S. Army Corps of Engineers*

USDA – *U.S. Department of Agriculture*

USP – *Universidade de São Paulo*

VIB – *Velocidade de Infiltração Básica*

WES – *Waterways Experiment Station*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2. OBJETIVOS.....	19
2.1 Objetivo geral	19
2.2 Objetivos específicos.....	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
3.1 Inundações urbanas	20
3.2 Risco de inundações	23
3.3 Medidas de redução do risco de inundações	24
3.3.1 Medidas estruturais	26
3.3.2 Medidas não estruturais.....	28
3.4 Plano Diretor do Município de São Carlos	29
3.4.1 Elaboração.....	30
3.4.2 Conteúdo	31
3.5 Plano Diretor de Drenagem Urbana Ambientalmente Sustentável do Município de São Carlos.....	36
3.6 Modelação	37
3.6.1 Modelação hidrológica.....	37
3.6.2 Modelação hidráulica	44
3.7 Planejamento voltado para a redução do risco de inundações – o Manual de Drenagem do UDFCD	45
3.7.1 Princípios.....	46
3.7.2 Diretrizes	47
4. MATERIAL E MÉTODOS	51
4.1 Área de estudo.....	51
4.2 Dados topográficos.....	53
4.3 Delimitação das sub-bacias	55
4.4 Tempo de concentração das sub-bacias.....	57
4.5 Chuvas de projeto.....	59
4.6 Construção dos cenários alternativos e cálculo do CN	62
4.6.1 Cenário 1 - atual	62
4.6.2 Cenário 2 - futuro tendencial.....	66
4.6.3 Cenário 3 - futuro tendencial com Plano Diretor de Drenagem Urbana.....	69

4.6.4 Cenário 4 - futuro alternativo	72
4.7 Modelação hidrológica	87
4.8 Modelação hidráulica e geração das manchas de inundação.....	91
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	97
5.1 Simulação hidrológica.....	97
5.2 Simulação hidráulica	103
6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	112
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114
APÊNDICE A – Diagnóstico fotográfico da bacia do Córrego do Mineirinho, realizado em 08 de junho de 2013	120
APÊNDICE B – Resultado do levantamento topobatimétrico realizado em junho de 2013 .	127
ANEXO A - Delimitação das zonas do Plano Diretor do Município de São Carlos (PMSC, 2005).....	129

1. INTRODUÇÃO

Na segunda metade do século XX, o processo de industrialização do Brasil resultou no rápido crescimento das cidades. Entre os anos de 1950 e 1991, a população brasileira triplicou, ao passo que a população urbana cresceu 6,15 vezes (SANTOS, 1993). Esse acelerado processo de urbanização ocorreu sem o planejamento adequado, e resultou em impactos sobre os sistemas de drenagem. Em termos quantitativos, a impermeabilização do solo ocasionada pelo desenvolvimento das cidades resulta no aumento do escoamento superficial, e conseqüentemente aumento da vazão máxima e antecipação dos picos dos hidrogramas (TUCCI, 1995).

Desde os primórdios da humanidade, a possibilidade de uso dos rios como fontes de água para o consumo humano e para a agricultura, vias de transporte de cargas e fonte de energia e lazer, estimulou os assentamentos humanos nas planícies que os margeiam. No Brasil, isso não foi diferente, e praticamente todas as cidades se desenvolveram nas proximidades dos cursos de água e da costa. A ocupação humana das áreas de várzea, associadas às alterações no escoamento introduzidas pela urbanização, resultam em enormes prejuízos materiais e não materiais. Nos últimos 10 anos, as 5 enchentes mais severas ocorridas no Brasil causaram a morte de aproximadamente 1500 pessoas, e um prejuízo estimado de 2 bilhões de dólares (EM-DAT, 2011). Segundo Jha, Bloch e Lamond (2012), as inundações são os desastres naturais mais frequentes.

As medidas de redução do risco de inundações podem ser classificadas em estruturais, quando o homem modifica os sistemas de drenagem naturais através de obras hidráulicas, e não estruturais, quando o homem convive com a dinâmica natural desses sistemas. Segundo Tucci e Genz (1995), um planejamento consistente deve contemplar uma integração harmoniosa entre medidas estruturais e não estruturais, e dessas com o desenvolvimento urbano, a fim de se evitar a ampliação das cheias naturais dos cursos d'água. No entanto, a maior parte dos planos diretores urbanos brasileiros não contempla a prevenção contra a ocupação das áreas de risco de enchentes e, atualmente, as ações públicas para reduzir os problemas de inundações tem se limitado a medidas estruturais, com visão pontual (TUCCI, 1995). A canalização dos cursos de água, solução comumente adotada, muitas vezes transfere a enchente de um ponto da bacia, sem que sejam avaliados os efeitos à jusante ou os reais benefícios das obras.

Em 1945, em tese publicada pela Universidade de Chicago, o pesquisador Gilbert F. White (*Human adjustment to floods*) defendeu que a confiança pública em obras estruturais incentiva a ocupação das áreas de várzea, o que resulta em desastres maiores quando as vazões superam os valores de projeto. Por isso, concluiu que sempre que possível, a ocupação humana deve se adaptar às enchentes. Seguindo esses princípios, em 1969 foi criado o *Urban Drainage and Flood Control District* (UDFCD, organização do estado do Colorado, EUA), com a finalidade de ajudar governos locais da região metropolitana de Denver no controle de inundações, a fim de proteger as pessoas, os bens materiais e o meio ambiente.

Em 2001, o UDFCD publicou o Manual de Drenagem (*Drainage Criteria Manual*), com o objetivo de estabelecer diretrizes para o planejamento urbano voltado para a drenagem de águas pluviais e o controle de inundações. Segundo a publicação *Good Examples* (UDFCD, 2008), que apresenta estudos de casos de áreas planejadas segundo esses princípios, alguns dos benefícios sociais, econômicos e ambientais da adoção dessa abordagem são: redução dos danos materiais e não materiais causados por inundações, baixo custo de implantação e operação dos projetos, valorização dos terrenos próximos às áreas de ocupação restrita, melhora na qualidade da água, ampliação das oportunidades de recreação e educação ambiental da população, restauração da vegetação e do habitat ripário e marketing ambiental na comunidade.

A proposta deste trabalho é o estudo das inundações em diferentes cenários de desenvolvimento de uma bacia em processo de urbanização situada no município de São Carlos, SP. Um dos cenários estudados foi construído de acordo com os princípios e diretrizes indicados pelo Manual de Drenagem do UDFCD (2001) para o controle de inundações.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Estudar as inundações geradas por precipitações de diferentes tempos de retorno em cenários alternativos de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Córrego do Mineirinho em São Carlos, SP.

2.2 Objetivos específicos

- a) Construir cenários de desenvolvimento para a bacia do Mineirinho, levando em consideração a situação atual de uso e ocupação do solo, o Plano Diretor Municipal e o Plano Diretor de Drenagem Urbana;
- b) Construir um cenário alternativo de ocupação da bacia do Mineirinho, levando em conta as diretrizes do UDFCD (2001) para o controle de inundações;
- c) Realizar a modelação hidrológica para precipitações com tempos de retorno de 25, 50 e 100 anos para os cenários propostos;
- d) Elaborar mapas de inundação com tempos de retorno de 25, 50 e 100 anos para os cenários propostos;
- e) Avaliar os efeitos dos cenários no controle de inundações na área de estudo e à jusante.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Inundações urbanas

Segundo Tucci (1997), bacia hidrográfica é uma área de captação natural de águas precipitadas, que faz convergir o escoamento para um único ponto de saída ou exutório. Todas as atividades humanas, industriais, agrícolas ou de preservação fazem parte de alguma bacia hidrográfica. Assim, o que ocorre no exutório das bacias é consequência das formas de ocupação do território e da utilização das águas que para ali convergem (PORTO, M.; PORTO, R., 2008).

Na natureza, quando a precipitação atinge uma superfície, parte da água retorna para a atmosfera por evapotranspiração, parte infiltra e contribui para os escoamentos subsuperficial e subterrâneo, e parte escoam pela superfície até chegar aos corpos d'água. A proporção entre essas três partes depende da natureza da superfície e varia ao longo da tormenta (o escoamento superficial tende a aumentar à medida que o solo é saturado com água). Tanto o escoamento superficial quanto o subsuperficial e o subterrâneo tendem a alcançar os cursos de água, embora as águas que escoam pela superfície cheguem muito mais rápido (BUTLER; DAVIES, 2000).

O processo de urbanização produz alterações no sistema de drenagem de uma bacia hidrográfica, tais como a impermeabilização das superfícies e construção de condutos e canais para o escoamento das águas. Como a capacidade de escoamento nas superfícies e canais artificiais normalmente é superior à das superfícies e canais naturais, as águas chegam mais rapidamente aos cursos de água, provocando aumento das vazões de pico e da frequência das cheias (TUCCI; GENZ, 1995).

Sendo hidrograma o gráfico que relaciona a vazão em uma determinada seção do curso de água e o tempo (em resposta a uma precipitação), na Figura 1 tem-se o hidrograma típico de uma bacia natural e aquele resultante da urbanização. Pode-se observar que os principais efeitos da urbanização são o aumento da vazão máxima, antecipação do pico e aumento do volume do escoamento superficial (TUCCI, 1995).

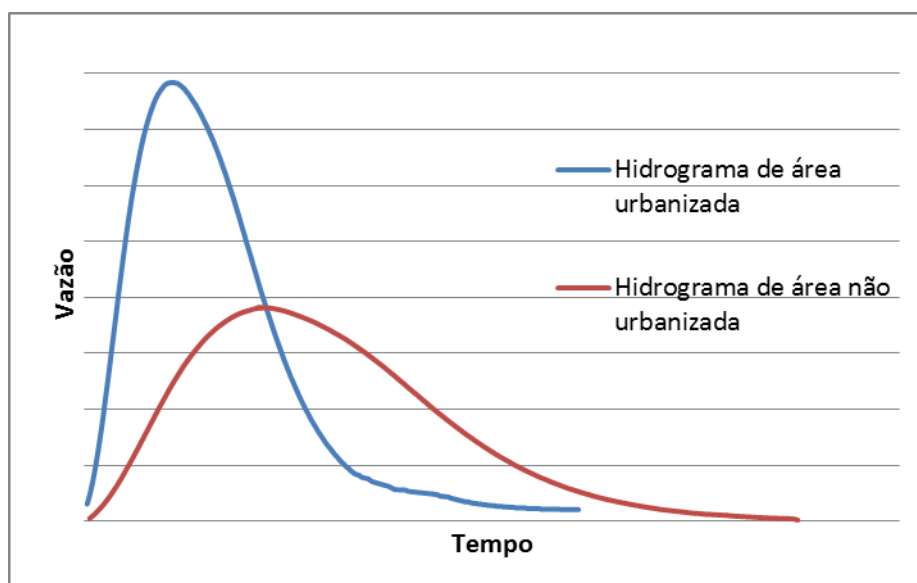


Figura 1 - Efeito da urbanização no hidrograma hipotético

As alterações no comportamento hidrológico de uma bacia, gerada pelo processo de urbanização, resulta no aumento do risco de inundações. Segundo Jha, Bloch e Lamond (2012), as inundações fluviais ocorrem quando a quantidade de água que chega ao corpo d'água é superior à capacidade de transporte de sua calha normal. O excesso de água extravasa do canal para as áreas marginais, de modo a atingir áreas que normalmente estão secas.

Tanto no Brasil como em outros países, além da impermeabilização, a urbanização tem ocasionado a ocupação das várzeas dos rios, que passam a ser incorporadas ao sistema viário por meio das denominadas “vias de fundo de vale” - que por sua vez atraem intensa ocupação. Para permitir a construção das vias marginais sobre os antigos meandros, inúmeros córregos são retificados e canalizados a céu aberto ou encerrados em galerias. Isso significa que as várzeas, sazonalmente sujeitas ao alagamento, são suprimidas, provocando, além da aceleração dos escoamentos, o aumento considerável dos picos de vazão, e em muitos casos, inundações (CANHOLI, 2005).

Segundo Canholi (2005), no Brasil, as soluções adotadas para tais problemas apresentam caráter localizado. A ampliação dos trechos de canais reduz os prejuízos em algumas áreas, mas agrava as inundações à jusante, devido ao aumento da velocidade da água. Segundo o autor, a drenagem urbana é uma questão de “alocação de espaço”, visto que a ocupação humana das áreas de várzea conflita com seu uso natural de amortecimento das cheias. Frequentemente os resultados são a destruição de bens materiais e a perda de vidas.

De acordo com Tucci (1995), as inundações em áreas urbanas são consequências de dois processos: inundações em áreas ribeirinhas e inundações provocadas pela urbanização.

As inundações em áreas ribeirinhas ocorrem principalmente pelo processo natural no qual o rio ocupa o seu leito maior de acordo com eventos chuvosos extremos. Os impactos sobre a população são causados pela ocupação inadequada do espaço urbano, condicionada aos seguintes fatores: inexistência nos Planos Diretores Urbanos de restrição ao loteamento de áreas com risco de inundações; invasão pela população de baixa renda de áreas ribeirinhas pertencentes ao poder público; e ocupação de áreas de médio risco, que são atingidas com frequência menor. As inundações provocadas pela urbanização ocorrem pelo aumento da frequência e magnitude das enchentes devido à ocupação do solo com superfícies impermeáveis e às redes de condutos de escoamento; além disso, obstruções ao escoamento nos condutos e canais e projetos de drenagem inadequados podem causar inundações localizadas.

Quando uma inundação atinge uma área habitada, as consequências são de quatro tipos. Primeiramente, ocorre dano à propriedade física pela morte de culturas agrícolas, lixiviação do solo e destruição da propriedade de várias maneiras. Em segundo lugar, interrompe-se a produção de bens e serviços. Em terceiro lugar, vidas humanas são perdidas ou prejudicadas. Em quarto lugar, a comunidade é forçada a se retirar da área na tentativa de minimizar as perdas, e reocupar a planície após a inundação (WHITE, 1945).

Segundo Canholi (2005), os problemas de inundações transcendem os limites dos municípios e devem ser tratados de forma integrada, considerando a bacia hidrográfica como unidade de gerenciamento. A opção de se considerar esse recorte geográfico traz uma série de dificuldades, e por isso o gerenciamento de recursos hídricos no Brasil frequentemente tem sido segmentado. O autor também afirma que a conexão do planejamento da cidade com o planejamento do uso da água é essencial, uma vez que a drenagem urbana apresenta interfaces com diversos elementos da infraestrutura urbana. Nessa mesma linha, Tucci (2001) recomenda que o espaço urbano seja organizado de forma a harmonizar os diversos subsistemas que se entrelaçam nas cidades. Por isso, propõe que o planejamento de áreas urbanas seja integrado, e envolva, principalmente: o planejamento do desenvolvimento urbano, o transporte, o saneamento, a drenagem urbana e controle de inundações, os resíduos sólidos e o controle ambiental.

O Plano Diretor Municipal, instrumento básico da política de desenvolvimento dos municípios, muitas vezes não considera o planejamento da rede de águas pluviais e da ocupação das áreas de riscos de enchentes (TUCCI, 1995). Por isso, ABRH (1995) recomendou que as cidades brasileiras estabelecessem um Plano Diretor de Drenagem Urbana, com o objetivo de planejar a ocupação do solo urbano em harmonia com os processos

naturais do ciclo hidrológico, priorizando a adoção de medidas não estruturais no controle da inundação das várzeas ribeirinhas. Alguns municípios brasileiros, tais como Porto Alegre, São Carlos, Vitória e Teresina, já desenvolveram esse plano.

3.2 Risco de inundações

Para a maior parte dos autores, dois fatores devem ser considerados na avaliação do risco de inundações: a probabilidade de ocorrência e o respectivo dano gerado. Crichton (1999) considera, além desses elementos, a exposição ao evento. O conceito de “triângulo do risco”, proposto pelo autor, é apresentado na Figura 2.

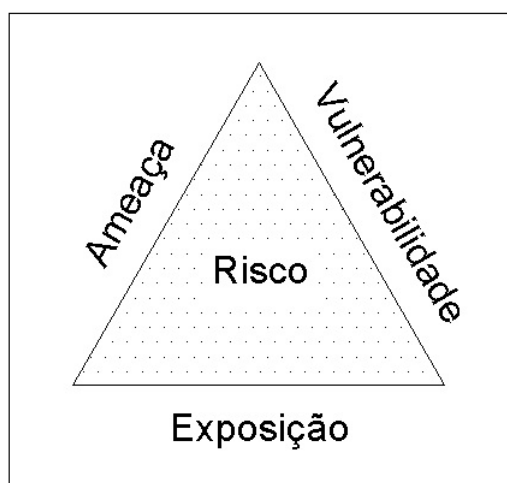


Figura 2 - Triângulo do risco. Fonte: Crichton (1999)

Segundo esse conceito, “ameaça” é a probabilidade de ocorrência de um evento de determinada magnitude, normalmente expressa através do tempo de retorno da cheia. A redução do risco por meio da redução da ameaça é possível através de medidas que visem à redução dos picos das cheias, como obras hidráulicas e medidas de retardamento e contenção de cheias. A “vulnerabilidade” é uma propriedade intrínseca do sistema, que avalia os danos potenciais associados ao evento; a redução da vulnerabilidade é possível por meio de sistemas de alertas e medidas de preparo ante a iminência do evento, pela evacuação e proteção de áreas, acionamento de sistemas de proteção móveis, etc. A “exposição” está relacionada à proximidade geográfica do sistema ao evento iminente; a redução da exposição consiste em afastar as pessoas da área de risco por meio, por exemplo, de leis de zoneamento e incentivos

tributários (GRACIOSA, 2010). Segundo Crichton, (1999), se um dos componentes do risco aumenta ou decresce, o risco aumenta ou decresce proporcionalmente.

De acordo com Heidari (2009), a gestão do risco de inundações é o processo que visa mitigar os danos decorrentes das inundações por meio da redução dos fatores citados acima. Isso pode ocorrer em três fases: preparo (antes do evento), resposta (durante o evento) e recuperação (após o evento). Alguns autores citam a mitigação como uma etapa atemporal que também deve ser considerada (GRACIOSA, 2010).

Graciosa e Mendiondo (2007) ilustraram as etapas do processo de gestão do risco de inundações na Figura 3.



Figura 3 - Etapas da gestão do risco de inundações. Fonte: Graciosa e Mendiondo (2007)

3.3 Medidas de redução do risco de inundações

Embora não seja possível se proteger completamente dos danos decorrentes das inundações, grande parte dos prejuízos pode ser diminuída pela adoção de medidas de redução do risco de inundações (HEIDARI, 2009).

As medidas de redução do risco de inundações podem ser do tipo estrutural e não estrutural. As medidas estruturais são aquelas que modificam o sistema fluvial com o objetivo de controlar as inundações, geralmente através de obras hidráulicas como canalizações, diques e barragens. As medidas não estruturais são aquelas que visam minimizar os danos associados às inundações e permitir a convivência da população com as mesmas, através do planejamento e gestão do ambiente urbano (TUCCI, 1993).

Segundo Jha, Bloch e Lamond (2012), os dois tipos de medidas são complementares e fazem parte de uma abordagem integrada da gestão do risco de inundações. De acordo com Tucci (1993), o controle da inundação, obtido por um conjunto de medidas estruturais e não estruturais, permite à população ribeirinha minimizar suas perdas e manter uma convivência harmônica com o rio.

Na Figura 4 são apresentadas as medidas estruturais e não estruturais para gestão do risco de inundações em torno de um assentamento humano, na escala da bacia hidrográfica (BARKER, 20--).

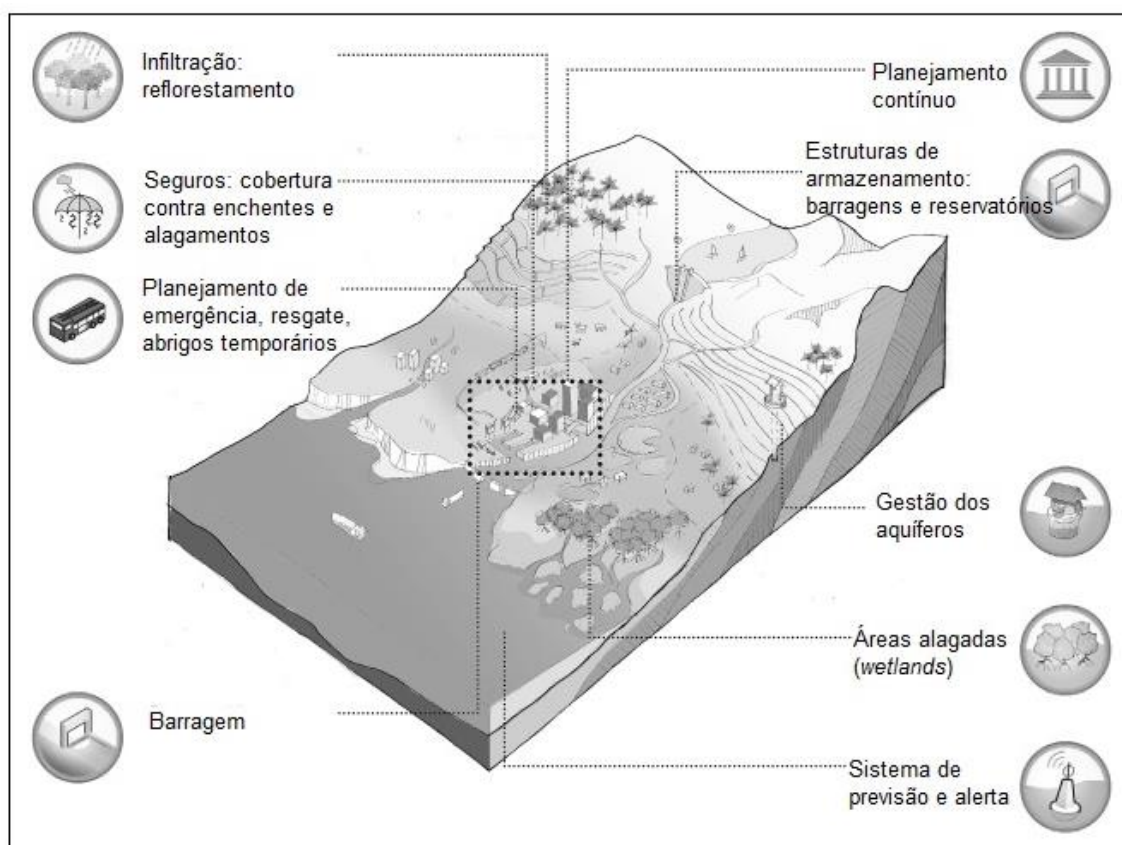


Figura 4 - Visão geral das medidas para gestão do risco de inundações, na escala da bacia hidrográfica

Na Figura 5 são apresentadas as medidas estruturais e não estruturais que podem ser consideradas em um bairro ou comunidade (BARKER, 20--).

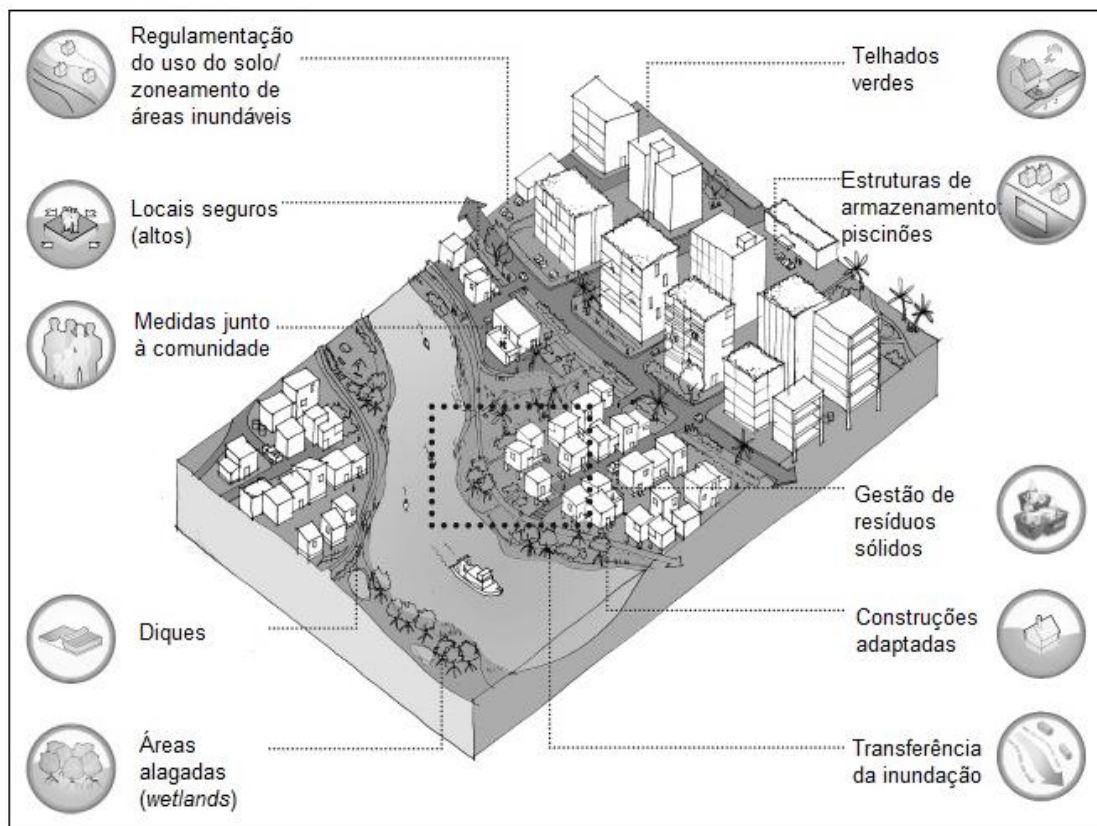


Figura 5 - Medidas estruturais e não estruturais para gestão do risco de inundações, na escala de bairro ou comunidade.

3.3.1 Medidas estruturais

As medidas estruturais normalmente correspondem a obras de engenharia, e por isso demandam grandes investimentos de capital para construção e manutenção. Devido à sua natureza, tendem a ser aplicadas em áreas onde a urbanização já está consolidada, possuindo um caráter mais corretivo do que preventivo (WALESH, 1989).

Jha, Bloch e Lamond (2012) apresentam as seguintes soluções estruturais:

- Transferência da inundação para jusante, para afastá-la das áreas ocupadas. Isso é obtido através de modificações no canal que aumentem a velocidade de escoamento, tais como redução da rugosidade do canal, corte de meandros (retificação), dragagem, retirada de obstruções ao escoamento e aumento da declividade;
- Reservação, para amortecimento das ondas de cheia e redução dos picos de vazão. Os reservatórios (também chamados “piscinões”) podem ser classificados em *in line*,

quando são atravessados pelo curso de água; e *off line*, quando o curso de água corre paralelo ao reservatório;

- Contenção das cheias, para evitar que as águas atinjam determinadas áreas. Isso é alcançado com a construção de diques;
- Sistema de microdrenagem, para proteger as vias de transporte das cidades das inundações frequentes. São as redes de condutos pluviais urbanos, normalmente dimensionadas para tempos de retorno entre 2 e 10 anos;
- Sistemas de infiltração, para redução das vazões escoadas. Isso inclui trincheiras e poços de infiltração, superfícies vegetadas e pavimentos permeáveis;
- Gestão das águas subsuperficiais, para evitar que inundem estruturas enterradas. Essas águas podem ser bombeadas e utilizadas para fins não potáveis em indústrias, descarga de vasos sanitários, entre outros;
- Alagados (*wetlands*), para retenção da água e redução da vazão de pico. Essas estruturas, naturais ou construídas, contribuem também para a melhoria da qualidade da água (pela redução da concentração de nitrogênio) e aumento da biodiversidade;
- Construções adaptadas, para reduzir a vulnerabilidade e permitir a ocupação das planícies de inundação. As três abordagens principais são: resiliência (a entrada de água é permitida), resistência (a água é mantida fora da construção) e esquivada (a construção evita a água, movimentando-se verticalmente, por exemplo).

Segundo Tucci (1995), as medidas estruturais podem criar uma falsa sensação de segurança, permitindo a ampliação da ocupação das áreas inundáveis. Visto que são dimensionadas para eventos associados a certa probabilidade de ocorrência (tempo de retorno), caso ocorra uma cheia superior à de projeto, a estrutura não é capaz de proporcionar a proteção necessária, resultando em danos maiores do que se não existisse. Graciosa (2010) concluiu que uma forma de melhorar a eficiência do sistema de prevenção de inundações seria aplicar as medidas estruturais apenas para a proteção da bacia contra cheias de menor período de retorno, de modo que não resultassem em prejuízos significativos.

Em 1936, foi aprovada nos Estados Unidos uma lei sobre controle de enchentes que identificava a natureza pública dos programas de redução de enchentes e caracterizava a implantação de medidas estruturais como meio de reduzir esses danos. Com isso, acelerou-se a ocupação das várzeas, o que resultou no aumento dos danos ocasionados pelas enchentes. Em 1966, o governo reconheceu que as medidas anteriores eram inadequadas e deu ênfase a medidas não estruturais, que permitiriam à população conviver com as cheias (TUCCI, 1993).

3.3.2 Medidas não estruturais

Muitas vezes descritas como soluções “brandas”, as medidas não estruturais são aplicadas com o objetivo de afastar as pessoas das inundações e reduzir o impacto das inundações sobre pessoas e bens expostos ao risco. Elas geralmente requerem pouco em termos de construção de infraestrutura física, e podem, portanto, ser menos dispendiosas e mais rápidas de se implementar do que as medidas estruturais (JHA; BLOCH; LAMOND, 2012). Por outro lado, Tucci (1995) afirma que por possuírem caráter preventivo, as medidas não estruturais podem ser de difícil aplicação quando a bacia já está urbanizada.

Jha, Bloch e Lamond (2012) apresentam as seguintes soluções não estruturais:

- Campanha de conscientização, visto que a ignorância do risco encoraja a ocupação de áreas inundáveis. Idealmente, a conscientização levaria a ações de preparação e mitigação, que reduziriam os impactos das inundações;
- Planejamento do uso do solo e zoneamento de áreas inundáveis, um mecanismo regulatório através do qual objetivos diversos e às vezes conflitantes são integrados e tratados em um quadro de desenvolvimento único (processo denominado planejamento integrado do uso do solo). Através de sua formulação e implementação, o planejamento do uso do solo identifica as localizações apropriadas para cada uso, determina o risco associado a determinado uso em determinado local, identifica as questões socioambientais relevantes e determina os requerimentos mínimos para cada uso em particular;
- Seguro para riscos hidrológicos, que proporcionam resiliência econômica, ou seja, capacidade do sistema se equilibrar economicamente após a ocorrência do desastre. Os seguros poderiam desestimular as ações de mitigação do risco, visto que proporcionam à população certo relaxamento. Isso é compensado com medidas de fiscalização e constante revisão nos prêmios dos seguros com base na segurança da bacia e das edificações;
- Gestão de resíduos líquidos e sólidos, para evitar que os resíduos sólidos bloqueiem o escoamento e contribuam para a ocorrência inundações, e que os resíduos líquidos contaminem as águas, contribuindo para a propagação de doenças;
- Planejamento de continuidade, para assegurar que os serviços essenciais e a infraestrutura crítica continuem a operar mesmo que os impactos das inundações sejam severos;

- Previsão e alerta, que avisam previamente sobre uma inundação iminente, permitindo que os planos de emergência sejam colocados em ação;
- Planos de evacuação, para minimizar a perda de vidas e outros impactos das inundações. Uma área deve ser evacuada quando o nível da água alcança um limite estabelecido previamente. O processo de elaboração do plano deve ser participativo, visto que o envolvimento da comunidade resulta em maior cooperação e disseminação da informação;
- Recuperação e reconstrução, visto que é impossível se proteger contra todas as inundações. Uma vez que a reconstrução total pode levar muitos anos, é importante, primeiramente, assegurar que a vida normal possa ser retomada apesar da reconstrução em curso; e em segundo lugar, encurtar o tempo necessário para reconstrução tanto quanto possível.

De acordo com White (1945), as principais vantagens da adoção de medidas não estruturais são: apresentam menor custo, uma vez que não implicam na execução de grandes obras; resultam em adaptação ao fenômeno natural das inundações; possuem horizontes mais longos de atuação; e apoiam-se em aspectos de caráter sócio-político (educação, participação pública, legislação).

Tucci (1993) citou um levantamento realizado em Denver (Estados Unidos) em 1972, através do qual se concluiu que o custo das medidas estruturais para a proteção de 1/4 da bacia era equivalente ao custo de proteção por medidas não estruturais dos 3/4 restantes. Além de custos mais elevados, as medidas estruturais apresentam as desvantagens de intervirem na drenagem natural da bacia, possuem efeito localizado e induzem à ampliação da ocupação das áreas inundáveis (TUCCI, 2001). Em contrapartida, as medidas não estruturais possuem caráter preventivo, e são aquelas em que se procura reduzir os danos causados por inundações pela introdução de normas, regulamentos e programas que visem o disciplinamento do uso e ocupação do solo, implementação de sistemas de alerta e conscientização da população para a manutenção dos sistemas de drenagem (CANHOLI, 2005).

3.4 Plano Diretor do Município de São Carlos

O Plano Diretor, instituído pela Lei 10.257 de 2001 (que regulamenta os artigos 182 e 183 da Constituição Federal), é o instrumento básico da política de desenvolvimento e

expansão urbana. De acordo com a referida lei, também conhecida como Estatuto da Cidade, a propriedade urbana cumpre sua função social quando atende às exigências fundamentais de ordenação da cidade expressas no Plano Diretor, assegurando o atendimento das necessidades dos cidadãos quanto à qualidade de vida, à justiça social e ao desenvolvimento das atividades econômicas.

O Plano Diretor pode ser definido como “um conjunto de princípios e regras orientadoras da ação dos agentes que constroem e utilizam o espaço urbano” (BRASIL, 2002). Sua elaboração baseia-se na interpretação da cidade real com ampla participação popular, envolvendo temas e questões relativos aos aspectos urbanos, sociais, econômicos e ambientais. A partir disso, o Plano estabelece o destino específico que se quer dar às diferentes regiões do município, embasando os objetivos e as estratégias. Essa divisão do território é denominada macrozoneamento (BRASIL, 2002).

O macrozoneamento estabelece um referencial espacial para o uso e a ocupação do solo na cidade, em concordância com as estratégias de política urbana. Define inicialmente grandes áreas de ocupação: zona rural (por exemplo, para produção de alimentos, produção de madeira); e a zona urbana (residências, indústrias, comércio e serviços, equipamentos públicos) em cujo interior valem as regras da política urbana. A partir da definição do perímetro urbano, o macrozoneamento define, ainda em grandes áreas de interesse de uso, as zonas onde se pretende incentivar, coibir ou qualificar a ocupação. Essa definição deve ser feita partindo do princípio da compatibilidade entre a capacidade da infraestrutura instalada, as condições do meio físico, as necessidades de preservação ambiental e de patrimônio histórico, e as características de uso e ocupação existentes. A partir do macrozoneamento pode-se estabelecer um zoneamento mais detalhado, que deve estar contido no Plano Diretor (BRASIL, 2002).

3.4.1 Elaboração

As discussões para elaboração do Plano Diretor do Município de São Carlos iniciaram-se em outubro de 2001, tendo como objetivo a adequação ao Estatuto da Cidade, que estabeleceu a obrigatoriedade da elaboração do Plano Diretor para municípios com mais de 20.000 habitantes (entre outros casos) e o prazo para sua aprovação até outubro de 2006 (PMSC, 2005).

O processo de elaboração e de discussão do Plano Diretor em São Carlos contou com a constituição de um Comitê Consultivo (com participação de representantes da sociedade

civil organizada), uma Comissão Executiva (com membros de diversos setores da Administração Pública Municipal), um Grupo de Trabalho Técnico e Operacional (formado por técnicos de diferentes setores do governo sob a coordenação da Secretaria Municipal de Habitação e Desenvolvimento Urbano - SMH DU), com a realização de Reuniões Setoriais para discussão do conteúdo do Plano com diferentes segmentos da sociedade civil, e com a assessoria da Organização Não Governamental (ONG) Instituto Pólis e da Prof^a. Sarah Feldman, do Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) – USP.

Entre outubro de 2001 e agosto de 2003 foram realizados diversos eventos públicos, reuniões setoriais e inúmeros debates entre os grupos, que culminaram na formulação das diretrizes básicas para elaboração do Projeto de Lei. O Projeto foi encaminhado para a Câmara Municipal em novembro de 2003, e durante 2004 e 2005 foram 7 realizadas audiências públicas sobre o tema. Após novos debates, apresentaram-se propostas de emendas, originárias tanto do poder legislativo quanto de representantes da sociedade civil organizada. O plano foi então votado e promulgado pelo prefeito no dia 25 de novembro de 2005 (PMSC, 2005).

3.4.2 Conteúdo

Para que se possa viabilizar a implementação de diretrizes gerais, princípios e objetivos estabelecidos para o ordenamento físico territorial do município, o Plano Diretor é composto por uma série de recursos e instrumentos da política urbana. De acordo com PMSC (2005), os principais componentes do Plano Diretor de São Carlos são:

- Macrozoneamento do Município
- Zoneamento das Macrozonas Urbana e Rural
- Áreas de Especial Interesse
- Diretrizes Viárias
- Parcelamento, Uso e Ocupação do Solo
- Instrumentos de Indução da Política Urbana:
 - utilização, edificação e parcelamento compulsórios;
 - direito de preempção
 - direito de superfície
 - outorga onerosa do direito de construir
 - outorga onerosa de alteração de uso do solo

- operações urbanas consorciadas
- transferência do direito de construir
- estudo de impacto de vizinhança
- Sistema de Gestão de Planejamento do Desenvolvimento Urbano

De acordo com o macrozoneamento, o território do Município de São Carlos é composto pela Macrozona Urbana e pela Macrozona de Uso Multifuncional Rural. A Macrozona Urbana subdivide-se em:

- Zona de Ocupação Induzida – Zona 1: é composta pelas áreas da cidade com as melhores condições de infraestrutura. Nela incentiva-se o uso misto (habitacional, comércio e serviços) e o incremento do adensamento, com a ocupação de lotes vazios e imóveis subutilizados. Nessa zona deve ser promovida a preservação do patrimônio histórico e arquitetônico, e o controle da permeabilidade do solo;
- Zona de Ocupação Condicionada – Zona 2: é composta por áreas com predominância de uso misto com grande diversidade de padrão ocupacional. Caracteriza-se pela fragmentação e descontinuidade do sistema viário, presença de áreas com carência de infraestrutura de drenagem, e deficiência de áreas e equipamentos públicos. Nessa zona o adensamento deve ser promovido nos eixos mais bem estruturados. Os sistemas viário e de drenagem devem ser adequados.
- Zona de Recuperação e Ocupação Controlada – Zona 3 (3A e 3B): caracterizam-se pela presença de fragilidades sociais e ambientais. A zona 3A apresenta encostas, solos suscetíveis à erosão, córregos assoreados, parcelamentos irregulares nas proximidades de encostas, infraestrutura precária e concentração de população de baixa renda. As diretrizes para essa zona incluem a recuperação urbana, social e ambiental; a diversificação dos usos, com o objetivo de atrair atividades que gerem trabalho e renda; a definição de parâmetros urbanísticos compatíveis com as características da área; e a instituição de Áreas Especiais de Interesse Social. A zona 3B caracteriza-se pela localização em área de proteção e recuperação de manancial (Córrego do Monjolinho), dificuldade de acesso, loteamentos com precariedade no sistema de drenagem e carência de equipamentos públicos. As diretrizes para essa zona incluem a restrição da ocupação da região como eixo de expansão; a regulamentação e disciplinamento do uso e ocupação do solo, objetivando a proteção do manancial; a educação ambiental da comunidade; a construção das vias marginais à

Rodovia Washington Luiz – SP 310; e a implementação de legislação específica de proteção dos mananciais de águas superficiais.

A Macrozona de Uso Multifuncional Rural subdivide-se em:

- Zona de Regulação e Ocupação Controlada – Zona 4 (4A e 4B): é composta por áreas com forte tendência para expansão urbana, apresentando usos diversificados que se configuram como transição entre o meio rural e o urbano. A zona 4A caracteriza-se pela concentração de chácaras de recreio, grande interesse para a implantação de condomínios fechados, ocorrência de parcelamentos irregulares, deficiência no sistema de drenagem, existência de aterro sanitário em operação e presença de nascentes de corpos de água. As diretrizes para essa zona incluem a regulamentação e disciplinamento dos empreendimentos que impliquem em alteração do uso do solo rural, a regularização física e fundiária dos loteamentos irregulares, a adequação do sistema viário e a recuperação ambiental da área ocupada pelo aterro após sua desativação. A zona 4B está no limite do perímetro urbano, e caracteriza-se pela presença de córregos e nascentes, e pelo alto potencial de expansão urbana devido à proximidade do Campus II da USP. Além das diretrizes especificadas para a zona 4A, nessa zona deve ser estimulado o crescimento ordenado e integrado à malha urbana já existente.
- Zona de Proteção e Ocupação Restrita – Zona 5 (5A e 5B): caracterizam-se por serem áreas de proteção e recuperação dos mananciais, de nascentes do córrego do Gregório e parte da Área de Proteção Ambiental (APA) do Corumbataí. A zona 5A abrange parte da área de preservação do manancial de abastecimento público (Córrego Monjolinho), nascentes do córrego do Gregório e apresenta proximidade com o meio urbano e *campus* da Universidade Federal de São Carlos (UFSCAR). As diretrizes para essa zona têm como orientação restringir o adensamento urbano e novos parcelamentos, visando a proteção dos mananciais. A zona 5B abrange parte da área de preservação do manancial de abastecimento público (Córrego do Feijão) e parte da APA do Corumbataí. Dessa forma, as diretrizes para essa zona objetivam evitar um adensamento populacional, além de prever a regularização de parcelamentos já existentes.
- Zona de Produção Agrícola Familiar – Zona 6: é composta por pequenas e médias propriedades rurais baseadas na agricultura familiar, tendo como objetivo garantir a produção agrícola de pequena e média escala. É a região de maior altitude do território

municipal, onde estão as nascentes dos Ribeirões dos Negros, do Quilombo e do Pântano. As diretrizes para essa zona incluem a consolidação da agricultura familiar, a regularização física e fundiária dos loteamentos irregulares e a proteção e recuperação das nascentes e corpos d'água.

- Zona de Uso Predominantemente Agrícola – Zona 7: apresenta grande diversidade de produção agrícola, com predomínio de redes agroindustriais, destacando-se a sucroalcooleira, citrícola, láctea, de carne bovina e avicultura de corte. Há presença de parcelamentos irregulares. Além disso, tem grande diversidade de solos, abundância em recursos hídricos e potencial turístico. As diretrizes do plano visam compatibilizar o uso turístico com a preservação do meio ambiente e uso agrícola nesta região, através de incentivos ao potencial paisagístico da área, implantação de técnicas de manejo agrícola sustentável, restrições à implantação de usos urbanos e implementação de políticas integradas de gestão sustentável dos recursos hídricos.

No Anexo A é apresentado o mapa de zoneamento do Município de São Carlos.

Em relação à ocupação do solo, o Plano Diretor do Município de São Carlos estabelece os seguintes coeficientes:

- Coeficiente de Ocupação (CO): razão entre a área de projeção da edificação e a área do terreno;
- Coeficiente de Aproveitamento (CA): razão entre a área edificável e a área do terreno;
- Coeficiente de Aproveitamento Básico (CAB): razão entre a área edificável básica e a área do terreno;
- Coeficiente de Aproveitamento Máximo (CAM): é o fator pelo qual a área do lote deve ser multiplicada para se obter a área máxima de edificação permitida neste mesmo lote, mediante a aplicação dos instrumentos da Outorga Onerosa do Direito de Construir ou da Transferência do Direito de Construir;
- Coeficiente de Permeabilidade (CP): razão entre a área permeável e a área do terreno;
- Coeficiente de Cobertura Vegetal (CCV): relação entre a área coberta por vegetação arbórea ou arbustiva de um determinado imóvel e a sua área total, sendo aplicado somente nas áreas de mananciais (Zonas 3B, 5A e 5B).

Na Figura 6 são apresentados os valores dos coeficientes acima descritos para cada zona do Plano Diretor do Município de São Carlos.

Plano Diretor de São Carlos - COEFICIENTES

Macrozona Urbana	Macrozona de Uso Multifuncional Rural
<p style="background-color: yellow; padding: 2px;">Zona 1 – Ocupação Induzida</p> <p>CO = 70%</p> <p>CAB = 2 CAM = 3,5 CA = 1,4 para uso estritamente residencial unifamiliar</p> <p>CP = 15%</p>	<p style="background-color: orange; padding: 2px;">Zona 4 – Regulação e Ocupação Controlada</p> <p>CO = 30% para chácaras de recreio CO = 70% para demais parcelamentos</p> <p>CA = 0,3 para chácaras de recreio CA = 1 para demais parcelamentos CA = 1,4 para EHIS</p> <p>CP = 40% para chácaras de recreio CP = 20% para demais parcelamentos</p> <p>obs.: Chácaras de Recreio serão admitidas somente na Zona 4A, com lotes mínimos de 1.500m²</p>
<p style="background-color: blue; color: white; padding: 2px;">Zona 2 – Ocupação Condicionada</p> <p>CO = 70%</p> <p>CAB = 1,4 CAM = 3 nos eixos da zona 2* CA = 1,4 para uso estritamente residencial unifamiliar</p> <p>CP = 15%</p>	<p style="background-color: green; padding: 2px;">Zona 5 – Proteção e Ocupação Restrita</p> <p>CO = 25%</p> <p>CA = 0,25</p> <p>CP = 50%</p> <p>CCV = 50%</p> <p>obs.: Parcelamento mínimo: Zona 5A: 1.500m² Zona 5B: 3.000m²</p>
<p style="background-color: red; color: white; padding: 2px;">Zona 3A – Recuperação e Ocupação Controlada</p> <p>CO = 70%</p> <p>CA = 1,4 para EHIS CA = 1 para demais parcelamentos</p> <p>CP = 15%</p>	<p>Definições:</p> <p><i>Coefficiente de Ocupação:</i> CO = $\frac{\text{área da projeção da edificação}}{\text{área do lote}}$</p> <p>CAB = coeficiente de aproveitamento básico CAM = coeficiente de aproveitamento máximo: solo criado (mediante Outorga Onerosa do Direito de Construir ou Transferência do Direito de Construir)</p> <p><i>Coefficiente de Aproveitamento:</i> CA = $\frac{\text{área edificada}}{\text{área do lote}}$</p> <p><i>Coefficiente de Permeabilidade:</i> CP = $\frac{\text{área permeável} \times 100}{\text{área do lote}}$</p> <p><i>Coefficiente de Cobertura Vegetal:</i> CV = $\frac{\text{área vegetada} \times 100}{\text{área do lote}}$</p> <p>* eixos da zona 2: Av. Henrique Gregori, Av. Grécia e Av. Theodureto de Camargo</p>
<p style="background-color: red; color: white; padding: 2px;">Zona 3B – Recuperação e Ocupação Controlada</p> <p>CO = 70% para lotes de 125m² CO = 70% a 50% para lotes de 125,01m² a 300m² (CO = 84,287 – 0,11429 x área) CO = 50% para lotes maiores que 300m²</p> <p>CA = 1,4 para EHIS CA = 1 para demais parcelamentos</p> <p>CP = 15% para lotes de 125m² CP = 15% a 30% para lotes de 125,01m² a 300m² (CP = 0,0857 x área + 4,286) CP = 30% para lotes maiores que 300m²</p> <p>CCV = 10%</p> <p>obs: máximo de 2 pavimentos</p>	

Figura 6 - Resumo dos valores dos coeficientes apresentados no Plano Diretor de São Carlos. Fonte: PMSC (2005)

A questão da drenagem urbana é apresentada no Capítulo I do Plano Diretor (“Dos Princípios Fundamentais”) como um dos requisitos mínimos para que a propriedade cumpra sua função social. Além disso, no artigo 240, o Plano Diretor prevê a elaboração de um Plano de Macrodrenagem Urbana como uma das formas de regulamentação, gestão e complementação do presente Plano.

3.5 Plano Diretor de Drenagem Urbana Ambientalmente Sustentável do Município de São Carlos

O Plano Diretor de Drenagem Urbana Ambientalmente Sustentável de São Carlos foi elaborado com o objetivo de dotar a prefeitura de subsídios técnicos e institucionais que permitam reduzir os impactos das inundações no município, e criar as condições para uma gestão sustentável da drenagem urbana.

Segundo PMSC (2011), o Plano foi fundamentado nos seguintes princípios:

- Abordagem interdisciplinar no diagnóstico e na solução dos problemas de inundação;
- Bacias hidrográficas como unidades de planejamento;
- Soluções integradas à paisagem e aos mecanismos de conservação do meio ambiente;
- Soluções economicamente viáveis que apresentem relações benefício/custo adequadas;
- Excesso de escoamento superficial controlado na fonte, evitando a transferência para jusante do aumento do escoamento e da poluição urbana;
- Redução dos impactos dos novos empreendimentos sobre o sistema de drenagem;
- Prioridade para controle da impermeabilização; restrição da ocupação de áreas de recarga, várzeas e áreas frágeis; e implantação de dispositivos de infiltração ou reservatórios de amortecimento, ao invés de obras de aceleração e afastamento das águas pluviais (canalização);
- Horizonte de planejamento de 20 anos, correspondente ao ano 2025.

Para a elaboração do plano foram levantados diversos dados, a fim de compor um diagnóstico da rede de drenagem de São Carlos e formular um prognóstico para uma condição de ocupação futura. Assim, foi mapeado o uso do solo através de imagens de satélite e estudou-se a pedologia da área urbana do município.

O plano apresenta proposição de medidas estruturais e não estruturais de controle de inundações. Dentre as medidas estruturais está a construção de 21 barramentos dentro do

perímetro urbano de São Carlos e nas suas redondezas, que amorteceriam as vazões veiculadas pelos córregos do Douradinho, Ponte de Tábua, Monjolinho, Santa Maria Madalena, Tijuco Preto, Paraíso, Mineirinho, Gregório, Sorregotti, Lazzarini, Medeiros, Água Quente e Água Fria. O plano também prevê a canalização de alguns trechos do Córrego do Gregório e do Monjolinho, e recomenda a construção de escadas hidráulicas e aterros hidráulicos em alguns pontos da cidade.

As medidas não estruturais propostas são: obtenção de recursos financeiros visando à manutenção do sistema de drenagem; elaboração de diretrizes para uma política de treinamento e atualização contínua dos técnicos envolvidos na gestão da drenagem urbana; educação ambiental, para que a população se envolva na elaboração dos planos e aplicação dos instrumentos legais; orientação para projetos de engenharia; elaboração de um manual de drenagem, com diretrizes básicas para projeto de microdrenagem; orientação para profissionais da prefeitura e empreendedores que atuem no planejamento e nos projetos relacionados à drenagem urbana.

3.6 Modelação

Modelo é uma representação simplificada do mundo real ou de algum de seus aspectos. Através da modelação, o comportamento do sistema é reproduzido, com o objetivo de prever a resposta do sistema dada uma entrada e o seu estado inicial (CRISTOFOLETTI, 1999).

Em drenagem urbana, o sistema em estudo é a bacia hidrográfica. Os modelos hidrológicos e hidráulicos são utilizados com o objetivo de prever vazões e níveis de cheia, dada uma determinada chuva e as características iniciais da bacia (GRACIOSA, 2010).

Segundo Butler e Davies (2000), a modelação dos sistemas de drenagem permite que seja testada sua resposta a diferentes condições, e por isso é amplamente utilizada para comparação de cenários e escolha de melhores alternativas.

3.6.1 Modelação hidrológica

Hidrograma é a denominação dada ao gráfico que relaciona vazão e tempo. A distribuição da vazão no tempo é resultado de interação de todos os componentes do ciclo hidrológico a partir do início da precipitação (TUCCI, 1993).

Os modelos hidrológicos procuram descrever o processo de transformação de precipitação em vazão, tendo como parâmetros a taxa de áreas impermeáveis, a eficiência do escoamento superficial, entre outros (TUCCI, 1995). Segundo Tucci (1998), os modelos podem ser classificados em:

- Modelo determinístico: as equações utilizadas para descrever as fases do ciclo hidrológico não contêm componentes aleatórias. Assim, para uma determinada situação inicial, o modelo sempre produzirá a mesma resposta;
- Modelo estocástico ou probabilístico: as formulações utilizadas na descrição do fenômeno contem variáveis aleatórias que seguem alguma distribuição probabilística;
- Modelo com embasamento físico: reproduz todos os processos através de equações matemáticas. Os parâmetros e as constantes das equações podem ser medidos ou determinados, não necessitando calibração. Sua utilização é restrita devido à dificuldade de obtenção de todos os parâmetros necessários;
- Modelo conceitual: baseia-se no entendimento conceitual do ciclo hidrológico, com a utilização de equações empíricas para explicar alguns dos processos envolvidos. Procura representar, de maneira simplificada, todos os processos físicos conhecidos do ciclo hidrológico;
- Modelo contínuo: desenvolvido para simular longos períodos de tempo;
- Modelo de evento: simula um evento individual, dadas as condições iniciais;
- Modelo concentrado (*lumped*): considera os dados de entrada e os parâmetros representativos da bacia como valores médios, válidos para toda a área de estudo;
- Modelo distribuído: os dados de entrada e as características físicas da bacia variam no espaço. Essas informações são distribuídas em malhas ou sub-bacias;
- Modelo simplificado: utiliza algoritmos simplificados para minimizar o esforço computacional.

Após o início da chuva, existe um intervalo de tempo para que a vazão do hidrograma comece a elevar-se. Isso ocorre devido às perdas iniciais por interceptação vegetal e depressões no solo, além do retardo de resposta da bacia devido ao tempo de deslocamento de água na mesma (TUCCI, 1993).

3.6.1.1 O método do *Soil Conservation Service* (SCS) para cálculo do escoamento superficial

O *Soil Conservation Service* (atual *Natural Resources Conservation Service*) foi estabelecido em 1935 pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, com a missão de desenvolver projetos visando a conservação do solo. Em 1936, com a aprovação do “*Flood Control Act*”, o SCS ficou encarregado de construir estruturas para controle do escoamento superficial e da erosão do solo. Para iniciar os estudos, foram realizados milhares de ensaios de infiltração em solos de todo os Estados Unidos (WILLIAMS et al., 2012).

Nas décadas subsequentes, diversos autores desenvolveram métodos para estimativa do escoamento superficial resultante de uma precipitação, tendo como base os dados de infiltração. Os trabalhos desenvolvidos por Andrews (1954) e Mockus (1949) constituíram a base do método SCS para predição do escoamento superficial, visto que apresentaram um procedimento uniforme para estimar o escoamento em todo o país, utilizando os dados disponíveis e sem necessidade de calibração (WOODWARD; HAWKINS; QUAN, 2002).

Segundo USDA (1986), as equações propostas pelo método do SCS são as seguintes:

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

$$I_a = 0,2 \cdot S$$

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

Em que:

P_e : precipitação efetiva, mm;

P : precipitação total, mm;

I_a : perdas iniciais por retenção de chuva na bacia, mm;

S : potencial de retenção do solo, mm;

CN : *curve number*, porcentagem do escoamento superficial.

Atualmente, o método do SCS é um dos mais utilizados para cálculo do escoamento superficial resultante de uma precipitação intensa (PORTO, 1995). Segundo Mishra, Pandey e Singh (1997), a popularidade desse método deve-se à sua simplicidade, estabilidade e

facilidade para compreensão e utilização; e pelo fato de considerar a maior parte das características das bacias produtoras de escoamento, tais como o tipo de solo, uso do solo, condição hidrológica e umidade antecedente.

O CN é um número adimensional que varia entre 0 e 100 e é um indicativo da habilidade de uma superfície em produzir escoamento. Esse parâmetro é função do tipo de solo, das condições de uso e ocupação, e umidade antecedente (HOGGAN, 1997). Com essas informações o CN é determinado, normalmente a partir de valores tabelados. Segundo Seybert (2006), os valores mais usuais de CN encontram-se entre 40 e 98.

Em relação ao tipo de solo, o método SCS distingue quatro grupos hidrológicos de acordo com sua velocidade de infiltração básica (VIB):

- Grupo A – solos arenosos com baixo teor de argila total, não havendo rochas nem camadas argilosas ou camadas densificadas até a profundidade de 1,50 m. O teor de húmus é baixo, não atingindo 1% (PORTO, 1995). São solos bem drenados, ou seja, com altas taxas de infiltração e baixo potencial de gerar escoamento. Sua VIB é superior a 8 mm/h (USDA, 1986);
- Grupo B – solos arenosos menos profundos que os do Grupo A e com maior teor de argila total. O teor de húmus pode subir para 1,5% (PORTO, 1995). São solos moderadamente bem a bem drenados, com VIB entre 4 e 8 mm/h (USDA, 1986);
- Grupo C – solos barrentos com teor de argila total superior a 20%, mas sem camadas argilosas impermeáveis ou contendo pedras até a profundidade de 1,20 m (PORTO, 1995). São solos com baixa VIB, que apresenta valores entre 1,5 e 4 mm/h (USDA, 1986);
- Grupo D – Solos argilosos com teor de argila total superior a 30% e camada densificada a 50 cm de profundidade. Ou solos arenosos como os do Grupo B, mas com camada argilosa quase impermeável, ou horizonte de seixos rolados (PORTO, 1995). São solos com alto potencial de geração de escoamento. Sua VIB é muito baixa, menor que 1,5 mm/h (USDA, 1986).

Existem diversos métodos para determinação do uso e ocupação do solo, como o reconhecimento de campo e a análise de imagens de satélite e de mapas de uso do solo (USDA, 1986). O SCS desenvolveu tabelas que consideram as diversas formas de uso e ocupação, o tipo de solo e a umidade antecedente, e associam essas condições a um valor de CN. Os valores de CN são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores de CN em função da cobertura e do tipo hidrológico do solo. Fonte: PORTO (1995)

Utilização ou cobertura do solo		Grupo hidrológico			
		A	B	C	D
Uso residencial:					
Tamanho médio do lote	% Impemeável				
< 500 m ²	65	77	85	90	92
1000 m ²	38	61	75	83	87
1500 m ²	30	57	72	81	86
2000 m ²	25	54	70	80	85
4000 m ²	20	51	68	79	84
Estacionamentos pavimentados, telhados		98	98	98	98
Ruas e estradas:					
Pavimentadas, com guias e drenagem		98	98	98	98
Com cascalho		76	85	89	91
Com terra		72	82	87	89
Áreas comerciais (85% de impermeabilização)		89	92	94	95
Distritos industriais (72% de impermeabilização)		81	88	91	93
Espaços abertos, parques, jardins:					
Boas condições, cobertura de grama > 75%		39	61	74	80
Condições médias, cobertura de grama > 50%		49	69	79	84
Terreno preparado para plantio, descoberto		77	86	91	94
Culturas em fileiras					
Linha reta	Condições ruins	72	81	88	91
	Condições boas	67	78	85	89
Curva de nível	Condições ruins	70	79	84	88
	Condições boas	65	75	82	86
Culturas de grãos					
Linha reta	Condições ruins	65	76	84	88
	Condições boas	63	75	83	87
Curva de nível	Condições ruins	63	74	82	85
	Condições boas	61	73	81	84
Pasto	Condições ruins	68	79	86	89
	Condições médias	49	69	79	84
	Condições boas	39	61	74	80
Campos	Condições boas	30	58	71	78
Florestas	Condições ruins	45	66	77	83
	Condições médias	25	55	70	77
	Condições boas	36	60	73	79

Quanto à umidade antecedente, o método SCS distingue três condições (PORTO, 1995):

- Condição I – solos secos – as chuvas, nos últimos 5 dias, não ultrapassaram 15 mm;
- Condição II – situação média na época das cheias – as chuvas, nos últimos 5 dias, totalizaram de 15 a 40 mm;
- Condição III – solo úmido (próximo à saturação) – as chuvas, nos últimos 5 dias, foram superiores a 40 mm, e as condições meteorológicas foram desfavoráveis a evaporação.

Os valores de CN tabelados usualmente consideram a Condição II. Para transformar o CN para a condição desejada, deve-se utilizar a Tabela 2.

Tabela 2 - Conversão das curvas CN para as diferentes condições de umidade do solo. Fonte: Porto (1995)

Condições de umidade		
I	II	III
100	100	100
87	95	99
78	90	98
70	85	97
63	80	94
57	75	91
51	70	87
45	65	83
40	60	79
35	55	75
31	50	70
27	45	65
23	40	60
19	35	55
15	35	50

Porto (1995) indica o seguinte roteiro para cálculo do escoamento superficial pelo método do SCS:

- Escolha das condições de saturação do solo;
- Determinação do grupo hidrológico do solo;
- Determinação do CN para a condição II por meio da Tabela 1;
- Transformação do CN para a condição desejada pela Tabela 2;

- Determinação do escoamento superficial pelas equações propostas pelo método.

3.6.1.2 Distribuição espacial da chuva

Para bacias de tamanho significativo, em um instante qualquer, a precipitação pode ser espacialmente não uniforme (SEYBERT, 2006). No entanto, para simplificar a modelação hidrológica, normalmente é considerado um valor médio entre as alturas ou intensidades de precipitação sobre a área da bacia. Os métodos mais utilizados para calcular esse valor médio, são: método da Média Aritmética, método dos Polígonos de Thiessen e método das Isoietas.

3.6.1.3 Distribuição temporal da chuva

Para precipitações com duração finita, a intensidade da chuva varia com o tempo. Hietograma é a representação gráfica de uma tormenta, onde se mostra a intensidade ou altura da precipitação *versus* tempo (SEYBERT, 2006).

A distribuição temporal dos volumes precipitados condicionará o volume infiltrado e a forma do hidrograma de escoamento superficial direto originado pela chuva excedente (ZAHED; MARCELLINI, 1995).

Tempo de concentração é definido como o tempo requerido para que uma gota de água viaje do ponto mais remoto da bacia hidrográfica até o seu exutório (SEYBERT, 2006). É provavelmente o parâmetro de tempo mais importante para a definição da chuva de projeto, uma vez que reflete a velocidade de resposta de uma bacia hidrográfica a um evento de chuva (PAVLOVIC; MOGLEN, 2008).

3.6.1.4 O *software* HEC-HMS

O HEC-HMS é um programa computacional desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos, com a finalidade de simular os processos chuva-deflúvio em bacias hidrográficas dendríticas. O HEC-HMS é de domínio público, sendo, desse modo, aplicado em diversos estudos no mundo todo.

Para que seja feita a modelação hidrológica, o HEC-HMS configura a bacia hidrográfica nos seguintes elementos hidrológicos: sub-bacia (*subbasin*), que é uma representação da bacia hidrográfica; trecho (*reach*), que corresponde a um trecho de canal que

conduz vazões para jusante; junção (*junction*), que corresponde a um nó; fonte (*source*), utilizado para introduzir vazão em um ponto do sistema; sumidouro (*sink*), utilizado para representar a saída da bacia; reservatório (*reservoir*), utilizado para representar estruturas de reservação; e derivação (*diversion*), para representar a retirada de água do canal.

Os dados de entrada do modelo são relativos às características físicas de cada uma das sub-bacias (área, área impermeável, CN, tempo de concentração e parâmetros relacionados ao fenômeno de propagação de ondas de cheia), à distribuição temporal da precipitação e ao método de transformação de chuva em vazão.

Os hidrogramas produzidos no HEC-HMS podem ser utilizados para estudos de disponibilidade hídrica, drenagem urbana, previsão de escoamento, impactos da urbanização, dimensionamento de reservatórios, redução do risco de inundações, regulamentação de planícies de inundação, operação de sistemas, entre outros (USACE, 2010c).

3.6.2 Modelação hidráulica

A modelação hidráulica é usada para calcular os perfis de superfície da água em escoamento em um canal. A importância desse estudo deve-se a uma série de motivos: permite o traçado das manchas de inundação associadas a determinados eventos chuvosos; contribui para o estudo dos usos do solo adequados a cada região da planície de inundação; possibilita o estudo do efeito das pontes e estrangulamentos nos níveis de água; auxilia no projeto de pontes, reservatórios e outras estruturas hidráulicas; auxilia na determinação dos seguros de inundação; entre outros (HOGGAN, 1997).

A modelação hidráulica pode ser realizada de duas formas: considerando regime permanente ou regime não permanente (CANHOLI, 2005).

De acordo com Porto (2006), o escoamento ou regime permanente é aquele em que a velocidade local em um ponto qualquer da corrente permanece invariável no tempo, em módulo e direção. Consequentemente, os demais parâmetros hidráulicos em uma mesma seção transversal – profundidade, vazão, área molhada, etc. – são constantes no tempo. Esse modelo forma a base para o cálculo do escoamento em canais, devido à simplicidade de seu equacionamento (CANHOLI, 2005). Para essa condição, a altura da água é calculada pelas equações de *Chézy* e *Manning*.

O escoamento ou regime não permanente (ou variável) é aquele em que a velocidade em um ponto varia ao longo do tempo. Nesse caso não existe continuidade de vazão, e as características do escoamento dependem da posição do ponto considerado e do tempo. Esse

tipo de escoamento ocorre, por exemplo, quando da passagem de uma onda de cheia através de um canal. As equações que representam o escoamento não permanente são a da continuidade e da quantidade de movimento, conhecidas como equações de *Saint Vénant* (PORTO, 2006).

3.6.2.1 O *software* HEC-RAS

O HEC-RAS é um programa computacional desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos. Esse *software* é utilizado para modelação hidráulica unidimensional em um canal (ou rede de canais), considerando regime permanente ou não permanente (USACE, 2010b). Por ser de domínio público, é aplicado em estudos no mundo todo.

Seus principais dados de entrada são: a representação esquemática da rede de canais, os dados de geometria de seções transversais, os valores para o coeficiente “n” de *Manning* para o canal e planície de inundação, a distancia entre as seções transversais consideradas, a vazão utilizada para modelação (valor fixo para o escoamento permanente e hidrogramas para o escoamento não permanente) e as condições de contorno (USACE, 2010b).

O procedimento computacional baseia-se na solução da equação da energia. O modelo permite a análise das medidas de redução do risco de inundações, pela comparação dos perfis de superfície da água na condição “sem projeto” e “com projeto”.

Os cinco passos da modelação hidráulica com HEC-RAS são: criar um projeto, definir a rede de canais e entrar com os dados de geometria das seções transversais, definir a vazão e as condições de contorno, executar a análise hidráulica, e revisar os resultados e produzir relatórios (USACE, 2010a).

Esse programa se comunica com o SIG através da plataforma HEC-GeoRAS, o que permite a retirada de informações necessárias à modelação hidráulica a partir de modelos digitais de terreno.

3.7 Planejamento voltado para a redução do risco de inundações – o Manual de Drenagem do UDFCD

O Manual de Drenagem (*Drainage Criteria Manual*), publicado pelo UDFCD em 2001, fornece orientação aos agentes públicos e privados na concepção, construção e

manutenção do sistema de drenagem de águas pluviais e controle de inundações. É reconhecido que uma área urbana com um sistema de drenagem bem planejado tem maior probabilidade de crescer de forma ordenada. Segundo UDFCD (2001), o planejador deve estar ciente das vantagens adicionais que podem ser obtidas a partir de um bom plano de drenagem, tais quais:

- Benefícios aos proprietários de terras de montante, resultantes da eliminação de estrangulamentos e restrições ao escoamento;
- Redução de problemas aos proprietários de terras de jusante, resultante da diminuição das vazões escoadas e de canais mais estáveis;
- Melhoria na qualidade da água;
- Proteção de áreas ambientalmente sensíveis e do habitat ripário;
- Redução nos custos de construção e manutenção das vias públicas;
- Melhoria no tráfego de veículos em situações de chuva;
- Melhoria na saúde pública;
- Espaços abertos de menor custo;
- Parques e áreas de recreação de menor custo;
- Oportunidades para reduzir o custo de construção das edificações;
- Aumento na recarga dos aquíferos subterrâneos.

A seguir apresenta-se um resumo dos princípios e diretrizes recomendados por esse Manual.

3.7.1 Princípios

Quando consideradas de forma abrangente – e a nível regional, com envolvimento público e privado – as estruturas de drenagem podem ser concebidas de forma a se evitar as perdas geradas pelas inundações, melhorar a saúde e bem estar da população e assegurar boas relações econômicas e sociais. Assim, o UDFCD (2001) recomenda que o planejamento urbano voltado para a redução do risco de inundações siga os seguintes princípios:

- A drenagem é um fenômeno regional que não respeita fronteiras entre propriedades ou unidades administrativas. Portanto, a unidade de planejamento deve ser a bacia hidrográfica;

- O sistema de drenagem é um subsistema do sistema de recursos hídricos urbano. Por isso, o planejamento das estruturas de drenagem deve ser coordenado com o planejamento do uso do solo, dos espaços abertos, do transporte e dos demais subsistemas das cidades;
- Toda cidade possui sistema de drenagem, mesmo que não tenha sido planejado. O sistema existente deve ser aproveitado ao máximo;
- O controle de enchentes é um problema de alocação de espaço;
- O planejamento do sistema de drenagem não deve se basear na premissa de que os problemas de inundações podem ser transferidos de um local para outro. O armazenamento do escoamento em reservatórios e a existência de espaços abertos para amortecimento das cheias são boas alternativas para reduzir os impactos à jusante;
- A estratégia de drenagem urbana deve ser um esforço de múltiplas finalidades, como por exemplo a melhora da qualidade de água, aumento da recarga subterrânea, proteção do habitat ripário, controle da erosão, recreação e criação de espaços abertos; e múltiplos meios;
- Em novos projetos, deve-se planejar o sistema de drenagem de forma a não ampliar a cheia natural dos cursos de água;
- O sistema de gestão de enchentes deve receber controle permanente;
- Sempre que possível, as planícies de inundação devem ser mantidas. Essa diretriz tem como objetivos a redução do risco de inundações, a preservação do habitat natural e dos espaços abertos, e a criação de um ambiente urbano melhor para os cidadãos.

3.7.2 Diretrizes

Visto que o sistema de águas pluviais é um subsistema do sistema de recursos hídricos urbanos, seu planejamento deve ser incluído desde a fase inicial do planejamento das cidades. Quando o planejamento da drenagem é feito após todas as outras decisões terem sido tomadas, muitas vezes os problemas de alocação de espaço resultantes são caros e difíceis de serem corrigidos.

O planejamento do sistema de águas pluviais requer o entendimento acerca do planejamento da ocupação e uso do solo, planejamento da drenagem, e de questões sociais, técnicas e ambientais relevantes de cada bacia hidrográfica. A equipe de projeto é encorajada a estudar formas de criar benefícios adicionais a partir do sistema de drenagem, tais como espaços abertos e áreas de recreação.

Considerar os múltiplos usos e múltiplos benefícios no planejamento da drenagem pode reduzir o custo do sistema de drenagem e aumentar os benefícios para o sistema urbano. Uma forma de assegurar que todos os usos sejam considerados é elaborar Planos Diretores de Drenagem Urbana (PDDU), de forma que o esforço global do planejamento esteja coordenado com os objetivos preestabelecidos para a cidade.

Durante a elaboração do PDDU, devem ser tomadas decisões para o dimensionamento das velocidades de projeto, localização das estruturas de drenagem, locação de espaços abertos para drenagem, integração do sistema de drenagem com a recreação e possíveis usos alternativos para os canais abertos. Nesse momento também devem ser previstos os reservatórios de detenção e trechos canalizados.



Figura 7 - Bible Park em Denver, EUA. Integração entre o sistema de drenagem, prevenção de inundações, recreação e espaços abertos demonstra integração entre engenheiros, arquitetos, urbanistas e planejadores.

Fonte: UDFCD (2001)

Adotar uma abordagem uniforme para o planejamento da drenagem de uma região usualmente traz resultados melhores do que quando são utilizadas abordagens diferentes, baseadas em experiências anteriores da equipe de planejamento.

O esforço do planejamento deve ser voltado para o desenvolvimento de informações sobre as áreas que tem um por cento de chance de serem inundadas em um determinado ano - a planície de inundação de 100 anos. A planície de inundação de 100 anos deve ser definida

com base no escoamento superficial projetado para a bacia totalmente urbanizada. Os dois objetivos principais da gestão da planície de inundação, são: reduzir os riscos associados às inundações; preservar e reforçar os valores naturais das áreas de várzea.

Para o planejamento da drenagem urbana, deve-se considerar a existência de dois sistemas distintos, a macrodrenagem e a microdrenagem.

A macrodrenagem corresponde à rede de drenagem natural, constituída por rios e córregos localizados nos talwegues dos vales. Em áreas urbanizadas, os canais artificiais, bueiros, canalizações subterrâneas e ruas também podem fazer parte da macrodrenagem. Um sistema de macrodrenagem cuidadosamente planejado pode fornecer transporte adequado para as vazões de dimensionamento, além de outros benefícios para a área urbana. De acordo com UDFCD (2001), a macrodrenagem deve ser dimensionada para tormentas com tempo de retorno de 100 anos.

Em áreas urbanas, os canais abertos são mais desejáveis do que as galerias subterrâneas de águas pluviais, devido ao menor custo de construção, maior capacidade de escoamento, possibilidade de usos múltiplos para recreação e proteção ambiental, e maior potencial de amortecer vazões. As desvantagens incluem a maior necessidade de manutenção e maior área ocupada.

Deve-se privilegiar a redução da velocidade de escoamento nos canais, através do aumento da rugosidade de suas paredes – de preferência com o plantio de vegetação – e o aumento da razão entre largura e profundidade da lâmina de água. Canais com velocidade reduzida tem maior capacidade de amortecer as vazões de pico, além de melhorar a recarga dos aquíferos subterrâneos; benefícios adicionais podem ser obtidos pela incorporação de parques e cinturões verdes no *layout* do canal. Alterações nos canais, tais como retificação e revestimento, não são desejáveis; no entanto, a estabilização dos taludes pode ser necessária para que o canal sustente o aumento das vazões decorrentes da urbanização.

Na prática, os canais devem ser largos e rasos, ter baixa velocidade de escoamento e ter funcionamento e aparência mais naturais possível.

Os reservatórios de retenção devem ser construídos preferencialmente nas partes altas da bacia, pois isso reduz o custo do sistema de drenagem. Sempre que possível, os reservatórios devem ser projetados considerando múltiplos usos, tais quais recreação, melhoria na qualidade da água e benefícios ao ecossistema.

A microdrenagem corresponde ao sistema de condutos pluviais em nível de lotes ou rede primária urbana, formado por galerias pluviais, guias, sarjetas e valas de infiltração. Normalmente são dimensionados para chuvas frequentes, com tempos de retorno entre 2 e 10

anos. Se planejada corretamente, reduz a frequência de inundação das ruas, protege os cidadãos contra inundações frequentes e ajuda a criar um sistema urbano ordenado. Os governos locais não devem dimensionar a microdrenagem para tempos de retorno maiores do que o necessário, pois isso resulta no aumento do custo da infraestrutura urbana.

O alinhamento entre ruas e avenidas propicia o escoamento das águas pluviais. O uso das vias pelo sistema de drenagem é importante e deve ser feito até limites razoáveis, levando em consideração que o seu uso primário é a circulação de veículos. A redução dos custos de manutenção das vias, dos incômodos ao público e da interrupção do tráfego devem ser os objetivos do projeto de microdrenagem. Um bom planejamento das ruas em áreas em processo de urbanização pode reduzir ou eliminar a necessidade de construção de galerias pluviais subterrâneas.

As instalações críticas, tais como hospitais, postos de bombeiros, delegacias de polícia e defesa civil necessitam um nível maior de proteção, de forma que continuem funcionando durante a inundação com tempo de retorno de 100 anos. Para esses casos, recomenda-se considerar a planície de inundação de 500 anos.

Visto que os métodos para determinação das vazões de pico são aproximados, o trabalho deve enfatizar a concepção de soluções hidraulicamente equilibradas, baseadas no bom senso e em uma modelação hidrológica confiável.

O financiamento das obras de melhoria no sistema de drenagem é fundamentalmente responsabilidade dos proprietários das áreas afetadas e dos governos locais.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção é detalhada a metodologia aplicada ao presente trabalho. Primeiramente é descrita a área de estudo, com informações sobre as características físicas da bacia do Mineirinho e o processo de ocupação. Em seguida, é feito um detalhamento sobre os dados topográficos utilizados, e com base nestes, explica-se como foi realizada a delimitação das sub-bacias consideradas na modelação hidrológica. Após este item, tem-se uma explicação acerca do cálculo do tempo de concentração das sub-bacias e das chuvas de projeto. Os itens subsequentes tratam da construção dos cenários alternativos, com a apresentação dos mapas de uso e ocupação do solo e dos valores de CN adotados para as sub-bacias em cada um deles. Em seguida é detalhado o processo de modelação hidrológica e hidráulica realizado no estudo.

4.1 Área de estudo

A área de estudo é a bacia hidrográfica do córrego do Mineirinho, afluente ao rio Monjolinho, situada no município de São Carlos. São Carlos situa-se na região central do Estado de São Paulo, distando, por rodovia, cerca de 250 km da capital do Estado. O município abrange uma área de 1.141 km², possuindo 67,25 km² de área urbana, dos quais aproximadamente 33 km² (3% da área total) estão ocupados (PMSC, 2011). Os limites do município encontram-se entre as coordenadas 47°30' e 48°30' Longitude Oeste, 21°30' e 22°30' Latitude Sul. Faz divisa com os seguintes municípios: Ibaté, Itirapina, Rincão, Santa Lúcia, Analândia, Luís Antônio, Araraquara, Descalvado, Brotas, Américo Brasiliense e Ribeirão Bonito.

A bacia hidrográfica do córrego do Mineirinho tem aproximadamente 5,85 km² de área, e perímetro igual a 10,8 km. A diferença entre a cota mais baixa (777 m) e mais alta (872 m) da bacia é de 95 m, e seu comprimento médio é de cerca de 4 km.

A bacia possui três rios – a nascente principal, que nasce no bairro Santa Angelina; um afluente na margem direita, que nasce no interior do campus 2 da USP; e um afluente na margem esquerda, que nasce nas imediações do campus 2, no bairro Santa Angelina – com comprimento total dos canais da bacia igual a 5,06 km (BENINI, 2005).

A Figura 8 mostra um mapa da bacia do Mineirinho que inclui a rede de drenagem, a topografia e o arruamento.

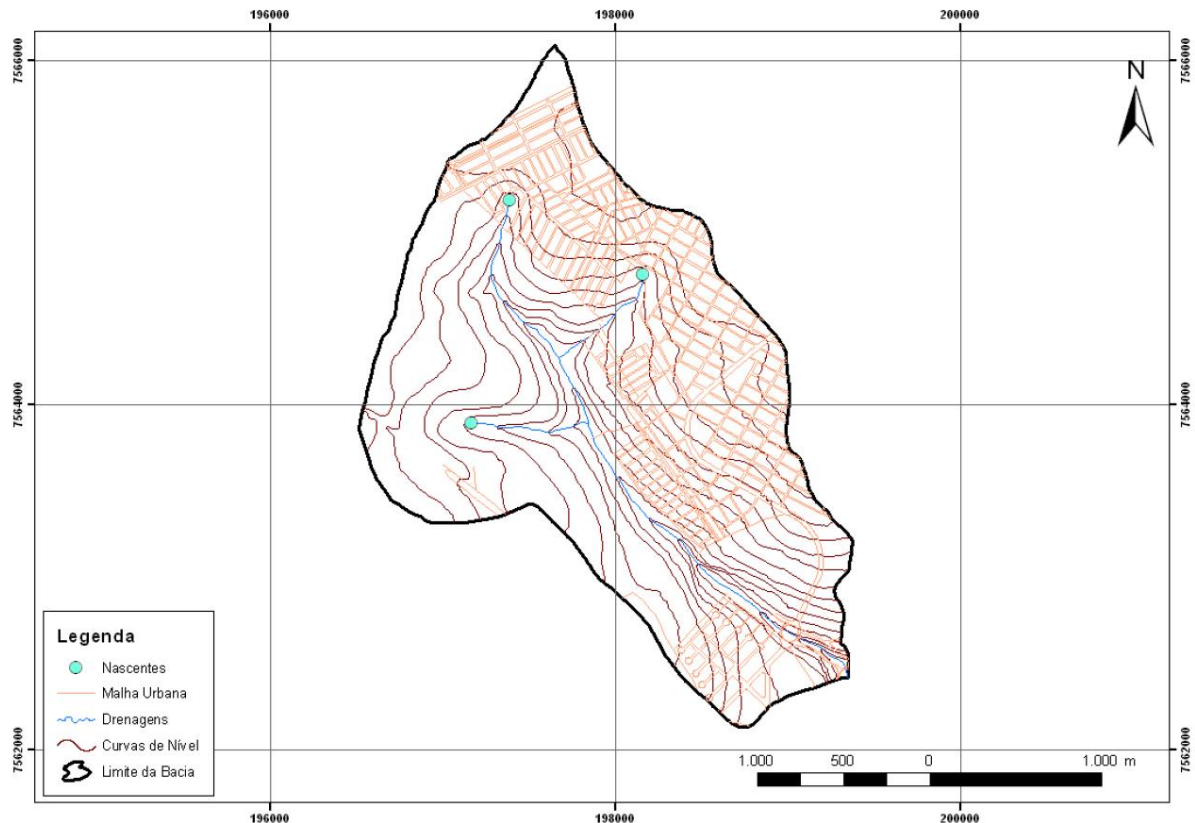


Figura 8 - Bacia do Mineirinho. Fonte: Bressiani (2011)

Os solos da área nos interflúvios são latossolos vermelho amarelo, profundo e distrófico; e no interior dos vales de drenagem, hidromórficos, dos tipos gleissolo e organossolo, saturados permanente ou intermitentemente (BENINI, 2005).

Segundo Tolentino (2007), o clima de São Carlos é de transição entre clima quente de inverno seco para clima tropical com verão úmido e inverno seco, com amplitude térmica entre verão e inverno menor que 5 °C. O clima da região é tropical de altitude, com verões chuvosos e invernos secos. A temperatura média do mês mais quente é 23,1 °C e do mês mais frio, 18,1 °C. A precipitação média anual é da ordem dos 1500 mm, e a normal de evaporação anual é 1431 mm (SÉ, 1992).

A bacia do Mineirinho começou a ser habitada de maneira lenta devido à saturação do antigo setor de crescimento da cidade, mas após a instalação do campus 2 da USP (Universidade de São Paulo) essa ocupação se acelerou. Atualmente, a área é ocupada por residenciais carentes, condomínios de alto padrão, um *Shopping Center* (Iguatemi São

Carlos), um campus universitário, pastagens, cultivos de cana-de-açúcar e terrenos sem cobertura vegetal.

Atualmente, cerca de 50% da bacia tem uso misto, com predomínio habitacional. As gramíneas ocorrem em aproximadamente 20% da bacia, e ocupam áreas ociosas entremeadas no tecido urbano, objeto de especulação imobiliária. A agricultura (cana-de-açúcar e Pinus) cobre 18% da bacia e localiza-se, predominantemente, na porção noroeste da bacia, contíguas ao campus 2 da USP. Cerca de 10% da bacia é ocupada por nativas antropizadas (mata ripária e pequenos fragmentos isolados), compostas, principalmente, de floresta latifoliada higrófila (floresta paludosa), encontradas nas cabeceiras e margens dos córregos, onde há afloramento do lençol freático. Nas proximidades da nascente, entretanto, a vegetação não apresenta estratificação evidente, devido ao encharcamento do solo (APRÍGIO, 2012).

4.2 Dados topográficos

Os dados topográficos utilizados neste trabalho são formados por: banco de dados digitalizados da bacia, fornecido pelo Centro de Divulgação Científica e Cultural (CDCC); e levantamento topobatimétrico de seções transversais do Córrego do Mineirinho, realizado com o auxílio do Departamento de Engenharia de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos.

A base cartográfica obtida junto ao CDCC (órgão ligado à Universidade de São Paulo) é composta por um arquivo com mapas digitalizados em formato CAD, contendo curvas de nível de 5 em 5 metros, hidrografia, linha de cumeada e pontos cotados, para todas as bacias urbanas do município de São Carlos. Esse conjunto de dados foi utilizado na geração de um modelo digital do terreno (MDT), delimitação das sub-bacias e cálculo do tempo de concentração de cada uma, como será detalhado mais adiante.

O Modelo Digital do Terreno (MDT), que consta da Figura 9, foi gerado em ambiente de SIG (ArcGIS 10.1) pela interpolação de dados vetoriais (curvas de nível e pontos cotados). O MDT serviu como dado de entrada no modelo hidráulico (HEC-RAS).

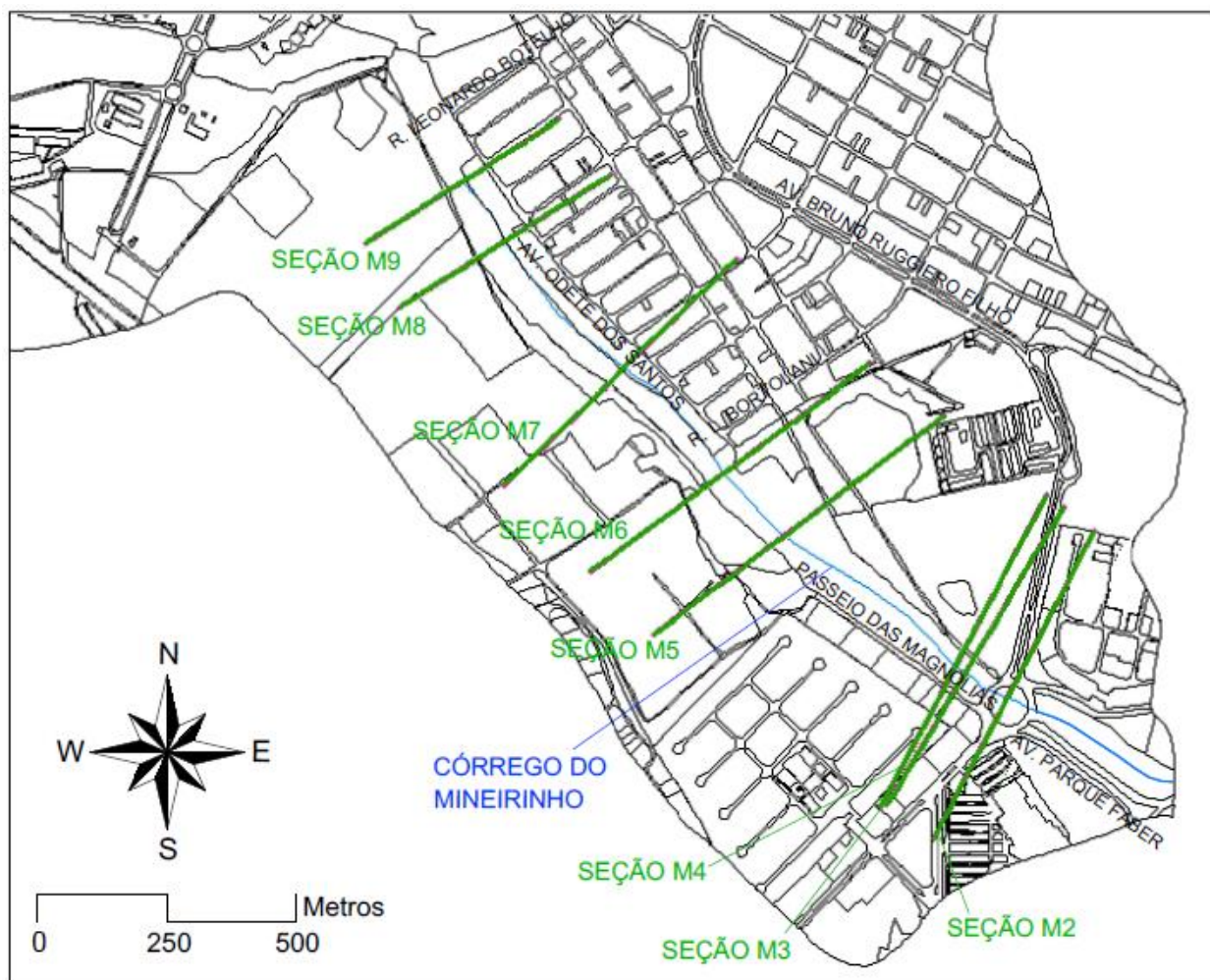


Figura 10 - Indicação dos locais onde as seções transversais foram levantadas

Nas Figuras 69 a 71 do Apêndice A, são apresentadas fotos das seções transversais M5, M4 e M2. No Apêndice B é apresentado o resultado do levantamento topobatimétrico.

4.3 Delimitação das sub-bacias

Para melhor representação dos mecanismos de formação de vazão no modelo hidrológico, a bacia do Córrego do Mineirinho foi dividida em sub-bacias. Foram utilizados os dados obtidos no trabalho de Aprígio (2012), em que as feições hidrológicas foram delimitadas automaticamente com o auxílio do software de geoprocessamento. Para tanto, foi determinada a direção do fluxo em cada célula do MDT, ou o caminho mais íngreme em relação às 8 células adjacentes. A partir dessa malha, foi gerada a de acúmulo de fluxo, contendo o número de células vizinhas que drenam para uma célula determinada; finalmente foram definidos os exutórios das sub-bacias. A Figura 11 mostra essa delimitação.

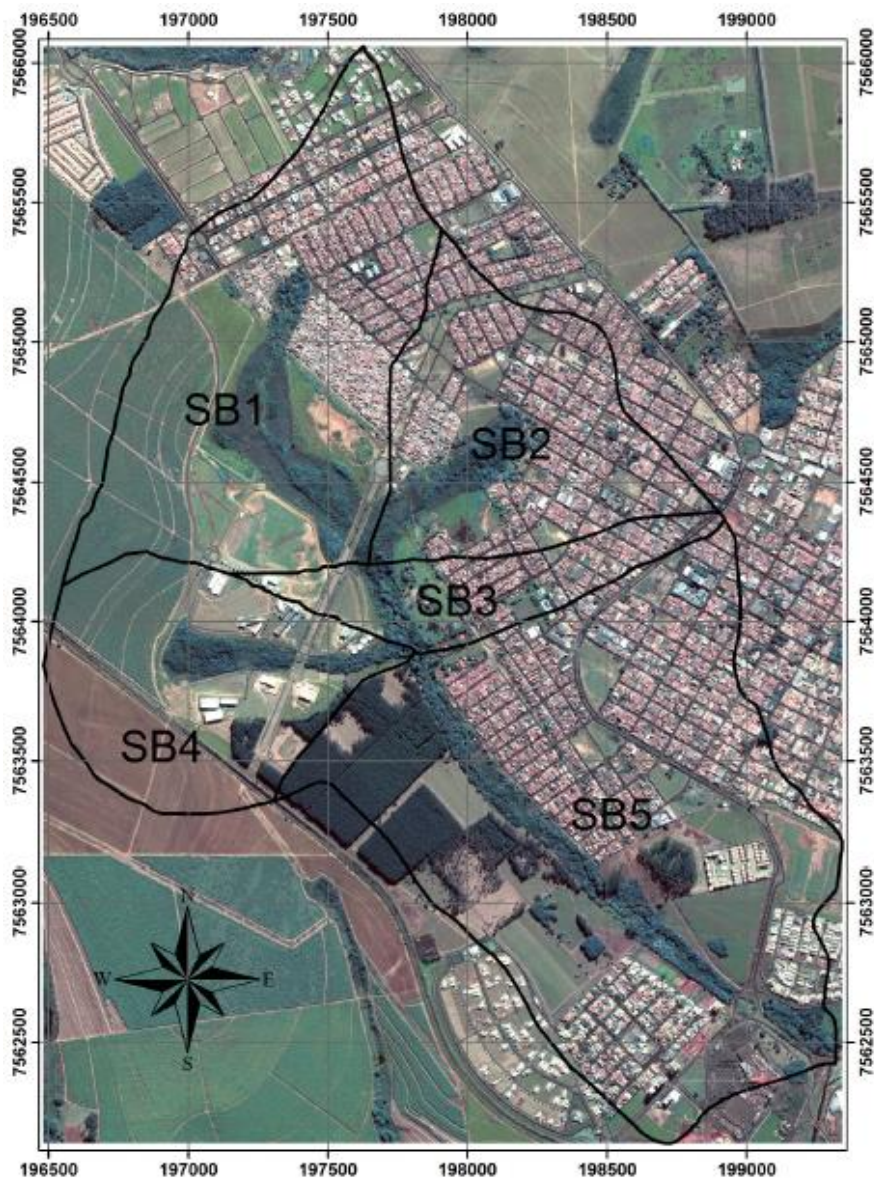


Figura 11 - Delimitação das sub-bacias do Córrego do Mineirinho. Fonte: Aprígio (2012)

Na Tabela 3 têm-se os valores de área e declividade média das sub-bacias.

Tabela 3 - Valores de área e declividade média das sub-bacias. Fonte: Aprígio (2012)

Bacia	Área (km ²)	S _m (%)
SB1	1,422	4,1
SB2	0,867	4,3
SB3	0,294	4,5
SB4	0,796	3,6
SB5	2,392	5,6

4.4 Tempo de concentração das sub-bacias

Hidrograma unitário é uma função de transferência usada para converter um hietograma de chuva excedente em um hidrograma de projeto. Baseia-se na hipótese de que uma bacia hidrográfica comporta-se como um reservatório linear, em que chuvas efetivas de intensidades constantes e mesmas durações geram hidrogramas com tempos de pico e durações iguais. Os deflúvios gerados seguem a mesma proporção das chuvas efetivas. Assim, se é determinado o hidrograma para 1 cm de chuva efetiva (hidrograma unitário), então pode-se determinar, por proporção, os deflúvios para outros totais de precipitação excedente. Mockus (1948) desenvolveu um hidrograma unitário para o método do SCS, considerando dados de um grande número de bacias hidrográficas de diferentes características. O tempo de base e o tempo de pico desse hidrograma dependem do tempo de concentração da bacia, por isso é importante a sua determinação (CANHOLI, 2005).

Até o presente momento, não existem valores obtidos experimentalmente para o tempo de concentração da bacia do Córrego do Mineirinho e suas sub-bacias. Dessa forma, foram estudadas diversas fórmulas de cálculo de tempo de concentração, a partir dos trabalhos de Silveira (2005) e Sharifi e Hosseini (2011).

Por terem, em geral, um caráter empírico e prático, frequentemente as fórmulas de tempo de concentração são apresentadas em trabalhos técnicos e acadêmicos sem fazer referência a todas as suas condições de origem e conseqüentemente, aos seus limites de aplicação. Quando a aplicação de uma fórmula viola essas condições, a princípio seu uso poderia ser considerado abusivo, mas isso muitas vezes não é reconhecido por haver um código de aceitação mútua entre projetistas e fiscais. Por outro lado, é possível que uma fórmula obtida com dados precários ou insuficientes obtenha bons resultados, captando por acaso a realidade física do processo (SILVEIRA, 2005).

A maior parte das fórmulas para cálculo de tempo de concentração existentes na literatura foi obtida empiricamente por regressão linear para bacias hidrográficas específicas. Para avaliar sua aplicabilidade para a bacia do Mineirinho, foi necessário estudar as condições de origem das fórmulas, tais quais: tamanho das bacias estudadas (área e comprimento do talvegue), declividade (da bacia como um todo, e do corpo d'água ou percurso hidráulico), e rugosidade ou resistência ao escoamento (n de Manning ou CN do método SCS). As metodologias que mais se adequaram às características da bacia do córrego do Mineirinho foram as propostas por Kirpich (1940), Carter (1961) e Desbordes (1974).

Não existem estudos da aplicação das fórmulas de Carter e Desbordes para bacias rurais; uma vez que a bacia do Mineirinho está em processo de urbanização, o uso dessas fórmulas poderia gerar certa distorção para a realidade atual. Por isso, optou-se pela fórmula de Kirpich. Essa mesma fórmula foi adotada por Bressiani (2010) em seu estudo sobre a bacia do Mineirinho e outras bacias urbanas do município de São Carlos.

De acordo com Silveira (2005), apesar de ter sido desenvolvida originalmente para bacias rurais pequeníssimas (com área de até 0,45 km²), a fórmula de Kirpich apresenta bons resultados para bacias rurais de médio e grande porte (até 12.000 km²) e bacias urbanas de até 26 km². A referida equação encontra-se expressa a seguir:

$$T_c = 0,01947 \cdot \left(\frac{L}{\sqrt{S_c}} \right)^{0,77}$$

Em que:

T_c: tempo de concentração, min;

L: comprimento do percurso hidráulico desde o ponto mais distante até o exutório, m;

S_c: declividade do percurso hidráulico, m/m.

Na literatura disponível, existe uma divergência entre os autores sobre os parâmetros L e S_c da equação proposta por Kirpich. Para alguns, L e S_c referem-se ao canal principal; enquanto para outros, L e S_c referem-se ao percurso hidráulico desde o ponto mais distante até o exutório. O artigo original escrito por Kirpich (KIRPICH, 1940) foi consultado para investigação dessa questão, e foi constatado que a segunda hipótese é a correta.

O tempo de concentração também foi calculado para a bacia do Mineirinho em sua totalidade, a fim de se determinar a duração da chuva de projeto. No caso de se estudar diversos cenários, deve-se calcular T_c para todos eles, e adotar o maior valor como base para os cálculos subsequentes. Uma vez que o resultado de T_c obtido pela equação de Kirpich não varia com o uso do solo da bacia, o valor de 58,4 min encontrado para a situação atual de uso e ocupação do solo pode ser usado para todos os cenários estudados.

Dessa forma, adotou-se a duração da precipitação crítica em 60 min.

4.5 Chuvas de projeto

Para que fosse possível gerar hidrogramas, e posteriormente avaliar os efeitos causados por suas vazões de pico, foi necessário o cálculo de chuvas de projeto, ou seja, as precipitações utilizadas nas simulações hidrológicas. No presente trabalho, foi utilizada a curva IDF (intensidade-duração-frequência) proposta por Barbassa (1991) para o município de São Carlos. Ela relaciona a intensidade da chuva com sua duração e seu tempo de retorno, que é definido como o inverso da probabilidade do evento ser igualado ou superado em um ano qualquer. Tal curva pode ser descrita pela equação a seguir:

$$i = \frac{1519 \cdot TR^{0,236}}{(t + 16)^{0,935}}$$

Em que:

i: intensidade, mm/h;

TR: período de retorno, anos;

t: duração da chuva, min.

No presente estudo, foram analisadas chuvas de projeto com tempos de retorno de 25, 50, 100. A duração da chuva de projeto foi determinada em função do cálculo do tempo de concentração da bacia hidrográfica do Mineirinho, considerado 60 minutos, conforme descrito no item anterior.

Com o cálculo da intensidade da chuva de projeto e sua duração, foi obtido o volume total precipitado. Em seguida, foi definida a distribuição temporal do volume precipitado. Para tanto, optou-se pelo método do *Bureau of Reclamation* dos EUA, que se baseia na maximização das condições desfavoráveis. Esse método, apresentado em 1977 para cálculo da precipitação de projeto no modelo SCS, consiste na seguinte sequência: determinar as precipitações correspondentes a diferentes durações, até o tempo de concentração; determinar os incrementos de chuva correspondentes a cada incremento de duração; arranjar os incrementos de chuva da forma 6, 4, 3, 1, 2, 5, 7, 8, etc (a numeração indica a ordem de magnitude). Colocando o maior valor no quarto intervalo, procura-se maximizar o pico do hidrograma, já que as chuvas iniciais atendem as perdas por infiltração e depressões da bacia e o incremento maior tende a gerar escoamento superficial (BERTONI e TUCCI, 1993).

De acordo com IPH (2005), a chuva deve ser dividida em intervalos menores ou iguais a $1/10$ do tempo de concentração da bacia. Inicialmente, ajustou-se o intervalo de 5 min. No entanto, devido a problemas na simulação hidrológica, os intervalos de tempo foram redefinidos para 1 minuto (de forma que o intervalo também fosse menor que $1/10$ do tempo de concentração de cada uma das sub-bacias).

A distribuição temporal dos volumes calculados através da curva IDF proposta por Barbassa (1991) resultou nos hietogramas expressos nas Figuras 12 a 14.

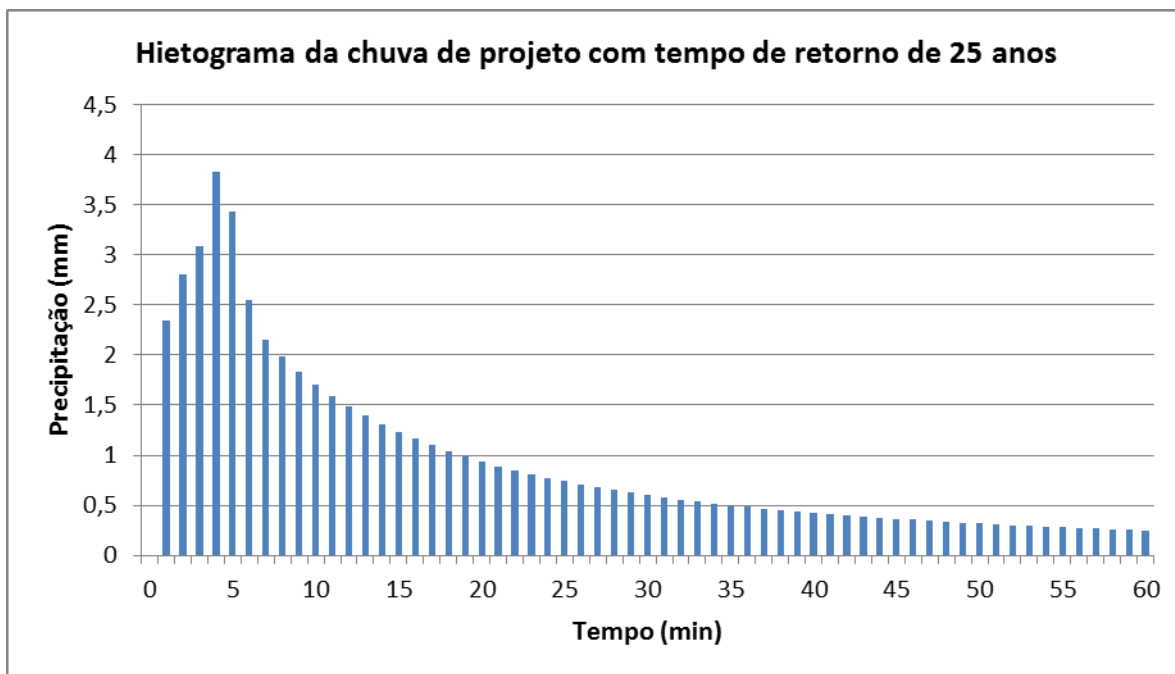


Figura 12 - Hietograma da chuva de projeto com tempo de retorno de 25 anos

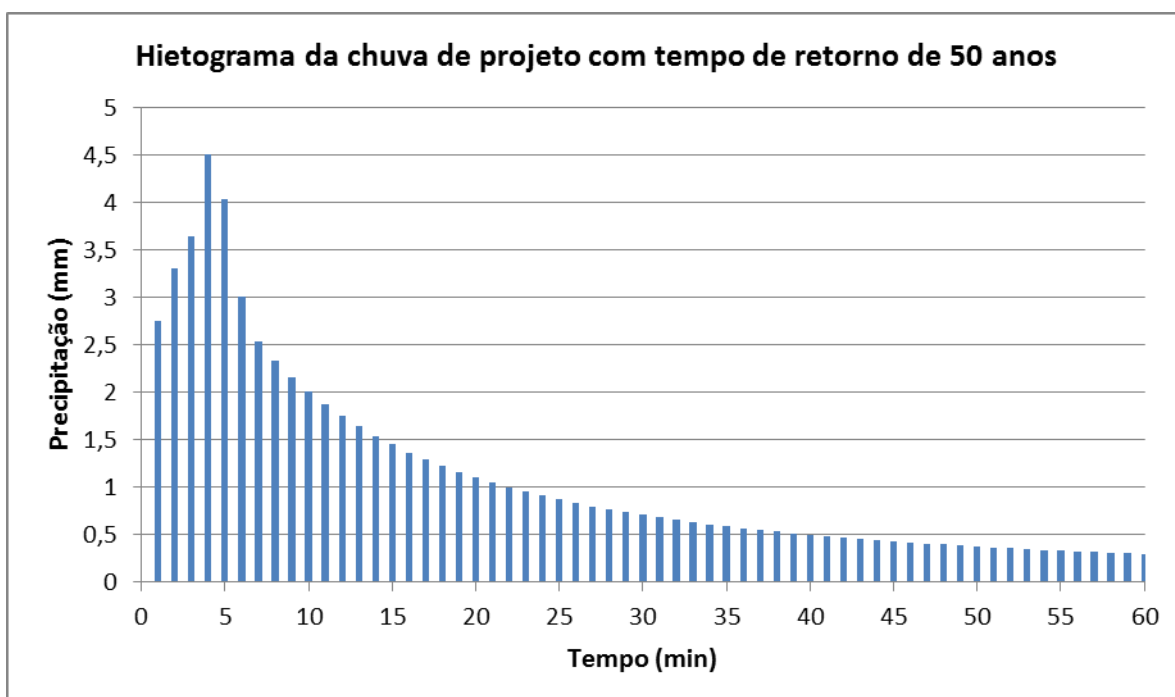


Figura 13 - Hietograma da chuva de projeto com tempo de retorno de 50 anos

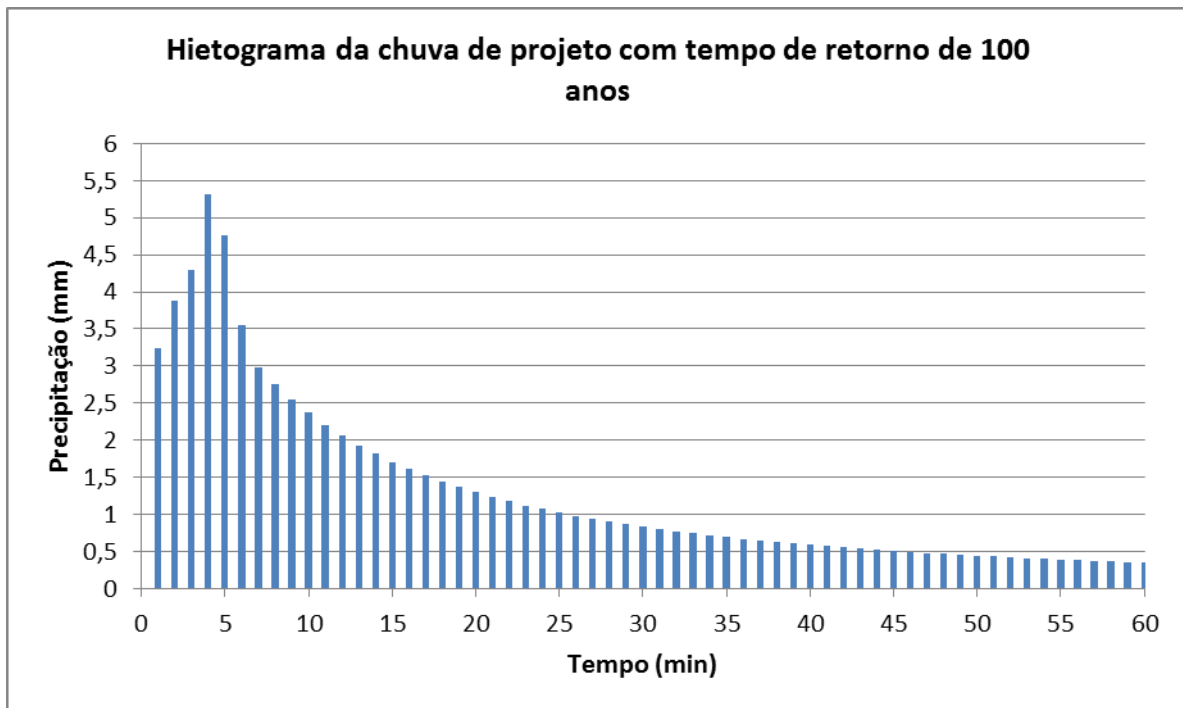


Figura 14 - Hietograma da chuva de projeto com tempo de retorno de 100 anos

4.6 Construção dos cenários alternativos e cálculo do CN

Os cenários tratam da descrição de um futuro possível, imaginável ou desejável para um sistema e seu contexto. No planejamento baseado em cenários, o planejador se prepara para os possíveis futuros e pode até intervir no desenvolvimento da área, atuando ativamente na materialização do futuro que se quer.

A construção de cenários alternativos de uso e ocupação do solo da bacia do Mineirinho teve como base o zoneamento presente no Plano Diretor do Município de São Carlos, as medidas estruturais do Plano Diretor de Drenagem Urbana Ambientalmente Sustentável do Município de São Carlos e as recomendações de UDFCD (2001) para a mitigação de inundações.

4.6.1 Cenário 1 - atual

Esse cenário representa as condições atuais de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Córrego do Mineirinho. Para delimitar o mapa de uso e ocupação do solo atual, Aprígio (2012) utilizou-se do reconhecimento de campo e fotointerpretação de imagem de satélite. Foi gerado um mapa de uso e ocupação do solo da bacia, e para cada categoria

considerada no mapa, foi atribuído um valor ao parâmetro CN. O CN de cada sub-bacia foi calculado através de uma média ponderada que levou em consideração o valor de CN de cada região da sub-bacia e sua respectiva área.

Aprígio (2012) realizou 3 visitas de campo para reconhecimento da área, entre os meses outubro/2011 e fevereiro/2012. Para confirmar as informações levantadas pelo autor, foi realizada nova visita de campo no dia 8 de junho de 2013, cujo relatório fotográfico encontra-se no Apêndice A do presente trabalho.

A imagem utilizada é um produto do satélite WorldView-II. O equipamento possui um sensor multiespectral que obtém imagens com resolução espacial de 0,46 m no modo pancromático e 1,85 m no modo multiespectral. Foram utilizadas cinco bandas espectrais: pancromática, Azul, Verde, Vermelha, e Infravermelho. Estes canais trabalham, respectivamente, nas seguintes faixas espectrais: 447 - 808 nm, 442 - 515 nm, 506 - 586 nm, 624 - 694 nm, 765 - 901 nm. A imagem foi obtida em 2 de junho de 2011, com ângulo off-nadir 22,2° e resolução radiométrica de 11 bits (DIGITALGLOBE, 2011).

O mapa temático de uso e ocupação foi construído por interpretação visual fundamentada na composição das bandas azul, verde e vermelha (RGB), fusionada com a pancromática. O processo de fusão permitiu melhorar a resolução espacial, por meio de uma transformação espectral que converte o sistema de cores RGB em sistema IHS (Intensidade, Matiz e Saturação). Essa transformação aloca a informação espectral das três bandas em apenas dois canais (matiz e saturação), e substitui a intensidade pela informação da banda pancromática, de melhor resolução. O resultado foi uma imagem colorida, com pixels de 0,5 m (APRÍGIO, 2012).

Também foi utilizada composição falsa-cor, sobretudo com o infravermelho próximo no canal verde, que facilita a identificação da vegetação. Os entes e as feições foram delimitados metodicamente, classe por classe, com base nos elementos de interpretação de imagens e no reconhecimento de campo. Em seguida, foram armazenados em um plano de informação para compor o mapa de uso e ocupação. Definiram-se ao todo nove classes, a saber: mata, gramínea, área de lazer, agricultura, institucional, solo exposto, residencial, terreno baldio e via de tráfego (APRÍGIO, 2012). O solo da região, de acordo com a classificação do método SCS, pertence ao grupo hidrológico B. Cada feição foi relacionada a um valor de CN, determinado por meio de tabelas obtidas em USDA (1986), apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores de CN utilizados. Adaptado de USDA (1986)

Cobertura do solo	<i>Curve Number (CN)</i>
Espaço aberto (condição hidrológica regular)	69
Áreas recém-parceladas (áreas permeáveis, sem nenhum tipo de vegetação)	86
Agricultura (condição hidrológica ruim)	74
Gramíneas (condição hidrológica regular)	69
Mata (condição hidrológica regular)	60
Residencial (depende da porcentagem de área impermeável - consideraram-se as parcelas permeáveis com CN 60)	92, 94 e 96
Vias	98

Na Figura 15 tem-se o mapa de uso e ocupação do solo para o Cenário 1 - atual. A descrição detalhada da metodologia utilizada em sua elaboração é apresentada por Aprígio (2012).

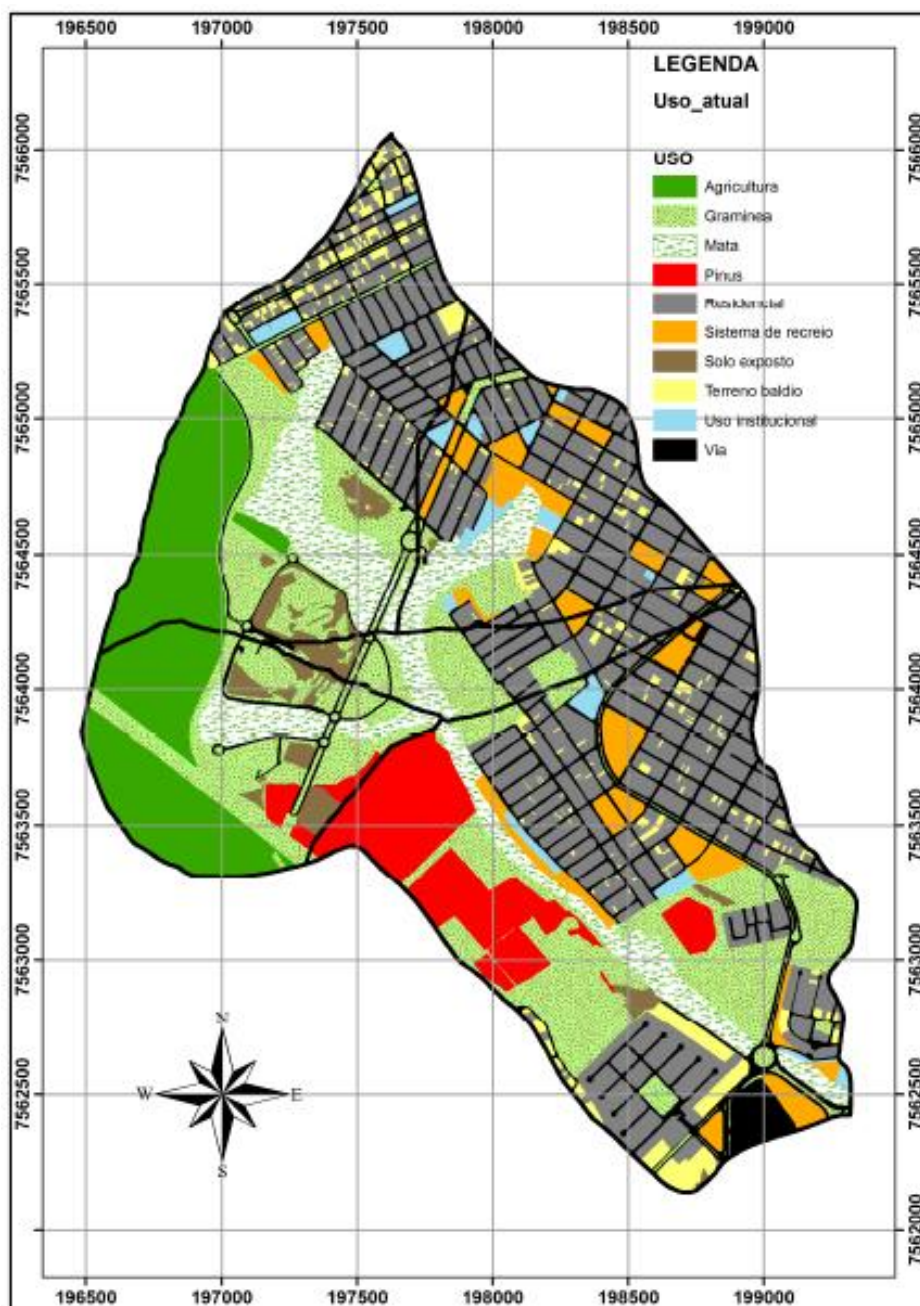


Figura 15 - Mapa de uso e ocupação do solo para o Cenário 1 - atual. Fonte: Aprígio (2012)

Na Tabela 5 têm-se os valores de porcentagem de área impermeável e CN médio das áreas permeáveis para o Cenário 1 – atual, obtidos a partir da Figura 15.

Tabela 5 - Porcentagem de área impermeável e CN médio das áreas permeáveis para as cinco sub-bacias e para a Bacia do Mineirinho no Cenário 1 - atual. Fonte: Aprígio (2012)

Bacia	A _{IMP} (%)	CN
SB1	33,5	70
SB2	58,7	66,4
SB3	35,6	69
SB4	2,6	71,8
SB5	41,8	69
Bacia do Mineirinho	36,6	69,2

4.6.2 Cenário 2 - futuro tendencial

Esse cenário representa um futuro provável para bacia do Córrego do Mineirinho, no que tange a ocupação do solo. Sua elaboração fundamentou-se na reflexão sobre os condicionantes da realidade atual capazes de indicar tendências de futuro. Os condicionantes considerados relevantes foram: o histórico da urbanização da bacia; as diferentes lógicas de ocupação no decorrer do tempo; e o Plano Diretor Municipal. Além desses, a implantação do campus 2 da Universidade de São Paulo foi considerado um fator influente no processo de alteração do uso e ocupação do solo, pois se constitui em um forte indutor de crescimento. As construtoras de condomínios fechados também são atores importantes nesse processo, visto que, em boa parte das áreas não loteadas da bacia, está prevista a construção desse tipo de empreendimento. Para o cenário futuro, foi considerada a conversão de boa parte das parcelas ociosas, ocupadas por gramíneas e solo exposto, em áreas residenciais (APRÍGIO, 2012).

Na Figura 16 tem-se o mapa de zoneamento da bacia do Córrego do Mineirinho, de acordo com o Plano Diretor Municipal.

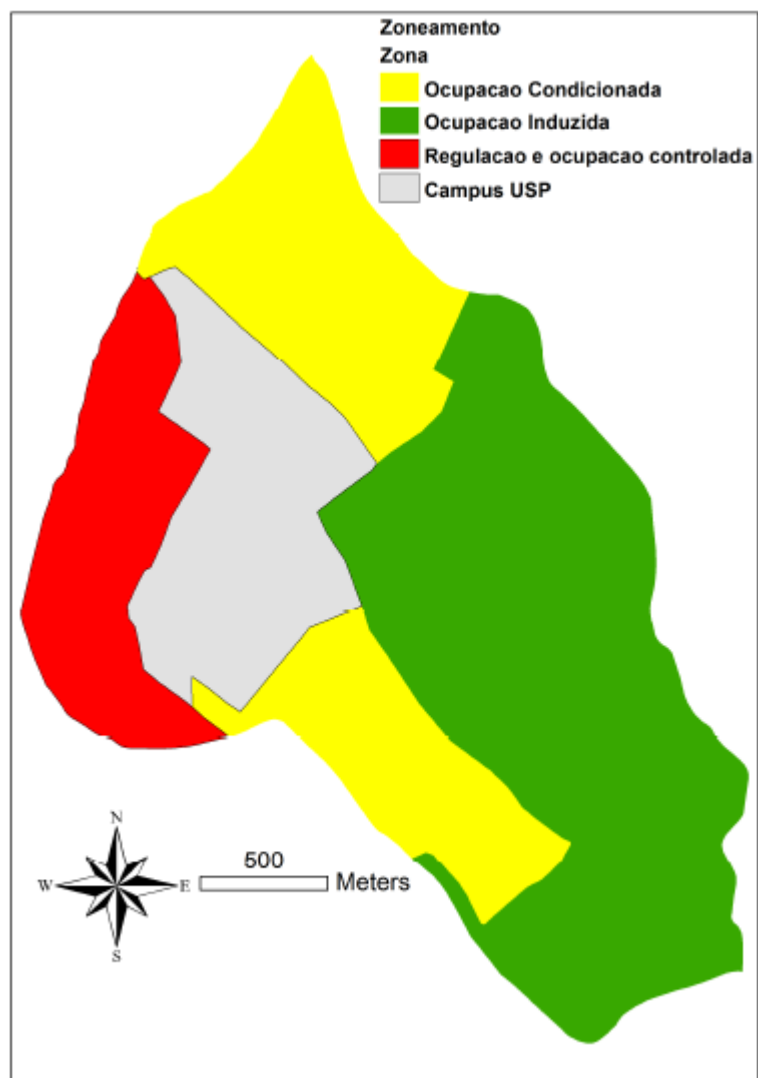


Figura 16 - Zoneamento da bacia do Córrego do Mineirinho de acordo com o Plano Diretor Municipal.

Fonte: Aprígio (2012)

Na Figura 17 tem-se o mapa de uso e ocupação do solo para o Cenário 2 - futuro tendencial. A descrição detalhada da metodologia utilizada em sua elaboração é apresentada por Aprígio (2012).

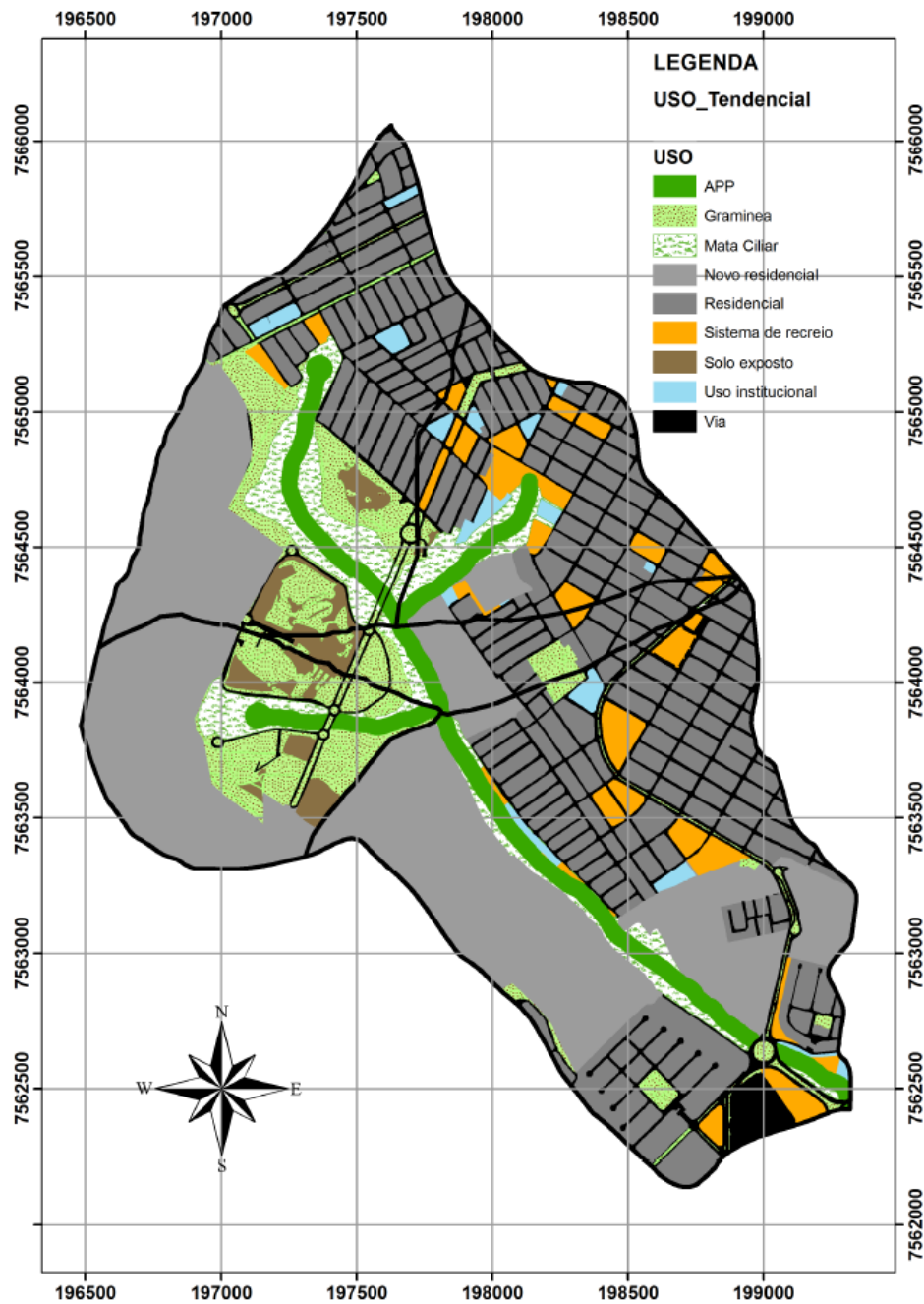


Figura 17 - Mapa de uso e ocupação do solo para o Cenário 2 – futuro tendencial. Fonte: Aprígio (2012)

Na Tabela 6 têm-se os valores de porcentagem de área impermeável e CN médio das áreas permeáveis para o Cenário 2 – futuro tendencial, obtidos a partir da Figura 17.

Tabela 6 - Porcentagem de área impermeável e CN médio das áreas permeáveis para as cinco sub-bacias e para a Bacia do Mineirinho no Cenário 2 – futuro tendencial. Fonte: Aprígio (2012)

Bacia	A _{IMP} (%)	CN
SB1	53,7	66
SB2	68,9	65
SB3	66,0	67,9
SB4	34,7	67,4
SB5	73,0	64,5
Bacia do Mineirinho	62,0	64,5

Comparando-se as Tabelas 5 e 6, nota-se que para todas as sub-bacias houve decréscimo do valor de CN para as áreas permeáveis entre os Cenários 1 e 2. Isso se deveu à conversão de parte das áreas permeáveis com valor elevado de CN em áreas impermeáveis, que não fazem parte do cômputo desses valores de CN.

4.6.3 Cenário 3 - futuro tendencial com Plano Diretor de Drenagem Urbana

O Cenário 3 - futuro tendencial com Plano Diretor de Drenagem Urbana foi construído a partir do Cenário 2 - futuro tendencial, ao qual foi incorporado o reservatório de retenção previsto para o córrego do Mineirinho pelo Plano Diretor de Drenagem Urbana Ambientalmente Sustentável do Município de São Carlos. Na Figura 18 tem-se a localização do reservatório.



Figura 18 – Reservatório do córrego do Mineirinho, proposto no Plano Diretor de Drenagem Ambientalmente Sustentável. Fonte: PMSC (2011)

No presente estudo, esse reservatório foi denominado R0.

O barramento do reservatório R0 possui um vertedor de soleira normal com perfil Creager, de largura efetiva igual a 26,51 m e soleira na cota 807,72 m. A estrutura de descarregamento de fundo é uma galeria circular com diâmetro de 1,0 m e comprimento aproximado de 15 m, instalada na cota 797,18 m (PMSC, 2011).

Para cálculo da curva cota-descarga do reservatório, é necessário avaliar a vazão descarregada pelo vertedor e pela galeria. A vazão descarregada pelo vertedor pode ser calculada pela seguinte equação:

$$Q = C \cdot L_s \cdot H^{2/3}$$

Em que:

Q: vazão descarregada, m³/s;

C: coeficiente de descarga;

L_s: largura da soleira, m;

H: carga hidráulica, m.

Foi adotado C igual a 2,2, seguindo a recomendação de Azevedo Netto (1972).

Visto que a relação L/D da galeria é menor do que 100, pode-se considerar o escoamento como sujeito à lei dos orifícios (PORTO, 2006). Assim, a vazão descarregada pela galeria é calculada pela seguinte equação:

$$Q = C_d \cdot A_o \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$

Em que:

Q: vazão descarregada, m³/s;

C_d: coeficiente de vazão;

A_o: área do orifício, m²;

H: carga hidráulica (diferença de nível entre a superfície da água e a linha de centro da seção de saída do tubo), m.

Para condutos circulares de concreto com entrada em aresta viva, com 1,0 m de diâmetro e L/D igual a 15, Porto (2006) recomenda o valor de C_d de 0,73.

A curva cota-descarga do reservatório R0 é apresentada na Figura 19.

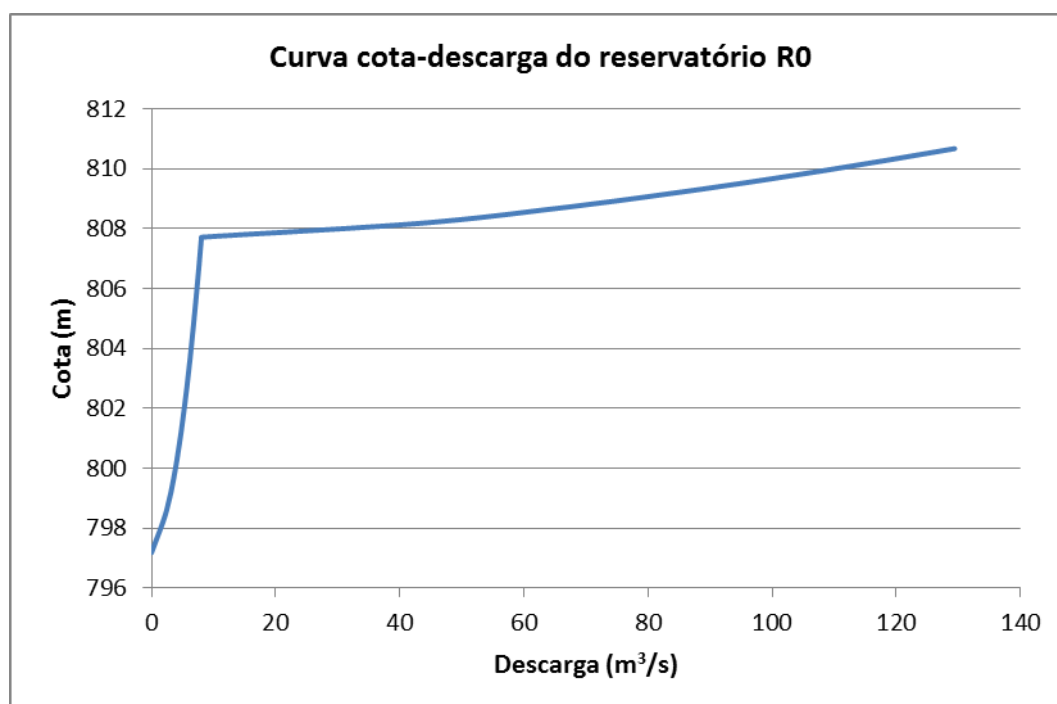


Figura 19 - Curva cota-descarga do reservatório R0

A curva cota-volume do reservatório R0 foi calculada por PMSC (2011), e é apresentada na Figura 20.

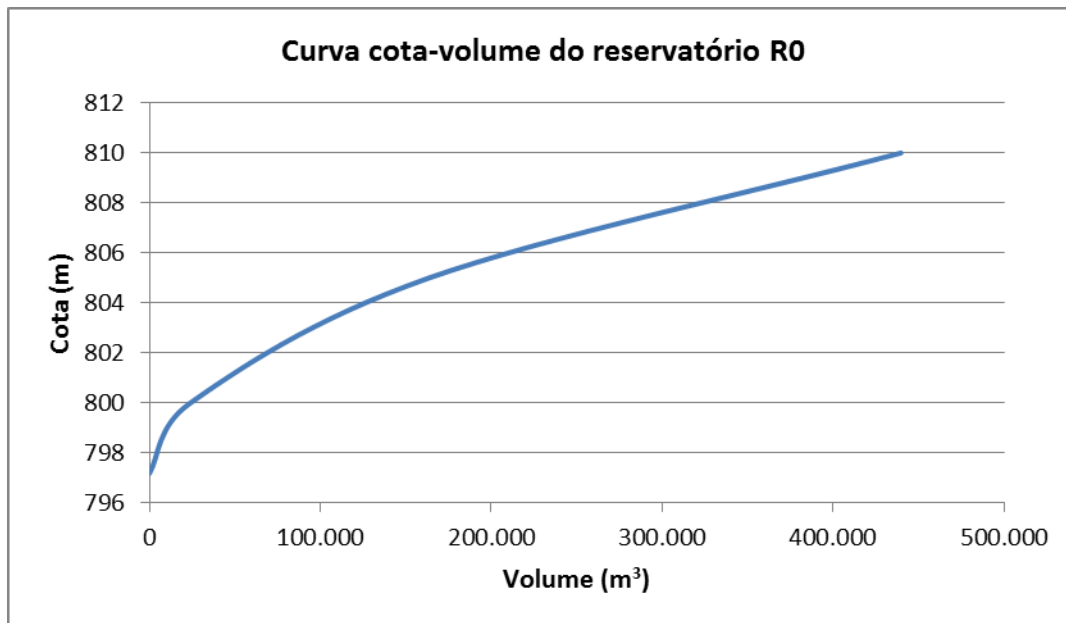


Figura 20 - Curva cota-volume do reservatório R0. Adaptado de PMSC (2011)

O mapa de uso e ocupação do solo, e os valores de porcentagem de área impermeável e CN médio das áreas permeáveis foram os mesmos considerado para o Cenário 2 – futuro tendencial, apresentados na Figura 17 e Tabela 6.

4.6.4 Cenário 4 - futuro alternativo

O Cenário 4 - futuro alternativo de ocupação da bacia do Córrego do Mineirinho foi construído a partir do Cenário 2 - futuro tendencial, o qual sofreu alterações baseadas nos princípios e diretrizes do UDFCD para o controle de inundações. Para construção do Cenário 4, foram consideradas as seguintes alterações em relação ao Cenário 2:

- Criação de parque linear ao longo do Córrego do Mineirinho com os objetivos de aumentar a permeabilidade da bacia e assim reduzir o volume de escoamento superficial, e preservar as planícies de inundação;
- Criação de estruturas de retenção à montante da rotatória da Av. Bruno Ruggiero Filho, para amortecimento das cheias e diminuição da vazão descarregada no exutório da bacia;

- Estabilização dos canais, para diminuir a ocorrência de erosão em suas paredes e fundo.

A premissa adotada na construção desse cenário foi a não ampliação das cheias naturais no exutório da bacia, em relação à condição atual (Cenário 1). A estabilização dos canais teve como objetivos a proteção dos corpos d'água, da infraestrutura (serviços públicos, vias, etc.) e da população.

4.6.4.1 Parque linear

De acordo com Friedrich (2007), parque linear é uma intervenção urbanística associada à rede hídrica, em fundo de vale, mais especificamente na planície aluvial, e tem como objetivos principais:

- Controlar as enchentes;
- Proteger ou recuperar os ecossistemas lindeiros aos corpos d'água;
- Conectar áreas verdes e espaços livres de um modo geral;
- Prover áreas verdes para o lazer, educação ambiental e coesão social;
- Reduzir a exposição ao risco de inundações;
- Aproximar a população do rio.

O Parque Linear têm características diferenciadas de um parque convencional por estar associado à rede hídrica. Nesse sentido, deve-se sempre buscar a implantação de espaços visando dar uma continuidade a caminhos verdes e à cobertura vegetal e arborização ao longo do curso hídrico, combinando espaços onde a zona equipada pode ter maior área, se assemelhando a um parque nuclear convencional, e espaços onde a faixa é mais estreita, limitando-se a áreas de preservação da mata ciliar e caminhos verdes, quando possível. A continuidade no tratamento da paisagem ao longo do curso hídrico visa não apenas a recuperação ambiental, que pode não ser possível em toda a margem e planície aluvial, mas também a valorização dos cursos d'água como elemento estrutural (FUPAM, 2006).

O parque linear foi locado de forma a não interferir nas construções existentes no cenário de ocupação atual da bacia, ou seja, ocupou parte das áreas destinadas a novos residenciais e gramíneas. Sempre que possível, o parque foi traçado considerando a distância de 100 m dos corpos d'água. Considerou-se CN igual a 69 (equivalente a gramíneas ou sistema de recreio). Sua área total foi de aproximadamente 190.000 m². Desse total, 178.000

m² seriam destinados a novos residenciais (com 85% de áreas impermeáveis e CN das áreas permeáveis igual a 60) e 12.000 m² seriam destinados a gramíneas (com CN igual a 69) no Cenário 2 - futuro tendencial.

4.6.4.2 Reservatórios de retenção

Os reservatórios de retenção são estruturas de acumulação temporária e/ou de infiltração de águas pluviais, que contribuem para a redução dos impactos da urbanização sobre os processos hidrológicos de bacias urbanas. Dentre as funções dos reservatórios de retenção destacam-se o amortecimento de cheias, a redução de volumes de escoamento superficial (por infiltração) e a redução da poluição difusa. UDFCD (2001) recomenda que os reservatórios de retenção sejam concebidos considerando múltiplos usos, em especial o de melhoria da qualidade da água.

Para bacias hidrográficas maiores do que 0,7 km², UDFCD (2011) recomenda que os reservatórios de retenção sejam dimensionados pelo método do amortecimento do hidrograma. Esse método iterativo consiste nos seguintes passos:

- Escolher a localização do(s) reservatório(s), de forma a se obter o maior número de benefícios, tais quais recreação, proteção da vida silvestre e melhora na qualidade da água;
- Determinar o hidrograma de entrada e a vazão máxima de descarga para a tormenta de projeto;
- Fazer uma primeira estimativa do volume de reservação, utilizando o hidrograma de entrada e uma aproximação do hidrograma de saída;
- Estimar o formato do reservatório, de forma que seja possível desenvolver as relações cota-volume-descarga do reservatório;
- Escolher os dispositivos de saída, tais quais tubulações, vertedores, etc;
- Dimensionar preliminarmente a estrutura de retenção considerando os passos anteriores. Esse é um processo iterativo no qual o tamanho e forma do reservatório e dos dispositivos de saída são testados e modificados conforme necessário para que os objetivos sejam alcançados.
- Fazer o dimensionamento final da estrutura, considerando o projeto da barragem, a estrutura dos dispositivos de saída, plano de vegetação, avaliação das questões de segurança da barragem, etc.

UDFCD (2011) ainda recomenda que as barragens tenham um vertedor dimensionado para descarregar vazões que excedam os valores de projeto do reservatório. Para determinação da altura da barragem, deve-se considerar uma borda livre de 0,30 m acima do nível máximo da água no vertedor. Quando a estrutura da barragem for dimensionada de forma a permitir o galgamento, a borda livre pode ser dispensada. Deve-se acrescentar 5% na altura da barragem, para considerar a perda de volume devido à sedimentação de material. Nos lagos permanentes devem ser previstas estruturas que permitam seu esvaziamento total para a remoção de sedimentos.

No presente estudo, para o Cenário 4 – futuro alternativo, adotaram-se 3 reservatórios de detenção, denominados R1, R2 e R3. Decidiu-se pela proposição de múltiplos reservatórios em série (ao invés de reservatório único) com o intuito de maximizar a reservação ao longo de todo o trecho do canal, e diminuir a altura das barragens. Os reservatórios R1, R2 e R3 foram locados próximo às seções transversais M4, M5 e M7, respectivamente. A localização dos reservatórios é apresentada na Figura 21.



Figura 21 - Localização dos reservatórios propostos no Cenário 4 - futuro alternativo

A metodologia de dimensionamento recomendada pelo UDFCD foi seguida, e o *software* HEC-HMS foi utilizado para cálculo dos hidrogramas afluentes e efluentes aos reservatórios, e os volumes armazenados. O barramento de cada um dos reservatórios foi dotado de um vertedor e uma estrutura de descarregamento de fundo. Os reservatórios foram dimensionados considerando-se a precipitação com tempo de retorno de 100 anos. A premissa básica foi que a inundação referente à precipitação de projeto não afogasse o descarregador de fundo da barragem à montante. Além disso, foram adotados descarregadores de fundo com diâmetro comercial.

Seguindo a recomendação de Azevedo Netto (1973), adotou-se o valor de 2,1 para o coeficiente de descarga dos vertedores. As características principais dos vertedores dos reservatórios R1, R2 e R3 são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Características principais dos vertedores dos reservatórios R1, R2 e R3

Reservatório	Tipo	Largura (m)	Cota da soleira (m)
R1	Soleira normal	30,0	798,60
R2	Soleira normal	35,0	806,00
R3	Soleira normal	40,0	812,00

Seguindo a recomendação de Azevedo Netto (1973), adotou-se o valor de 0,79 para o coeficiente de vazão das galerias de descarregamento de fundo dos reservatórios. As demais características das galerias são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Características principais das galerias de descarregamento de fundo dos reservatórios R1, R2 e

R3

Reservatório	Formato	Diâmetro (m)	Cota do centro (m)
R1	Cilíndrico	2,5	793,15
R2	Cilíndrico	3,0	800,80
R3	Cilíndrico	3,0	808,50

Para todos os reservatórios, considerou-se um lago permanente com lâmina de água de 1,0 m. O armazenamento da água por longos períodos proporciona a sedimentação das partículas sólidas e conseqüentemente a redução de cargas poluentes. Adicionalmente, o lago permanente possibilita a utilização do espaço para recreação.

Após a diminuição da vazão de escoamento superficial, UDFCD (2001) recomenda que o escoamento remanescente seja tratado através do armazenamento, com o objetivo de melhorar a qualidade da água e minimizar os impactos à jusante. Para isso, os reservatórios devem ser dotados de um volume de armazenamento para qualidade da água WQCV (*Water Quality Control Volume*), que é uma função da porcentagem de área impermeável da bacia, e pode ser calculado pela seguinte equação (UDFCD, 2001):

$$WQCV = A \cdot a \cdot 0,0254 \cdot \left(0,91 \cdot A_{IMP}^3 - 1,19 \cdot A_{IMP}^2 + 0,78 \cdot A_{IMP} \right)$$

Em que:

WQCV: volume de armazenamento para qualidade da água, m³;

A: área da bacia, m²;

a: coeficiente correspondente ao tempo de drenagem do volume de armazenamento;

A_{IMP}: taxa de impermeabilidade da bacia.

Tabela 9 - Tempo de esvaziamento e valores do coeficiente “a” para cálculo do WQCV

Tempo de esvaziamento (h)	Coeficiente a
12	0,8
24	0,9
40	1,0

Considerou-se reservação durante 24 horas para cálculo do volume WQCV. Sendo o valor do coeficiente “a” igual a 0,9, e a taxa de impermeabilidade da bacia igual a 0,58, o valor de WQCV calculado para bacia do Mineirinho foi de 30.750 m³. Optou-se por colocar todo o volume WQCV no reservatório R1.

Seguindo a recomendação de Porto (2006), para todos os reservatórios adotou-se vertedor com soleira normal, perfil padrão *Waterways Experiment Station* (WES). Esse perfil coincide com a face inferior da lâmina líquida, garantindo, além da eficiência hidráulica, a proteção da estrutura do vertedor. Baseando-se em dados experimentais levantados pela WES, esse órgão propõe a seguinte equação para o traçado do perfil do vertedor:

$$y = 0,5 \cdot \frac{x^{1,85}}{H_d^{0,85}}$$

Em que:

x: coordenada horizontal da soleira, com origem no ponto mais alto do perfil, m;

y: coordenada vertical da soleira, com origem no ponto mais alto do perfil, m;

H_d: carga estática de projeto, m.

A partir da equação acima, nota-se que para um mesmo valor de y, a largura do vertedor (x) cresce com o aumento de H_d. Ou seja, quanto maior o nível de água no reservatório de montante, maior deve ser a base da barragem.

O traçado da crista foi feito para a máxima vazão de descarga admissível, relacionada a carga hidráulica H_d. No presente estudo, considerou-se os valores de H_d de cada barramento obtidos para a precipitação com tempo de retorno de 1000 anos.

As curvas cota-volume dos reservatórios foram obtidas a partir da geometria das seções transversais do canal, com o auxílio do *software* HEC-RAS. As curvas cota-descarga foram obtidas considerando as vazões descarregadas pela galeria (dispositivo de descarregamento de fundo) e pelo vertedor de cada reservatório.

Nas Figuras 22 a 33 têm-se os croquis dos perfis das barragens, as curvas cota-volume, as curvas cota-descarga e o traçado do perfil dos vertedores de soleira normal de cada reservatório. O presente trabalho não tem o objetivo de apresentar o projeto final das barragens (com detalhes de geotecnia, estrutura, hidráulica, entre outros), mas sim um *layout* simplificado das instalações, com ênfase nas cotas dos níveis de água nos reservatórios.

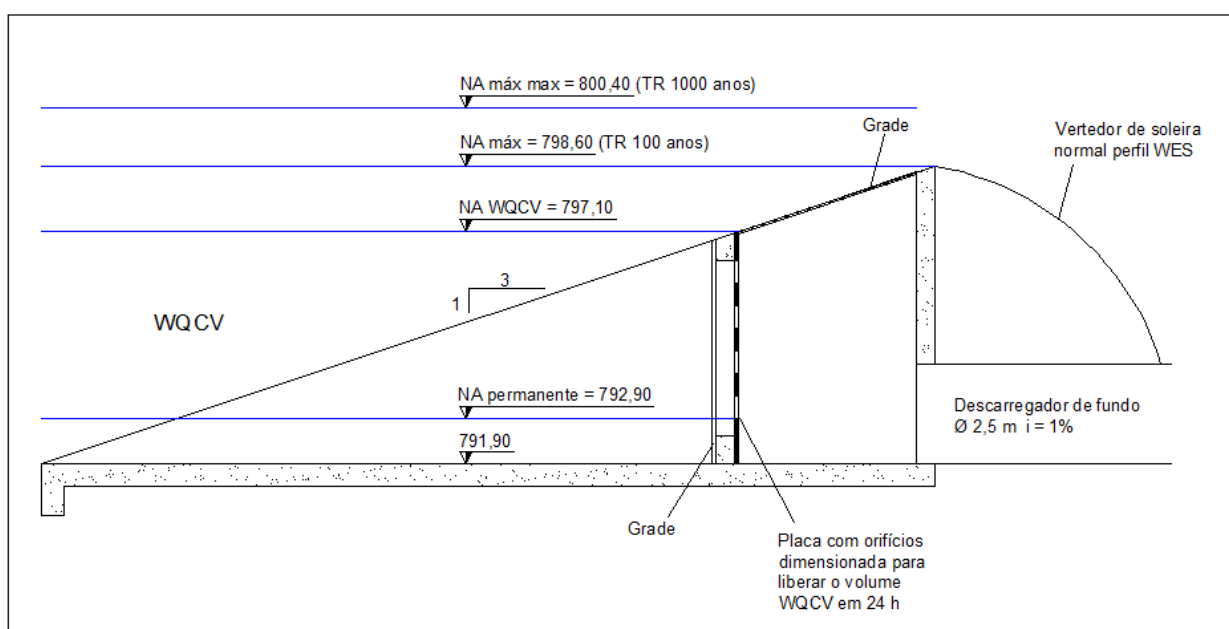


Figura 22- Perfil da barragem do reservatório R1

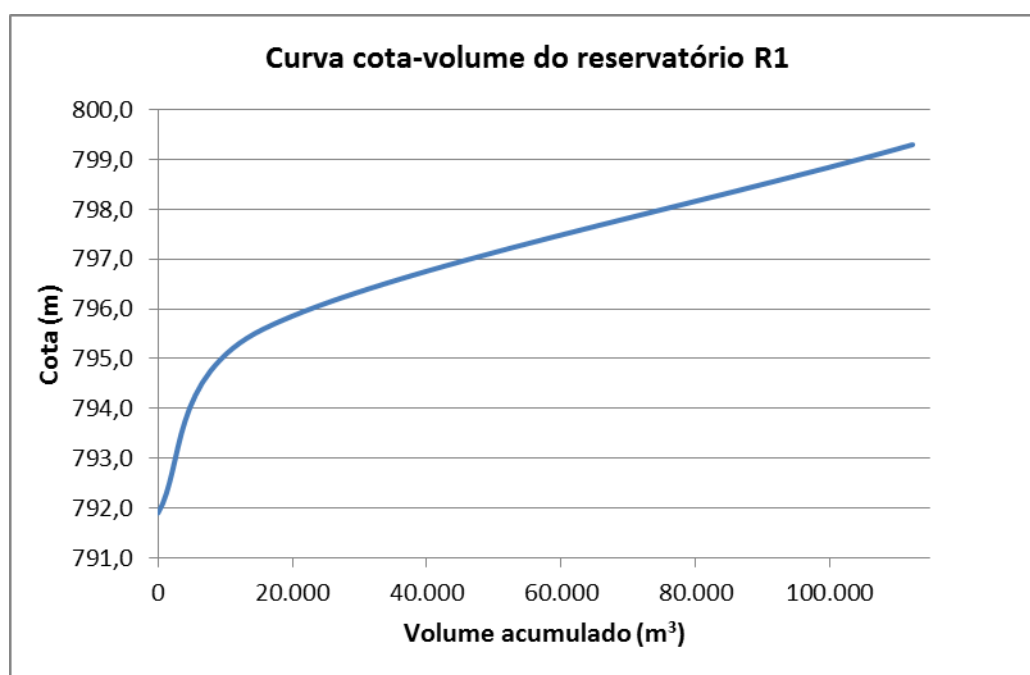


Figura 23 - Curva cota-volume do reservatório R1

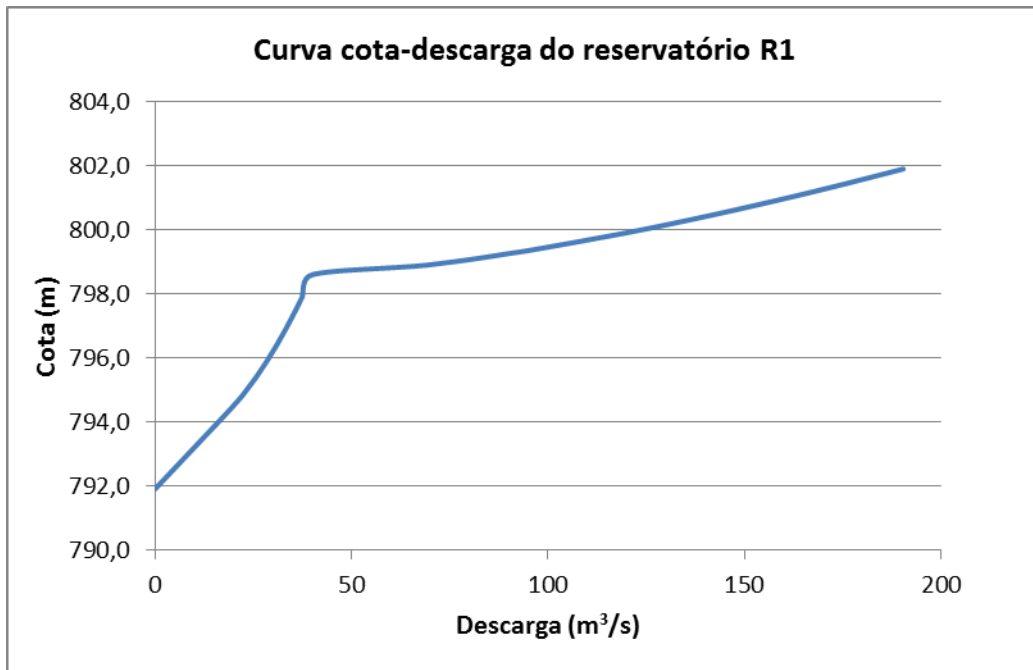


Figura 24 - Curva cota-descarga do reservatório R1

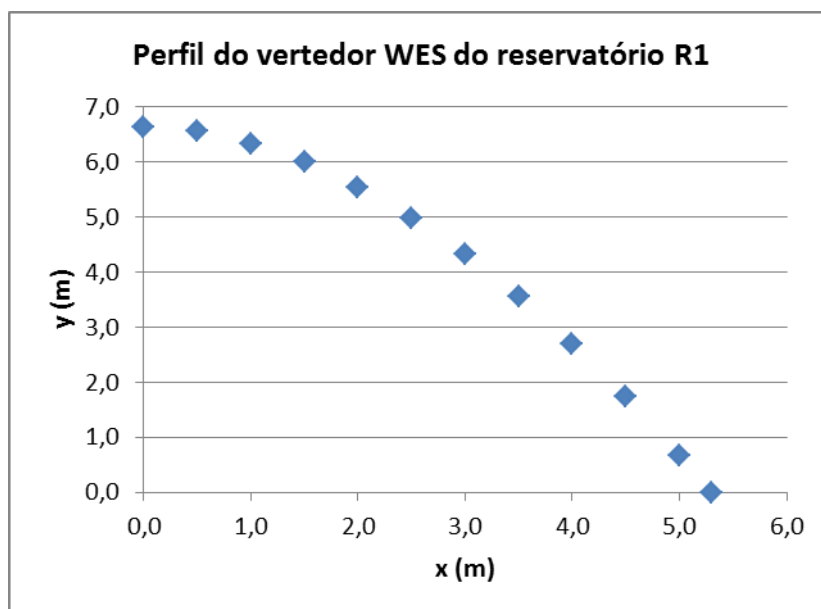


Figura 25 - Perfil do vertedor WES do reservatório R1

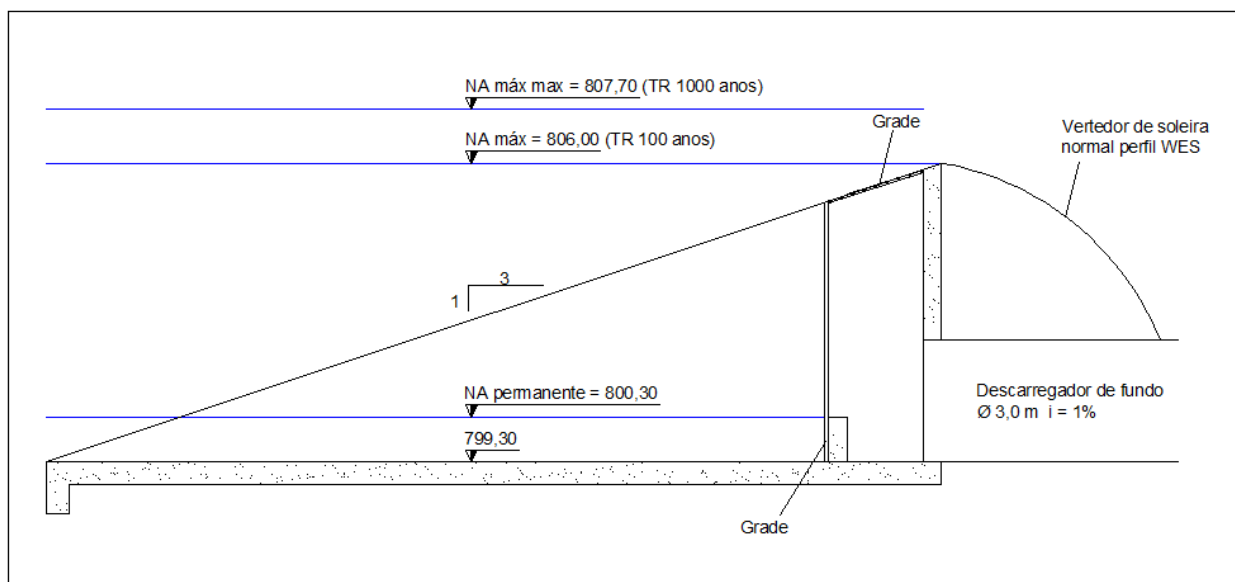


Figura 26 – Perfil da barragem do reservatório R2

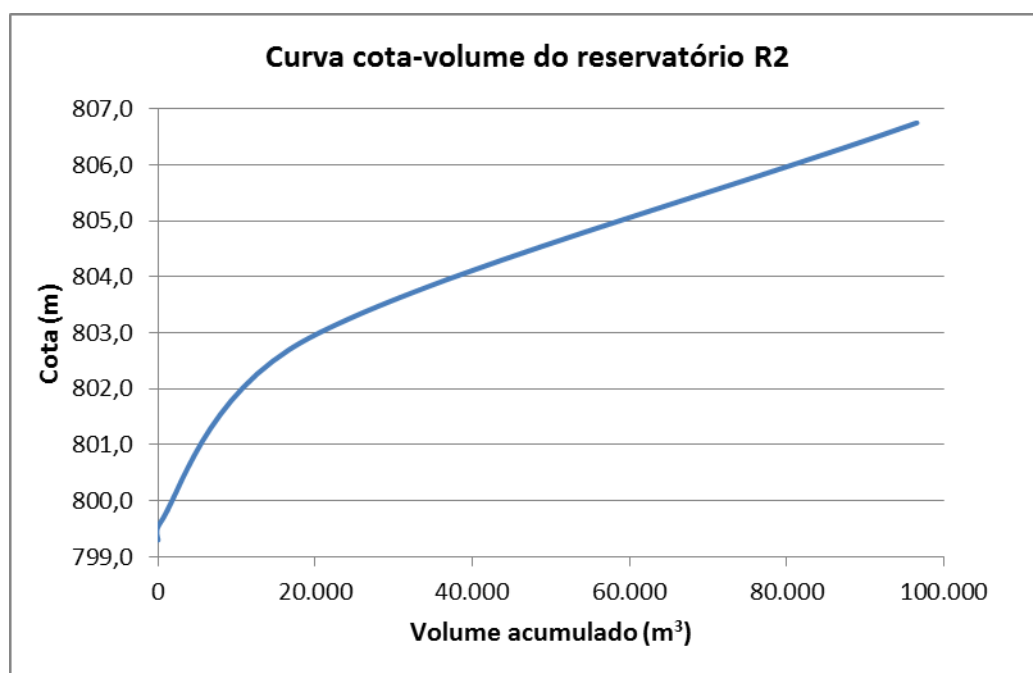


Figura 27 - Curva cota-volume do reservatório R2

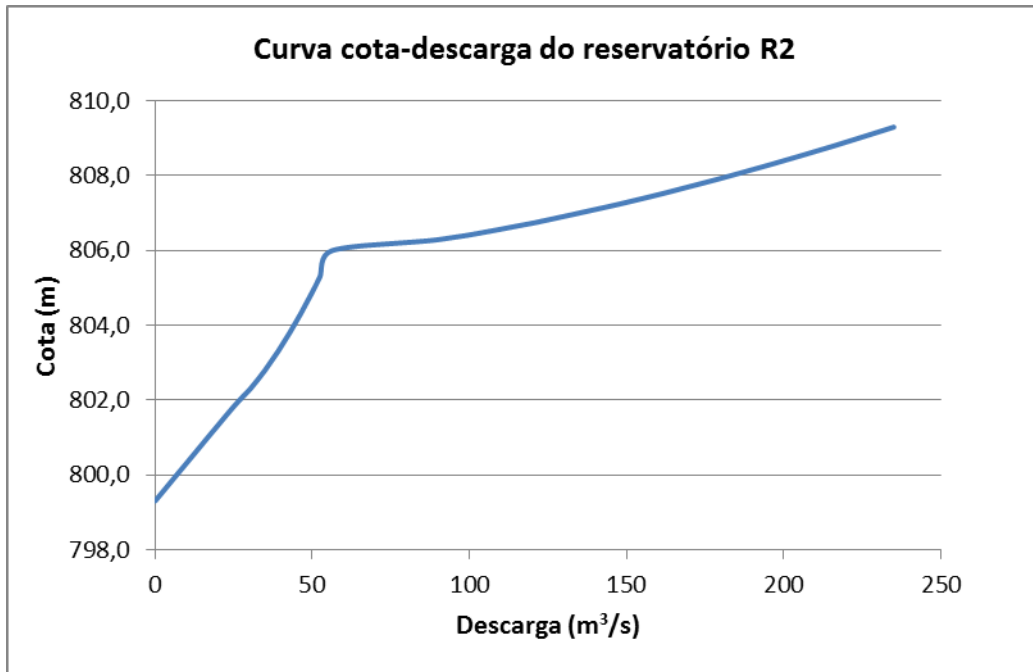


Figura 28 - Curva cota-descarga do reservatório R2

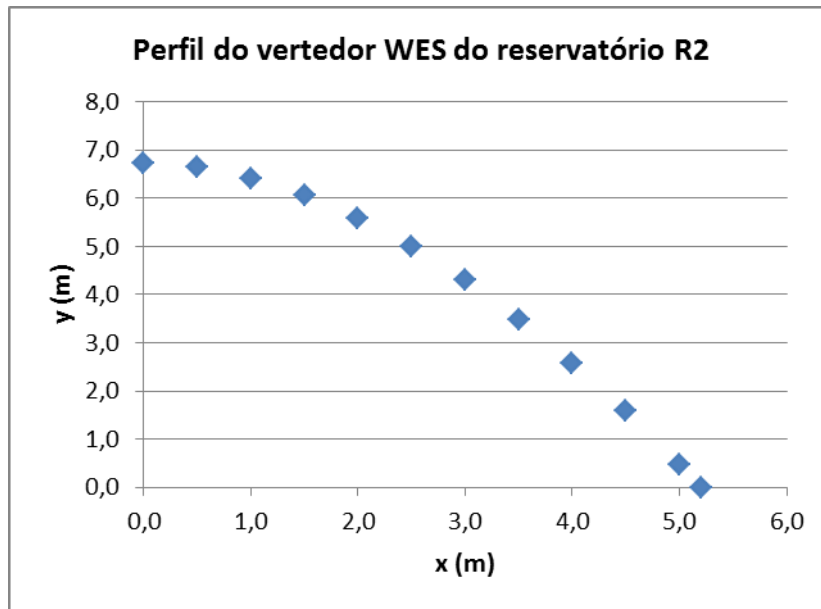


Figura 29 - Traçado do perfil do vertedor WES do reservatório R2

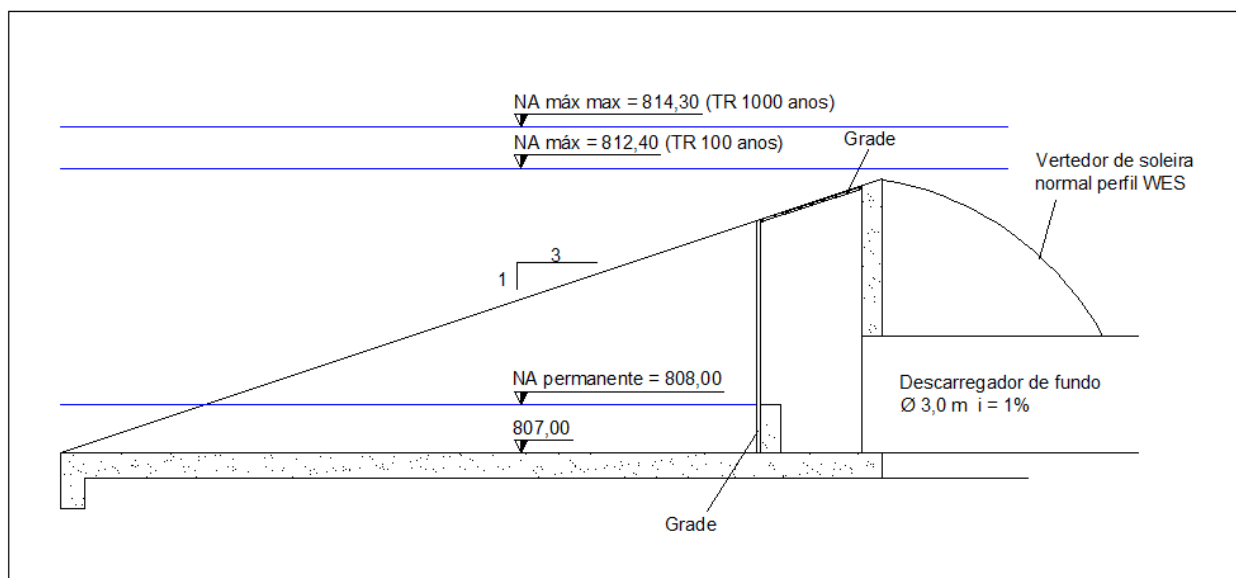


Figura 30 - Perfil da barragem do reservatório R3

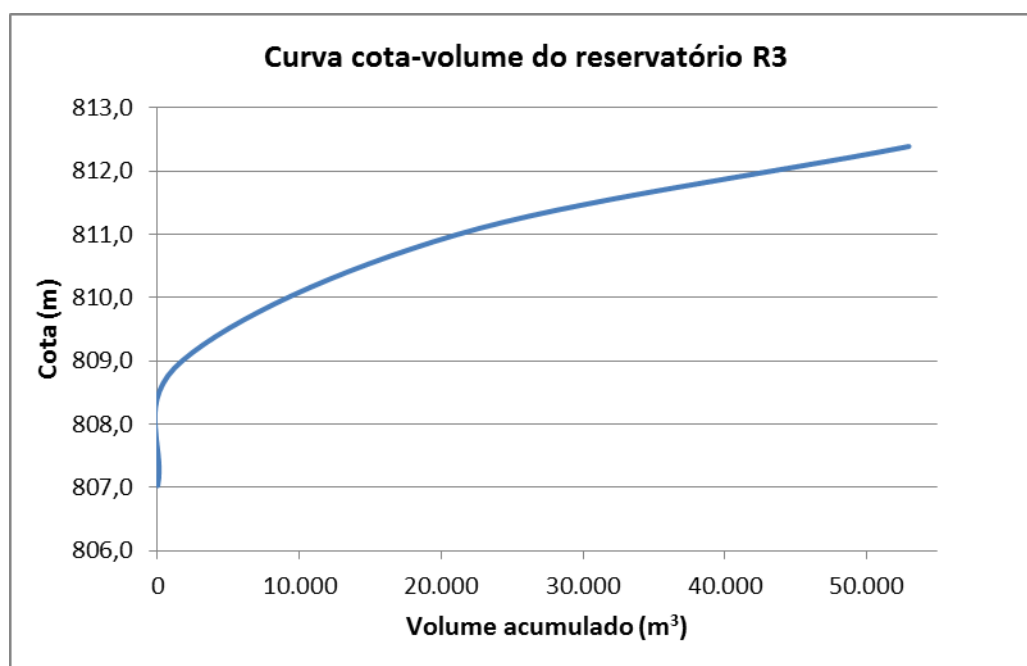


Figura 31 - Curva cota-volume do reservatório R3

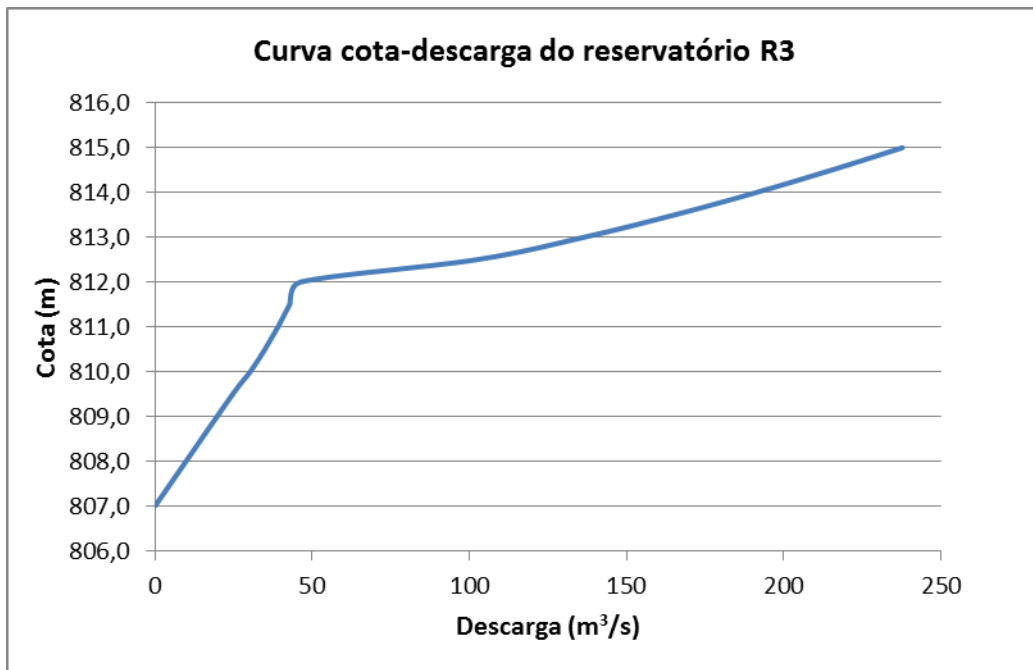


Figura 32 - Curva cota-descarga do reservatório R3

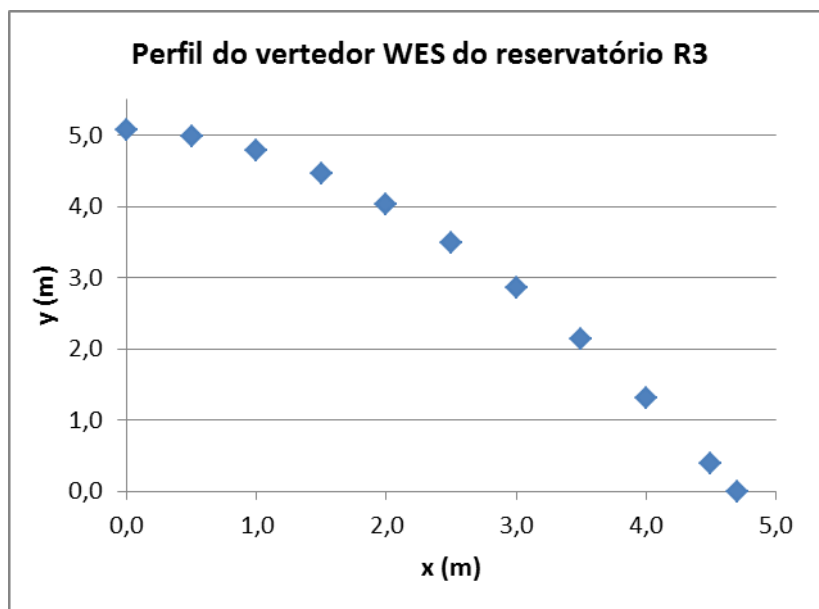


Figura 33 - Traçado do perfil do vertedor WES do reservatório R3

4.6.4.3 Estabilização dos canais

Como consequência do desenvolvimento urbano, os canais de drenagem naturais são frequentemente sujeitos à erosão das paredes e fundo devido ao aumento na frequência, duração, vazão e volume do escoamento superficial. Se a estabilização puder ser feita nos

estágios iniciais do desenvolvimento urbano, é maior a probabilidade de as características naturais dos cursos de água (declividade, largura, entre outros) serem mantidas; adicionalmente, o custo de se estabilizar um canal relativamente estável é muito menor, se comparado aos custos de reparação de canais erodidos (UDFCD, 2001).

A estabilização dos canais tem como objetivos:

- Manter a capacidade de escoamento do canal;
- Evitar a perda de terras, vias, edifícios e outras instalações adjacentes ao curso de água;
- Evitar a degradação da vegetação da planície de inundação;
- Reduzir a carga de sedimentos em escoamento e o assoreamento;
- Melhorar a geometria do canal para uso recreativo ou como habitat para peixes e animais selvagens;
- Controlar a formação de meandros.

Dentre as alternativas para estabilização dos canais, tem-se o revestimento com: pedra rachão, vegetação, gabião, solo-pneu, geomanta e gramíneas, muro de alvenaria armada, cimentado, tela metálica e tirantes.

O presente trabalho não tem a intenção de detalhar a questão da estabilização dos taludes, e por isso não será apresentado o dimensionamento das estruturas de contenção. No entanto, pela natureza das paredes e fundo dos canais da bacia do Córrego do Mineirinho, recomenda-se a estabilização por meio do revestimento com pedra rachão.

A solução de revestimento dos taludes com solo-pneu também é possível, porém deve-se atentar ao fato de que ainda não existem informações suficientes acerca do impacto do uso dos pneus no ambiente aquático. Algumas pesquisas relacionam o uso de pneus ao aumento da concentração de Manganês, Ferro e compostos orgânicos nas águas em escoamento.

4.6.4.4 Mapa de uso e ocupação do solo

Na Figura 34 tem-se o mapa de uso e ocupação do solo para o Cenário 4 – futuro alternativo. Na Tabela 10 têm-se os valores de porcentagem de área impermeável e CN médio das áreas permeáveis para o Cenário 4 – futuro alternativo, obtidos a partir da Figura 34.

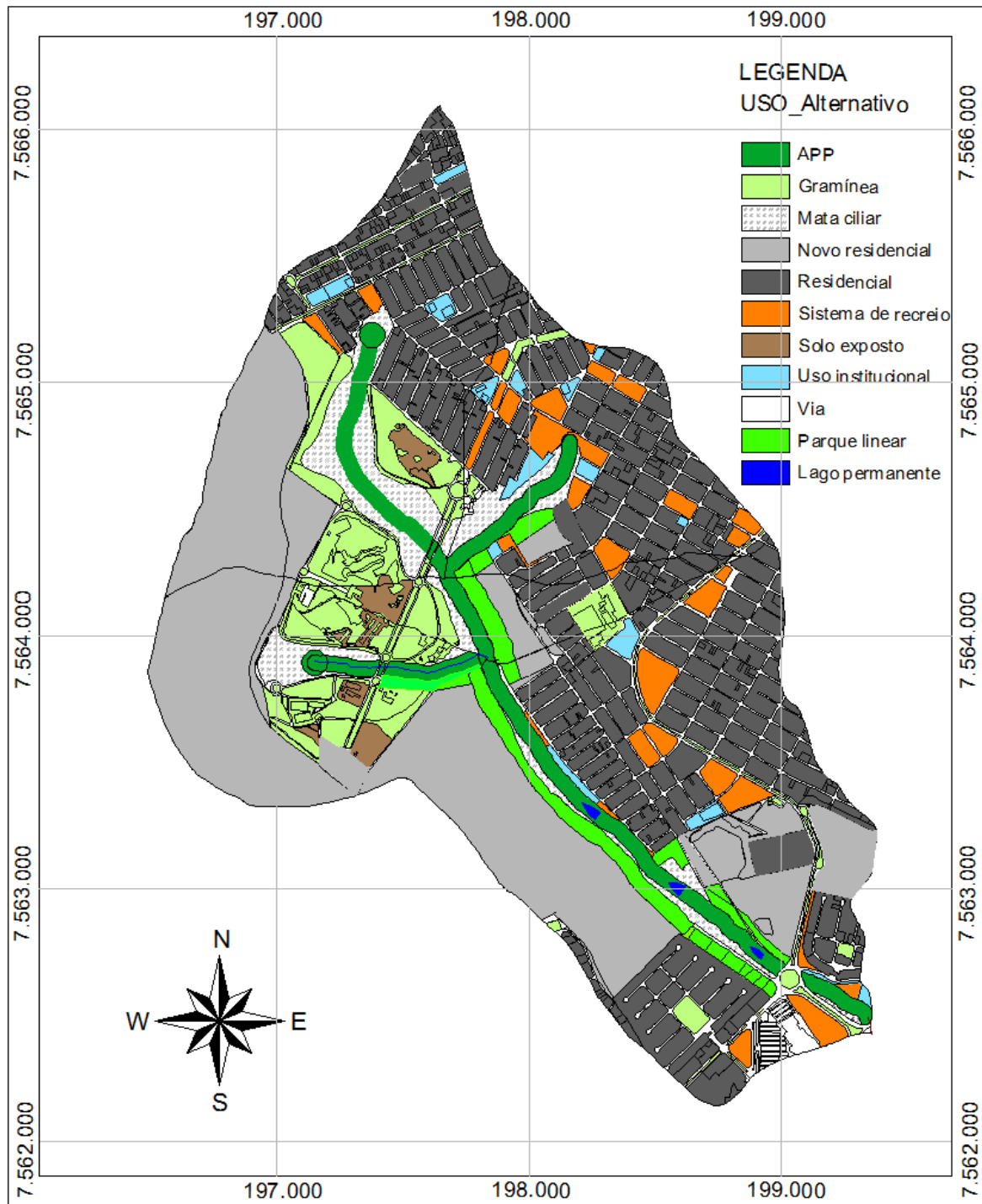


Figura 34 - Mapa de uso e ocupação do solo para o Cenário 4 - futuro alternativo

Tabela 10 - Porcentagem de área impermeável e CN médio das áreas permeáveis para as cinco sub-bacias e para a Bacia do Mineirinho no Cenário 4 – futuro alternativo.

Bacia	A _{IMP} (%)	CN
SB1	53,7	66
SB2	62,9	64,5
SB3	43,5	68,3
SB4	34,7	67,4
SB5	68,3	64,5
Bacia do Mineirinho	58,0	65,5

A criação do parque linear resultou na redução das parcelas impermeáveis da bacia, que passaram de 62,0% no Cenário 2 para 58,0% no Cenário 4. A área do parque é de aproximadamente 190.000 m², e equivale a 3,2% da área total da bacia.

4.7 Modelação hidrológica

A modelação hidrológica foi realizada com o auxílio do software HEC-HMS, desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos.

Para a realização da simulação hidrológica no HEC-HMS, são necessários os seguintes dados de entrada:

- Modelo da bacia (*basin model*), ou seja, a topologia do sistema;
- Modelo meteorológico (*meteorologic model*);
- Especificação de controle (*control specification*);
- Dados de séries temporais (*time-series data*).

O “modelo da bacia” é a representação física do sistema em estudo, e deve ser configurado pela inserção e conexão de elementos hidrológicos. Conforme apresentado no item 3.6.1.4, os elementos hidrológicos disponíveis no HEC-HMS são: sub-bacia (*subbasin*), trecho (*reach*), junção (*junction*), fonte (*source*), sumidouro (*sink*), reservatório (*reservoir*) e derivação (*diversion*).

Nas Figuras 35 a 37 são apresentadas as topologias do sistema para os cenários estudados.

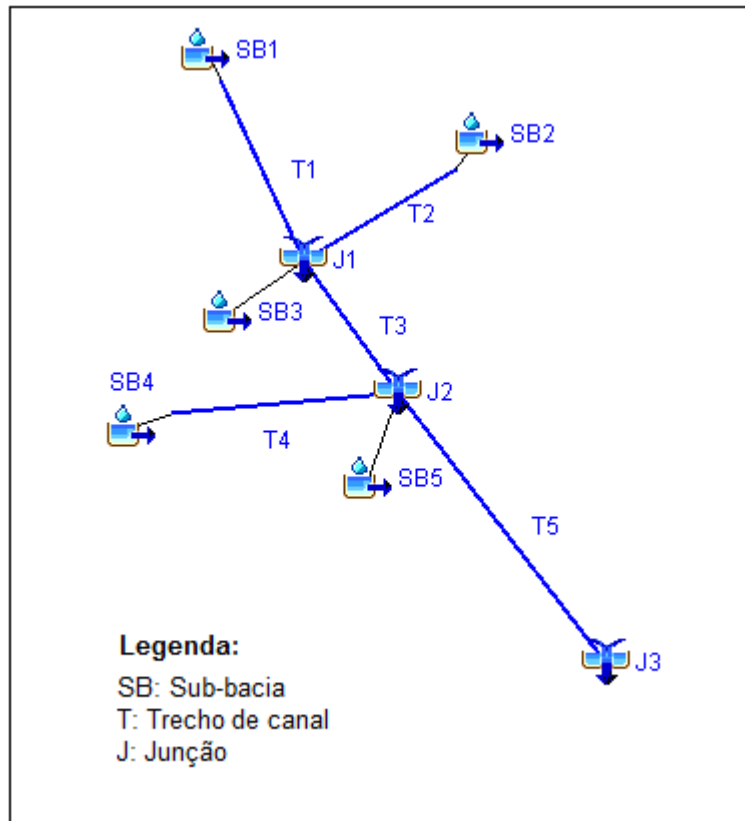


Figura 35 - Topologia do sistema para o Cenário 1 - atual e Cenário 2 - futuro tendencial

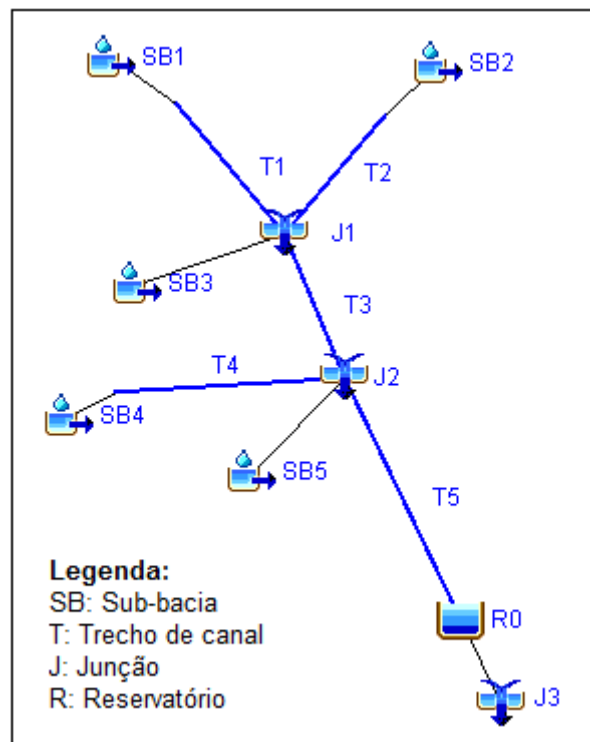


Figura 36 - Topologia do sistema para o Cenário 3 - futuro tendencial com Plano Diretor de Drenagem Urbana

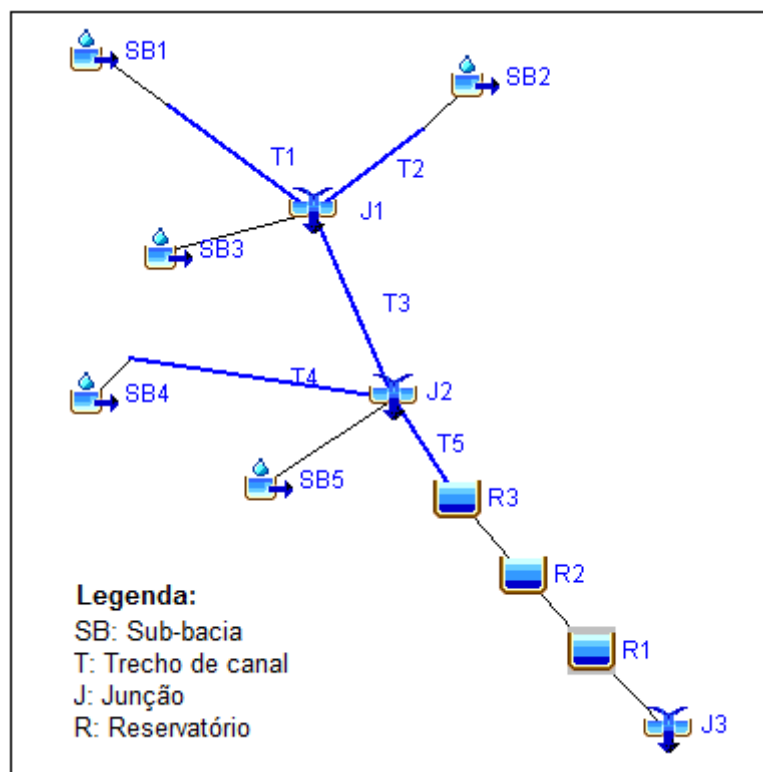


Figura 37 - Topologia do sistema para o Cenário 4 - futuro alternativo

Os elementos hidrológicos descrevem processos físicos através de modelos matemáticos. Para cada “sub-bacia”, foi necessário definir a área total, o método para cálculo do escoamento superficial (foi adotado o método *SCS Curve Number*), o método para transformação da chuva em vazão (foi adotado o método do hidrograma unitário do SCS), a porcentagem de área impermeável, o valor de CN das áreas permeáveis e o tempo de resposta da bacia (*lag time*, que foi definido como 60% do tempo de concentração).

Conforme apresentado no item 4.4, os tempos de concentração das sub-bacias foram calculados pela equação de *Kirpich*. Na Tabela 11 tem-se os valores dos parâmetros de entrada dessa equação, e o tempo de concentração calculado para cada sub-bacia.

Tabela 11 - Comprimento do percurso hidráulico, declividade e tempo de concentração das sub-bacias

Sub-bacia	L (m)	S _c (m/m)	T _c (min)
1	2060	0,0218	30,2
2	1425	0,0351	19,0
3	370	0,0108	10,6
4	1360	0,0279	20,0
5	2160	0,0190	33,1

Para cada “trecho de canal”, foi necessário definir o método para cálculo do amortecimento da onda de cheia e o método para contabilização das perdas de água por infiltração.

Conforme a onda de cheia passa pelo canal, a profundidade da água e a reservação do canal aumentam, causando atenuação no pico e achatamento no hidrograma (SEYBERT, 2006). Para o cálculo do amortecimento da onda de cheia, inicialmente foram estudados os métodos da Onda Cinemática e de Muskingum-Cunge, que demandam a entrada de dados geométricos das seções transversais. Como os canais da bacia do Mineirinho são naturais e, portanto, tem geometria variável, decidiu-se pela não utilização desses métodos. Em seguida, foi estudado o método de Muskingum, que considera que a reservação no canal é função dos parâmetros K e X (tempo de transito da onda de cheia e coeficiente de amortecimento, respectivamente). O desafio na aplicação desse método é estimar valores razoáveis para os parâmetros K e X, o que pode ser feito caso existam dados de vazão observados em diferentes pontos do canal. Visto que na bacia do Mineirinho não existem dados de vazão observados, optou-se por não adotar o método de Muskingum. Caso os valores adotados para X e K não condissessem com a realidade, as vazões de pico dos hidrogramas poderiam ser subestimadas. Assim, para efeito de comparação dos cenários, foi desconsiderado o efeito do amortecimento do canal. Pelo fato de o canal ter declividade e velocidade de escoamento altas, essa hipótese provavelmente se aproxima da realidade.

Foram desconsideradas as perdas de água no canal por infiltração, também em favor da segurança.

Para as “junções”, foi necessário apenas especificar o elemento hidrológico para conexão à jusante.

Para os “reservatórios”, foi necessário definir o método para cálculo da vazão de saída e o método para cálculo do volume reservado. Foram adotadas as curvas cota-descarga e cota-volume, respectivamente.

O “modelo meteorológico” associa as sub-bacias a dados de precipitação. Foi escolhido o modelo “hietograma especificado” (*specified hyetograph*), em que os hietogramas são inseridos manualmente.

A “especificação de controle” define o intervalo de tempo para a execução da simulação. Adotou-se 5 horas para os Cenários 1, 2 e 4, e 8 horas para o Cenário 3.

Os “dados de séries temporais” referem-se a parâmetros ou condições de contorno necessárias à modelação hidrológica. No presente estudo foram especificados os dados de precipitação (*precipitation gages*), pela inserção dos valores tabelados dos hietogramas das

chuvas de projeto, apresentados nas Figuras 12 a 14. Foi definida a unidade “milímetros incrementais” (*incremental millimeters*) e o intervalo de tempo considerado para cálculo dos hietogramas, de 1 minuto.

Após a inserção dos dados, foram criadas “simulações” (*simulation runs*), através das quais foram calculados os hidrogramas para as precipitações com tempo de retorno de 25, 50 e 100 anos, para cada cenário estudado. A vazão máxima dos hidrogramas foi utilizada na modelação hidráulica, conforme será descrito a seguir.

4.8 Modelação hidráulica e geração das manchas de inundação

A modelação hidráulica foi realizada com o auxílio do *software* HEC-RAS, desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos. Para geração das manchas de inundação, o modelo hidráulico foi utilizado conjuntamente com o ArcGIS 10.1 e a extensão HECGeoRAS, que faz a comunicação entre o HEC-RAS e o ArcGIS.

O procedimento para geração das manchas de inundação com o auxílio do SIG envolveu três etapas: pré-processamento dos dados, execução do modelo hidráulico e pós-processamento dos dados/visualização dos resultados.

O pré-processamento teve como objetivo criar os dados geométricos necessários à modelação hidráulica. As únicas informações necessárias foram o MDT (que deve estar no mesmo sistema de coordenadas dos demais dados utilizados) e a geometria das seções transversais levantadas em campo. Com o uso do HECGeoRAS em ambiente de SIG, foram criados atributos físicos do canal, tais quais: traçado do canal, delimitação das margens, determinação do sentido de fluxo, seções transversais e estruturas hidráulicas.

Para uma maior precisão na visualização das manchas de inundação, foi utilizado MDT com espaçamento vertical de 1 m entre as curvas de nível. Esse arquivo foi criado a partir do mapa topográfico disponibilizado pelo CDCC, pela interpolação das curvas de nível com espaçamento vertical de 5 m.

O *layout* resultante da etapa de pré-processamento dos dados é apresentado na Figura 38.

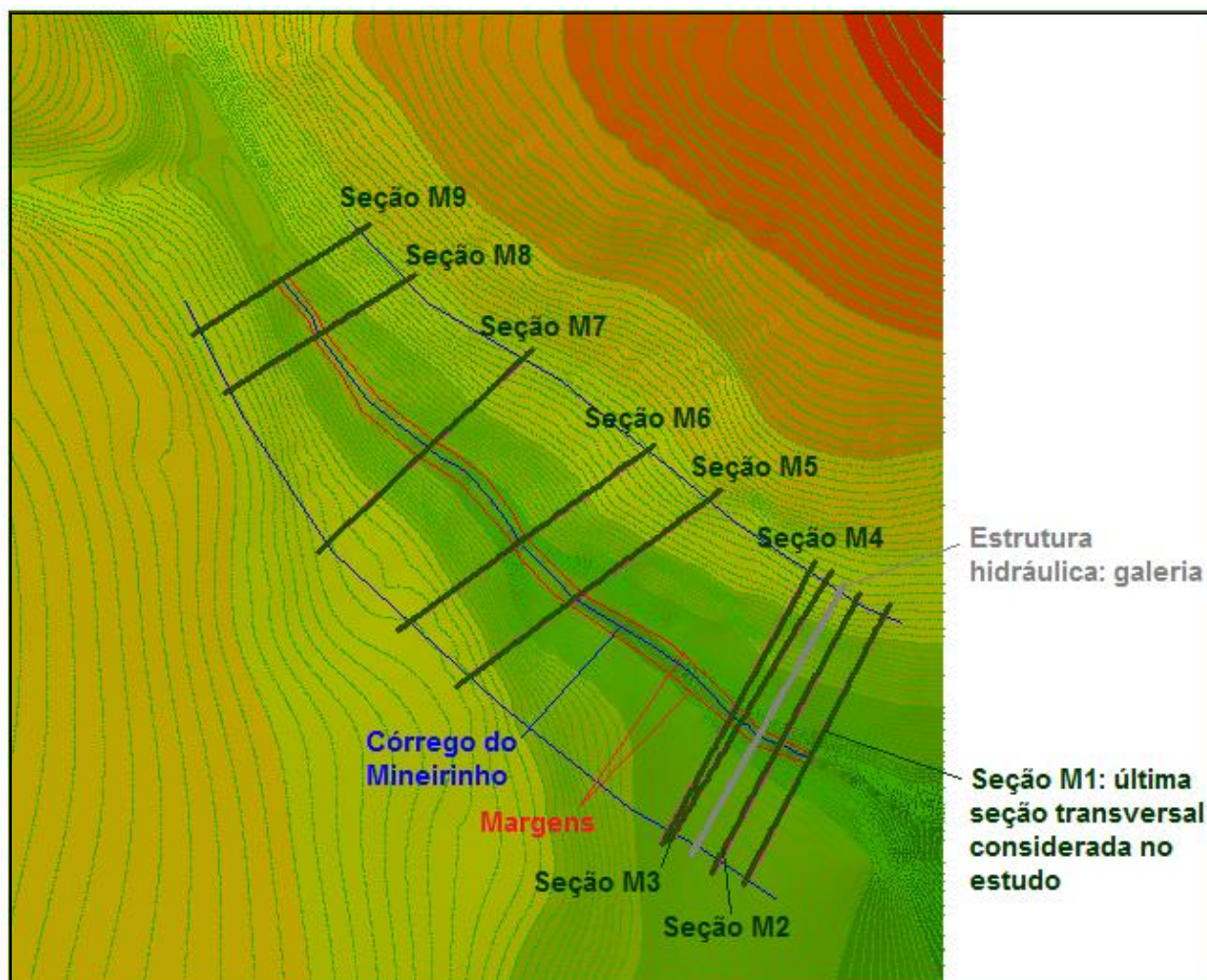


Figura 38 - *Layout* resultante da etapa de pré-processamento de dados para geração das manchas de inundação

Para modelação de galerias, são necessárias quatro seções transversais. Este total inclui uma seção transversal suficientemente à jusante da galeria, de modo que o fluxo não seja afetado pela existência da galeria; uma seção na extremidade de jusante; uma seção na extremidade de montante; e uma seção localizada suficientemente longe à montante, de forma que a galeria não tenha nenhum efeito sobre o fluxo. No trabalho de campo, não foram levantados os pontos referente à primeira seção acima descrita. Para que fosse possível executar o modelo hidráulico foi criada a seção M1, e considerou-se sua geometria igual à da seção M2.

A galeria considerada no estudo situa-se à montante da rotatória da Av. Bruno Ruggiero Filho. À jusante dessa rotatória existe outra galeria, que é sucedida por uma queda d'água, conforme Figura 39. Essa segunda galeria não foi considerada devido a instabilidades na modelação geradas pela queda de água. Para modelação hidráulica em regime permanente, é necessário que o canal tenha declividade “baixa”, inferior a 10%. Acima desse valor de

declividade, são ampliados os erros obtidos no cálculo da profundidade da água. Além disso, em declividades altas pode haver entrada de ar no fluxo, o que não é considerado pelo HEC-RAS no cálculo da altura d'água.



Figura 39 - Galeria de jusante da rotatória da Av. Bruno Ruggiero Filho

Após a criação dos atributos físicos do canal no ArcGIS 10.1, o arquivo resultante foi exportado para o HEC-RAS.

No HEC-RAS, para execução do modelo hidráulico, foi necessário ajustar os dados geométricos e definir a vazão e as condições de contorno.

Em relação aos dados geométricos, foram ajustadas as geometrias das seções transversais conforme os levantamentos topobatimétricos, foram atribuídos valores para o n (coeficiente de rugosidade da fórmula de Manning), foram inseridas as informações referentes à galeria, e finalmente foram criadas seções transversais interpoladas entre as seções levantadas em campo.

Para todo o trecho estudado, adotou-se o valor de n igual a 0,035 para o canal, referente a “canais com leito pedregoso e vegetação nos taludes” (PORTO, 2006); e o valor

de 0,10 para as planícies de inundação, referente a “arbusto médio a denso, no verão” (USACE, 2010b).

As seções transversais interpoladas tiveram espaçamento de 1 m entre si, e foram criadas com o objetivo de conferir estabilidade à simulação hidráulica. O *layout* dos dados geométricos após sua edição no HEC-RAS é apresentado na Figura 40.

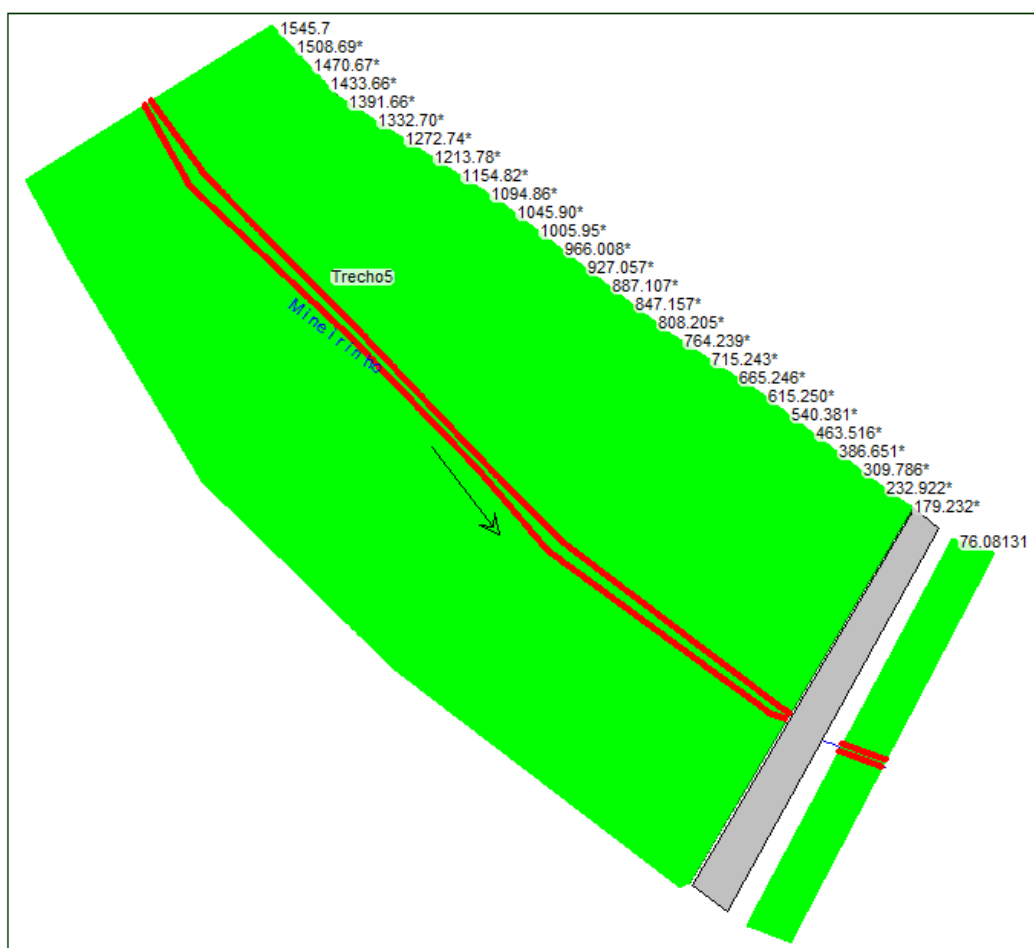


Figura 40 - Layout dos dados geométricos após sua edição no HEC-RAS

Para o Cenário 3 – futuro tendencial com Plano Diretor de Drenagem Urbana e Cenário 4 – futuro alternativo, foram ainda acrescentados os dados de geometria das barragens dos reservatórios propostos.

Após a edição dos dados geométricos, foi criado um arquivo com os dados de escoamento. O regime de escoamento escolhido nesse estudo foi o permanente, pois a simulação do regime não permanente foi impossibilitada devido a instabilidades na modelação. De acordo com Graciosa (2010), a existência de dados observados para as seções imediatamente a jusante do trecho simulado forneceriam as condições de contorno necessárias para simulação do regime não permanente.

No HEC-RAS, um valor de vazão pode ser associado a um canal, e alterações desse valor podem ser feitas em cada seção transversal. Devido ao fato de a bacia do Mineirinho ser pequena - e em favor da segurança -, para os Cenários 1 e 2 foi considerado um valor único de vazão em todo o trecho, referente à vazão de pico dos hidrogramas construídos na simulação hidrológica para o exutório da bacia. Para os Cenários 3 e 4, houve variação da vazão considerada ao longo do córrego devido à existência dos reservatórios de amortecimento. Os valores de vazão utilizados na simulação hidráulica serão apresentados nos itens 5.1 e 5.2.

Após a entrada dos dados de vazão, foi necessário definir as condições de contorno de montante e de jusante. Foi escolhida a opção “profundidade normal”, que requer o estabelecimento das declividades imediatamente a montante e a jusante do trecho analisado. Esses valores foram calculados com o auxílio do modelo digital do terreno, e encontrou-se 0,01 m/m para a região a montante, e 0,02 m/m para a região a jusante do trecho.

Posteriormente à entrada dos dados do escoamento, foi realizada a simulação hidráulica, que calculou os níveis de água nas seções transversais. Escolheu-se o regime de escoamento “misto”, visto que o mesmo varia entre subcrítico e supercrítico ao longo do canal. Antes de exportar o arquivo gerado para o ArcGIS 10.1, os resultados foram analisados ainda no HEC-RAS, para identificar a presença de erros. Na Figura 41 tem-se um exemplo de perfil de superfície de água, resultante da simulação hidráulica.

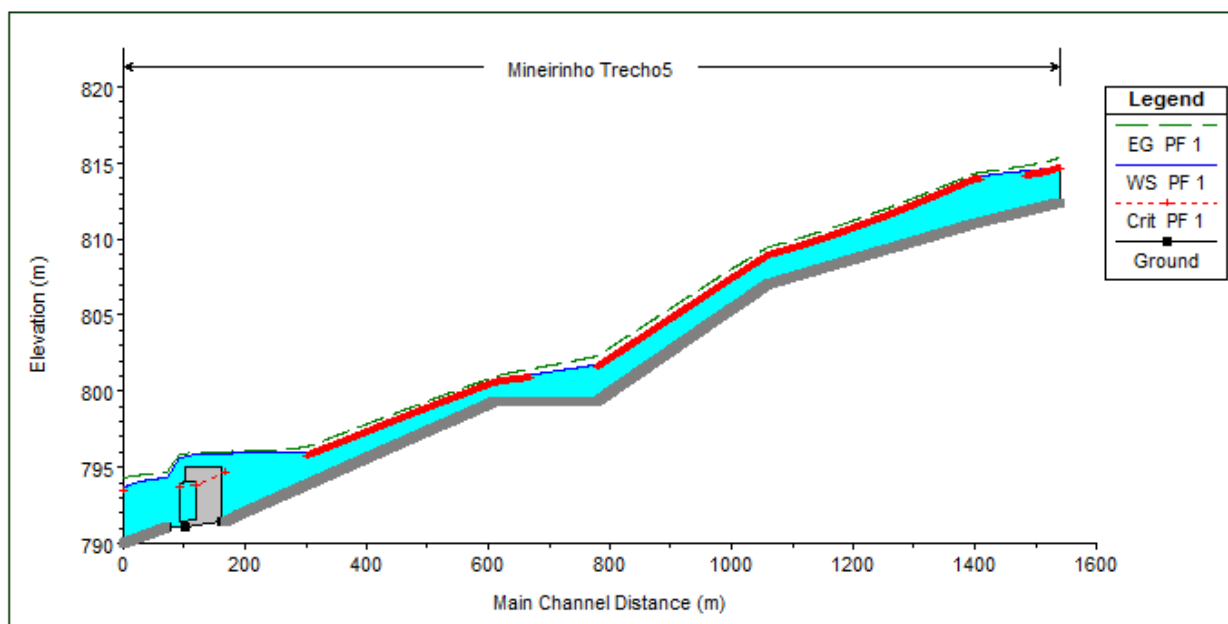


Figura 41 - Exemplo de perfil de superfície da água, resultante da simulação hidráulica

O pós-processamento/visualização dos resultados ocorreu no ambiente de SIG. Com o auxílio do HECGeoRAS, foi feita a sobreposição das lâminas de água com o MDT da área de

estudo (gerado a partir das curvas de nível interpoladas com espaçamento vertical de 1 m). Foram gerados dois arquivos: um polígono com o delineamento da mancha de inundação; e um *raster*, em que cada célula contém um valor referente à profundidade da lâmina d'água.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Simulação hidrológica

A simulação hidrológica foi utilizada para cálculo do escoamento superficial resultante das precipitações de projeto. O cálculo do escoamento superficial foi realizado pelo método do SCS *Curve Number*, e a transformação da chuva em vazão foi realizada pelo método do hidrograma unitário do SCS, conforme apresentado no item 4.7.

O método do SCS *Curve Number* baseia-se na atribuição de um valor para o coeficiente CN da bacia hidrográfica em estudo, e na contabilização da área impermeável. No item 4.6 foram apresentados os valores de CN e as porcentagens de área impermeável das sub-bacias para os cenários estudados.

Para a transformação da chuva em vazão pelo método do hidrograma unitário, é necessário informar ao modelo hidrológico o tempo de concentração de cada sub-bacia. No item 4.7 foram apresentados os tempos de concentração das sub-bacias, calculados pela equação de Kirpich.

Nas Figuras 42 a 44 são apresentados os hidrogramas calculados no exutório da bacia do Mineirinho em cada cenário, para os tempos de retorno considerados no estudo: 25, 50 e 100 anos. Não foi considerado o efeito da infiltração nos reservatórios para redução do volume de escoamento superficial.

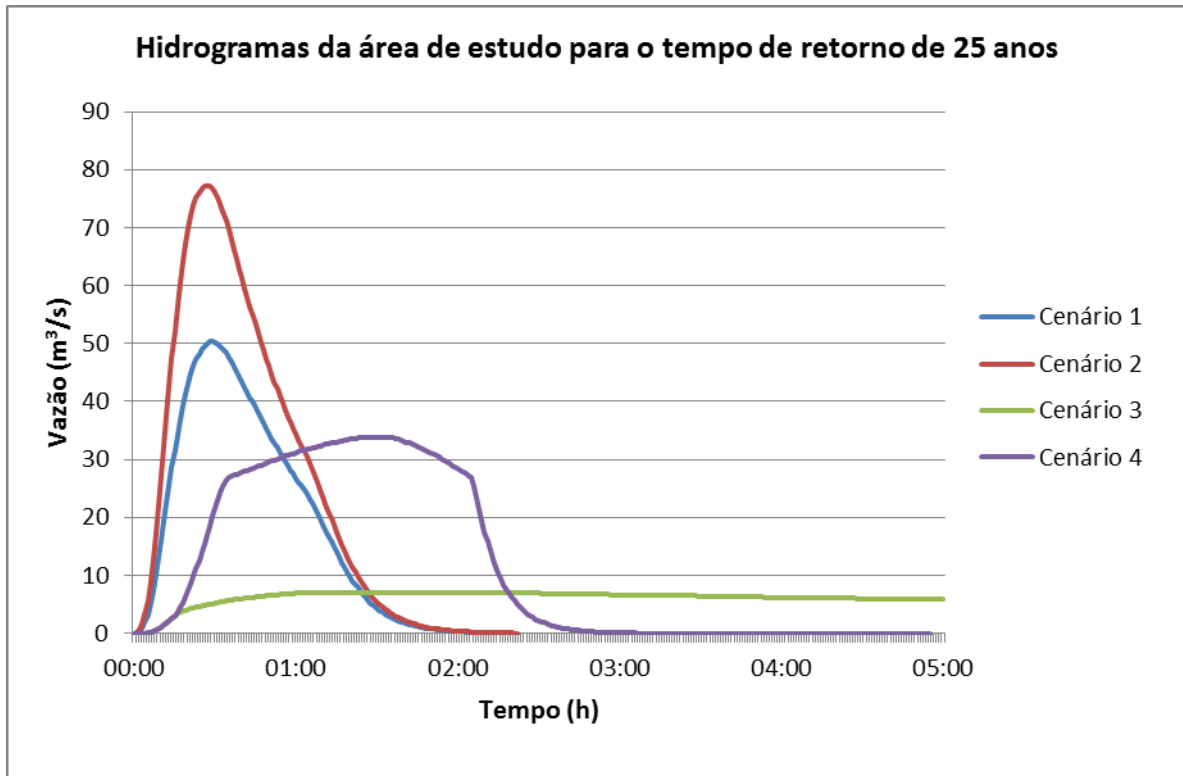


Figura 42 - Hidrogramas calculados para o exutório da área de estudo, para o tempo de retorno de 25 anos

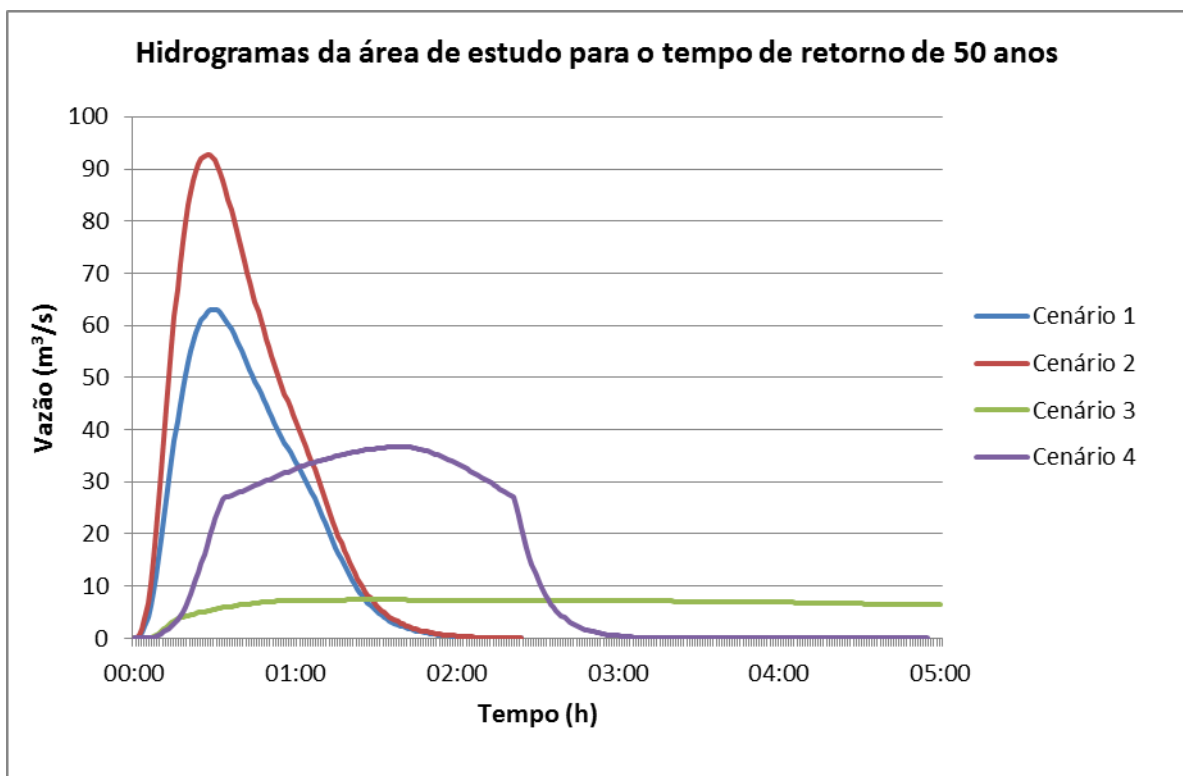


Figura 43 - Hidrogramas calculados para o exutório da área de estudo, para o tempo de retorno de 50 anos

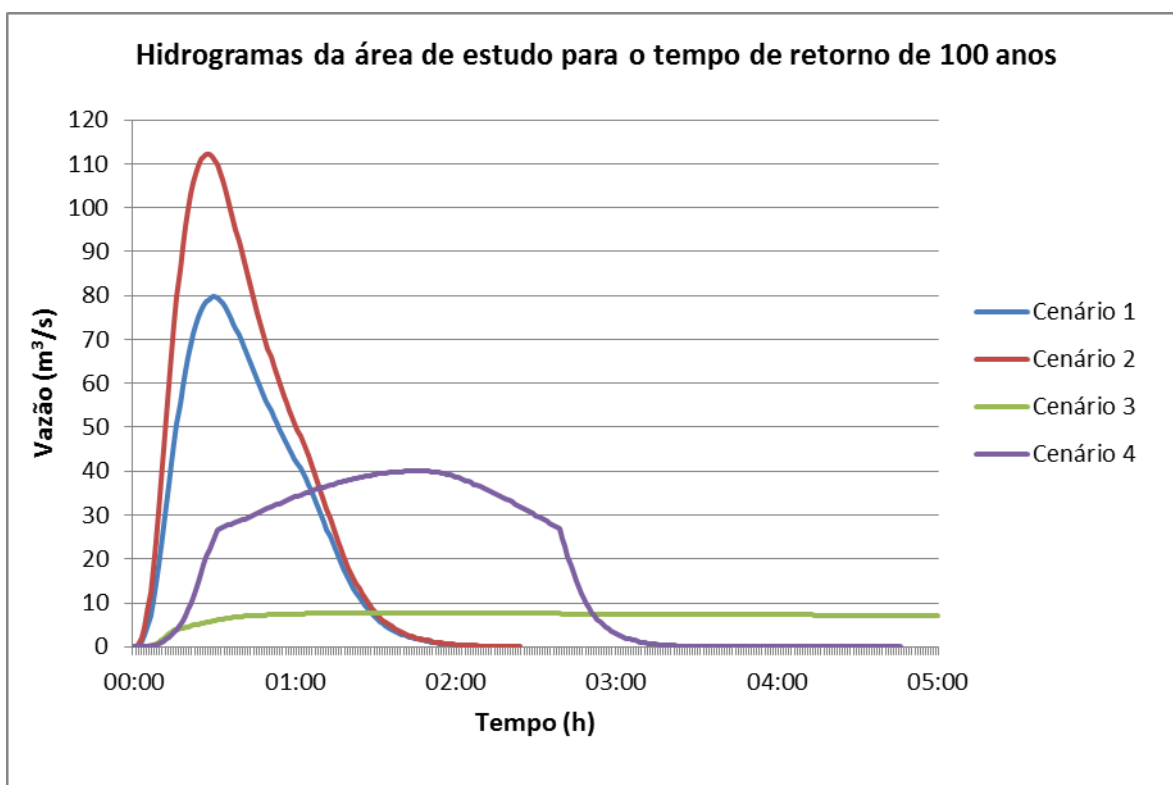


Figura 44 - Hidrogramas calculados para o exutório da área de estudo, para o tempo de retorno de 100 anos

A fim de facilitar a comparação dos resultados obtidos nos diferentes cenários, na Tabela 12 são apresentados os picos de vazões dos hidrogramas das Figuras 42 a 44.

Tabela 12 - Vazões máximas (m^3/s) dos hidrogramas calculados para a área de estudo

Cenário	Tempo de retorno		
	25 anos	50 anos	100 anos
1 - Atual	50,3	63,1	79,7
2 - Futuro tendencial	77,3	92,8	112,1
3 - Futuro tendencial com Plano Diretor de Drenagem Urbana	7,1	7,4	7,7
4 - Futuro alternativo	33,9	36,7	40,0

O Cenário 2 possui as maiores vazões de pico dentre todos os cenários analisados. Isso demonstra que as diretrizes constantes no Plano Diretor do Município de São Carlos não são suficientes para evitar o aumento das vazões no exutório da bacia do Mineirinho. A simulação deste cenário revelou um acréscimo na vazão de pico de 53% para a precipitação com tempo de retorno de 25 anos, 47% para a precipitação com tempo de retorno de 50 anos e 40% para a precipitação com tempo de retorno de 100 anos, em relação à condição atual (Cenário 1).

O Cenário 3 considerou, além das diretrizes do Plano Diretor Municipal, o reservatório de retenção previsto pelo Plano Diretor de Drenagem Urbana Ambientalmente Sustentável. É possível perceber o efeito de diminuição dos picos de vazão gerado pelo barramento, visto que os Cenários 2 e 3 apresentam as mesmas características de uso do solo. Comparando os resultados do Cenário 2 com o Cenário 3, tem-se uma redução de 91% na vazão de pico para a precipitação com tempo de retorno de 25 anos, 92% para a precipitação com tempo de retorno de 50 anos e 93% para a precipitação com tempo de retorno de 100 anos. Os picos de vazão são menores do que os obtidos para o Cenário 1 – atual. Ou seja, a premissa do UDFCD (2001) que a ocupação humana não resulte no aumento da vazão de pico dos hidrogramas é alcançada no Cenário 3.

O Cenário 4 foi elaborado com base nos princípios e diretrizes do UDFCD para controle de inundações. Ele representa um futuro alternativo para a bacia do Mineirinho, e por isso os valores de vazão serão comparados com os obtidos para o Cenário 2. Em relação ao cenário 2, houve redução nas vazões de pico em 33% para a precipitação com tempo de retorno de 25 anos, 42% para a precipitação com tempo de retorno de 50 anos e 50% para a precipitação com tempo de retorno de 100 anos. Os picos de vazão são menores do que os obtidos para o Cenário 1 – atual. Ou seja, a premissa do UDFCD (2001) que a ocupação humana não resulte no aumento da vazão de pico dos hidrogramas é alcançada no Cenário 4.

Foi realizada simulação hidrológica para o Cenário 4 - futuro alternativo, considerando apenas o parque linear (ou seja, desconsiderando as estruturas de retenção). As vazões de pico dos hidrogramas calculados para as precipitações com tempo de retorno de 25, 50 e 100 anos foram $73,0 \text{ m}^3/\text{s}$, $87,9 \text{ m}^3/\text{s}$ e $106,7 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente. Em relação ao Cenário 2 - futuro tendencial, esse cenário apresentou aumento de 4% nas áreas permeáveis, e redução na vazão de pico dos hidrogramas de 5,6%, 5,3% e 4,8% para as precipitações supracitadas. Apesar de o parque linear ter efeito pequeno na redução da vazão de pico dos hidrogramas, deve-se considerar os outros efeitos benéficos para a estrutura da cidade, meio ambiente e população.

Para ilustrar o efeito dos reservatórios de retenção nos hidrogramas, nas Figuras 45 a 48 são apresentados os hidrogramas afluentes e efluentes aos reservatórios R0 (Cenário 3), R1, R2 e R3 (Cenário 4), considerando a chuva de projeto com tempo de retorno de 100 anos.

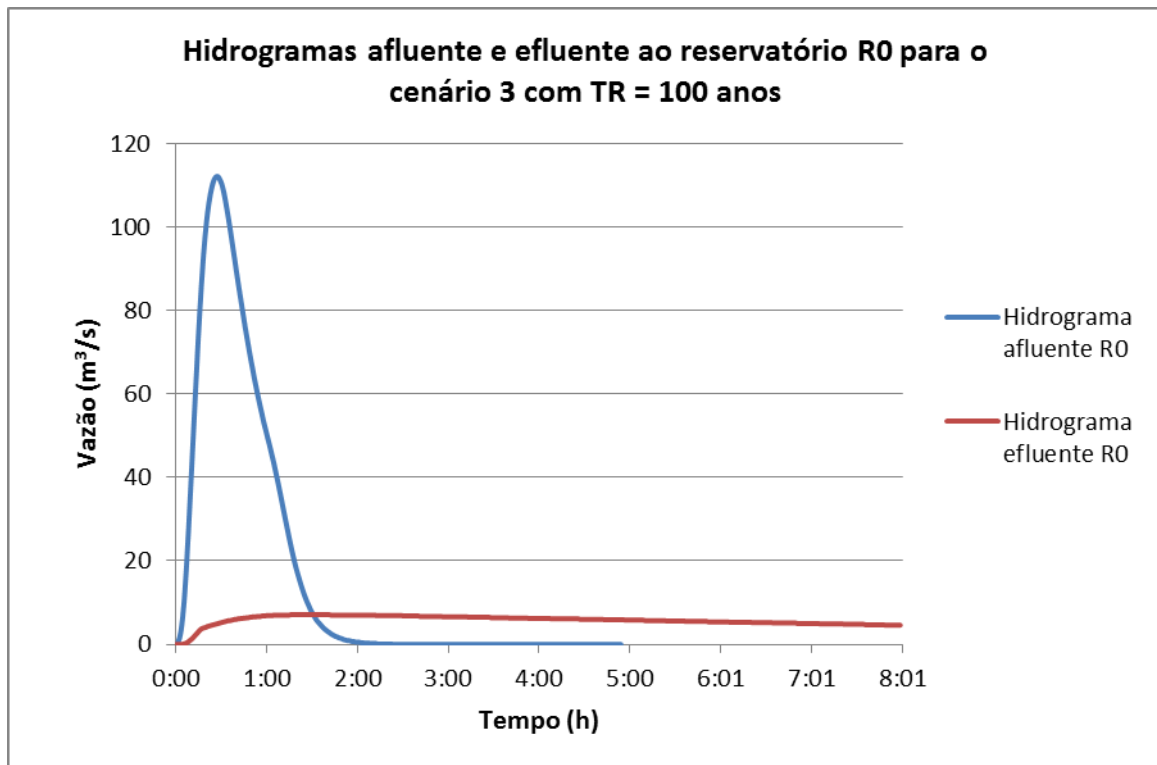


Figura 45 - Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório R0 para o Cenário 3 - futuro tendencial com Plano Diretor de Drenagem Urbana, com tempo de retorno de 100 anos

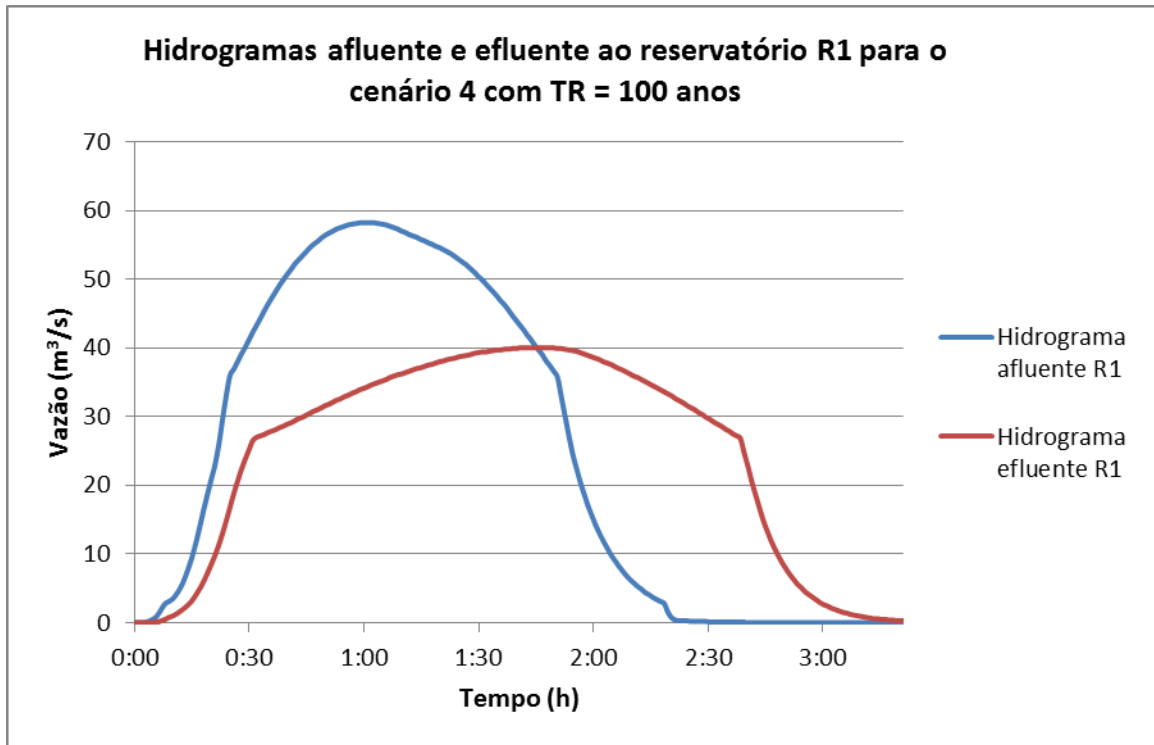


Figura 46 - Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório R1 para o Cenário 4 - futuro alternativo, com tempo de retorno de 100 anos

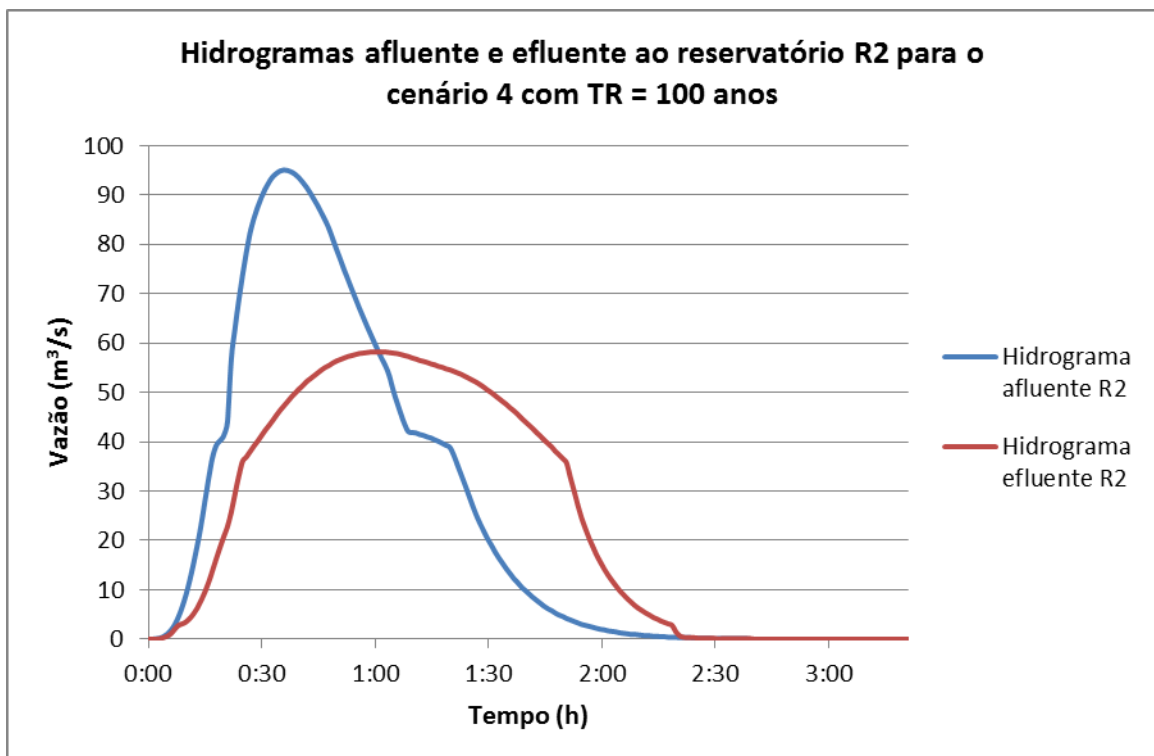


Figura 47 - Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório R2 para o Cenário 4 - futuro alternativo, com tempo de retorno de 100 anos

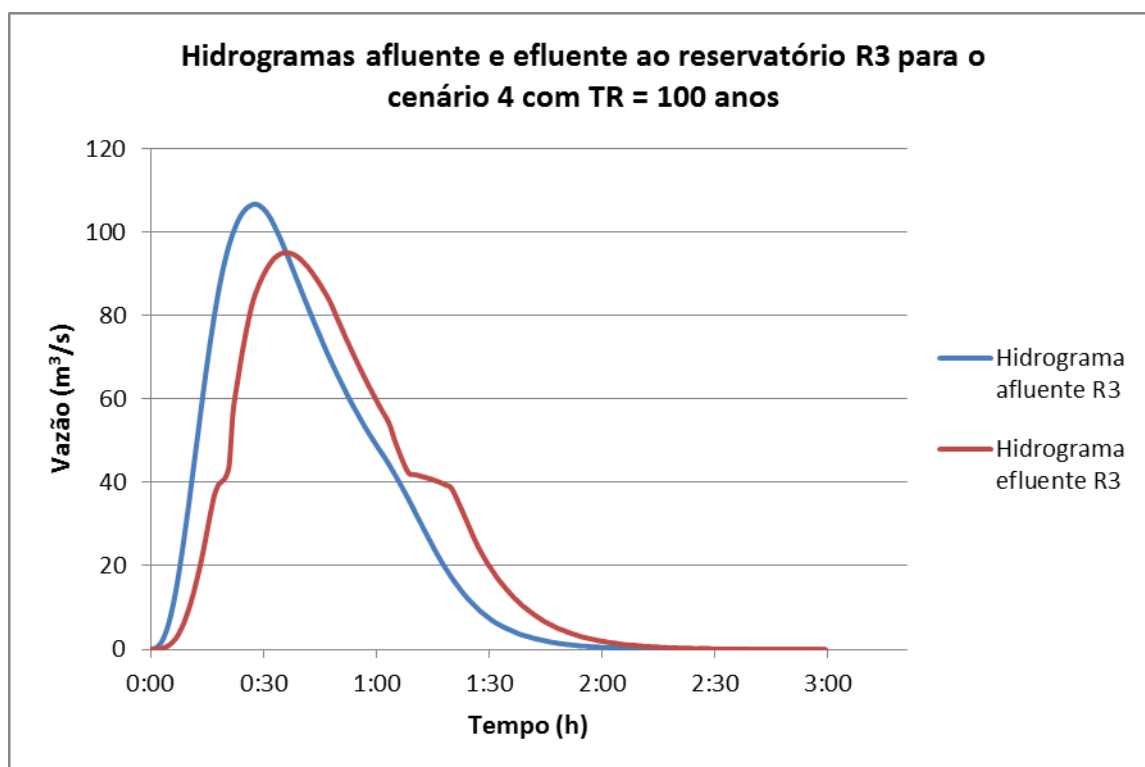


Figura 48 - Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório R3 para o Cenário 4 - futuro alternativo, com tempo de retorno de 100 anos

5.2 Simulação hidráulica

Com o suporte do *software* HEC-RAS, foi realizada a simulação hidráulica para os 4 cenários estudados, para precipitações com tempos de retorno de 25, 50 e 100 anos. Os mapas de inundação foram gerados a partir da sobreposição dos níveis d'água simulados no HEC-RAS com o modelo digital do terreno, processo realizado no ArcGIS 10.1 com o auxílio da extensão HEC-GeoRAS.

Para os Cenários 1 e 2, os dados de vazão da modelação hidráulica foram os valores de pico dos hidrogramas calculados no exutório da bacia para cada tempo de retorno, apresentados na Tabela 12. Nos Cenários 3 e 4 houve variação da vazão considerada ao longo do Córrego, devido à existência dos reservatórios de amortecimento. Os valores de vazão foram calculados através do HEC-HMS. Para o Cenário 3, a vazão simulada sofreu uma alteração, no ponto de instalação da barragem do reservatório R0. Os valores de vazão considerados a partir desse ponto para os tempos de retorno de 25, 50 e 100 anos são 7,1, 7,4 e 7,7 m³/s, respectivamente. No Cenário 4, os valores de vazão admitidos na simulação hidráulica sofreram 3 alterações, e estão expressos na Tabela 13.

Tabela 13 - Picos de vazão (m^3/s) para cada ponto do córrego do Mineirinho no Cenário 4 - futuro tendencial

Nó	TR 25	TR 50	TR 100
Seção M9	73,0	87,9	106,7
Seção M7	64,5	79,1	95,1
Seção M5	44,8	51,1	58,2
Seção M4	33,9	36,7	40,0

A simulação hidráulica foi realizada no trecho do córrego do Mineirinho compreendido entre a Rua Leonardo Carlos de A. Botelho e a rotatória da Av. Bruno Ruggiero Filho.

Nas Figuras 49 a 60 tem-se os mapas de inundação gerados no modelo hidráulico.



Figura 49 - Mancha de inundação para o Cenário 1 - atual, com tempo de retorno de 25 anos

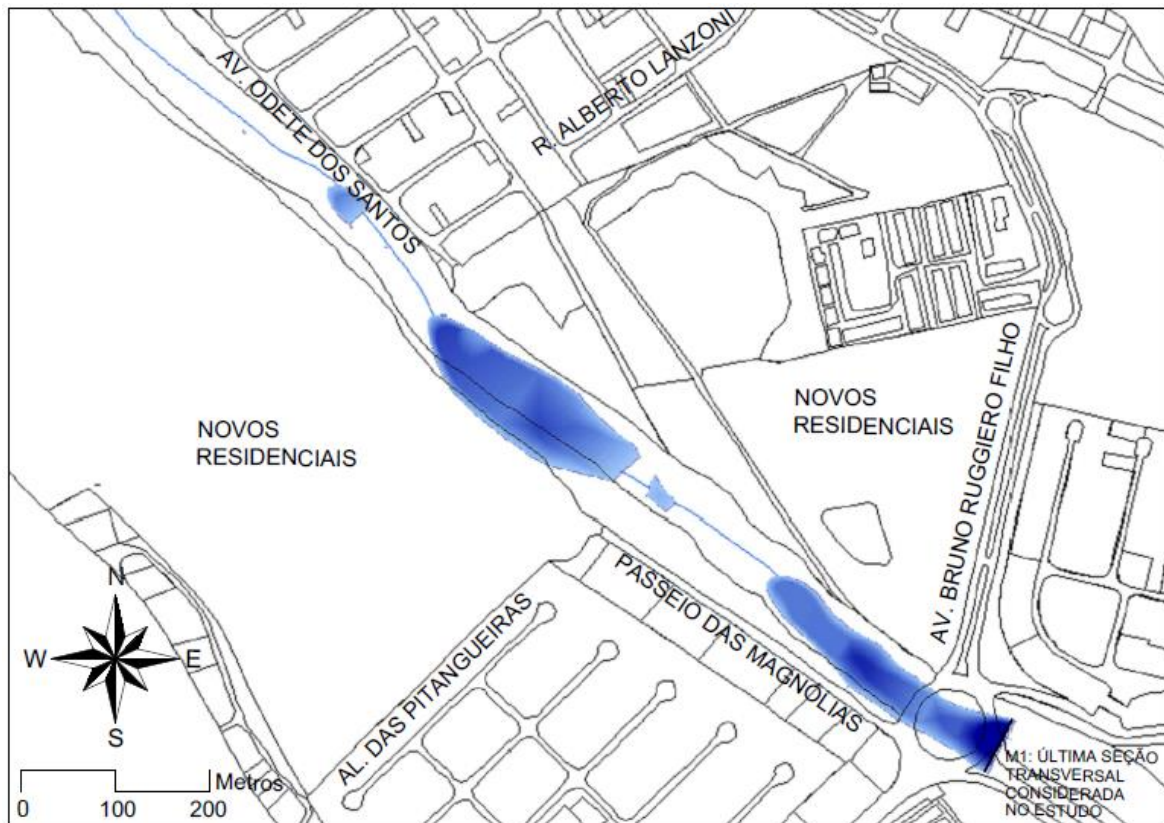


Figura 50 - Mancha de inundação para o Cenário 2 – futuro tendencial, com tempo de retorno de 25 anos

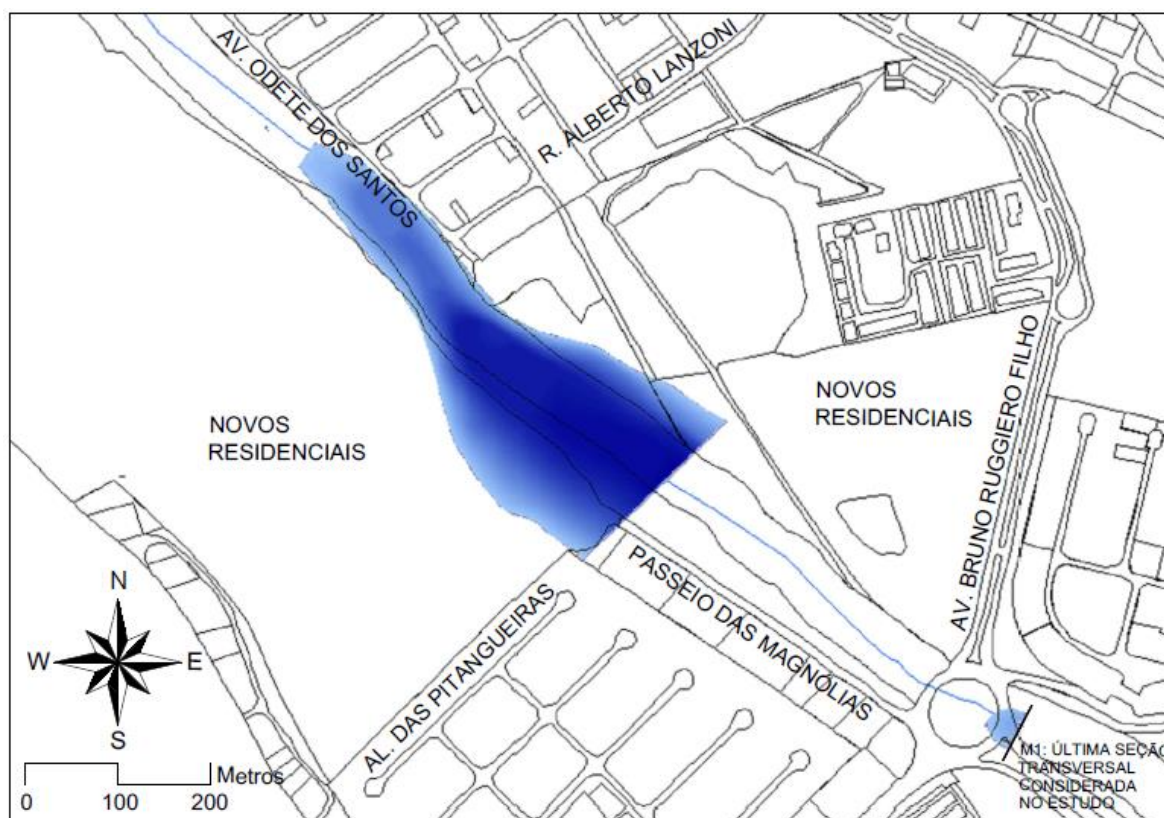


Figura 51 - Mancha de inundação para o Cenário 3 – futuro tendencial com Plano Diretor de Drenagem Urbana, com tempo de retorno de 25 anos

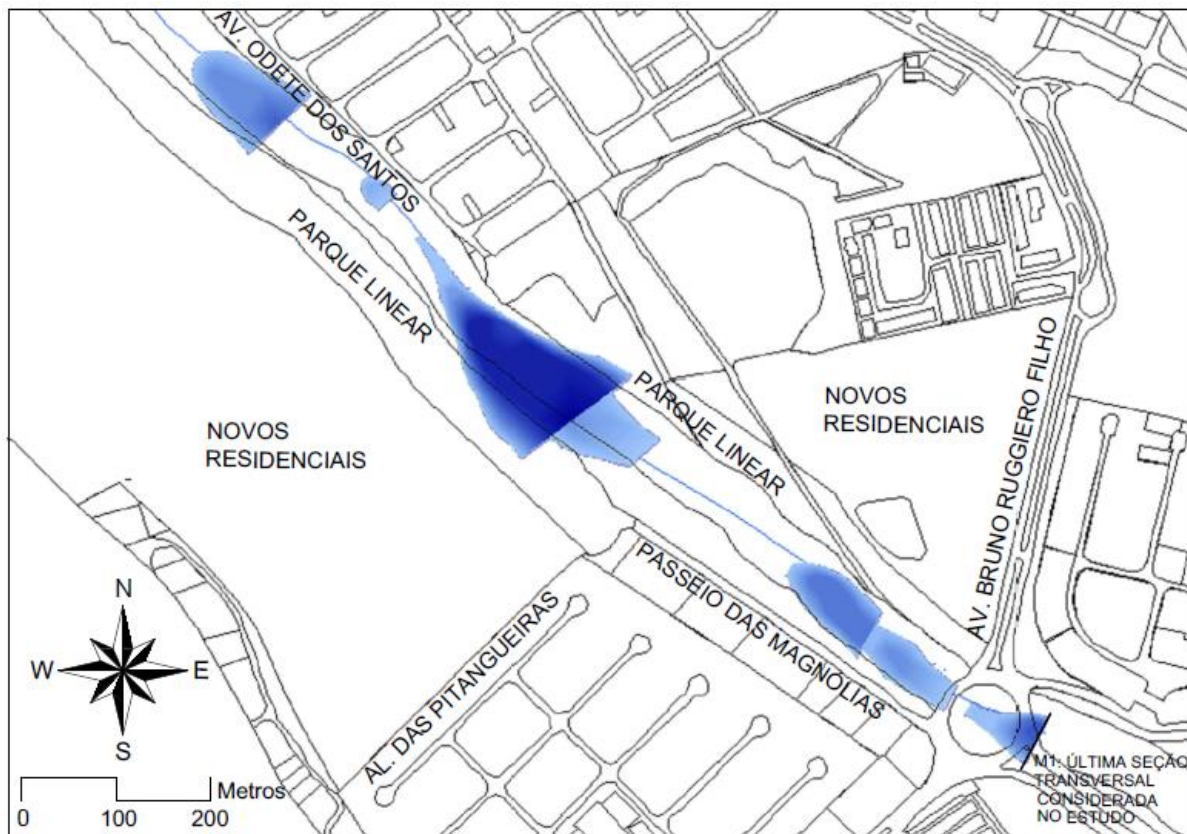


Figura 52 - Mancha de inundação para o Cenário 4 – futuro alternativo, com tempo de retorno de 25 anos

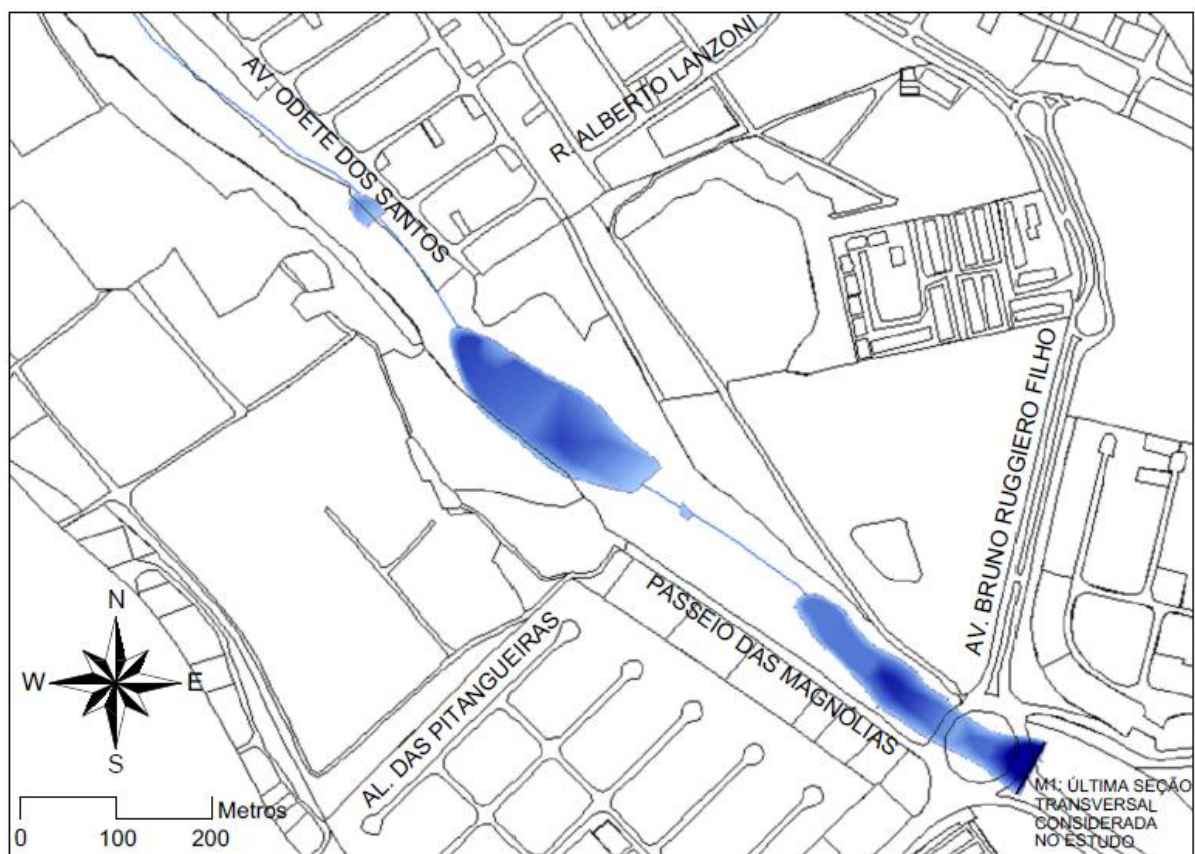


Figura 53 - Mancha de inundação para o Cenário 1 - atual, com tempo de retorno de 50 anos

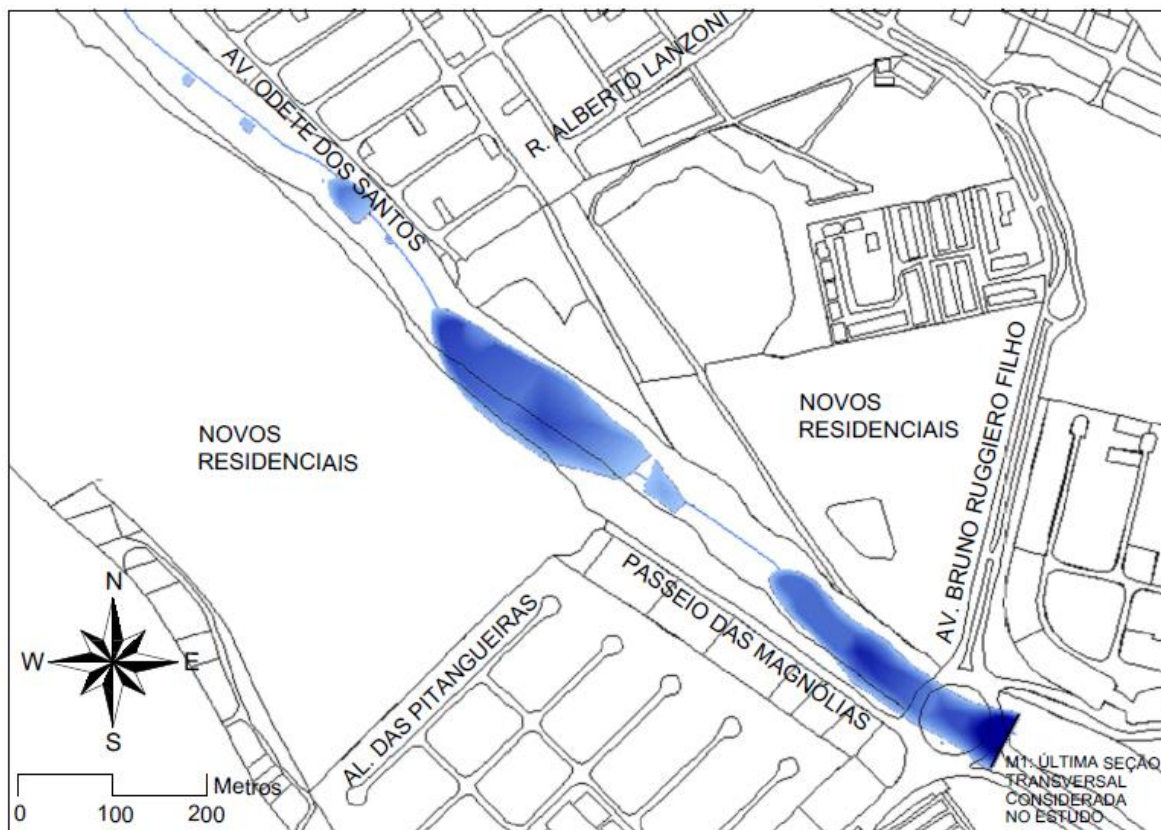


Figura 54 - Mancha de inundação para o Cenário 2 – futuro tendencial, com tempo de retorno de 50 anos

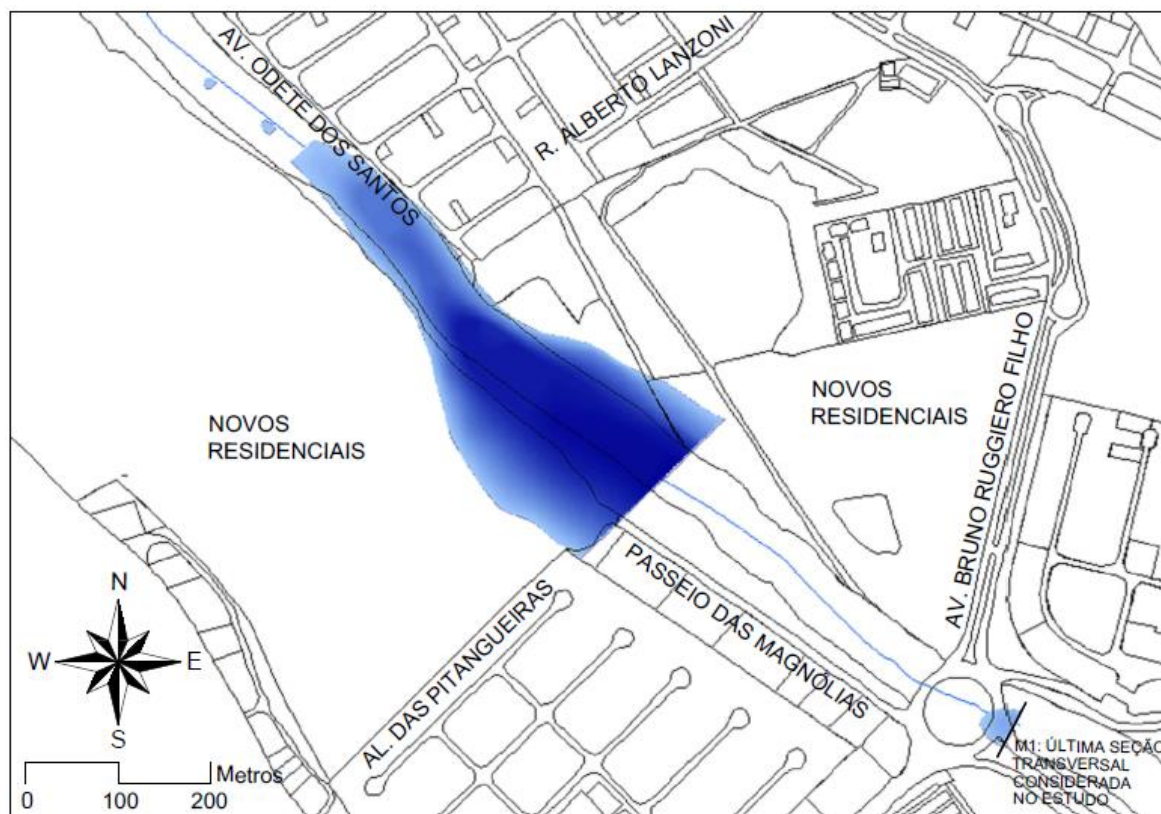


Figura 55 - Mancha de inundação para o Cenário 3 – futuro tendencial com Plano Diretor de Drenagem Urbana, com tempo de retorno de 50 anos

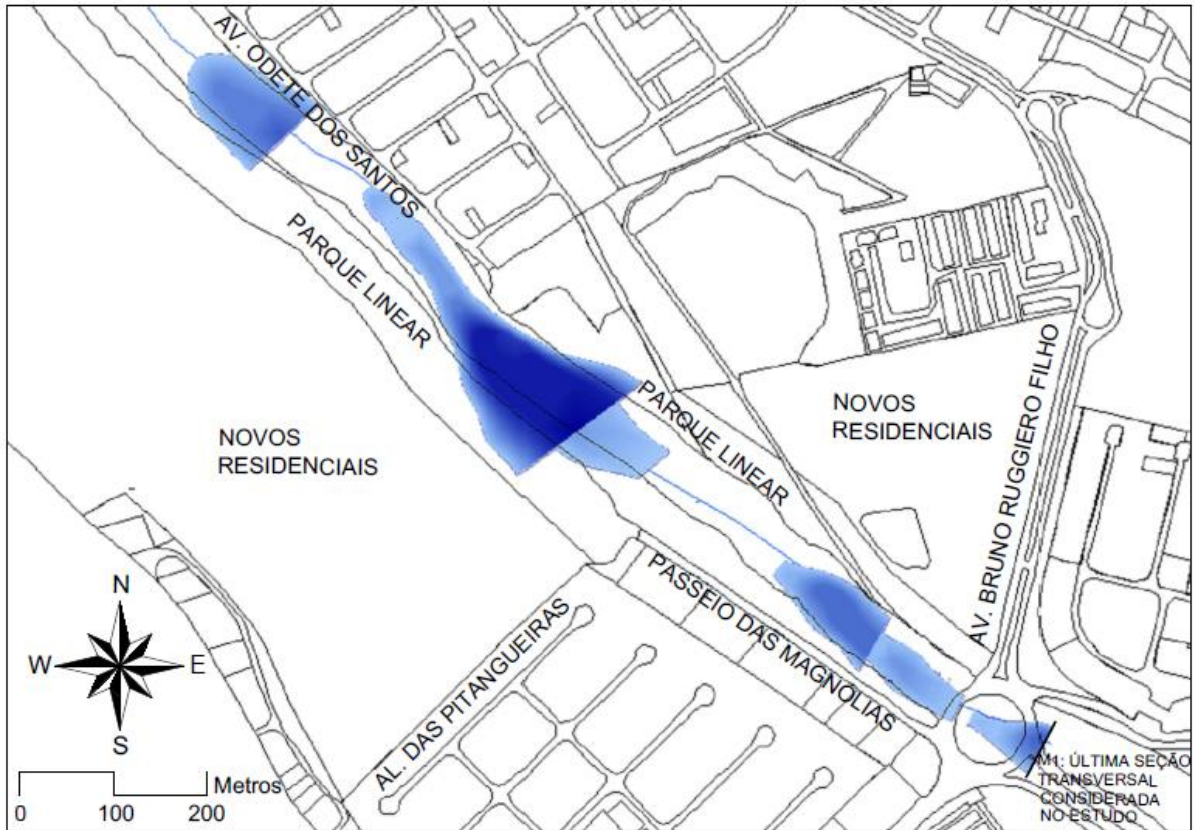


Figura 56 - Mancha de inundação para o Cenário 4 - futuro alternativo, com tempo de retorno de 50 anos

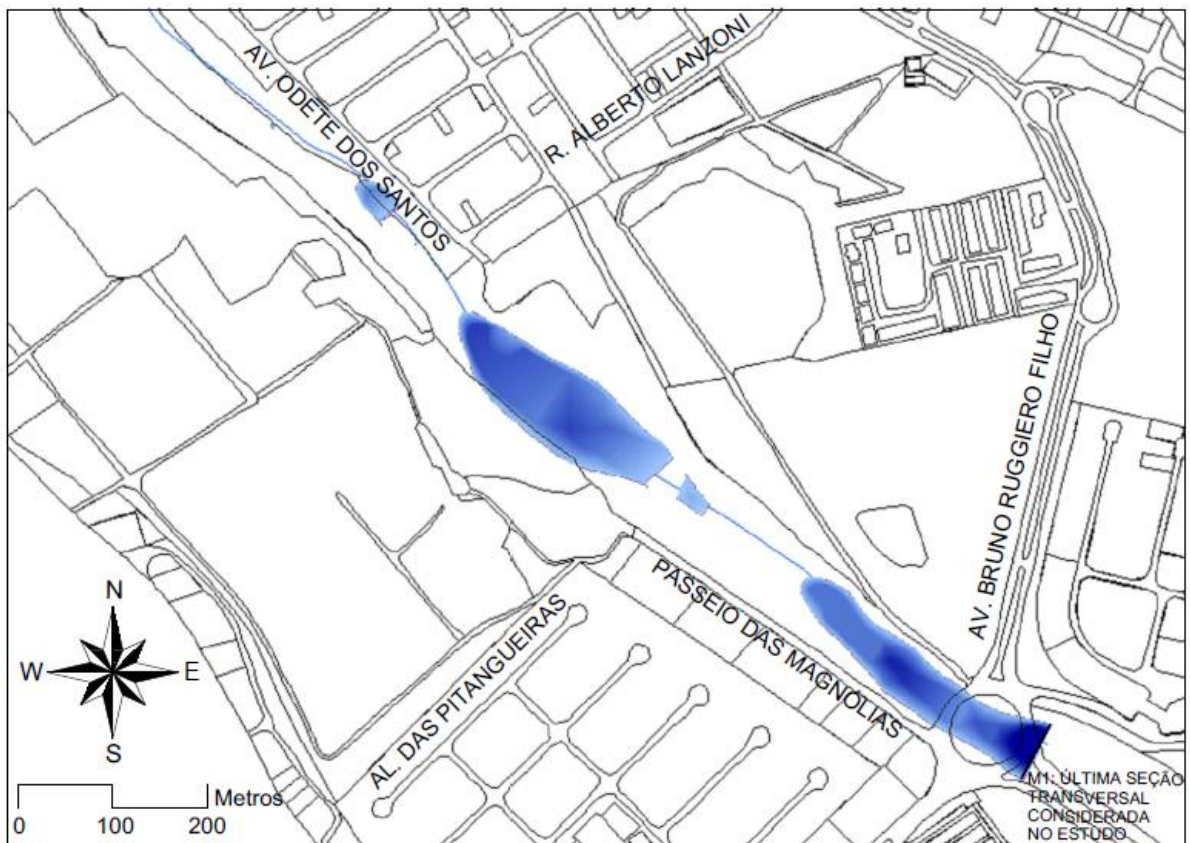


Figura 57 - Mancha de inundação para o Cenário 1 - atual, com tempo de retorno de 100 anos

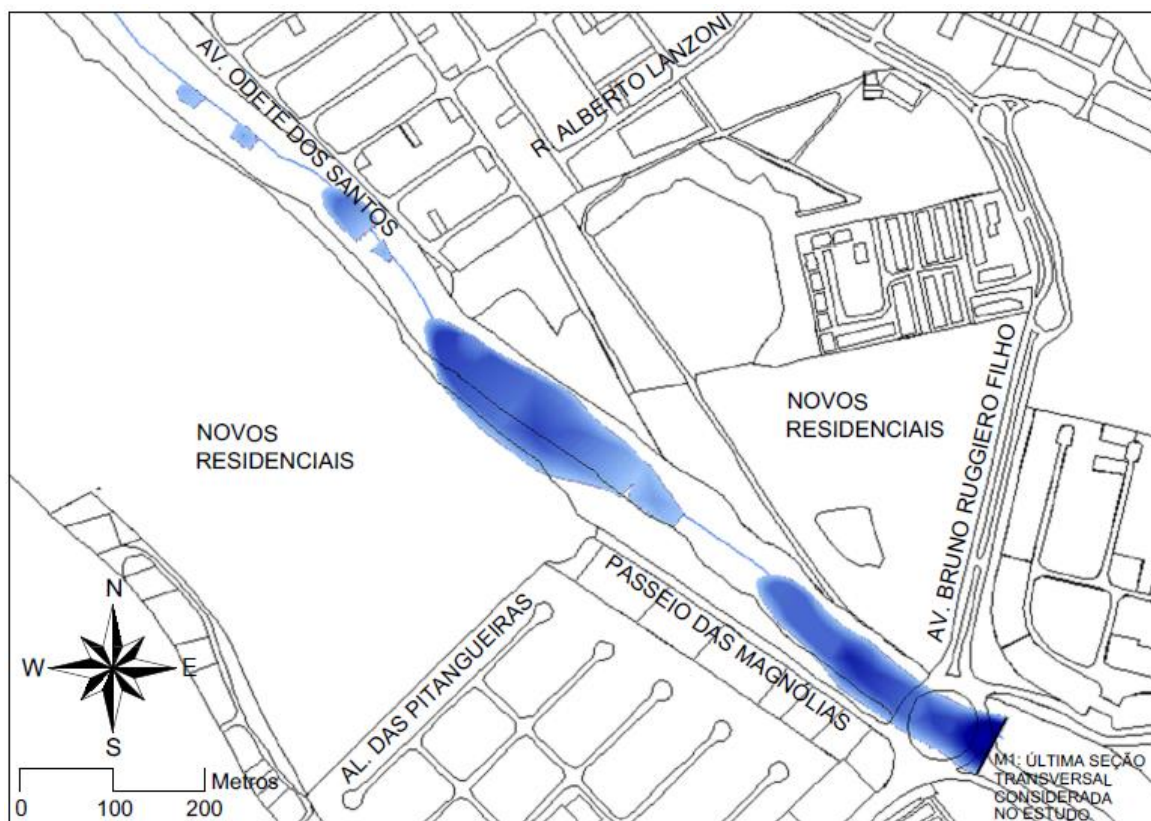


Figura 58 - Mancha de inundação para o Cenário 2 – futuro tendencial, com tempo de retorno de 100 anos

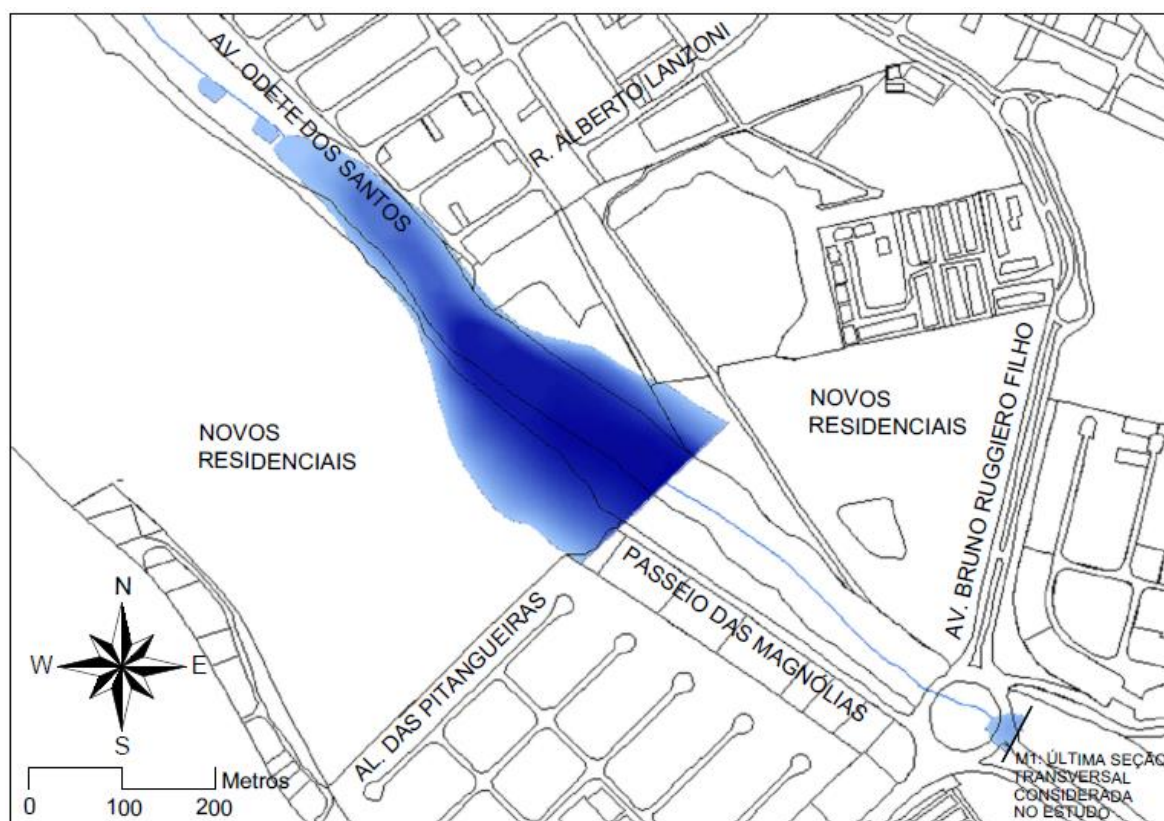


Figura 59 - Mancha de inundação para o Cenário 3 – futuro tendencial com Plano Diretor de Drenagem Urbana, com tempo de retorno de 100 anos

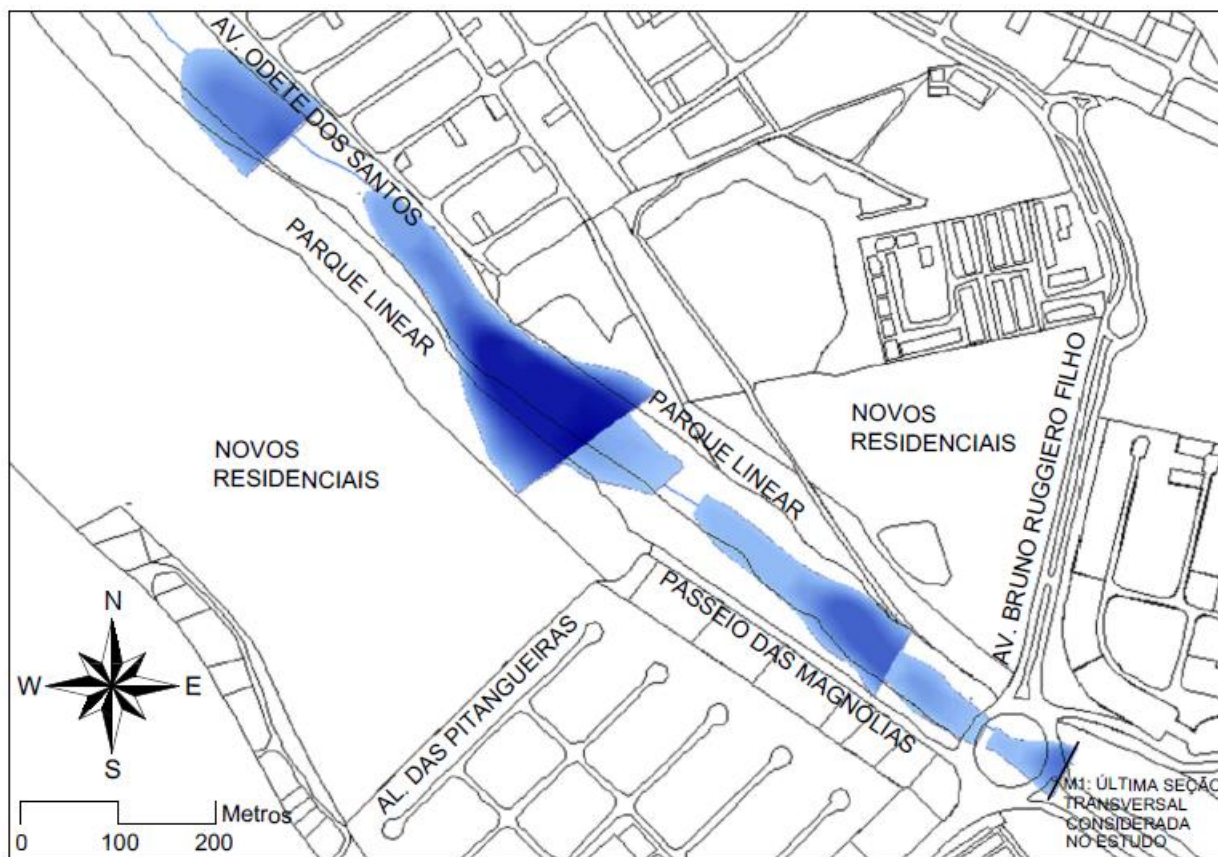


Figura 60 - Mancha de inundação para o Cenário 4 - futuro alternativo, com tempo de retorno de 100 anos

Para cada cenário e tempo de retorno, calculou-se a área inundada. Os resultados são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Área (m²) das manchas de inundação

Cenário	Tempo de retorno		
	25 anos	50 anos	100 anos
1 - Atual	27.834	30.370	33.414
2 - Futuro tendencial	32.893	36.191	40.592
3 - Futuro tendencial com Plano Diretor de Drenagem Urbana	67.125	68.659	71.491
4 - Futuro alternativo	43.124	53.169	65.335

Os resultados mostram que, para os Cenários 1 e 2, em que não existem estruturas de retenção, as manchas de inundação localizam-se próximas ao canal, distando, no máximo, 55 metros do mesmo. Este fato decorre da topografia acentuada da bacia hidrográfica do Córrego do Mineirinho. Entre os cenários mencionados, verificou-se aumento de 18% na área de inundação para o tempo de retorno de 25 anos, 19% para o tempo de retorno de 50 anos e

21% para o tempo de retorno de 100 anos. Portanto, o acréscimo na área inundada é muito menor do que o acréscimo nas vazões de pico, entre os Cenários 1 e 2.

Devido à construção do reservatório de retenção R0 no Cenário 3, houve aumento na área inundada em relação ao Cenário 2. Para os tempos de retorno de 25, 50 e 100 anos, verificou-se aumento de 100%, 90% e 76% nas áreas inundadas, respectivamente. Por outro lado, o problema de inundações na rotatória da Av. Bruno Ruggiero Filho foi resolvido.

Apesar de resolver o problema de inundações na rotatória da Av. Bruno Ruggiero Filho, o Cenário 3 teve impacto negativo na área de estudo, por resultar na inundação de regiões habitadas. Verificou-se que das regiões inundadas no Cenário 3, 36% corresponderam áreas de ocupação humana para o tempo de retorno de 25 anos, 37% para o tempo de retorno de 50 anos e 38% para o tempo de retorno de 100 anos. Portanto, se o Plano Diretor de Drenagem Urbana Ambientalmente Sustentável de São Carlos for aplicado sem que sejam consideradas medidas de zoneamento de área inundáveis na bacia do Córrego do Mineirinho, a exposição das pessoas ao risco de inundações aumentará em relação ao cenário de desenvolvimento previsto no Plano Diretor Municipal (Cenário 2).

Entre os Cenários 4 e 2, também houve aumento na área inundada, devido à construção dos reservatórios de retenção R1, R2 e R3. Para os tempos de retorno de 25, 50 e 100 anos, verificou-se aumento de 31%, 47% e 61% nas áreas inundadas. No entanto, devido à criação do parque linear, no Cenário 4 a inundação não atinge áreas habitadas. Apesar de o Cenário 4 não resolver o problema de inundações na rotatória da Av. Bruno Ruggiero Filho, ocorre atenuação do problema. No cenário 2, a profundidade da lâmina d'água na rotatória para o tempo de retorno de 100 anos é de aproximadamente 4,0 m, enquanto no Cenário 4, de aproximadamente 1,0 m.

6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

A proposta desse estudo foi analisar os hidrogramas e manchas de inundação referentes a cenários alternativos de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Córrego do Mineirinho. Visto que não houve calibração dos modelos hidráulico e hidrológico devido à falta de dados observados de vazão, este trabalho apresenta um caráter essencialmente comparativo entre os cenários estudados. Os resultados obtidos permitem que se compare um cenário com o outro quanto aos hidrogramas e áreas inundáveis, porém podem não representar com exatidão a transformação chuva-vazão ocorrida na bacia hidrográfica. Dessa forma, os hidrogramas e manchas de inundação apresentados devem ser compreendidos como estimativas da resposta da bacia aos eventos simulados.

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que caso a bacia do Córrego do Mineirinho se desenvolva de acordo com as diretrizes do Plano Diretor Municipal (Cenário 2), ocorrerá aumento das inundações na bacia e das vazões descarregadas para jusante. Ou seja, para essa bacia, o Plano Diretor Municipal de São Carlos não considera medidas que minimizem as cheias decorrentes do processo de urbanização.

Caso seja construído o reservatório de retenção previsto pelo Plano Diretor de Drenagem Urbana Ambientalmente Sustentável de São Carlos (Cenário 3), serão minimizadas as vazões descarregadas para jusante, porém a área de inundação atingirá regiões habitadas da bacia. Recomenda-se que caso esse cenário seja seguido, sejam adotadas medidas para redução da exposição das pessoas ao risco de inundações, tais quais leis de zoneamento, incentivos tributários e desapropriação de terras. Outro problema associado a este cenário é que o reservatório proposto R0 é do tipo “bacia seca” o que traz uma série de problemas, tais como: degradação da paisagem, possibilidade de ser ocupado clandestinamente, possibilidade de se tornar depósito de “lixo”, perda no valor dos imóveis das redondezas, não trata minimamente a poluição difusa.

O Cenário 4 – futuro alternativo cumpriu as diretrizes do UDFCD (*Urban Drainage and Flood Control District*) para o controle de inundações nos seguintes aspectos:

- Foi planejado considerando a bacia hidrográfica como unidade de planejamento;
- Não houve ampliação das vazões em relação à condição atual;
- A estratégia de drenagem urbana considerou múltiplas finalidades, tais quais: a melhora da qualidade da água, pela criação dos lagos permanentes nos reservatórios R1, R2 e R3 e do volume WQCV (*Water Quality Capture Volume*) no reservatório

R1; a criação de espaços abertos e áreas de recreação, pela proposição de um parque linear ao longo dos cursos de água da bacia; o controle da erosão, pela estabilização do canal; e a melhoria estética e paisagística, com a criação dos três espelhos d'água;

- As planícies de inundação foram mantidas, através da construção do parque linear.

Apesar de o problema de inundações não ter sido resolvido na rotatória da Av. Bruno Ruggiero Filho, ele foi atenuado pelas medidas adotadas no Cenário 4. Recomenda-se estudar a possibilidade de se aumentar as dimensões das galerias de montante e jusante da rotatória da Av. Bruno Ruggiero Filho.

Recomenda-se que seja incentivada a adoção de outros mecanismos para aumento da infiltração e redução da vazão de escoamento na bacia, como por exemplo: pavimentos permeáveis, telhados verdes, reservatórios residenciais, poços e valas de infiltração, entre outros. Pelo fato de a modelação hidrológica ter sido realizada com o apoio de um modelo concentrado, não foi possível contabilizar o impacto dessas ações na vazão de escoamento.

Para estudar com maior profundidade a bacia, considerando também a microdrenagem, recomenda-se que trabalhos futuros sejam desenvolvidos utilizando-se o modelo hidráulico-hidrológico SWMM (*Storm Water Management Model*).

Esse trabalho é apenas o início de uma discussão maior sobre o futuro da bacia hidrográfica do Córrego do Mineirinho, que envolve a inclusão de profissionais de várias disciplinas, tais quais engenheiros civis, engenheiros de tráfego, urbanistas, sociólogos, profissionais da saúde, advogados, geógrafos, ecologistas, professores, entre outros.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRH – Associação Brasileira de Recursos Hídricos. **Carta de Recife**. ABRH, 1995.

ANDREWS, R.G. **The use of relative infiltration indices in computing runoff**. Texas: Soil Conservation Service, 1954.

APRÍGIO, P.O. **Avaliação de modelos de simulação de cargas difusas em bacias urbanas**. 2012. 113p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

AZEVEDO NETTO, J.M.; VILELA, S.M. **Manual de hidráulica**. 5.ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1972.

BARBASSA, A.P. **Simulação do efeito da urbanização sobre a drenagem pluvial na cidade de São Carlos/SP**. 1991. 327p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991.

BARKER, R. **Design Strategies – Flood Resilience**. London, UK: Baca Architects. Disponível em: <<http://www.architecture.com/SustainabilityHub/Designstrategies/Water/1-3-2-3-Floodresilience.aspx>>. Acesso em 16 jun. 2013.

BENINI, R.M. **Cenários de ocupação urbana e seus impactos no ciclo hidrológico na bacia do córrego do mineirinho**. 2005. 122p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2005.

BERTONI, J.C.; TUCCI, C.E.M. Precipitação. In: TUCCI, C.E.M (Organizador). **Hidrologia**. Porto Alegre: Editora da Universidade; ABRH; EDUSP, 1993. Cap. 5, p.177-242.

BRESSIANI, D.A. **Hidrologia urbana: discussão do fenômeno, comparação Brasil e EUA e aplicação do modelo a Chicago**. 2010. 97p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2010.

BUTLER, D; DAVIES, J.W. **Urban drainage**. London: Spon Press, 2000.

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

CASTILHO, A.S.; OLIVEIRA, G.S.R.; PINTO, E.J.A. **Utilização de modelo hidráulico associado a um SIG para a definição de áreas inundáveis na cidade de Governador Valadares, Minas Gerais**. Belo Horizonte. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/rehi>>. Acesso em 20 out. 2011.

CRICHTON, D. The risk triangle. In: INGLETON, J. (Editor). **Natural Disaster Management**. Leicester, Inglaterra: Tudor Rose Holdings Limited, 1999. p.102-103.

CRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. 1.ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1999.

EM-DAT: **The OFDA/CRED International Disaster Database**. Disponível em: <[http://www.emdat.be/result-country-profile?disgroup=natural&country=bra&period=2002\\$2011](http://www.emdat.be/result-country-profile?disgroup=natural&country=bra&period=2002$2011)>. Acesso em: 21 out. 2011.

FRIEDRICH, D. **O parque linear como instrumento de planejamento e gestão das áreas de fundo de vale urbanas**. 2007. 273p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Urbano e Regional) – Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

FUPAM – Fundação para Pesquisa Ambiental. Relatório 2 - Instrumentos Legais necessários à implantação de parques lineares. In: BONDUKI, N.; FERREIRA, J.S.W. (Coordenadores). **Pesquisa e análise de aplicação de instrumentos em planejamento urbano ambiental no Município de São Paulo**. São Paulo: Secretaria do Verde e Meio Ambiente da Prefeitura do Município de São Paulo, 2006.

GOERL, R.F. **Estudo de inundações em Rio Negrinho – SC sob a ótica dos desastres naturais**. 2010. 103p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

GRACIOSA, M.C.P. **Modelo de seguro para riscos hidrológicos com base em simulação hidráulico-hidrológica como ferramenta de gestão do risco de inundações**. 2010. 163 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

GUIMARÃES, S.T.L. **Bacia hidrográfica: unidade territorial de planejamento?** Disponível em: <<http://riooiapoque.blogspot.com/2010/08/bacia-hidrografica-unidade-territorial.html>>. Acesso em: 22 out. 2011.

HEIDARI, A. Structural master plan of flood mitigation measures. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, v.9, n.1, p.61–75, jan. 2009. Disponível em: www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/9/61/2009/. Acesso em: 22 jun. 2013.

HOGGAN, D.H. **Computer-assisted floodplain hydrology and hydraulics**. United States of America: McGraw-Hill, 1997.

IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. **Plano Diretor de Drenagem Urbana: Manual de Drenagem Urbana**. Volume VI. Porto Alegre: Prefeitura Municipal de Porto Alegre, 2005.

JACOB, S.M. **Análise do uso e ocupação das APPs da bacia do córrego Mineirinho e propostas para recuperação das suas nascentes**. 2010. 77p. Tese (Trabalho de Graduação) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

JHA, A.K.; BLOCH, R.; LAMOND, J. **Cities and flooding: a guide to integrated urban flood risk management for the 21st century**. Washington: International Bank for Reconstruction and Development, 2012.

JONES, D.E. **Urban hydrology: a redirection**. Civil Engineering, 1967

KIRPICH, Z.P. Time of concentration of small agricultural watersheds. **Engineer's Notebook**. American Society of Civil Engineers (ASCE). p.162, 1940.

MAIDMENT, D.; TATE, E. **Floodplain mapping using HEC-HAS and Arcview GIS**. Austin: Center for Research in Water Resources, The University of Texas at Austin. 1991. Disponível em: <http://www.ce.utexas.edu/centers/crwr/reports/online.htm>. Acesso em: 19 out. 2011.

MISHRA, S.K.; PANDEY, A.; SINGH, V.P. Special Issue on Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology. **Journal of Hydrologic Engineering**. American Society of Civil Engineers (ASCE). p.1157, nov. 2012.

MOCKUS, V. **Estimation of total surface runoff for individual storms**. Exhibit A, Appendix B, Interim Survey Rep., (Neosho) River Watershed USDA, Washington, 1948.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Computing and communications in the extreme**. Washington, USA: National Academy Press, 1993.

PORTO, M.F.A; PORTO, R.L.L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos Avançados**, São Paulo, n.63, p.43-60, jun. 2008.

PORTO, R.L.L. Escoamento superficial direto. In: BARROS, M.T.; PORTO, R.L.; TUCCI, C.E.M (Organizadores). **Drenagem urbana**. Porto Alegre: ABRH, 1995. Cap. 4, p.107-165.

_____. (2006) **Medidas não estruturais para mitigação de danos de inundações**. Disponível em: <http://200.144.189.36/phd/default.aspx?id=88&link_uc=disciplina>. Acesso em 03 nov. 2011.

PORTO, R.M. **Hidráulica básica**. 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006.

PMSC – Prefeitura Municipal de São Carlos. **Lei 13.691/05: Plano Diretor do Município de São Carlos**. São Carlos: 2005. Disponível em: <http://www.saocarlos.sp.gov.br/images/stories/pdf/Lei_13691_05_Plano_Diretor.pdf>. Acesso em: 28 set. 2011.

_____. **Plano Diretor de Drenagem Urbana Ambientalmente Sustentável**. São Carlos: Secretaria de obras, 2011. 213 p. Relatório Síntese. Volume II – Medidas Estruturais, Medidas Não Estruturais e Custos.

SANTOS, M. **A urbanização brasileira**. 5. ed. São Paulo: EDUSP, 2008.

SÉ, J.A.S. **O Rio Monjolinho e sua Bacia Hidrográfica como integradores de Sistemas Ecológicos**: um Conjunto de Informações para o Início de um Processo de Pesquisas Ecológicas, de Educação, Planejamento e Gerenciamento Ambientais em Longo Prazo. 1992. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.

SEYBERT, T.A. **Stormwater management for land development: methods and calculations for quantity control**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.

SHARIFI, S; HOSSEINI, S.M. Methodology for identifying the best equations for estimating the time of concentration of watersheds in a particular region. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. 25 mai. 2011. Vol. 137, n. 11. Disponível em: <<http://profdoc.um.ac.ir/articles/a/1024901.pdf>>. Acesso em: 13 mar. 2013.

SILVA, A.P.M. **Elaboração de manchas de inundação para o município de Itajubá, utilizando SIG**. 2006. 122p. Tese (Mestrado em Engenharia da Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006.

SILVEIRA, A.L. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.10, n.1, p.5-23, jan./mar. 2005.

VIEIRA, S. **Como escrever uma tese**. Ilustrações de Marcio Vieira Hoffmann. 2. ed. São Paulo: Pioneira, 1994.

TOLENTINO, M. **Estudo crítico sobre o clima da região de São Carlos**. São Carlos: EdUFSCAR, 2007. p76.

TUCCI, C.E.M. Escoamento Superficial. In: TUCCI, C.E.M (Organizador). **Hidrologia**. Porto Alegre: Editora da Universidade; ABRH; EDUSP, 1993. Cap. 11, p.391-442.

_____. Inundações urbanas. In: BARROS, M.T.; PORTO, R.L; TUCCI, C.E.M (Organizadores). **Drenagem urbana**. Porto Alegre: ABRH, 1995. Cap 1, p. 15-36.

_____. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2.ed. Porto Alegre: ABRH, 1997.

_____. Aspectos institucionais do controle das inundações urbanas. In: MARQUES, D.M.; TUCCI, C.E.M. (Organizadores). **Avaliação e controle da drenagem urbana**. Porto Alegre: ABRH, 2001. Cap. 5.1, p.405-420.

USACE – U.S. Army Corps of Engineers. **HEC-RAS river analysis system: user’s manual**. Davis: HEC – Hydrologic Engineering Center, jan. 2010a.

_____. **HEC-RAS river analysis system: hydraulic reference manual**. Davis: HEC – Hydrologic Engineering Center, jan. 2010b.

_____. **Hydrologic modeling system HEC-HMS: quick start guide**. Davis: HEC – Hydrologic Engineering Center, ago. 2010c.

UDFCD – Urban Drainage and Flood Control District. **Drainage criteria manual: volumes 1, 2 e 3**. Colorado: UDFDC, 2001.

_____. **Good examples**. Colorado: UDFDC, 2008.

USDA - U.S. Department of Agriculture. **Urban Hydrology for Small Watersheds**. Natural Resources Conservation Service. Technical Release 55. Washington: USDA, 1986.

WELSH, S.G. **Urban surface water management**. New York: 1989.

WHITE, G.F. **Human adjustment to floods**: a geographical approach to the flood problem in the United States. 1945. 225p. Dissertação (Doctor of Philosophy) – Department of Geography Research, University of Chicago, Chicago, 1945. Disponível em: < http://www.colorado.edu/hazards/gfw/images/Human_Adj_Floods.pdf >. Acesso em: 3 out. 2011.

WILLIAMS, J.R.; KANNAN, N.; WANG, X.; SANTHI, C.; ARNOLD, J.G. Evolution of the SCS Runoff Curve Number Method and its application to continuous runoff simulation. **Journal of Hydrologic Engineering**. American Society of Civil Engineers (ASCE). p.1221 - 1229, nov. 2012.

WOODWARD, D.E.; HAWKINS, R.H.; QUAN, Q.D. **Curve number method: origins, applications and limitations**. Hydrologic modeling for the 21st century: 2nd Federal Interagency Hydrologic Modeling Conf., Las Vegas, 2002. Disponível em: < <http://ftp.bossintl.com/download/Runoff-Curve-Number-Method-Origins-Applications-and-Limitations.doc> >. Acesso em: 3 maio 2013.

ZAHED, K.F; MARCELLINI, S.S. Precipitações máximas. In: BARROS, M.T.; PORTO, R.L; TUCCI, C.E.M (Organizadores). **Drenagem urbana**. Porto Alegre: ABRH, 1995. Cap. 2, p.37-76.

APÊNDICE A – Diagnóstico fotográfico da bacia do Córrego do Mineirinho, realizado em 08 de junho de 2013



Figura 61 - Área de lazer contígua à nascente do Córrego do Mineirinho, próximo à Rua Olavo Godoy



Figura 62 – Cultura de milho na Área de Preservação Permanente do Córrego do Mineirinho, próximo à Rua Lourenço Cerri



Figura 63 - Vista do Campus II da USP a partir da Rua Osvaldo Perez. No primeiro plano nota-se a presença de resíduos líquidos e sólidos na margem do Córrego do Mineirinho, situado mais ao fundo



Figura 64 - Vista do campus II da USP. A vegetação mais próxima é a mata ciliar do Córrego do Mineirinho. Mais adiante, o outro sulco no relevo é por onde corre um de seus afluentes



Figura 65 - Vista da Avenida Odete dos Santos. À direita tem-se a mata ciliar do Córrego do Mineirinho, e ao fundo, cultivo de *Pinus sp.*



Figura 66 - Área de gramíneas às margens da Avenida Bruno Ruggiero Filho



Figura 67 - Vista da Avenida João Stella, uma via de uso misto (residencial e comercial)



Figura 68 - Vista da Avenida Bruno Ruggiero Filho. À direita tem-se um condomínio fechado, à esquerda área ocupada por gramíneas, e ao fundo, o bairro Parque Santa Mônica (situado na bacia do Córrego do Gregório)

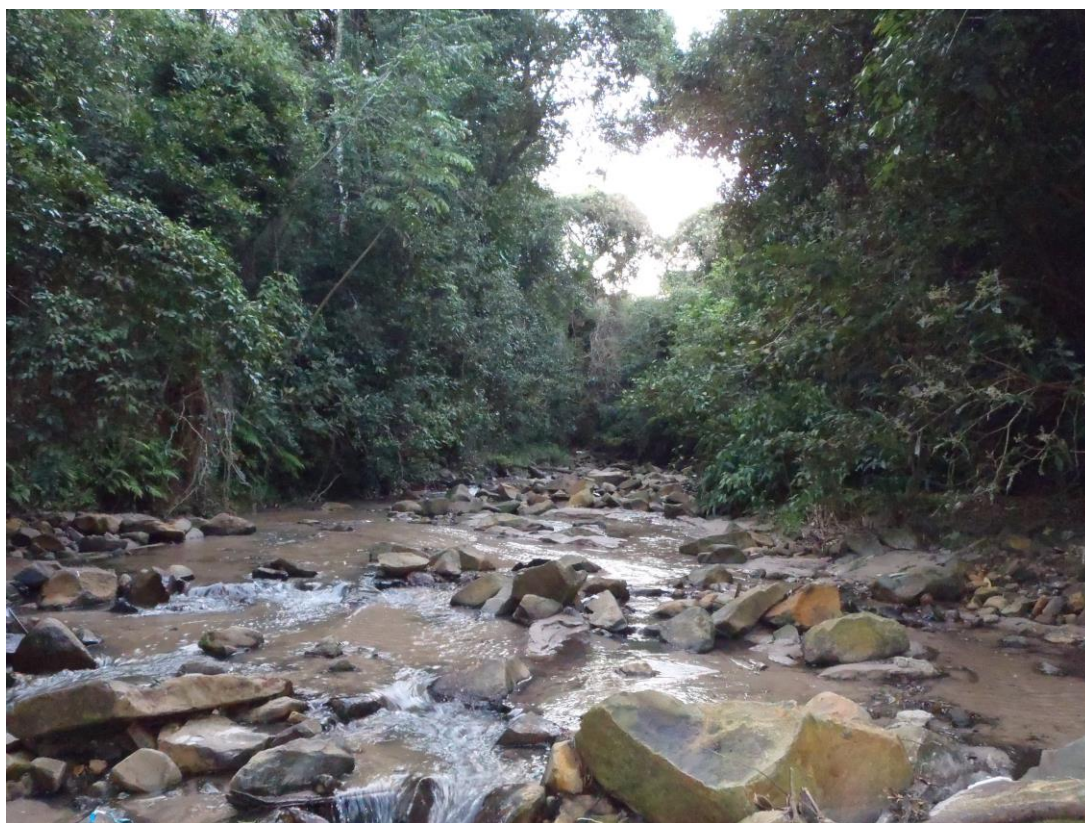


Figura 69 – Vista da seção M5 do levantamento topobatimétrico realizado no Córrego do Mineirinho



Figura 70 - Vista da seção M4 do levantamento topobatimétrico realizado no Córrego do Mineirinho

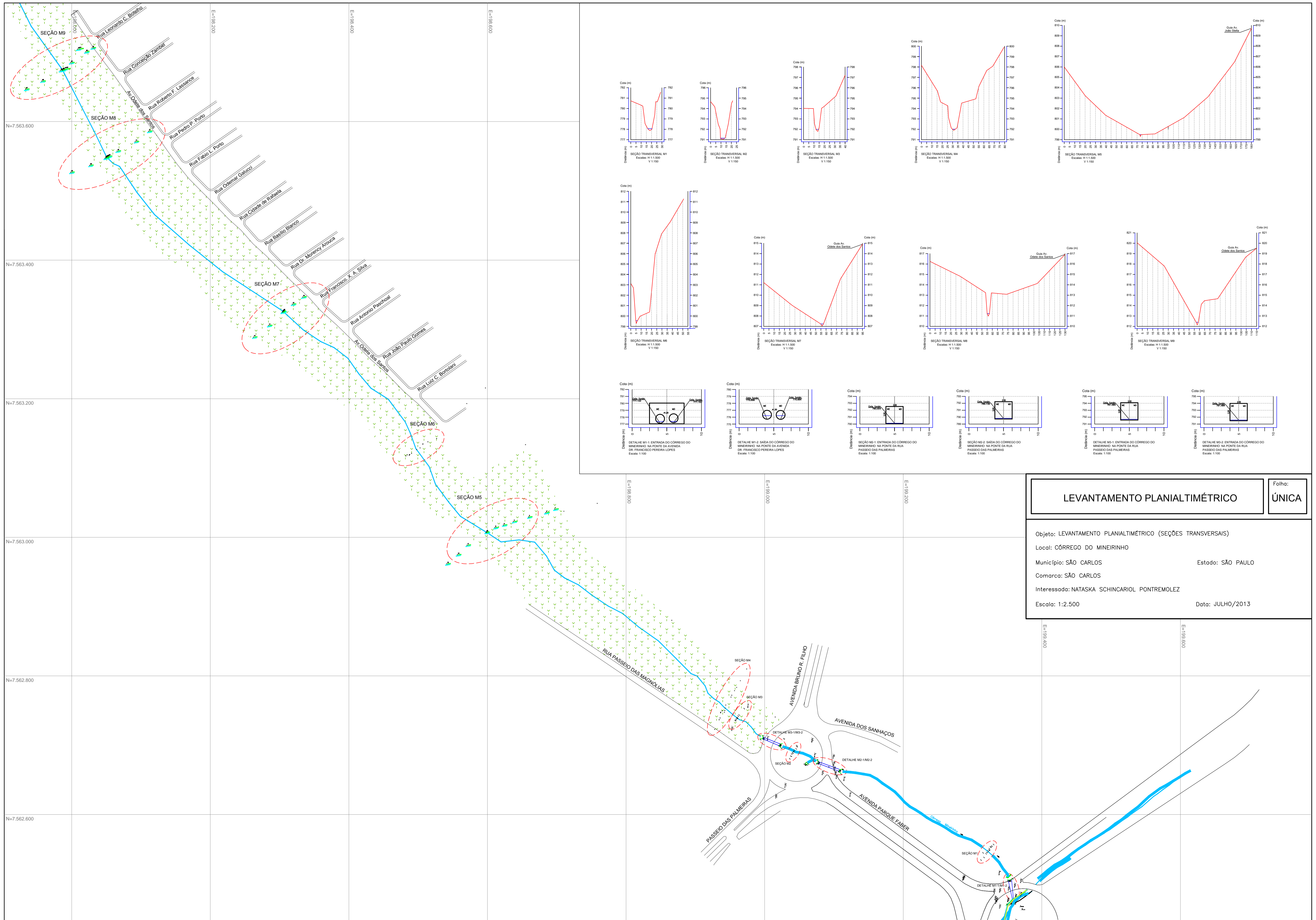


Figura 71 - Vista da seção M2 do levantamento topobatimétrico realizado no Córrego do Mineirinho



Figura 72 - A foz do Córrego do Mineirinho

**APÊNDICE B – Resultado do levantamento topobatimétrico realizado em junho de
2013**



LEVANTAMENTO PLANIALTIMÉTRICO

Folha:
ÚNICA

Objeto: LEVANTAMENTO PLANIALTIMÉTRICO (SEÇÕES TRANSVERSAIS)
 Local: CÓRREGO DO MINEIRINHO
 Município: SÃO CARLOS
 Estado: SÃO PAULO
 Comarca: SÃO CARLOS
 Interessada: NATASKA SCHINCARIOL PONTREMOLEZ
 Escala: 1:2.500
 Data: JULHO/2013

**ANEXO A - Delimitação das zonas do Plano Diretor do Município de São Carlos
(PMSC, 2005)**

