THIAGO GALVÃO TIRADENTES DECINA

Análise de medidas de controle de inundações a partir da avaliação de cenários
de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório, São
Carlos – SP

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos – SP

2012

THIAGO GALVÃO TIRADENTES DECINA

Análise de medidas de controle de inundações a partir da avaliação de cenários de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório, São Carlos – SP

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento, da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Hidráulica e Saneamento.

Área de concentração: Hidráulica e Saneamento

Orientador: Prof. Dr. João Luiz Boccia Brandão

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos – SP

2012

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

D295a   Decina, Thiago Galvão Tiradentes.
Análise de medidas de controle de inundações a partir da avaliação de cenários de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório, São Carlos-SP. / Thiago Galvão Tiradentes Decina ; orientador João Luiz Boccia Brandão. São Carlos, 2012.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento)-- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2012.

1. Inundações. 2. Medidas de controle. 3. Modelação hidráulico-hidrológica. 4. HEC-HMS. 5. HEC-RAS. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **THIAGO GALVÃO TIRADENTES DECINA**.

Título da dissertação: "Análise de medidas de controle de inundações a partir da avaliação de cenários de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do córrego do Gregório, São Carlos-SP".

Data da defesa: 15/06/2012

Comissão Julgadora:

Resultado:

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

APROVADO

Prof. Associado **Rodrigo de Melo Porto**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

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

APROVADO

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

Prof. Titular **Edson Cezar Wendland**

Suplente do Presidente da Comissão de Pós-Graduação em Exercício:

Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

ESCALA
Serviço de Pós-Graduação
15/06/2012
10h30

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, em especial meus pais e minha irmã, por todo o amor e carinho que sempre tiveram comigo.

Ao Prof. Dr. João Luiz Boccia Brandão por todo o apoio, compreensão e orientação oferecidos durante todo esse tempo de trabalho e aprendizado, sem os quais o desenvolvimento desta pesquisa seria impossível.

A todos os companheiros do LabSiN: Bruna, Gabriela, Maria, Renata, Taís e todos os outros, pelo companheirismo, ajuda e amizade.

A todos os funcionários do Departamento de Hidráulica e Saneamento, que sempre estiveram dispostos a oferecer ajuda quando precisei.

À engenheira Melissa Graciosa, pela grande ajuda com os dados da pesquisa e pelas dicas que facilitaram muito a execução do trabalho.

Aos meus amigos de república e agregados: André, Caio, Dante, Davi, Evillin, Francys, Maria, Murilo, Norvin, Patrik, Ricardo, Roger, Rodrigo, Victor e todos os outros, pela grande amizade, pelo apoio que sempre me deram e pela paciência que tiveram morando comigo por todos esses anos.

Aos meus amigos de Santos, por toda amizade que vem desde a infância e por termos mantido o contato mesmo morando longe.

À Priscila, que sempre esteve ao meu lado e me apoiou em todos os momentos.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa.

A todos que eu, eventualmente, tenha esquecido de agradecer.

RESUMO

DECINA, T. G. T. **Análise de medidas de controle de inundações a partir da avaliação de cenários de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório, São Carlos – SP.** 2012. 177 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

O processo de urbanização vem ocorrendo na maioria das cidades brasileiras de forma desorganizada. Desse modo, um problema recorrente que afeta diversos municípios brasileiros são as inundações. A falta de um planejamento que levasse em consideração a drenagem urbana no início do desenvolvimento das cidades acaba criando condições para que as inundações sejam deflagradas a cada época chuvosa. Assim, mostra-se necessária a planificação de medidas preventivas e corretivas que abordem essa questão, a fim de que os prejuízos causados pelas inundações sejam minimizados. Dessa forma, a modelação hidrológica aparece como uma poderosa ferramenta, ao tornar possível uma análise das medidas de controle, através da criação de cenários e simulação de eventos hidrológicos. Nesse contexto o presente trabalho tem como objetivo analisar, por meio de simulação hidrológica e hidráulica, o desempenho de algumas medidas de controle de inundação, estruturais e não-estruturais. Para tanto, com o auxílio do programa ArcGIS 9.3 e imagens de satélite de alta resolução, a bacia hidrográfica do Córrego do Gregório, em São Carlos – SP, foi digitalizada e foram criados cenários alternativos que incorporaram as medidas de controle. Através da utilização dos *softwares* HEC-HMS e HEC-RAS foram realizadas as modelações hidráulica e hidrológica, utilizando tempos de retorno de 25, 50 e 100 anos para a chuva de projeto. Com os resultados obtidos (hidrogramas de cheia e manchas de inundação referentes a cada tempo de retorno), foi possível analisar as medidas comparando-se os diferentes cenários, e concluiu-se, para este caso, que os melhores resultados correspondem à associação das medidas estruturais e não-estruturais. Contudo, também foi verificado que, mesmo com a concretização do cenário mais favorável, o problema das inundações não seria satisfatoriamente equacionado, o que revela a necessidade de se considerar outras medidas para minimizar os prejuízos decorrentes das inundações, tais como medidas de controle na fonte, seguros contra inundações e sistemas de alerta antecipados.

Palavras-chave: inundações, medidas de controle, modelação hidráulico-hidrológica, HEC-HMS, HEC-RAS.

ABSTRACT

DECINA, T. G. T. **Analysis of flood control measures from the assessment of land use scenarios in the Gregório Stream basin, São Carlos - SP.** 2012. 177 f. Dissertation (MSc degree in Hydraulic and Sanitary Engineering) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

The urbanization process has taken place in most Brazilian cities in a disorganized way, and floods are a recurring problem that has affected many municipalities. The lack of a planning that takes into account the urban drainage in the early development of the cities creates conditions for floods to occur in every rainy season. Therefore, the planning of preventive and corrective measures is necessary to address this issue in order to minimize the flood damages. Hydrological modeling appears as a powerful tool, as it enables the analysis of the flood management measures through the creation of scenarios and simulations of hydrological events. In this context, this dissertation analyzes the performance of some structural and nonstructural flood control measures by means of hydrologic and hydraulic simulations. The basin of the Gregório Stream, in São Carlos - SP, was scanned and scenarios that incorporate the management measures were created, both with the aid of software ArcGIS 9.3 and high-resolution satellite images. Hydraulic and hydrologic modelings were performed by HEC-HMS and HEC-RAS software programs using return periods of 25, 50 and 100 years for the design storm. The results (flood hydrographs and flooding areas for each return period) allowed analyzing the measures by comparing the different scenarios and the best results corresponded to the association of structural and nonstructural measures. However, even by implementing the best scenario, the problem of flooding would not be satisfactorily solved, revealing the need to consider other measures to minimize flood damage, such as runoff source control measures, flood insurance and early warning systems.

Key-words: floods, management measures, hydraulic-hydrological modeling, HEC-HMS, HEC-RAS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Balanço hídrico em uma bacia hidrográfica antes e depois do processo de urbanização. Fonte: OECD (1986 apud TUCCI; GENZ, 1995).....	24
Figura 2 – Obras de canalização do Córrego do Gregório. Fonte: Águas da memória (2011a).....	44
Figura 3 – Inundação na bacia do Córrego do Gregório, em região próxima ao Mercado Municipal. Fonte: Águas da memória (2011b)	45
Figura 4 – Representação esquemática de um sistema real através de um modelo. Fonte: Graciosa (2010)	50
Figura 5 – Delimitação da bacia do Córrego do Gregório com indicação da hidrografia, Mercado Municipal e Fórum Municipal.....	62
Figura 6 – Indicação dos locais onde as seções transversais foram levantadas	64
Figura 7 – Delimitação das sub-bacias para modelação hidrológica, com numeração utilizada no estudo e indicação da hidrografia	65
Figura 8 – Exemplo de traçado de sub-bacia em que é considerada a rede de microdrenagem	66
Figura 9 – Uso do solo na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório com base em imagem de satélite de 2 de junho de 2011	67
Figura 10 – Zoneamento do Plano Diretor do Município de São Carlos dentro da área de estudo	71
Figura 11 – Curvas cota-área e cota-volume do reservatório G1 - B 93.5. Fonte: PMSC, 2011	72
Figura 12 – Curvas cota-área e cota-volume do reservatório G2 – B. 83.5. Fonte: PMSC, 2011	73
Figura 13 – Curvas cota-área e cota-volume do reservatório S1 – B. 84.5. Fonte: PMSC, 2011	73
Figura 14 – Curvas cota-área e cota-volume do reservatório La1 – B. 97.5. Fonte: PMSC, 2011	74
Figura 15 – Curvas cota-área e cota-volume do reservatório La2 – B. 98.5. Fonte: PMSC, 2011	74
Figura 16 – Curva volume-descarga para o reservatório G1 – B 93.5.....	77
Figura 17 – Curva volume-descarga para o reservatório G2 – B 83.5.....	78
Figura 18 – Curva volume-descarga para o reservatório S1 – B 84.5	78
Figura 19 – Curva volume-descarga para o reservatório La1 – B 97.5	79
Figura 20 – Curva volume-descarga para o reservatório La2 – B 98.5	79
Figura 21 – Configuração de uso e ocupação do solo aplicada ao Cenário 2, com indicação das zonas do plano diretor e delimitação das sub-bacias.....	84
Figura 22 – Configuração do Cenário 7 para a área de estudo	88
Figura 23 – Faixas de CN para o Cenário 1 – Atual.....	90
Figura 24 – Faixas de CN para o Cenário 2 – Plano diretor, e Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais... 90	
Figura 25 – Faixas de CN para o Cenário 4 – Plano diretor e medidas não estruturais, e Cenário 5 – Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais	91
Figura 26 – Faixas de CN para o Cenário 6 – Sem plano diretor	91
Figura 27 – Faixas de CN para o Cenário 7 – Hipotético.....	92
Figura 28 – Hietograma da chuva de projeto com tempo de retorno de 25 anos.....	94
Figura 29 – Hietograma da chuva de projeto com tempo de retorno de 50 anos.....	95
Figura 30 – Hietograma da chuva de projeto com tempo de retorno de 100 anos.....	95

Figura 31 – Topologia do sistema para os Cenários 1, 2, 4, 6 e 7	97
Figura 32 – Topologia do sistema para os Cenários 3 e 5	97
Figura 33 – Indicação da localização das ruas e seções que limitam a área onde foi realizada a modelação hidráulica	100
Figura 34 – Entrada de vazões para simulação hidráulica	102
Figura 35 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório G1 – B 93.5, no exutório da sub-bacia 5, para o Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais, e tempo de retorno de 100 anos	108
Figura 36 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório G2 – B 83.5, no exutório da sub-bacia 6, para o Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais, e tempo de retorno de 100 anos	108
Figura 37 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório S1 – B 84.5, no exutório da sub-bacia 3, para o Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais, e tempo de retorno de 100 anos	109
Figura 38 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório La1 – B 97.5, no exutório da sub-bacia 8, para o Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais, e tempo de retorno de 100 anos	109
Figura 39 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório La2 – B 98.5, no exutório da sub-bacia 9, para o Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais, e tempo de retorno de 100 anos	110
Figura 40 – Hidrogramas calculados para o exutório da área de estudo, nó 16, para um tempo de retorno de 25 anos	111
Figura 41 – Hidrogramas calculados para o exutório da área de estudo, nó 16, para um tempo de retorno de 50 anos	111
Figura 42 – Hidrogramas calculados para o exutório da área de estudo, nó 16, para um tempo de retorno de 100 anos	112
Figura 43 – Mancha de inundação para o Cenário 1 – Atual, com tempo de retorno de 25 anos.....	117
Figura 44 – Mancha de inundação para o Cenário 1 – Atual, com tempo de retorno de 50 anos.....	117
Figura 45 – Mancha de inundação para o Cenário 1 – Atual, com tempo de retorno de 100 anos.....	118
Figura 46 – Mancha de inundação para o Cenário 2 – Plano Diretor, com tempo de retorno de 25 anos	118
Figura 47 – Mancha de inundação para o Cenário 2 – Plano Diretor, com tempo de retorno de 50 anos	119
Figura 48 – Mancha de inundação para o Cenário 2 – Plano Diretor, com tempo de retorno de 100 anos.....	119
Figura 49 – Mancha de inundação para o Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais, com tempo de retorno de 25 anos.....	120
Figura 50 – Mancha de inundação para o Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais, com tempo de retorno de 50 anos.....	120
Figura 51 – Mancha de inundação para o Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais, com tempo de retorno de 100 anos.....	121
Figura 52 – Mancha de inundação para o Cenário 4 – Plano diretor e medidas não-estruturais, com tempo de retorno de 25 anos	121
Figura 53 – Mancha de inundação para o Cenário 4 – Plano diretor e medidas não-estruturais, com tempo de retorno de 50 anos	122
Figura 54 – Mancha de inundação para o Cenário 4 – Plano diretor e medidas não-estruturais, com tempo de retorno de 100 anos	122

Figura 55 – Mancha de inundação para o Cenário 5 – Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais, com tempo de retorno de 25 anos	123
Figura 56 – Mancha de inundação para o Cenário 5 – Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais, com tempo de retorno de 50 anos	123
Figura 57 – Mancha de inundação para o Cenário 5 – Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais, com tempo de retorno de 100 anos	124
Figura 58 – Mancha de inundação para o Cenário 6 – Sem plano diretor, com tempo de retorno de 25 anos	124
Figura 59 – Mancha de inundação para o Cenário 6 – Sem plano diretor, com tempo de retorno de 50 anos	125
Figura 60 – Mancha de inundação para o Cenário 6 – Sem plano diretor, com tempo de retorno de 100 anos ..	125
Figura 61 – Mancha de inundação para o Cenário 7 – Hipotético, com tempo de retorno de 25 anos.....	126
Figura 62 – Mancha de inundação para o Cenário 7 – Hipotético, com tempo de retorno de 50 anos.....	126
Figura 63 – Mancha de inundação para o Cenário 7 – Hipotético, com tempo de retorno de 100 anos.....	127
Figura 64 – Profundidades associadas à mancha de inundação do Cenário 6 – Sem plano diretor, com tempo de retorno de 100 anos	130
Figura 65 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório G1 – B 93.5 para o Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais, e tempo de retorno de 25 anos	146
Figura 66 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório G2 – B 83.5 para o Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais, e tempo de retorno de 25 anos	146
Figura 67 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório S1 – B 84.5 para o Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais, e tempo de retorno de 25 anos	147
Figura 68 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório La1 – B 97.5 para o Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais, e tempo de retorno de 25 anos	147
Figura 69 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório La2 – B 98.5 para o Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais, e tempo de retorno de 25 anos	148
Figura 70 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório G1 – B 93.5 para o Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais, e tempo de retorno de 50 anos	148
Figura 71 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório G2 – B 83.5 para o Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais, e tempo de retorno de 50 anos	149
Figura 72 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório S1 – B 84.5 para o Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais, e tempo de retorno de 50 anos	149
Figura 73 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório La1 – B 97.5 para o Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais, e tempo de retorno de 50 anos	150
Figura 74 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório La2 – B 98.5 para o Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais, e tempo de retorno de 50 anos	150
Figura 75 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório G1 – B 93.5 para o Cenário 5 – Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais, e tempo de retorno de 25 anos.....	151
Figura 76 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório G2 – B 83.5 para o Cenário 5 – Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais, e tempo de retorno de 25 anos.....	151
Figura 77 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório S1 – B 84.5 para o Cenário 5 – Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais, e tempo de retorno de 25 anos.....	152

Figura 78 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório La1 – B 97.5 para o Cenário 5 – Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais, e tempo de retorno de 25 anos.....	152
Figura 79 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório La2 – B 98.5 para o Cenário 5 – Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais, e tempo de retorno de 25 anos.....	153
Figura 80 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório G1 – B 93.5 para o Cenário 5 – Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais, e tempo de retorno de 50 anos.....	153
Figura 81 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório G2 – B 83.5 para o Cenário 5 – Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais, e tempo de retorno de 50 anos.....	154
Figura 82 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório S1 – B 84.5 para o Cenário 5 – Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais, e tempo de retorno de 50 anos.....	154
Figura 83 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório La1 – B 97.5 para o Cenário 5 – Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais, e tempo de retorno de 50 anos.....	155
Figura 84 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório La2 – B 98.5 para o Cenário 5 – Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais, e tempo de retorno de 50 anos.....	155
Figura 85 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório G1 – B 93.5 para o Cenário 5 – Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais, e tempo de retorno de 100 anos.....	156
Figura 86 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório G2 – B 83.5 para o Cenário 5 – Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais, e tempo de retorno de 100 anos.....	156
Figura 87 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório S1 – B 84.5 para o Cenário 5 – Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais, e tempo de retorno de 100 anos.....	157
Figura 88 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório La1 – B 97.5 para o Cenário 5 – Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais, e tempo de retorno de 100 anos.....	157
Figura 89 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório La2 – B 98.5 para o Cenário 5 – Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais, e tempo de retorno de 100 anos.....	158
Figura 90 – Hidrogramas que passam pelo nó 2, para tempo de retorno de 25 anos.....	160
Figura 91 – Hidrogramas que passam pelo nó 2, para tempo de retorno de 50 anos.....	160
Figura 92 – Hidrogramas que passam pelo nó 2, para tempo de retorno de 100 anos.....	161
Figura 93 – Hidrogramas que passam pelo nó 13, para tempo de retorno de 25 anos.....	161
Figura 94 – Hidrogramas que passam pelo nó 13, para tempo de retorno de 50 anos.....	162
Figura 95 – Hidrogramas que passam pelo nó 13, para tempo de retorno de 100 anos.....	162
Figura 96 – Coeficientes aplicados às Zonas 1, 2, 3A, 3B, 4 e 5.....	168

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Áreas e porcentagens correspondentes a cada classe de uso do solo.....	68
Tabela 2 - Área das sub-bacias e porcentagem relativa a cada classe de uso do solo.....	69
Tabela 3 - Valores de comprimento (L), diâmetro (D), resultado da divisão de um pelo outro (L/D) e coeficientes de descarga (Cd) das descargas de fundo de cada reservatório	75
Tabela 4 - Coeficientes de descarga corrigidos (Cd*) para os descarregadores de fundo de cada reservatório	76
Tabela 5 - Valores percentuais de AIDC, AINC e AP obtidos para São Carlos.....	80
Tabela 6 - Áreas permeáveis, impermeáveis e CN médio das diferentes regiões.....	81
Tabela 7 - Valores de CN médio para cada sub-bacia e para cada cenário	89
Tabela 8 - Dados dos trechos do canal utilizados pelo HEC-HMS	99
Tabela 9 - Comprimento do talvegue e declividade média de cada sub-bacia da área de estudo.....	105
Tabela 10 - Fração da área coberta com vegetação nas sub-bacias para cada cenário	106
Tabela 11 - Tempos de concentração de cada sub-bacia para cada cenário	107
Tabela 12 - Vazões máximas (m ³ /s) dos hidrogramas calculados para a área de estudo.....	112
Tabela 13 - Picos de vazão para cada ponto da bacia considerado no estudo	116
Tabela 14 - Área ocupada pela mancha de inundação, em m ² , para cada cenário.....	127
Tabela 15 - Valores de CN para áreas urbanas.....	174
Tabela 16 - Valores de CN para áreas agrícolas.....	175
Tabela 17 - Valores de CN para outros tipos de áreas agrícolas	176
Tabela 18 - Valores de CN para regiões áridas e semiáridas.....	177

LISTA DE SÍMBOLOS

- A - Área da seção transversal da tubulação de descarga (m^2)
- A_l - Área do lote (m^2)
- AIDC - Área impermeável diretamente conectada (%)
- AINC - Área impermeável não conectada (%)
- AP - Área permeável (%)
- b - Largura do canal (m)
- C - Coeficiente de vazão (adimensional)
- Cd - Coeficiente de descarga (adimensional)
- Cd^* - Coeficiente de descarga corrigido (adimensional)
- CN - *Curve Number*
- CN(I) - *Curve Number* para condição de umidade I
- CN(II) - *Curve Number* para condição de umidade II
- CN(III) - *Curve Number* para condição de umidade III
- D - Diâmetro da descarga de fundo (m)
- g - Aceleração da gravidade (m/s^2)
- H - Diferença de nível entre a superfície do reservatório e a linha de centro da seção de saída da descarga de fundo (m)
- h - Carga sobre a soleira do vertedor (m)
- h_d - Carga estática associada à vazão de projeto (m)
- i - Intensidade (mm/h)
- I_a - Perdas iniciais por retenção da chuva na bacia (mm)
- K - Coeficiente que expressa a relação entre a parte do perímetro em que há supressão da contração e o perímetro total do orifício (adimensional)
- L - Comprimento do descarregador (m)
- L_c - Comprimento do trecho de canal (m)
- L_t - Comprimento do talvegue (km)
- L_v - Largura do vertedor (m)
- n - Coeficiente de rugosidade de *Manning*
- NA máx max- Nível d'água máximo maximorum (m)
- P - Precipitação total (mm)
- p - Fração da área da bacia coberta com vegetação (adimensional)

P_e - Precipitação efetiva (mm)

Q - Vazão (m^3/s)

S - Potencial de retenção do solo, após início do escoamento superficial (mm)

S_c - Declividade do trecho de canal (m/m)

S_m - Declividade média da bacia (m/m)

T - Período de retorno (anos)

t - Duração da chuva (min)

t_c - Tempo de concentração (min)

vert. - Vertedor

vol. - Volume (m^3)

Z - Declividade das paredes do canal trapezoidal (adimensional)

LISTA DE SIGLAS

ABC6 - Análise de Bacias Complexas 6
APA - Área de Proteção Ambiental
APP - Área de Preservação Permanente
BBC - British Broadcasting Corporation
C - *Contoured*
CA - Coeficiente de Aproveitamento
CAB - Coeficiente de Aproveitamento Básico
CAD - *Computer-Aided Design*
CAM - Coeficiente de Aproveitamento Máximo
CCV - Coeficiente de Cobertura Vegetal
CDCC - Centro de Divulgação Científica e Cultural
CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CO - Coeficiente de Ocupação
CP - Coeficiente de Permeabilidade
CR - *Crop Residue Cover*
CRED - *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters*
CRHEA - Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada
C&T - *Contoured and Terraced*
EESC - Escola de Engenharia de São Carlos
EUA - Estados Unidos da América
FAP - *Flood Action Plan*
FCTH - Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica
GIS - *Geographic Information System*
GUFIM - *GIS-based urban flood inundation model*
HEC - *Hydrologic Engineering Center*
HMS - *Hydrologic Modeling System*
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDF - Intensidade-Duração-Frequência
IPH - Instituto de Pesquisas Hidráulicas
Jd - Jardim
LabSid - Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões

LabSiN - Laboratório de Simulação Numérica
MDT - Modelo Digital do Terreno
NEXRAD - *Next-Generation Radar*
NIBH - Núcleo Integrado de Bacias Hidrográficas
OECD - Organisation for Economic Co-operation and Development
OESA - Organização e Engenharia S.A.
PIB - Produto Interno Bruto
PMSC - Prefeitura Municipal de São Carlos
RAS - *River Analysis System*
SC - Santa Catarina
SCS - *Soil Conservation Service*
SIG - Sistema de Informação Geográfica
SIGRH - Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SWMM - *Storm Water Management Model*
SP - São Paulo
SR - *Straight Row*
Sto - Santo
TR - Tempo de Retorno
UFSCar - Universidade Federal de São Carlos
USACE - *United States Army Corps of Engineers*
USDA - *United States Department of Agriculture*
USP - Universidade de São Paulo
WES - *Waterways Experiment Station*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2. OBJETIVOS	19
2.1. Objetivo central.....	19
2.2. Objetivos específicos	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
3.1. Urbanização e inundações.....	20
3.2. Impactos da urbanização no ciclo hidrológico	22
3.3. Aspectos gerais acerca do gerenciamento e planejamento da drenagem urbana.....	25
3.4. Medidas de controle das águas pluviais.....	29
3.4.1. Medidas estruturais.....	30
3.4.2. Medidas não-estruturais	30
3.5. Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano.....	32
3.6. Plano Diretor do Município de São Carlos.....	33
3.6.1. Elaboração	33
3.6.2. Conteúdo	34
3.7. Plano Diretor de Drenagem Urbana Ambientalmente Sustentável do Município de São Carlos.....	38
3.8. Sistemas de Informação Geográfica e recursos hídricos.....	40
3.9. Processo de ocupação do município de São Carlos e da bacia hidrográfica do Córrego do Gregório.....	42
3.10. Trabalhos realizados na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório.....	46
3.11. Modelação.....	49
3.11.1. Modelação hidrológica	50
3.11.1.1. <u>O Modelo SCS Curve Number</u>.....	51

3.11.1.2. <u>Hidrograma unitário do SCS</u>	54
3.11.1.3. <u>O software HEC-HMS</u>	55
3.11.2. <i>Modelação hidráulica</i>	56
3.11.2.1. <u>O software HEC-RAS</u>	57
3.11.3. <i>Aplicações de modelação hidrológica e hidráulica</i>	58
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	60
4.1. Área de estudo	60
4.2. Dados topográficos.....	63
4.3. Delimitação das sub-bacias	64
4.4. Delimitação do uso e ocupação do solo	66
4.5. Cenários prospectivos.....	70
4.5.1. <i>Zoneamento</i>	70
4.5.2. <i>Medidas não-estruturais</i>	71
4.5.3. <i>Medidas estruturais</i>	72
4.5.4. <i>Gênese dos cenários e cálculo do CN</i>	79
4.5.4.1. <u>Cenário 1 – Atual</u>	80
4.5.4.2. <u>Cenário 2 – Plano diretor</u>	82
4.5.4.3. <u>Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais</u>	84
4.5.4.4. <u>Cenário 4 – Plano diretor e medidas não-estruturais</u>	85
4.5.4.5. <u>Cenário 5 - Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais</u>	86
4.5.4.6. <u>Cenário 6 – Sem plano diretor</u>	86
4.5.4.7. <u>Cenário 7 – Hipotético</u>	87
4.5.5. <i>CN das sub-bacias para cada cenário</i>	88
4.6. Tempo de concentração das sub-bacias	92
4.7. Chuvas de projeto	93
4.8. Modelação hidrológica: o HEC-HMS	96

4.9. Modelação hidráulica: o HEC-RAS	99
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	104
5.1. Simulação hidrológica	104
5.2. Simulação hidráulica	115
6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	132
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	135
APÊNDICE A – Hidrogramas afluentes e efluentes aos reservatórios de detenção para os Cenários 3 e 5	145
APÊNDICE B – Hidrogramas que passam pelos nós 2 e 13, para cada cenário e tempo de retorno	159
ANEXO A – Delimitação das zonas do Plano Diretor do Município de São Carlos (PMSC, 2005b).....	163
ANEXO B – Coeficientes aplicados a cada zona do Plano Diretor do Município de São Carlos (PMSC, 2005b).....	167
ANEXO C – Localização dos reservatórios (PMSC, 2011)	169
ANEXO D – Valores de CN para diferentes tipos de uso do solo (USDA, 1986).....	173

1. INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, o Brasil apresentou um intenso crescimento da população urbana, que atualmente corresponde a mais de 80% de seus habitantes. O acelerado processo de urbanização, principalmente a partir dos anos 80, foi realizado sem o planejamento adequado e praticamente sem infraestrutura. Um importante desdobramento dessa realidade é a geração de impactos sobre os recursos hídricos, principalmente sobre a drenagem urbana. A impermeabilização do solo, causada pelo desenvolvimento da malha urbana, altera profundamente o escoamento superficial das águas pluviais. O volume que anteriormente à urbanização era retido pela vegetação e infiltrava no solo, passa a escoar rapidamente até atingir os canais de drenagem, o que resulta em um aumento significativo da vazão máxima dos rios, causando inundações urbanas que podem ter consequências catastróficas (TUCCI, 1995).

A saída tradicionalmente adotada por muitos engenheiros responsáveis pela drenagem urbana foi a de canalizar os cursos d'água, a fim de aumentar a velocidade de escoamento e expulsar a água rapidamente. Tal solução, porém, acaba por transferir o problema para áreas a jusante na bacia hidrográfica, aumentando a magnitude e frequência das inundações, o que deixa claro que a drenagem deve ser incorporada na fase inicial do desenvolvimento urbano. Desse modo, aparece a necessidade de se planejar ações preventivas e corretivas para se controlar as inundações, e integrar essas medidas ao planejamento urbano como um todo, por meio dos planos diretores (CANHOLI, 2005).

As medidas de controle de inundação podem ser estruturais, quando envolvem obras de engenharia, ou não-estruturais, como zoneamento, sistemas de alerta e seguros. Um planejamento consistente deve contemplar uma integração harmoniosa entre medidas estruturais e não-estruturais, e destas com o desenvolvimento urbano, seguindo sempre o critério fundamental de que não se deve ampliar a cheia natural do curso d'água (CANHOLI, 2005; TUCCI e GENZ, 1995).

Um meio de se avaliar o desempenho dessas medidas antes de sua implantação é a utilização de modelos hidrológicos e hidráulicos. Lançando-se mão de *softwares* que realizem a modelação, é possível criar cenários e simular eventos hidrológicos para que se possam avaliar as consequências da implantação das medidas de controle. Desse modo, metodologias podem ser desenvolvidas no sentido de auxiliar o poder público no processo de tomada de decisão.

Nesse contexto, este trabalho propõe a utilização de modelação hidráulica e hidrológica a fim de se analisar as consequências da implantação de algumas medidas de controle, através da simulação de cenários de uso e ocupação do solo que incorporam medidas estruturais e não-estruturais.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo central

Analisar o efeito causado por diferentes medidas estruturais e não-estruturais de controle de inundações em uma bacia hidrográfica, através da criação de cenários e modelação hidrológica e hidráulica na bacia do Córrego do Gregório, em São Carlos, SP.

2.2. Objetivos específicos

- Propor cenários alternativos de desenvolvimento da bacia em questão, levando em conta a adoção de medidas estruturais e não-estruturais.
- Comparar os cenários alternativos através da análise dos hidrogramas gerados, no exutório de uma parcela da bacia hidrográfica do Córrego do Gregório.
- Gerar manchas de inundação com base na simulação hidráulica para cada cenário e tempos de retorno considerados no estudo.
- Avaliar o desempenho das medidas propostas para cada caso estudado.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção tem como objetivo fazer uma explanação sobre os conceitos envolvidos na elaboração do trabalho, a fim de embasar o leitor. São abordados assuntos referentes à questão da urbanização e seus impactos no ciclo hidrológico com destaque para as inundações, que constituem o foco deste estudo. Dessa forma, são analisados os aspectos referentes ao seu controle e sua relação com o planejamento da drenagem urbana. O planejamento da drenagem urbana, por sua vez, deve estar contido em um processo de planejamento maior, que contemple todo o contexto territorial urbano. Esta função é cumprida por um instrumento conhecido como plano diretor.

A fim de contextualizar o leitor com a área de estudo, é realizado um apanhado histórico sobre o processo de ocupação do município de São Carlos e da bacia hidrográfica do Córrego do Gregório, assim como são relacionados diversos trabalhos que utilizaram esta bacia como objeto de estudo.

Por fim, são abordados os conceitos de modelação hidrológica, modelação hidráulica e Sistemas de Informação Geográfica, que são ferramentas utilizadas neste trabalho. Também são caracterizados os *softwares* usados nos processos de modelação, com exemplos de aplicações.

3.1. Urbanização e inundações

A relação do homem com as inundações remonta à Antiguidade. Segundo Caponera (1992), o nascimento das primeiras cidades e comunidades humanas esteve intimamente ligado à busca de locais com adequado suprimento de água. Tal processo histórico leva muitos autores a classificar os primeiros grupos sociais como “civilizações hidráulicas”. A ocupação de áreas no entorno de corpos hídricos trouxe importantes benefícios para a agricultura e o comércio, facilitado pelo transporte aquático. Além disso, o relevo plano dos vales facilitou o assentamento das comunidades, o que também acabou por motivar a colonização desses espaços (TUCCI, 2005). Porém, ao se instalar nesses locais, as civilizações acabaram sendo submetidas às inundações (CAPONERA, 1992).

Tal problema continua até os dias de hoje e atinge principalmente os países ditos “em desenvolvimento”, nos quais é agravado sobremaneira por um rápido e desordenado

crescimento populacional urbano. Este processo tem sido significativo desde a década de 70, e segundo projeções das Nações Unidas, até o ano 2100 a população mundial terá ultrapassado a marca de 10 bilhões de habitantes (TUCCI, 2005; UNITED NATIONS, 2011).

No Brasil, o aumento da população urbana acarretou no crescimento explosivo das cidades, sendo que a taxa da população brasileira que vive em situação urbana é de 84% (IBGE, 2010). Tal processo resultou na formação de 12 regiões metropolitanas, que concentram cerca de um terço dos habitantes do país. Estes complexos urbanos são formados por unidades administrativas com gestões independentes, mas com funções complementares e situação econômica desigual. Esta situação dificulta o atendimento das demandas sociais e o provimento de infraestrutura adequada que atenda à população de toda a região de forma satisfatória. Na ausência de políticas que integrem o desenvolvimento dos municípios, e que extrapolem seus limites político-administrativos, o processo de ocupação de áreas inadequadas surge com força, criando grandes impactos ambientais e sociais (GROSTEIN, 2001).

A partir da década de 80, houve um intenso crescimento das periferias de regiões metropolitanas, e um crescimento ainda maior do número de habitantes de favelas, muitas das quais localizadas em zonas vulneráveis. Este processo é resultado do menor acesso à moradia formal para população de baixa renda e do crescimento da oferta de loteamentos clandestinos em locais inadequados, como encostas de morros e várzeas de rios. É possível perceber semelhanças no processo de urbanização das regiões metropolitanas brasileiras, como a inexistência de projetos que articulassem esse crescimento e ordenassem o uso e ocupação do solo. Desse modo, prevaleceram os loteamentos ilegais e o surgimento de casas auto-construídas, contribuindo para que os grandes centros urbanos tivessem uma expansão insustentável do ponto de vista ambiental, além de proporcionar condições precárias e baixa qualidade de vida à grande parte da população (GROSTEIN, 2001). Nota-se que as mesmas práticas inadequadas em relação à falta de planejamento do uso do solo, e seus consequentes impactos ambientais, estão ocorrendo nas cidades de médio porte (TUCCI, 2008). Dessa forma, as ocupações inadequadas e o mau planejamento, tanto da cidade formal quanto da informal, acabaram por contribuir sobremaneira com o problema das inundações urbanas, pois a drenagem das cidades foi tratada de maneira acessória dentro do contexto do parcelamento do solo (CANHOLI, 2005).

As inundações assolam diversos países, sendo o desastre natural com o maior número de ocorrências no mundo inteiro. Segundo dados do Centro de Pesquisas de Epidemiologia dos Desastres, CRED (2012), órgão colaborativo da Organização Mundial da Saúde, as

inundações representam 32% de todos os desastres naturais ocorridos no planeta de 1900 até 2011. Quando se analisam os registros de desastres ocorridos a partir de 2000, a participação das inundações sobe para 39%, o que mostra que o problema está longe de ser equalizado em escala mundial. O número de mortes registradas nesses eventos também é elevado, dado que esses acontecimentos são responsáveis por 21% das mortes decorrentes de desastres naturais a partir do ano 1900. Ao se analisar os dados das inundações ocorridas no Brasil, percebe-se um aumento acentuado nas estatísticas, mostrando o quão alarmante é a situação nacional. De 1900 até 2011, o desastre em questão representa 57% de todas as ocorrências, sendo responsável por 62% das mortes. A partir do ano 2000, os registros analisados indicam que a participação das inundações no total de desastres naturais ocorridos é de 64%, que resultaram em nada menos que 83% das mortes registradas. Grande parte dessas mortes foi resultado das inundações e deslizamentos decorrentes das chuvas que atingiram a região serrana do Rio de Janeiro em janeiro de 2011, em que 806 óbitos foram contabilizados. Tal ocorrência foi a maior inundação registrada em número de mortos no Brasil, e evidencia os resultados da falta de planejamento no uso e ocupação do solo urbano (BBC BRASIL, 2011; CRED, 2012).

3.2. Impactos da urbanização no ciclo hidrológico

A palavra *drenagem* é definida como “escoamento de águas de terreno excessivamente úmido por meio de tubos, valas, fossos etc. instalados na superfície ou nas camadas subterrâneas” (HOUAISS, 2009). Nesse contexto, quando a *drenagem* se refere às instalações utilizadas para escoar a água presente em uma malha urbana, emprega-se o termo *drenagem urbana*. Tal denominação compreende um conjunto de medidas relacionadas à atenuação de riscos e prejuízos advindos de inundações, e visa oferecer condições para que o desenvolvimento urbano ocorra de forma harmônica, articulada e sustentável (PORTO, et al., 2001).

As inundações ocorrem quando a calha de rios, córregos ou galerias pluviais não têm capacidade de veicular a vazão da bacia de montante. Consequentemente, a água passa a escoar pela planície de inundação, a qual muitas vezes é ocupada pela população. Esses eventos resultam de dois processos que podem atuar em conjunto ou separadamente: as inundações em áreas ribeirinhas e as inundações devido à urbanização (TUCCI, 2005; TUCCI, 1995).

As primeiras ocorrem devido ao fenômeno natural em que o rio ocupa seu leito maior, e causam impactos adversos quando há uma ocupação inadequada do espaço urbano. Em regiões de relevo acidentado, as áreas mais propícias para a população se estabelecer são as mais planas e baixas, justamente as mais atingidas pelas inundações, dado que a várzea aumenta significativamente nos cursos médio e baixo do rio (TUCCI, 2005). Muitas vezes esses impactos estão ligados à memória da população e à frequência das cheias. A inexistência de uma inundação significativa em um longo período de tempo pode fazer com que a população novamente se instale no leito maior do rio, e acabe por sofrer as consequências de um evento de maior magnitude. Um exemplo dessa situação ocorreu em Blumenau, SC, onde por 71 anos (entre 1912 e 1982) não ocorreu nenhuma inundação no rio Itajaí-Açu com cota superior a 13,00 m. Durante esse tempo a várzea do rio foi intensamente ocupada, até que nos anos de 1983 e 1984 o nível do rio atingiu as cotas de 15,34 m e 15,50 m respectivamente. Os prejuízos contabilizados por esses eventos representaram 16% do PIB do estado de Santa Catarina (TUCCI, 1995).

Já o segundo processo diz respeito principalmente à impermeabilização dos solos que resulta da implantação das cidades. Com a construção de vias pavimentadas, telhados e galerias pluviais, o escoamento superficial sofre profundas alterações, sendo regido pelos caminhos formados pelas ruas e condutos. Além disso, a água que anteriormente era retida pela vegetação e infiltrava no solo, passa a atingir rapidamente o canal principal. Dessa forma, criam-se condições para a ocorrência das inundações (TUCCI, 1995). Essas alterações no uso e ocupação do solo acarretam em mudanças no ciclo hidrológico, a saber (BUTLER e DAVIES, 2004; TUCCI, 2005):

- Redução na infiltração da água no solo;
- Aumento no escoamento superficial;
- Aumento do pico de vazão, devido ao rápido transporte da água das chuvas até o exutório da bacia;
- Antecipação da ocorrência do pico de vazão;
- Redução do nível do lençol freático, devido à redução da infiltração;
- Redução da evapotranspiração, pois a impermeabilização não permite a evapotranspiração das folhagens e do solo.

Tais mudanças aumentam o risco de ocorrer uma súbita inundação no corpo hídrico. Além disso, a qualidade da água também é impactada, pois o rápido escoamento superficial tende a causar o arraste de sedimentos e poluentes para o rio, e em ambientes urbanos é muito maior a concentração dessas substâncias na superfície da bacia (BUTLER e DAVIES, 2004).

Uma estimativa das alterações no balanço hídrico provocadas pela urbanização encontra-se na figura a seguir:

Figura 1 – Balanço hídrico em uma bacia hidrográfica antes e depois do processo de urbanização. Fonte: OECD¹ (1986 apud TUCCI; GENZ, 1995)

Através da modelação hidrológica pode-se obter hidrogramas de bacias hidrográficas sujeitas a diferentes tipos de uso e ocupação do solo, e assim avaliar alguns dos efeitos da urbanização na geração do escoamento superficial. Há na literatura diversos trabalhos nesse sentido. Barbassa (1991) simulou o efeito da urbanização em duas bacias hidrográficas no município de São Carlos, a do Córrego do Gregório e do Monjolinho, e concluiu que houve um aumento na vazão de pico de 20% para determinada seção do Córrego do Gregório decorrente do aumento da impermeabilização da bacia no período de 1980 a 1990. Esta alteração faz com que, para as condições de urbanização de 1980, uma precipitação com tempo de retorno de 10 anos produza a mesma vazão de pico que uma chuva com 5 anos de

¹ OECD - Organisation for Economic Cooperation and Development. **Control of Water Pollution from Urban Runoff**. Paris: Organisation for Economic Cooperation and Development, 1986.

tempo de retorno em 1990. Ao estudar a mesma bacia, Boldrin (2005) concluiu que a vazão de pico para um cenário de quase completa impermeabilização pode ser da ordem de 10 vezes a vazão máxima em condições de pré-urbanização. Ali et al., (2010) criaram, para o município de Islamabad, no Paquistão, um cenário de uso e ocupação do solo com as alterações previstas no plano diretor, e simularam hidrogramas para um ponto no curso do rio Lai Nullah. Os resultados encontrados mostraram que o futuro uso do solo indicado no plano diretor causa um aumento que varia de 51,6% a 100% no volume total escoado, e um acréscimo na vazão de pico de 45,4% a 83,3% quando são analisados 4 eventos de precipitação ocorridos entre 2007 e 2008.

3.3. Aspectos gerais acerca do gerenciamento e planejamento da drenagem urbana

O planejamento e gerenciamento de sistemas de drenagem urbana envolvem o equacionamento de um problema de alocação de espaços, pois a supressão de várzeas e a impermeabilização do solo implicam que a água anteriormente alocada nesses locais deverá ser realocada a jusante. O resultado do descaso do poder público com essa problemática se demonstra no estado alarmante em que alguns centros urbanos se encontram em relação ao controle de enchentes. (SHEAFFER, 1982).

De forma geral, o gerenciamento da drenagem urbana nas cidades brasileiras é realizado pelas prefeituras municipais, prática esta comum no mundo todo. Porém, diferentemente de alguns países, no Brasil não há integração das políticas referentes à drenagem com o planejamento urbano. Além disso, muitas vezes os municípios não possuem suporte técnico adequado e não há uma análise mais completa do conjunto da bacia hidrográfica. Assim, deve se entender o planejamento da drenagem urbana como parte do processo de planejamento urbano, integrado a outros planos, como o de água, esgoto, transportes e uso do solo (TUCCI, 2000; CANHOLI, 2005).

Grande parte dos problemas enfrentados pelas cidades brasileiras em relação às inundações advém da filosofia higienista, engendrada na Europa no século XVIII. O ponto de partida desse pensamento ocorreu quando se constatou, na Itália, que a morte de pessoas e animais estava relacionada à existência de água parada em banhados e zonas alagadiças. Desse modo, surgiu o higienismo, que preconizava a rápida evacuação das águas paradas ou empoçadas e do esgoto por meio de canalizações subterrâneas. Tais ideias foram concebidas

com base em recomendações médicas, não em decorrência de modernização de práticas de engenharia. Os engenheiros e urbanistas passaram então a materializar a nova concepção de drenagem urbana, que ganhou impulso com o tratamento de doenças de veiculação hídrica. A partir da segunda metade do século XIX, diversas cidades europeias passaram então a contar com grandes redes subterrâneas unitárias de esgoto (SILVEIRA, 2000).

Esse conceito chegou ao Brasil ainda no século XIX, e, juntamente com o domínio da hidráulica de condutos e a ideia do controle técnico sobre o meio natural, permeou as reformas urbanísticas ocorridas nessa época. Nesse contexto surgem os projetos de Saturnino de Brito, que obteve êxito nas obras realizadas na cidade de Santos, a qual historicamente sofria com problemas de drenagem (SILVEIRA, 2000). Porém, essas intervenções acabaram por causar impactos adversos onde foram implementadas, principalmente por desconsiderarem o trinômio: meio físico, agentes sociais de produção do espaço e especificidades do meio (ALVES, 2005).

Os conflitos entre as cidades impermeabilizadas e o ciclo hidrológico, aliados à consciência ecológica que começava a despontar, fizeram com que a filosofia higienista passasse a não mais ditar as regras dos projetos relacionados à drenagem urbana nos países ditos “desenvolvidos” (SILVEIRA, 2000). Reflexões sobre conflitos ambientais e a intervenção antrópica nas bacias hidrográficas estabeleceram um novo conceito aplicado à drenagem urbana, imbuído de uma perspectiva ambiental. A aplicação dessa nova abordagem faz necessário integrar aspectos de engenharia, sanitários, ecológicos, legais e econômicos, conectando-se com a concepção e gestão dos espaços urbanos, e tendo o ciclo hidrológico como elemento principal na definição de políticas ligadas à drenagem (GOLDENFUM; TUCCI; SILVEIRA, 2010).

Assim, difundiu-se a ideia de se promover o retardamento dos escoamentos, aumentando o tempo de concentração e, conseqüentemente, diminuindo o pico de cheias, a fim de se evitar os transtornos causados pelas inundações. Mais recentemente, têm ganhado força soluções alternativas que preveem a redução dos volumes do *runoff* por meio da contenção do escoamento superficial no local da precipitação. Estes métodos se baseiam no aumento das áreas de infiltração ou no armazenamento temporário em reservatórios residenciais (CANHOLI, 2005, ROBINSON et al., 2010).

No entanto, no Brasil, o higienismo ainda influencia a concepção dos projetos de drenagem urbana, e provavelmente é uma das principais causas dos problemas institucionais e técnicos na gestão das águas pluviais (NASCIMENTO; BAPTISTA; KAUARK-LEITE, 1999). Muitos engenheiros, na falta de uma visão mais global dos processos que ocorrem na

bacia hidrográfica, ainda seguem a filosofia de que um bom projeto de drenagem urbana é aquele que expulsa a água o mais rápido possível. Há diversos motivos que explicam essa realidade, como o fato de que a concepção ambiental é muito mais difícil e cara de se aplicar, pois preconiza uma abordagem multidisciplinar da drenagem, exigindo a integração do planejamento da drenagem com outros planos e avaliando seus efeitos sobre uma grande extensão territorial. O conceito higienista também torna simples o dimensionamento das obras hidráulicas, pois visa apenas o rápido escoamento das águas. Ainda como agravante tem-se o fato de que o higienismo é muitas vezes mal aplicado no Brasil, por falta de recursos, mau dimensionamento ou falta de manutenção, e as pressões sociais acabam por gerar situações de urbanização desordenada que agravam o problema das inundações. Como consequência dessa visão, usualmente adotam-se medidas como canalização de riachos que causam enchentes. Tais soluções acabam por transferir o problema para regiões à jusante na bacia hidrográfica e tornam as inundações mais rápidas, frequentes e de maior magnitude (SILVEIRA, 2000, TUCCI, 2000).

Desse modo, demonstra-se a urgente necessidade de se planejar ações preventivas onde o processo de urbanização ainda não causou impactos adversos, e ações corretivas, onde o problema já ocorre. Para tanto, é preciso que as decisões em relação à drenagem urbana sejam tomadas considerando a bacia hidrográfica como unidade de planejamento territorial, independente dos municípios que ela engloba. A planificação das medidas necessárias para o controle do escoamento superficial é, em resumo, o objetivo do plano diretor de drenagem urbana que muitas cidades e regiões metropolitanas do Brasil vêm adotando (CANHOLI, 2005, MENDES; GREHS, 2007).

Segundo Wanielista e Yousef (1993), é necessário se definir políticas relativas à drenagem que possam guiar as decisões. Essas políticas devem ser disponíveis ao público e necessitam o estabelecimento de critérios, que, na forma de regulamentações, especificam detalhes a serem considerados nas fases de projeto, operação e manutenção. Exemplos de critérios utilizados em algumas políticas são: definição do volume de escoamento a ser considerado no dimensionamento de obras; definição do tempo de retorno; curva intensidade-duração-frequência a ser utilizada; não ampliar a cheia natural, entre outros. Também é importante que se tenha detalhes sobre o uso e ocupação do solo, diâmetros e comprimentos dos condutos de microdrenagem, declividades das vertentes, entre outros dados. Outra política que deve ser adotada diz respeito ao estabelecimento de um plano financeiro, que determine o dinheiro disponível, quem pagará pelo serviço e quando o dinheiro será gasto. Nesse contexto, Nascimento e Baptista (2002), ao analisar diferentes formas de financiamento do serviço de

drenagem, sugerem a adoção de uma taxa baseada na produção do escoamento superficial, proporcional à superfície impermeabilizada.

Para que o planejamento da drenagem urbana seja apropriado, Wanielista e Yousef (1993) ainda recomendam que sejam realizados quatro “testes” de viabilidade: técnica, econômica, financeira, política e social.

Visando um planejamento adequado da drenagem urbana, um instrumento que pode ser aplicado com essa finalidade é o plano diretor de drenagem urbana. Segundo Walesh (1989), este instrumento é constituído de uma série de documentos que contêm essencialmente, três tipos de recomendações: medidas estruturais, medidas não-estruturais e um plano de implementação, que atribui responsabilidades, organiza um cronograma e determina como as medidas serão realizadas. Para que o plano seja definido, se faz necessário um processo complexo, onde se estabelecem objetivos e padrões, levantam-se dados sobre as características naturais e culturais da área onde se pretende elaborar o planejamento, analisam-se os dados, definem-se os problemas e previsões de cenários futuros, criam-se diferentes alternativas que são comparadas, e se seleciona a melhor combinação de alternativas que irá compor o plano.

Segundo Goldenfum, Tucci e Silveira (2010), um plano diretor de drenagem urbana objetiva primordialmente planejar a alocação de volumes de água dentro da bacia hidrográfica, baseada na dinâmica das ocupações urbanas, na rede de drenagem e nas características do meio ambiente. O plano também deve controlar a ocupação da planície de inundação através de medidas de controle não-estruturais e prever medidas que compatibilizem a convivência da população ribeirinha com inundações nas áreas de baixo risco. Ainda de acordo com os autores, os três produtos principais do plano diretor de drenagem urbana são:

- Plano de ação: indica as ações necessárias para se implantar medidas propostas para áreas críticas. Normalmente inclui um plano de emergência, indicado em situações que requerem soluções rápidas;
- Regulamentação: faz parte das medidas não-estruturais de controle de inundações. Tais medidas devem focar principalmente na regulação da drenagem de novos loteamentos, identificação de áreas verdes para aumentar a infiltração, desenvolvimento da educação ambiental, participação popular no processo de tomada de decisão, e treinamento de engenheiros e arquitetos;

- Manual de drenagem: este manual deve ser desenvolvido para orientar engenheiros sobre os procedimentos que devem ser adotados para o projeto do sistema de drenagem urbana. Deve ainda orientar os órgãos fiscalizadores.

Tucci e Genz (1995) elencam princípios que devem ser seguidos para o desenvolvimento de um bom plano diretor de drenagem urbana. Deve-se considerar a bacia hidrográfica como um sistema, utilizando este recorte como unidade de planejamento da drenagem, integrada com o processo de urbanização. O plano também deve contemplar um horizonte de expansão, considerando o planejamento das áreas a serem ocupadas e densificação das áreas já loteadas. Os autores também frisam que haja um mecanismo de controle permanente de enchentes, garantia de participação popular na elaboração dos planos e que o critério fundamental que embasa a planificação seja a não ampliação da cheia natural. Por fim recomendam as seguintes atividades:

- Análise de sub-bacias urbanas e faixas ribeirinhas, com o estabelecimento de normas de inspeção de projeto e execução de ocupação e obras urbanas;
- Subdivisão da área legislada em distritos, a fim de se que sejam realizados estudos para regulamentar o tipo de ocupação;
- Estabelecimento de equipes para operação e manutenção dos sistemas de drenagem, fiscalização dos projetos, planejamento e acompanhamento.

3.4. Medidas de controle das águas pluviais

Segundo Walesh (1989), as medidas de controle aplicadas às águas pluviais têm por objetivo harmonizar o transporte da água e a função de armazenamento de depressões, lagos, baixadas, canais e várzeas com o espaço urbano e as necessidades da população. Tais medidas englobam obras, planos e ações, e ao longo do tempo muitas foram desenvolvidas visando à solução de problemas de quantidade e qualidade das águas pluviais.

De acordo com sua natureza, as medidas de controle podem ser classificadas em estruturais e não-estruturais, e sua combinação ótima permite à população ribeirinha minimizar suas perdas e ter uma convivência harmônica com o rio. A pesquisa que objetiva essa combinação faz parte do planejamento da drenagem urbana (TUCCI, 2001).

3.4.1. Medidas estruturais

As medidas estruturais normalmente correspondem a grandes obras de engenharia e, portanto, requerem maiores esforços no seu projeto, aprovação de agências governamentais e grandes investimentos de capital na construção e manutenção. Algumas medidas podem agir tanto no controle quantitativo quanto qualitativo das águas pluviais, como por exemplo, bacias de detenção ou retenção que visem também à sedimentação. Devido à sua natureza, tendem a ser aplicadas em áreas onde a urbanização já está consolidada, tendo um caráter mais corretivo do que preventivo (WALESH, 1989).

Essas obras podem ser classificadas em intensivas ou extensivas. As primeiras agem na macrodrenagem, e compreendem medidas que podem acelerar o escoamento, retardar o escoamento ou desviá-lo. Já as medidas estruturais extensivas são aplicadas ao longo da bacia, e procuram modificar as relações entre precipitação e vazão. Tais práticas englobam pequenos armazenamentos, controle de erosão do solo e recuperação de vegetação. Ações que tenham como objetivo tornar as edificações à prova de enchentes podem, de acordo com a abordagem do autor, ser classificadas como estruturais extensivas ou não-estruturais (CANHOLI, 2005; TUCCI, 2001; WALESH, 1989).

Uma relação de medidas estruturais pode ser visualizada a seguir (WALESH, 1989):

- Retificação ou tamponamento de canais;
- Reservatórios de armazenamento;
- Desvio do canal;
- Bacia de sedimentação com detenção ou retenção;
- Sistemas de infiltração.

3.4.2. Medidas não-estruturais

Em contraste com as medidas estruturais, as medidas não-estruturais envolvem poucas obras, ou até nenhuma. Normalmente podem ser implementadas rapidamente, e em algumas situações, unilateralmente por indivíduos ou entidades privadas. Requerem investimentos bem menores, e ao contrário das medidas estruturais, são mais facilmente aplicadas a áreas onde a urbanização ainda não se desenvolveu, sendo assim, essencialmente preventivas. Nesse sentido, muitas das propostas que englobam esse conceito integram tais medidas com um

abrangente planejamento urbano. Assim como no caso das medidas estruturais, algumas não-estruturais podem surtir efeitos positivos tanto nos aspectos quantitativos quanto qualitativos do escoamento superficial. Esse é o caso, por exemplo, da elaboração de mapas de inundação (WALESH, 1989).

Exemplos de medidas não-estruturais usualmente adotadas são (BRAGA, 1999; CANHOLI, 2005; WALESH, 1989):

- Regulamentação do uso e ocupação do solo;
- Sistemas de alerta e previsão de inundações;
- Seguro contra inundações;
- Educação ambiental;
- Elaboração de manuais de drenagem urbana;
- Programas de ações emergenciais;
- Zoneamento de áreas de alto e baixo risco de inundação;
- Estabelecimento de critérios de construção no código de obras.

Tucci e Villanueva (1999) enfatizam o importante papel das medidas não-estruturais ao analisarem diferentes soluções para o controle de inundações nas cidades de União da Vitória e Porto União, ambas no estado do Paraná. Dentre as propostas estudadas, estão: a elaboração de mapas de zoneamento de inundações, associados a restrições e incentivos para modificar o uso e ocupação do solo; previsão de inundações em tempo real com um sistema de alerta; elaboração de um mapa de alerta, para ser usado pela defesa civil juntamente com as previsões em tempo real; e a construção de diques em certas áreas da várzea, sendo esta última, uma típica medida estrutural. Ao comparar as medidas estruturais com as não-estruturais, os autores recomendam a adoção destas últimas, devido aos menores custos envolvidos e menores impactos ambientais. Salientam ainda que alguns impactos relativos a medidas estruturais normalmente não são levados em conta na análise dos projetos, como as alterações na paisagem. Além disso, frisam que muitas vezes a opção pelas medidas estruturais tem fins políticos, pois a construção de obras é muito mais visível pela população, tendo maior apelo em campanhas eleitorais.

Um exemplo que mostra certo descaso das autoridades em relação às medidas não-estruturais ocorreu em Bangladesh. Faisal, Kabir e Nishat (1999) relatam que o plano de ação contra inundações (FAP) proposto após uma grande cheia em 1988, ocorrida na capital, Daca,

dispensou menor atenção às medidas não-estruturais em comparação com as estruturais. Desse modo, diques foram construídos ao lado de dois dos rios responsáveis pelo evento de 1988. Contudo, em 1998, outra inundação resultou em danos ainda maiores que a primeira, demonstrando que, nesse caso, as medidas estruturais não garantiram a proteção da cidade. Ao analisar o evento de 1998, os autores concluíram que muitos dos fatores que contribuíram com os prejuízos estavam relacionados com aspectos não-estruturais do gerenciamento de inundações. Nesse contexto, recomendaram a adoção de medidas como: desenvolvimento de um sistema de previsão e alerta de inundações acoplado a um modelo digital do terreno, para que a população possa visualizar as regiões vulneráveis; regulação do uso e ocupação do solo, evitando-se ocupar depressões presentes no terreno; e educação ambiental, pois se constatou que uma das principais causas da inundação foi a obstrução de galerias pluviais, decorrente da disposição inadequada de resíduos sólidos por parte da população.

3.5. Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano

O plano diretor é concebido como o instrumento básico da política de desenvolvimento e expansão urbana (BRASIL, 2001a). É estabelecido pela lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001, conhecida como “Estatuto da Cidade”, que regulamenta os artigos 182 e 183 da Constituição Federal e determina diretrizes gerais da política urbana. 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 função primordial é garantir que se cumpra a função social da cidade e da propriedade urbana, assegurando aos cidadãos o atendimento de necessidades relacionadas à qualidade de vida, justiça social e desenvolvimento de atividades econômicas. A partir da leitura da realidade local e de um amplo debate com a sociedade, estabelece diretrizes que guiam o uso e ocupação do solo em diferentes setores do município, dentro de uma estratégia que visa cumprir os objetivos citados anteriormente. A espacialização dessas diretrizes corresponde a um macrozoneamento, em que o município é dividido em zonas específicas, cada qual com regras próprias que conduzem sua ocupação (BRASIL, 2002).

O macrozoneamento inicialmente descreve os limites do perímetro urbano do município, circunscrevendo a região em que são aplicáveis as regras da política urbana. A partir daí, delimita macrozonas em que a ocupação é qualificada, incentivada ou coibida. Para tanto é realizado um diagnóstico da cidade, em que se verificam as características existentes

de uso e ocupação do solo, capacidade da infraestrutura instalada, necessidades de preservação do meio ambiente e patrimônio histórico e as condições do meio físico. Assim, pretende-se produzir um conjunto de diretrizes fundamentais que irá guiar o desenvolvimento urbano da cidade, servindo de base para a aplicação dos instrumentos da política urbana e definindo o uso e ocupação do solo (BRASIL, 2002).

Um requisito para que se construa o macrozoneamento é contar com uma base de dados que informe o tomador de decisão sobre a relevância de se ocupar uma zona de determinada forma. É importante que se disponha dos seguintes dados (BRASIL, 2002):

- Dados geomorfológicos, pedológicos e altura do lençol freático;
- Dados relativos aos ecossistemas, com indicação de onde haja áreas de fauna ou flora de interesse estratégico, ou regiões cuja ocupação deva ser monitorada;
- Dados relativos ao atendimento da área urbana pela infraestrutura. Pretende-se, geralmente, que as zonas mais bem providas de infraestrutura sejam as áreas com maior adensamento populacional, para que os investimentos feitos não sejam subutilizados. Dessa forma, este levantamento também pode indicar locais que sofrem com falta de equipamentos urbanos e orientar planos de expansão da malha urbana;
- Dados relativos à situação atual de uso e ocupação do solo, com padrões de ocupação por faixa de renda, assentamentos irregulares, atividades econômicas desenvolvidas etc;
- Dados relativos ao preço da terra.

3.6. Plano Diretor do Município de São Carlos

3.6.1. *Elaboração*

No ano de 2001, a Prefeitura Municipal de São Carlos (PMSC) deu início ao processo de elaboração do Plano Diretor do Município de São Carlos, a fim de se adequar ao Estatuto da Cidade, que estabelece o Plano Diretor como instrumento obrigatório para municípios com população acima de 20.000 habitantes, situados em regiões metropolitanas ou aglomerações urbanas, em áreas de interesse turístico, sob influência de empreendimentos de grande

impacto ambiental ou onde o poder público pretenda aplicar instrumentos previstos no capítulo da Reforma Urbana da Constituição de 1988 (BRASIL, 2001a; PMSC, 2005a).

As atividades tiveram início com a realização de plenárias públicas, visando debater os trabalhos a serem efetuados. Dentre os assuntos abordados, focaram-se principalmente aspectos relacionados ao Estatuto da Cidade, planejamento municipal urbano e rural, e o diagnóstico do município. Além disso, nesse período, foi constituído o Comitê Consultivo, formado por representantes da sociedade civil organizada. Este grupo teve como objetivo debater o diagnóstico, e, ao identificar problemas ou potencialidades, propor novas diretrizes para a formulação do plano. Também foi formada a Comissão Executiva, composta por integrantes da administração pública municipal e responsável por coordenar as ações do governo em relação à elaboração do plano. Dentro dessa comissão, formou-se o Grupo de Trabalho Técnico e Operacional, com técnicos de diferentes setores sob coordenação da Secretaria Municipal de Habitação, que teve como função desenvolver trabalhos de pesquisa, entrevistas, mapeamento e levantamentos, além de organizar os eventos realizados (FABBRO NETO, 2010; PMSC, 2005a).

Outros espaços de discussão criados no contexto da elaboração do Plano Diretor do Município de São Carlos foram reuniões setoriais, organizadas para se discutir o conteúdo do plano com vários segmentos da sociedade. Houve reuniões com representantes da Associação Comercial e Industrial de São Carlos, Conselho Regional dos Corretores Imobiliários, Associação dos Engenheiros e Arquitetos de São Carlos, professores e alunos da UFSCar e da USP, entre outros (PMSC, 2005a).

Após a realização de inúmeros debates entre os grupos, e destes com a sociedade, durante o “Congresso da Cidade” foram formuladas as diretrizes básicas para elaboração do Projeto de Lei, encaminhado finalmente em novembro de 2003. Durante 2004 e 2005 foram realizadas audiências públicas, e após novos debates, apresentaram-se propostas de emendas, originárias tanto do poder legislativo quanto de representantes da sociedade civil organizada. O plano então foi votado e promulgado pelo prefeito no dia 25 de novembro de 2005 (PMSC, 2005a).

3.6.2. *Conteúdo*

A fim de que sejam implementadas as diretrizes gerais, princípios e objetivos determinados para a ordenação territorial do município, o Plano Diretor do Município de São

Carlos dispõe de diversos recursos e instrumentos da política urbana. Nesse contexto, e objetivando o cumprimento da função social da propriedade, o plano foi concebido com os seguintes componentes (PMSC, 2005a):

- Macrozoneamento do município;
- Zoneamento das macrozonas urbana e de uso multifuncional 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 e Planejamento do Desenvolvimento Urbano.

O macrozoneamento do município, conforme comentado anteriormente, regula a expansão urbana através do estabelecimento de zonas que seguem diretrizes específicas. Segundo a lei nº 13.691, de 25 de novembro de 2005, que institui o Plano Diretor do Município de São Carlos, o macrozoneamento divide o território do município de São Carlos considerando a infraestrutura instalada, as características de uso e ocupação do solo, as características do meio ambiente natural e construído e a implementação de ações de planejamento, consolidado nesta lei. A divisão do território do município segue a seguinte classificação (PMSC, 2005b):

- Macrozona urbana:
  - Zona 1: Zona de ocupação induzida: apresenta as melhores condições de infraestrutura da cidade, e assim requer qualificação urbanística para novas ocupações.

Contém em seu interior áreas de uso misto, com grande presença de estabelecimentos de comércio e serviços, em detrimento do uso habitacional na área central. Concentra população de alta renda, e imóveis de interesse histórico e cultural. As diretrizes do plano para esta zona prevêm incrementar o adensamento populacional e ocupar lotes vazios ou subutilizados.

- Zona 2: Zona de ocupação condicionada: apresenta uso predominantemente misto, com grande diversidade no padrão de ocupação. Há a presença de áreas com carência em infraestrutura de drenagem, falta de equipamentos públicos e loteamentos em situação irregular, assim como discontinuidades no sistema viário e fragmentação da malha urbana. Pretende-se, com o plano diretor, o provimento de áreas com infraestrutura apropriadas para habitação popular, adequação dos sistemas de drenagem e viário, e incentivar o adensamento populacional em torno dos eixos mais bem providos de infraestrutura.

- Zona 3: Zona de recuperação e ocupação controlada: é dividida entre as zonas 3A e 3B, caracterizadas por apresentarem fragilidades sociais e ambientais. A zona 3A apresenta características que dificultam sua ocupação, como encostas com alta declividade e solos sujeitos à erosão. Além disso, a região é provida de infraestrutura precária, parcelamentos irregulares, interligação viária insuficiente com as regiões mais centrais da cidade e concentra população de baixa renda. Com isso, o plano diretor prevê recuperação urbana, ambiental e social para esta área, além do estabelecimento de parâmetros urbanísticos que compatibilizem a ocupação urbana com as características do meio. Já a zona 3B apresenta alguns loteamentos em situação irregular, problemas na infraestrutura de drenagem, carência de equipamentos públicos e se localiza em área de proteção e recuperação do manancial de captação superficial do Córrego do Monjolinho. Desse modo, deseja-se restringir a ocupação desta área como eixo de expansão, além de realizar trabalhos de educação ambiental com a comunidade e regulamentar e disciplinar o uso e ocupação do solo, visando à proteção do manancial.

- Macrozona de uso multifuncional rural:

- Zona 4: Zona de regulação e ocupação controlada: é dividida entre as zonas 4A e 4B, ambas com fortes tendências para expansão urbana, cujos usos estão na transição entre o meio rural e o meio urbano. A zona 4A apresenta concentração de

chácaras de recreio e propensão à implantação de condomínios fechados. Há deficiências na drenagem, presença de loteamentos irregulares e a existência de um aterro sanitário. Essa região inspira cuidados especiais, pois nela há a presença de diversas nascentes de corpos d'água. Em relação a esta área, o plano pretende regulamentar e disciplinar empreendimentos que alterem o uso do solo rural, impedir desmembramentos nos parcelamentos já existentes, adequar o sistema viário à malha urbana existente e promover a recuperação ambiental da área do aterro sanitário, após sua desativação. Já a Zona 4B apresenta áreas contíguas ao perímetro urbano e a presença de nascentes. Espera-se uma rápida ocupação desta região, em função de sua proximidade com o Campus II da USP. As diretrizes previstas no plano para esta região são semelhantes às da zona 4A.

- Zona 5: Zona de proteção e ocupação restrita: a exemplo das zonas 3 e 4, a 5 também é dividida em 5A e 5B. Em comum, há o fato de serem áreas de proteção e recuperação de mananciais. A zona 5A, além do uso rural, abrange as nascentes do Córrego do Gregório e localiza-se próxima à área de manancial do Monjolinho, entretanto, situa-se próxima ao meio urbano consolidado. Assim, as medidas indicadas no plano para esta região têm como orientação restringir o adensamento urbano e novos parcelamentos, visando à proteção dos mananciais. A zona 5B compreende parte da área de preservação do manancial de abastecimento da bacia hidrográfica do Córrego do Feijão, além de abranger parte da Área de Proteção Ambiental (APA) do Corumbataí. Nesse sentido, as medidas previstas para esta região, a exemplo da zona 5A, procuram evitar um adensamento populacional, além de prever a regularização de parcelamentos já existentes.

- Zona 6: Zona de produção agrícola familiar: esta zona é predominantemente ocupada por pequenas e médias propriedades rurais voltadas à agricultura familiar. A região compreende nascentes do Ribeirão dos Negros, do Quilombo e do Pântano, e apresenta alguns parcelamentos irregulares. Para esta área, as diretrizes estabelecidas pelo plano têm como objetivo compatibilizar as atividades agrícolas com o meio ambiente, consolidar a agricultura familiar como alternativa à monocultura extensiva, regularizar os loteamentos clandestinos e promover a recuperação e proteção das nascentes.

- Zona 7: Zona de uso predominantemente agrícola: esta zona apresenta grande diversidade de produção agrícola, com predomínio de redes agroindustriais, destacando-se a sucroalcoeira, citrícola, láctea, de carne bovina e avicultura de corte.

Há a presença de parcelamentos irregulares. Além disso, tem grande diversidade de solos, abundância em recursos hídricos e potencial turístico. As diretrizes do plano visam essencialmente compatibilizar o uso turístico, 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.

A delimitação das zonas descritas pode ser visualizada no Anexo A.

Já em relação à ocupação do solo, o Plano Diretor do Município de São Carlos estabelece os seguintes coeficientes: Coeficiente de Ocupação (CO); Coeficiente de Aproveitamento (CA), que se divide em Coeficiente de Aproveitamento Básico (CAB) e Coeficiente de Aproveitamento Máximo (CAM); e o Coeficiente de Permeabilidade (CP).

O CO é calculado pela razão entre a área de projeção da edificação no solo e a área total do terreno. Já o CA representa a relação entre área edificável e a área do terreno. Dentro do CA, tem-se que o cálculo do CAB é feito através da relação entre a área edificável básica e a área do terreno, enquanto o CAM é um fator pelo qual se multiplica a área do lote, obtendo-se assim a máxima área permitida para edificação mediante aplicação dos instrumentos de Outorga Onerosa do Direito de Construir ou da Transferência do Direito de Construir. O CP é obtido pelo cálculo da porcentagem de área impermeável dentro do terreno, e assim se constitui em um parâmetro importante na elaboração de cenários de uso e ocupação do solo visando modelação hidrológica (PMSC, 2005b).

Um resumo dos coeficientes aplicados a cada zona descrita anteriormente está expresso no Anexo B.

3.7. Plano Diretor de Drenagem Urbana Ambientalmente Sustentável do Município de São Carlos

O Plano Diretor de Drenagem Urbana Ambientalmente Sustentável do Município de São Carlos, elaborado em 2011 (PMSC, 2011), pretende auxiliar a Prefeitura Municipal com subsídios técnicos e institucionais na redução dos impactos causados pelas inundações, criando condições para uma gestão sustentável da drenagem urbana.

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. As medidas estruturais propostas consistem na construção de 21 barramentos dentro do perímetro urbano de São Carlos ou nas suas redondezas, a maioria reservatórios de retenção in-line. Tais reservatórios 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. Através de modelação hidrológica realizada pelo *software* DrenÁgua2009 avaliou-se o amortecimento das cheias, sendo usado o método SCS *Curve Number* para determinar o escoamento superficial. A localização dos barramentos e das canalizações propostas pode ser visualizada no Anexo C.

O Plano Diretor de Drenagem Urbana Ambientalmente Sustentável do Município de São Carlos também sugere medidas não-estruturais para a drenagem urbana, tais como:

- Obtenção de recursos financeiros, como por exemplo, a implantação de instrumentos legais de arrecadação visando à manutenção do sistema de drenagem;
- Elaboração de diretrizes para uma política de treinamento e atualização dos técnicos envolvidos na gestão da drenagem urbana;
- Efetivo treinamento dos técnicos, orientando-os para realizar fiscalização, coordenação e gerenciamento das ações previstas no plano;
- Educação ambiental, para que a população se envolva na elaboração dos planos e aplicação de instrumentos legais;
- Orientação para projetos de engenharia, como, por exemplo, obras de retenção de escoamento superficial no lote;
- Elaboração de um manual de drenagem, com diretrizes básicas para projeto de microdrenagem e orientação para profissionais da prefeitura e empreendedores que atuem no planejamento e nos projetos relacionados à drenagem urbana.

3.8. Sistemas de Informação Geográfica e recursos hídricos

SIG, ou Sistema de Informações Geográficas, pode ser definido como um conjunto de ferramentas que têm como função armazenar, recuperar, transformar e emitir informações espaciais. Tais informações geográficas são relativas a objetos do mundo real, especificando seu posicionamento em relação a um sistema de coordenadas e descrevendo informações não aparentes (CÂMARA, 1999).

Estes sistemas realizam o tratamento de dados geográficos e têm a capacidade de recuperar informações através de suas características alfanuméricas e também de sua localização espacial. Assim, para cada objeto geográfico a ser representado, o SIG tem como requisito armazenar seus atributos e representações gráficas associadas. Dessa forma, as informações disponíveis sobre um determinado assunto estão inter-relacionadas com base em suas localizações geográficas. Para tanto é necessário que a geometria e os atributos dos dados estejam georreferenciados dentro do SIG (DAVIS; CÂMARA, 2001).

Os SIGs podem ser aplicados a diversos campos do conhecimento. De uma forma geral, sempre que a espacialização de dados ou atributos em um sistema informatizado for relevante para o problema em questão, há uma oportunidade de se considerar a utilização de um SIG. Desse modo, existem, no mínimo, três grandes maneiras de se utilizá-lo (CÂMARA; DAVIS, 2001; DAVIS; CÂMARA, 2001):

- Ferramenta para produção de mapas;
- Suporte para análise espacial de fenômenos;
- Banco de dados geográficos, com funções de armazenamento e recuperação de informação espacial.

Segundo Maguire (1991), há diversas ideias diferentes a respeito da natureza e escopo da utilização dos SIGs, resultado da enorme gama de aplicação deste instrumento e da heterogeneidade de seus usuários. Portanto, para que um SIG seja definido de forma satisfatória, é necessário resumir suas abordagens díspares na forma de uma série de pontos de vista, cada qual aplicado a uma função. Contudo, o autor afirma que um ponto que une essas abordagens, e que assim, diferencia os SIGs de outros sistemas de informação, é o foco que o SIG tem nas entidades espaciais e suas relações, sendo que seus mecanismos de busca associados à espacialização e suas operações de intersecção de mapas, são características chave de seu funcionamento.

Um dos temas em que a utilização dos SIGs tem sido mais frequente é o planejamento do uso e manejo de recursos naturais, em especial, o gerenciamento de recursos hídricos. O grande potencial da utilização desta ferramenta vem da necessidade de se utilizar uma abordagem sistêmica para se tratar da problemática ambiental urbana. Tal necessidade advém do fato de que o homem e a cidade não estão desligados dos outros elementos que compõem o meio ambiente. Assim, a cidade deve ser vista como um sistema ecológico, dependente de outros sistemas, e inserida em um sistema global (ROCHA, 2003).

Desse modo, os problemas e questões relacionados ao meio ambiente devem ser tratados através do estudo de relações e integrações. Para tanto, as metodologias e filosofias utilizadas na análise e síntese desses problemas têm necessariamente seguido uma abordagem sistêmica. Esta abordagem implica em uma manipulação de grandes quantidades de dados, o que requer a utilização de ferramentas capazes de integrar e processar um elevado número de informações para que os resultados gerados possam servir como suporte ao processo de tomada de decisão. Posto isso, os SIGs aparecem como uma das ferramentas que mais se adequam a esse enfoque sistêmico, pois apresentam características de integração de grande quantidade de dados espaciais e alfanuméricos. Assim, podem ser aplicados especialmente à gestão de bacias hidrográficas, as quais normalmente reúnem diversos municípios e apresentam um grande número de informações que devem ser integradas para que as decisões acerca de seu planejamento territorial sejam as mais adequadas (ROCHA, 2003). Alguns dos fatores que se fazem importantes nesse processo são: a seleção de um nível adequado de planejamento, escolha de modelos analíticos de suporte e a exibição dos mapas resultantes em uma escala apropriada. Para tanto é necessária a formação de uma equipe multidisciplinar (ROBINETTE, 1991).

Segundo Berry (1991), uma das vantagens associadas à utilização dos SIGs dentro do planejamento territorial é a possibilidade de se propor diferentes cenários de desenvolvimento e, assim, avaliar os impactos potenciais de cada um de forma espacializada.

Nesse contexto, é importante destacar a utilização dos SIGs conjuntamente com modelos usados na gestão de recursos hídricos. A capacidade de visualização espacial que os SIGs proporcionam aos usuários lhes propicia um controle maior da entrada dos dados e de sua manipulação (CROSBIE, 1996).

Há diversos exemplos na literatura que ilustram a aplicação de SIGs no âmbito dos recursos hídricos, muitos dos quais associam o sistema a outros modelos. Chen, Hill e Urbano (2009) desenvolveram um modelo de inundação baseado em SIG denominado GUFIM (*GIS-based urban flood inundation model*), composto de um modelo chuva-vazão e um modelo de

inundação. A aplicação desta ferramenta demonstrou sua efetividade ao indicar o padrão das inundações ocorridas no campus da Universidade de Memphis com pouco tempo de processamento. Ademais, o modelo é capaz de produzir arquivos para visualização e edição em *softwares* de Sistemas de Informações Geográficas.

Park e Hur (2011) conceberam um modelo hidrológico distribuído considerando variações espaciais e temporais das chuvas. A utilização do SIG neste estudo foi necessária para se determinar alguns parâmetros da bacia hidrográfica em análise. Com base em um modelo digital do terreno e em mapas pedológicos e de uso e ocupação do solo, foi possível obter as declividades, a direção do fluxo da precipitação efetiva, parâmetros de infiltração do solo e coeficiente de rugosidade de *Manning* para cada célula da representação da bacia hidrográfica. As informações obtidas podem ser exportadas de volta para o SIG a fim de se visualizar a distribuição de vazões na bacia. Com base nos resultados, os autores concluíram que a metodologia proposta pode prover fundamentos para o desenvolvimento de sistemas de previsão de inundações em tempo real.

Merwade, Cook e Coonrod (2008) avaliaram a utilização de técnicas baseadas em SIG para integrar mapas topográficos com seções transversais de rios obtidas através de batimetria. Este procedimento é de suma importância, pois os modelos hidrodinâmicos utilizados para modelação hidráulica necessitam que os dados da geometria do canal e o levantamento topográfico da região do entorno estejam representados em uma superfície contínua.

3.9. Processo de ocupação do município de São Carlos e da bacia hidrográfica do Córrego do Gregório

O processo de ocupação do município de São Carlos teve início durante os movimentos de colonização do território do estado de São Paulo. Num primeiro momento, em fins do século XVIII a área foi colonizada por posseiros que originaram estabelecimentos agrícolas e pecuários com objetivo de abastecer os tropeiros que circulavam por estradas da região. O território atualmente compreendido pelo município era cortado por vias de escoamento da produção das minas, visto que nesta época a mineração era a principal atividade econômica brasileira (DEVESCOVI, 1987).

Contudo, o fator preponderante que efetivou o povoamento da região foi a chegada das plantações de café, dentro do contexto do ciclo cafeeiro da economia brasileira, na segunda

metade do século XIX. O desenvolvimento da nova atividade econômica criava a necessidade de um centro urbano próximo às lavouras. Assim, em 1857 foi levantado o marco inicial da cidade, a capela onde hoje se localiza a Catedral São Carlos Borromeu, na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório. A partir daí, os primeiros loteamentos foram implantados, orientados por uma expansão linear no eixo norte-sul, com um eixo secundário leste-oeste, dando origem aos bairros Vila Nery e Vila Pureza, e um eixo sudoeste, com a Vila Prado. Este último bairro teve seu desenvolvimento creditado à vinda da Companhia Paulista de Estrada de Ferro, que favoreceu a construção de moradias de operários devido à proximidade da estação ferroviária (ALMEIDA, 2000; FALCOSKI, 1988).

O processo de urbanização seguiu em direção ao sul, fruto do início da implantação de um parque industrial na cidade, e com o passar do tempo houve um adensamento populacional na malha urbana central, resultando na instalação de um centro comercial bancário e de serviços nessa região (FALCOSKI 1988).

Dessa forma, até a década de 40, o processo de urbanização do município de São Carlos evidencia a omissão do poder público na formulação de políticas urbanas que visassem à ordenação do uso do solo e à satisfação das necessidades da população em geral. O sistema viário e os loteamentos não levaram em conta as características do meio físico, resultando em declividades exageradas das vias (FALCOSKI, 1988). Segundo Alves (2005), esta prática favorece o aumento da velocidade do escoamento superficial, o que, dentre outros fatores, pode propiciar a ocorrência de inundações.

A partir da década de 40 houve uma ação mais incisiva por parte dos proprietários imobiliários, que, articulados com mecanismos reguladores do poder público, tornaram o processo de expansão urbana mais acentuado nas periferias, criando uma forte segregação espacial. Este processo, resultante de interesses particulares dos proprietários, levou à ocupação de lotes em descontinuidade à malha urbana já existente, criando grandes vazios urbanos.

A urbanização periférica descontínua e com infraestrutura deficiente ou inexistente também marcou as décadas seguintes, sendo acelerada por um rápido crescimento populacional. Segundo dados divulgados pela Prefeitura Municipal de São Carlos (PMSC, 2003), entre 1950 e 1970, a população do município passou de cerca de 50.000 habitantes para 85.000, que se instalaram em áreas inadequadas, agravando problemas de erosão e drenagem. Na década de 70 este cenário de oposição entre a expansão urbana e áreas ambientalmente vulneráveis se agravou com a construção de vias marginais ao longo do

Córrego do Gregório e a invasão de áreas no entorno de cursos d'água (FABBRO NETO, 2010).

Figura 2 – Obras de canalização do Córrego do Gregório. Fonte: Águas da memória (2011a)

Entre 1970 e 2000, a população de São Carlos dobrou, assim como a área ocupada pelo perímetro urbano. A expansão urbana nesse período criou grande pressão em áreas que necessitam cuidados na sua ocupação, como as áreas de manancial do Córrego do Monjolinho. A lógica na ocupação do solo urbano tem seguido, dessa forma, os interesses do mercado imobiliário, sem uma atenção maior ao provimento de infraestrutura adequada. Assim, este processo acaba por causar problemas de mobilidade, moradia e diversos impactos ambientais. Esta situação torna-se crítica nas áreas periféricas, que sofrem com problemas de drenagem, esgotamento doméstico e abastecimento de água, causados essencialmente pela permissividade na legislação municipal de parcelamento do solo e por uma fiscalização técnica ineficaz (FABBRO NETO, 2010; PMSC, 2003).

Por ter sido o palco das primeiras ocupações, a bacia hidrográfica do Córrego do Gregório sofre com inundações há tempos. Mendes et al. (2005) realizaram uma pesquisa sobre o histórico de inundações nesta bacia utilizando os arquivos da Fundação Pró Memória

de São Carlos, onde há um acervo de jornais da imprensa local. Com auxílio de dados de precipitações totais diárias, obtidos junto ao SIGRH (Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos), e consulta ao Sr. José João, que trabalhou como fotógrafo autônomo para alguns jornais antigos de São Carlos, os autores encontraram registros de inundações do Córrego do Gregório que datam de 1947, nos primórdios do processo de expansão urbana da cidade. Porém, a suscetibilidade desta área às inundações não foi considerada durante a urbanização da bacia, visto que houve uma intensa ocupação da várzea do córrego nos anos subsequentes, principalmente devido à construção de avenidas marginais nos anos 70 e grande impermeabilização do solo.

Desse modo, o problema tem se acentuado com o passar dos anos, em razão da progressiva impermeabilização da bacia hidrográfica. As inundações atingem principalmente a região do Mercado Municipal de São Carlos, o que resulta em diversos prejuízos. Righetto e Mendiondo (2004), em consulta a comerciantes estabelecidos nesta região, concluíram que a gravidade do problema faz com que haja uma grande demanda por seguros que forneçam cobertura às inundações. Segundo os autores, as inundações que afetam esta área ocorrem de forma muito rápida, de 15 a 30 minutos. Em face destes problemas percebe-se a vulnerabilidade desta região, e é possível concluir que ela não deveria ter sido ocupada da forma como está atualmente.

Figura 3 – Inundação na bacia do Córrego do Gregório, em região próxima ao Mercado Municipal. Fonte: Águas da memória (2011b)

3.10. Trabalhos realizados na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório

Machado (1981) desenvolveu um modelo hidrológico distribuído determinístico para bacias urbanas e o testou na bacia do Córrego do Gregório. Foram modelados os principais processos do ciclo hidrológico urbano, como infiltração, retenção superficial, geração de escoamento de superfície e propagação do escoamento em sarjetas, galerias e canais. Os resultados obtidos mostraram pequenas diferenças entre os hidrogramas observados e os simulados, indicando uma boa capacidade do modelo de simular o volume total, vazão de pico, tempo de pico e forma do hidrograma.

Barbassa (1991) aprimorou o modelo desenvolvido por Machado (1981), e a partir de sua utilização para modelação hidráulico-hidrológica, simulou o efeito da urbanização em duas bacias hidrográficas no município de São Carlos, a do Córrego do Gregório e do Monjolinho. O autor concluiu que houve um aumento na vazão de pico de 20% para determinada seção do Córrego do Gregório decorrente do aumento da impermeabilização da bacia no período de 1980 a 1990. Esta alteração faz com que, para as condições de urbanização de 1980, uma precipitação com tempo de retorno de 10 anos produza a mesma vazão de pico que uma chuva com 5 anos de tempo de retorno em 1990. Nesse trabalho foi desenvolvido um programa para o cálculo hidrodinâmico, que utilizou as equações completas de Saint Venant, e uma curva IDF, baseada em dados de precipitações registradas no período de 1950 até 1988.

Ao estudar o comportamento de uso e ocupação do solo na bacia do Córrego do Gregório, Oliveira (1999) analisa a importância e possibilidade de se compatibilizar medidas estruturais e não-estruturais, priorizando as últimas. Através de observações de campo, entrevistas com técnicos da Defesa Civil e moradores, e informações disponíveis na bibliografia, a autora promoveu uma discussão sobre a adoção de medidas não-estruturais de contenção de inundações em áreas urbanas, utilizando como cenário a bacia do Córrego do Gregório.

À época da implantação do monitoramento hidrometeorológico na bacia do Córrego do Gregório, realizada pelo Núcleo Integrado de Bacias Hidrográficas, NIBH, vinculado à Escola de Engenharia de São Carlos, EESC, Almeida Neto et al. (2004) realizaram análise de alguns parâmetros do balanço hídrico da bacia do Córrego do Gregório. Através de dados obtidos em 2 estações climatológicas e 1 estação plúvio-fluviométrica, foram avaliadas a precipitação, evaporação, escoamento superficial e armazenamento na bacia durante 5 meses. Tal monitoramento se mostra importante, pois os registros obtidos podem embasar futuras

pesquisas, assim como intervenções do poder público no controle dos prejuízos causados pelas inundações.

O estudo de medidas não-estruturais de controle de inundações também se fez presente nos estudos de Alves (2005) e Boldrin (2005). A primeira criou cenários de uso e ocupação do solo para a bacia do Córrego do Gregório, a saber:

- 1. Bacia em condições naturais, coberta por vegetação de cerrado;
- 2. Urbanização atual, com ocupação urbana parcial da bacia;
- 3 a. Expansão urbana até o limite da bacia considerando as diretrizes presentes no projeto de lei do plano diretor, dado que à época o Plano Diretor do Município de São Carlos ainda não tinha sido promulgado;
- 3 b. Expansão urbana desordenada, sem a aplicação das diretrizes do plano;
- 4 a. Configuração do cenário 3 a, acrescida de medidas não-estruturais, como arborização urbana, manutenção de Áreas de Preservação Permanente ao longo de corpos d'água, aumento da permeabilidade das áreas públicas de loteamentos e aplicação da Reserva de Legal em áreas rurais e urbanas não loteadas;
- 4 b. Configuração do cenário 3 b, acrescido das medidas não-estruturais citadas anteriormente;
- 5 a. Cenário hipotético de planejamento prévio, com a aplicação das medidas não-estruturais desde o início da ocupação urbana e limites de expansão urbana em acordo com o projeto do plano diretor;
- 5 b. Cenário hipotético com aplicação das medidas não-estruturais desde o início da ocupação urbana, porém supondo urbanização de toda a área da bacia hidrográfica.

Boldrin (2005) realizou a simulação hidrológica dos cenários propostos utilizando o modelo IPHS-1 e concluiu que as medidas não-estruturais resultam em reduções significativas dos volumes escoados e dos picos de vazão.

Barros (2005), visando fornecer subsídios para a tomada de decisão no plano diretor municipal, simulou chuvas de projeto e eventos que produziram inundações próximas ao Mercado Municipal de São Carlos em um modelo concentrado (IPHS-1) e em um distribuído (HIDRORAS), a fim de compará-los. Neste trabalho foram estudadas medidas de controle de inundações estruturais, que consistiram em reservatórios de acumulação, e medidas não-estruturais, que corresponderam ao aumento de áreas permeáveis. A autora gerou hidrogramas

e mapeou as áreas inundáveis para cada situação, concluindo que as alterações no fluxo de escoamento devido ao sistema viário são melhor representadas pelo modelo distribuído HIDRORAS.

Ribeiro e Mendiondo (2007) propuseram a aplicação de uma sinaleira ambiental como medida não estrutural de controle de inundações para a bacia do Córrego do Gregório. Tal ação funcionaria como um sistema de alerta antecipado, que emitiria sinais sonoros e luminosos, indicando os possíveis riscos de inundação a partir de dados obtidos em um modelo de previsão hidrometeorológica e da transformação chuva-vazão. Os autores também entrevistaram residentes e comerciantes da região, e verificaram que a adoção deste sistema teve grande aceitação dentre os entrevistados.

Collodel (2009) avaliou diferentes níveis de detalhamento da porção mais alta da bacia hidrográfica do Córrego do Gregório, até as proximidades do Fórum Municipal. Para tanto, a autora utilizou o modelo hidrológico distribuído Storm Water Management Model, SWMM, na transformação chuva-vazão. As diferentes configurações analisadas foram elaboradas a partir de um levantamento intensivo das características de toda a rede de microdrenagem da bacia, como: comprimentos das galerias pluviais e sarjetas, diâmetros das galerias, detalhamento das seções transversais dos cursos d'água e localização das bocas de lobo. Assim, foram estabelecidos 11 diferentes níveis de detalhamento da bacia, os quais foram simulados a fim de se descobrir qual a configuração que produziria resultados mais próximos de eventos observados. Concluiu-se que um maior nível de detalhamento conduziu a uma melhor adequação dos hidrogramas simulados com os observados, o que evidencia a importância da consideração da rede de microdrenagem na modelação de bacias hidrográficas. Também é importante frisar que o levantamento de campo realizado neste estudo constituiu uma grande contribuição a trabalhos posteriores.

Com o objetivo de avaliar a viabilidade da implantação de um modelo de seguros contra inundações, Graciosa (2010) utilizou um SIG e modelação hidráulico-hidrológica para gerar manchas de inundação e mapas de risco na bacia do Córrego do Gregório. A autora propôs um modelo baseado no princípio do seguro indexado, no qual o valor a ser indenizado aos usuários está vinculado a uma variável, neste caso, a vazão máxima de cheia. Ao verificar a mancha de inundação para diferentes períodos de retorno, notou-se que a região do Mercado Municipal é a mais afetada. As áreas próximas à foz do córrego e ao Fórum Municipal, próximo ao cruzamento das ruas Campos Sales e Geminiano Costa também se mostraram críticas. Os resultados obtidos neste estudo mostraram que a metodologia proposta é apropriada para se analisar este modelo de seguro.

3.11. Modelação

Segundo Campos (2009), um modelo é um conjunto de hipóteses que pretende explicar as propriedades de um sistema, sem necessariamente preservar todas as suas características. Para Christofolletti (1999) um modelo é definido como uma representação simplificada do mundo real ou de algum de seus aspectos, de modo que seja possível reconstruir a realidade e prever comportamentos, transformações ou evoluções. O autor também destaca que a construção de um modelo para representar um sistema ambiental expressa uma hipótese científica, a qual necessita ser avaliada, configurando um teste de hipóteses.

Dessa forma, os modelos funcionam como uma ponte entre a observação e as proposições teóricas, devendo ser construídos com objetivos claros, delimitando aquilo que podem prever. Nesse sentido, entre suas funções, destaca-se a de servir como instrumento para o planejamento (CHRISTOFOLETTI, 1999).

Dada sua capacidade de realizar previsões específicas, os modelos possibilitam que se avaliem as consequências da implementação de planos alternativos. Assim, se as simulações realizadas corresponderem à realidade, o modelo criado passa a ser uma importante ferramenta no processo de tomada de decisão, permitindo que se façam escolhas entre os cenários simulados. O modelo também deve compatibilizar uma vasta gama de opções possíveis, para que se possam comparar diversas situações (CHRISTOFOLETTI, 1999).

De acordo com Walters (1971), um modelo pode ser dividido em quatro grupos de equações e procedimentos: forçantes, estado, transferência e parâmetros.

As forçantes, também conhecidas como impulsos, são os dados que compõem as entradas dos modelos e afetam a estrutura do sistema modelado.

O estado é formado por equações que definem as condições atuais do sistema quanto à variável que se pretende analisar.

As equações de transferência têm como finalidade representar os processos que ocorrem dentro do sistema, indicando as mudanças que acontecem em todos os outros componentes.

Por fim, os parâmetros representam valores característicos, sendo assim, constantes das equações ou grandezas associadas a características físicas das variáveis.

A fim de exemplificar esta divisão de grupos, Campos (2009) a aplicou à modelação do sistema da bacia hidrográfica. As variáveis de entrada, ou forçantes, seriam as precipitações e as afluências superficiais e subterrâneas provenientes de fora do sistema em

análise. Exemplos de variáveis de estado podem ser ilustrados pelos volumes de água armazenados em reservatórios ou nos solos. As equações de transferência relacionadas à separação do escoamento são representadas por métodos que calculam a infiltração de água no solo, como as equações do Método *Curve Number* (USDA, 1986) ou o método *Green-Ampt*. Já os parâmetros podem ser exemplificados por dados como a área total de bacia hidrográfica e seu percentual de impermeabilização.

Odum (1988) afirma que muitas vezes um número relativamente pequeno de variáveis é suficiente para se representar sistemas naturais complexos, pois, frequentemente, apenas alguns “fatores chave” controlam grande parte dos processos ocorridos. Desta forma, não se pretende que os modelos sejam representações fiéis do mundo real, mas sim, que sejam simplificações reveladoras dos processos principais, necessários à predição do comportamento do sistema.

A figura apresentada a seguir, extraída do trabalho de Graciosa (2010), ilustra de forma esquemática como os modelos expressam os processos ocorridos no mundo real.

Figura 4 – Representação esquemática de um sistema real através de um modelo. Fonte: Graciosa (2010)

3.11.1. Modelação hidrológica

A modelação hidrológica é uma ferramenta desenvolvida para representar o comportamento da bacia hidrográfica frente a fenômenos naturais complexos, como a precipitação, evaporação, infiltração e escoamento em rios, com o objetivo de melhor entender seu funcionamento e prever condições diferentes das observadas. Seu funcionamento, tal qual o de vários outros tipos de modelo, é baseado na simulação do

sistema físico por meio de funções matemáticas empíricas e conceituais, que auxiliam na modelação de parte do ciclo hidrológico (TUCCI, 1998).

Quando se pretende utilizar um modelo hidrológico, é importante se levar em consideração suas limitações para a seleção de um modelo adequado aos objetivos almejados. A quantidade e qualidade dos dados hidrológicos disponíveis, heterogeneidade física da bacia, diversidade dos processos envolvidos, simplificações na representação espacial das variáveis e fenômenos, entre outros fatores, são determinantes na escolha do modelo a ser utilizado, dada a vasta gama de modelos hidrológicos existentes atualmente (TUCCI, 1998).

Segundo Singh (1995), um modelo hidrológico consistente deve considerar cinco componentes: a geometria do sistema, que envolve as características e processos da bacia hidrográfica; os dados de entrada; as leis vigentes; as condições iniciais e limitantes e os resultados. De acordo com a finalidade do modelo e suas características, alguns dos componentes podem estar combinados.

Singh (1995) acrescenta que os modelos podem ser concentrados ou distribuídos. Os concentrados homogeneízam as características da bacia hidrográfica, sem se preocupar com a variação espacial da vegetação, solos, precipitação, geologia ou topografia ocorrida em seu interior. Assim, um valor médio associado às variáveis é aplicado ao sistema.

Já os modelos distribuídos contemplam a distribuição espacial dos componentes da bacia, levando em consideração as alterações nos valores das variáveis. Contudo, a carência de dados de campo e experimentais aparece como um obstáculo ao desenvolvimento de modelos plenamente distribuídos. Deste modo, existem modelos que homogeneízam certos aspectos, enquanto preservam a variabilidade espacial de outros. Aplica-se a estas ferramentas a denominação de “modelos quase distribuídos” (SINGH, 1995).

3.11.1.1. O Modelo SCS Curve Number

Um dos modelos hidrológicos mais utilizados em estudos e projetos é o método SCS (*Soil Conservation Service*, atual *National Resources Conservation Service*), desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos em 1976. Este método consiste na determinação da precipitação efetiva (precipitação que gera escoamento superficial) e na transformação de chuva em vazão.

A determinação da precipitação efetiva é realizada através das seguintes equações:

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

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

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

Onde:

P_E : precipitação efetiva (mm)

P : precipitação total (mm)

I_a : perdas iniciais por retenção da chuva na bacia (mm)

S : potencial de retenção do solo, após início do escoamento superficial (mm)

CN : parâmetro *Curve Number*

O objetivo das fórmulas acima é determinar a precipitação efetiva de um evento, em função de características do solo que influenciem a infiltração. O uso deste método admite que as perdas iniciais por retenção na bacia sejam 20% do valor total do armazenamento potencial no solo. Portanto, o escoamento superficial é gerado apenas se o valor de precipitação total (P) for maior que as perdas iniciais (I_a).

O máximo potencial de retenção na bacia (e consequentemente, as perdas iniciais) pode ser estimado com a determinação do parâmetro CN (*Curve Number*). Este índice está associado às condições de uso e ocupação do solo, ao tipo hidrológico do solo e à umidade antecedente, relacionada à precipitação acumulada dos últimos cinco dias. Seu valor pode variar entre 0 e 100, visto que quanto maior o número, maior será o escoamento superficial em relação à precipitação total.

O solo pode ser classificado em quatro tipos hidrológicos, a saber:

- A: Solos arenosos com baixo teor de argila, inferior a 8%. Sem rochas, camadas argilosas ou densificadas até 1,5 m de profundidade. Teor de húmus menor que 1%. Produz baixo escoamento superficial.
- B: Solos arenosos menos profundos que os do grupo A com teor de argila inferior a 15%. Ausência de rochas ou camadas argilosas, até 1,5 m de profundidade, mas normalmente

apresenta camada mais densificada até este nível. No caso de terras roxas, o teor de argila pode ser de até 20%.

- C: Solos barrentos, com teor de argila que varia entre 20 e 30%. Não possui rochas ou camadas argilosas impermeáveis até a profundidade de 1,2 m. Para terras roxas o limite pode ser de 40% de teor de argila e ausência de rochas ou camadas impermeáveis até a profundidade de 1,5 m. Pode apresentar camada mais densificada que a apresentada no grupo B.

- D: Solos argilosos, com teor de argila que varia entre 30 e 40% e camada densificada a 50 cm de profundidade. Esta categoria também inclui solos arenosos com camada argilosa quase impermeável ou camada de seixos.

Para a condição de umidade antecedente do solo, o método utiliza três categorias:

- Condição I: Solos secos, em que as precipitações acumuladas dos últimos 5 dias não ultrapassam 15 mm;
- Condição II: situação média dos solos na época de cheias, em que as precipitações acumuladas dos últimos 5 dias totalizam entre 15 e 40 mm. Esta condição é normalmente utilizada para se determinar hidrogramas de escoamento superficial quando são elaborados projetos de drenagem urbana;
- Condição III: Solos úmidos, em que as precipitações acumuladas dos últimos 5 dias ultrapassam 40 mm e as condições meteorológicas não favorecem a evaporação.

As condições de uso e ocupação do solo estão expressas em tabelas no Anexo D. Tais tabelas fornecem os valores de CN para diversos tipos de ocupação e para os quatro grupos hidrológicos. Os valores mostrados indicam o índice CN para a condição II de umidade, o qual pode ser convertido para as demais condições com auxílio das equações a seguir (RIGHETTO, 1998):

$$CN(I) = \frac{4,2 \times CN(II)}{10 - 0,058 \times CN(II)}$$

$$CN(III) = \frac{23 \times CN(II)}{10 + 0,13 \times CN(II)}$$

Onde:

CN(I): CN para condição de umidade I

CN(II): CN para condição de umidade II

CN(III): CN para condição de umidade III

Assim, para que se calcule o escoamento superficial em uma bacia hidrográfica é necessário escolher a condição de umidade anterior do solo, o tipo hidrológico do solo e suas condições de uso e ocupação. Com o valor encontrado na tabela (para condição de umidade II), pode se recorrer às formulas supracitadas a fim de converter o valor de CN para outras condições de umidade. Por fim, encontrado o CN desejado, utilizam-se as equações que calculam o escoamento superficial.

Como as condições de uso e ocupação do solo apresentam certa variabilidade espacial na maioria das bacias, o que implica em regiões com diferentes valores de CN, é necessário calcular um valor médio do *Curve Number* que represente o sistema na sua totalidade. Para tanto, uma média ponderada é calculada levando em consideração o valor de CN de cada região da bacia e sua respectiva área.

3.11.1.2. Hidrograma unitário do SCS

Este método realiza a transformação chuva-vazão, a partir da determinação da chuva efetiva. O hidrograma unitário do SCS, que supõe uma relação linear entre chuvas excedentes e vazões do hidrograma de cheias, segue os princípios básicos da proporcionalidade e da superposição, e, com isso, sua aplicação pode ser generalizada para chuvas de qualquer duração e distribuição temporal (FCTH, 2003).

O princípio da proporcionalidade indica que uma vez conhecido o hidrograma gerado por uma chuva unitária (convenciona-se que seja de 10 mm) é possível gerar o hidrograma de uma chuva qualquer de mesma duração, multiplicando-se as ordenadas do hidrograma unitário pela razão entre os valores das precipitações. Para tanto, o método assume que a duração do escoamento superficial direto (tempo de base) seja o mesmo para chuvas de igual duração, independente da intensidade da precipitação que o gerou.

O princípio da superposição é utilizado quando se deseja obter o hidrograma referente a chuvas de diferentes durações. Para tanto, admite-se que a chuva seja discretizada em diversos intervalos, ou seja, ietogramas de vários blocos. A técnica consiste em obter

hidrogramas parciais de cada bloco de chuva, cada um iniciando juntamente com sua chuva correspondente, e somar as ordenadas de cada hidrograma para que se obtenha um resultante, correspondente à chuva toda.

Os parâmetros referentes ao equacionamento do hidrograma unitário podem ser visualizados no *National Engineering Handbook* (USDA, 2007), elaborado pelo *National Resources Conservation Service*, antigo SCS.

3.11.1.3. O software HEC-HMS

O HEC-HMS é um programa desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América (*US Army Corps of Engineers*) com a finalidade de simular os processos chuva-deflúvio em bacias hidrográficas dendríticas. O *software* realiza a modelação de um sistema de bacias hidrográficas através da separação do ciclo hidrológico em diferentes processos, que podem ser gerenciados pelo usuário. Dessa forma, todos os fluxos de massa e energia presentes no ciclo hidrológico são representados por um modelo matemático, sendo que na maioria dos casos, o usuário pode escolher, dentre várias opções, qual modelo matemático utilizará (USACE, 2010a).

O HEC-HMS pode ser utilizado em uma grande gama de situações, sendo aplicável a grandes e pequenas bacias hidrográficas. Os hidrogramas produzidos podem ser utilizados diretamente ou em conjunto com outros *softwares* para estudos de disponibilidade hídrica, drenagem urbana, previsão de vazões, impactos de urbanização, projetos de vertedores, redução de prejuízos associados a inundações, entre outras aplicações. Além disso, é de domínio público e apresenta grande aceitação em todo o mundo (CAMPOS, 2009; USACE, 2010a).

Para realizar a modelação hidrológica, o HEC-HMS configura a bacia hidrográfica nos seguintes elementos hidrológicos: sub-bacia (*subbasin*), que é uma representação física da bacia hidrográfica; trecho (*reach*), que corresponde a um trecho de canal e conduz vazões nos rios e canais para jusante ao longo da bacia; junção (*junction*), que corresponde a um nó; fonte (*source*), utilizado para introduzir vazão em um ponto do sistema; sumidouro (*sink*), utilizado para representar águas retiradas da bacia, reservatório (*reservoir*); e derivação (*diversion*) (USACE, 2010a).

3.11.2. Modelação hidráulica

O planeamento da drenagem urbana requer que as capacidades de vazão associadas aos canais da macrodrenagem sejam determinadas corretamente. As mudanças existentes na geometria do canal, na planície de inundação e a diversidade de materiais que revestem essas superfícies resultam em mudanças nas condições de escoamento. Portanto, faz-se necessário a utilização de modelos hidráulicos que levem essas condições em consideração, a fim de se compreender com precisão o comportamento da água.

A modelação hidráulica na drenagem urbana pode ser realizada basicamente de duas formas: considerando-se o escoamento permanente ou não permanente.

Segundo Porto (2006), o escoamento permanente é definido como aquele em que a velocidade local em um ponto permanece invariável no tempo. Consequentemente, outros parâmetros hidráulicos como profundidade, vazão, raio hidráulico, entre outros, também se mantêm constantes. Quando as características geométricas do canal, declividade e velocidade não variam ao longo da trajetória, com linhas de fluxo retilíneas e paralelas, diz-se que o escoamento é uniforme. De acordo com Canholi (2005), este regime é usualmente considerado no dimensionamento e verificação da capacidade de vazão de canais, devido à simplicidade de seu equacionamento. Neste caso, a resistência é quantificada pelas equações de *Chézy* ou *Manning*.

Os modelos que representam o escoamento permanente são fundamentados nos princípios da conservação de energia, presente na fórmula de Bernoulli, e da conservação de massa, representado pela equação da continuidade (GRACIOSA, 2010). Estes modelos são comumente empregados no cálculo de remanso em rios, análise de perfil de cheias, escoamento em estiagem e dimensionamento de obras hidráulicas, entre outras aplicações (TUCCI, 1998).

O escoamento não permanente acontece quando a velocidade do fluxo, em determinado ponto, varia com o tempo. Nesta situação, portanto, suas características dependem das coordenadas espaciais do ponto e do tempo. Este regime ocorre, por exemplo, quando há a passagem de uma onda de cheia, condição presente na maioria dos problemas hidrológicos de escoamento superficial e de canais (PORTO, 2006; TUCCI, 1998).

As duas equações que representam este tipo de escoamento são a da continuidade e a da quantidade de movimento, que juntas são conhecidas como equações de *Saint Vénant*. A fim de facilitar a aplicação desse conjunto de equações, algumas simplificações costumam ser adotadas no seu tratamento, como, por exemplo, tratamento unidimensional do escoamento,

desprezando as variações de velocidade nas direções vertical e transversal. Os modelos que consideram todos os elementos das equações de *Saint Vénant* (gravidade, atrito, pressão e inércia do fluxo) são conhecidos como modelos hidrodinâmicos. Neste caso, o sistema de equações formado para representar o escoamento em rios e canais não pode ser resolvido por métodos analíticos, fazendo-se necessário o uso de métodos numéricos que permitem a discretização do rio através de seções (TUCCI, 1998).

3.11.2.1. O software HEC-RAS

Assim como o HEC-HMS, o HEC-RAS também é desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América (*US Army Corps of Engineers*). Este programa tem o objetivo de realizar modelação hidráulica unidimensional para uma rede de rios ou canais, podendo ser utilizado para escoamento permanente, escoamento não-permanente, modelação de transporte de sedimentos e análises de qualidade da água (USACE, 2010b).

A modelação do escoamento permanente tem a função de calcular a lâmina d'água nos canais considerando fluxo uniforme, gradualmente variado ou bruscamente variado, para regimes de escoamento supercrítico e subcrítico. As perdas de energia são calculadas pela equação de *Manning* e pela utilização de coeficientes de contração e expansão. Contudo, em situações onde a variação do nível d'água ocorre rapidamente, utiliza-se a equação da quantidade de movimento. O programa também considera o efeito de pontes, bueiros e barragens no escoamento (USACE, 2010b).

Já a modelação do escoamento não permanente é realizada através de um método hidrodinâmico, com a resolução das equações completas de *Saint Vénant* através de um método numérico de discretização por diferenças finitas em um esquema implícito. O modelo pode considerar os regimes subcrítico, supercrítico ou ambos, e também incorpora os cálculos hidráulicos de pontes, bueiros e outras estruturas, desenvolvidos para o componente de escoamento permanente (USACE, 2010b).

Os principais dados de entrada para o *software* são a geometria de cada seção considerada no canal, a vazão utilizada para a modelação (valores fixos para o escoamento permanente e hidrogramas para o não permanente), condições de contorno e valores do coeficiente *n* de *Manning* para o canal e planície de inundação.

A fim de se acoplar o HEC-RAS a um SIG, e, consequentemente facilitar a edição da geometria de canais, foi desenvolvida a plataforma HEC-GeoRAS. Este programa consiste em uma série de ferramentas para o *software* ArcGIS com o objetivo de processar dados geográficos para serem utilizados no HEC-RAS. Cria-se um arquivo com dados geométricos extraídos de um modelo digital de terreno (MDT) que é importado para o HEC-RAS. Então a modelação hidráulica é realizada, e um novo arquivo gerado pode ser exportado de volta para o ArcGIS, possibilitando uma análise espacial da planície de inundação simulada.

3.11.3. Aplicações de modelação hidrológica e hidráulica

Na literatura há diversas pesquisas que fazem uso da modelação hidrológica e hidráulica. Muitas vezes a mesma pesquisa reúne as duas, utilizando dados dos hidrogramas resultantes da modelação hidrológica como dados de entrada para os modelos hidráulicos.

Nesse contexto, os dois *softwares* descritos anteriormente são amplamente utilizados no meio acadêmico. Knebl et al. (2005) desenvolveram um modelo da bacia hidrográfica do rio San Antonio, no Texas, EUA, com o objetivo de avaliar a aplicabilidade da metodologia proposta para estudos em escala regional. Os autores criaram um processo simplificado em que são integrados dados de precipitação obtidos a partir de medições feitas por radares NEXRAD, que fornecem dados matriciais de precipitações na área da bacia, com transformação chuva-vazão feita pelo HEC-HMS e delimitação da planície de inundação realizada pelo HEC-RAS. Com dados de uso e ocupação do solo e topografia em formato matricial, obtiveram-se hidrogramas para alguns pontos da bacia, com início no dia 30 de junho e fim em 9 de julho de 2002, período em que ocorreram grandes eventos de precipitação. Para tanto, foi utilizado o método SCS *Curve Number*, a fim de se determinar a chuva efetiva, e o algoritmo ModClark na transformação chuva-vazão. Após calibração manual dos parâmetros, os hidrogramas produzidos foram modelados no HEC-RAS que, com a topografia da região, mapeou as manchas de inundação. Os mapas produzidos foram então comparados com imagens de satélite feitas nesse período, a fim de verificar se as áreas inundadas produzidas pelo HEC-RAS correspondiam à realidade. Os autores concluíram que a metodologia proposta obteve sucesso na aplicação em escala regional, devido à proximidade dos resultados simulados com os observados.

Bounds e Gali (2010) descreveram a modelação hidráulico-hidrológica realizada no desenvolvimento de um plano detalhado da bacia hidrográfica (*Detailed Watershed Plan*) do

rio *Little Calumet*, no estado de Illinois, EUA. A partir de cenários com condições futuras de ocupação da bacia, avaliaram cerca de 200 situações, a fim de desenvolver um plano que contivesse informações detalhadas sobre as áreas suscetíveis a inundações e uma lista de medidas a serem tomadas. Para tanto, a simulação hidrológica foi realizada utilizando o HEC-HMS, com o auxílio do *software* ArcGIS na delimitação das bacias hidrográficas. Utilizou-se o modelo SCS *Curve Number* na determinação da chuva efetiva e o método do hidrograma unitário de Clark na transformação chuva-vazão. Os hidrogramas gerados foram calibrados com dados observados e usados como entrada para a modelação hidráulica, realizada com o HEC-RAS. Com o auxílio deste programa e da extensão HEC-GeoRAS, que acopla o HEC-RAS ao ArcGIS, geraram-se manchas de inundação para a região considerando escoamento não-permanente. Para que o processo de modelação hidráulica ocorresse de forma satisfatória, foram feitas pesquisas na área, a fim de verificar todas as estruturas e dimensões dos canais.

Suriya e Mudgal (2012) lançaram mão da modelação hidrológica e hidráulica a fim de verificar os efeitos causados pela urbanização na bacia hidrográfica do rio *Adyar*, em Chennai, na Índia. Com base em um mapa de uso e ocupação do solo elaborado em 1976, uma imagem de satélite obtida no ano de 2005 e um modelo digital de terreno levantado pelo radar SRTM, com resolução espacial de 30 m por 30 m, os autores utilizaram o HEC-HMS para realizar a modelação hidrológica da bacia nessas duas épocas. Para tanto foi usado o *software* ArcGIS, através do qual foram delimitadas as sub-bacias e realizada a classificação de uso e ocupação do solo. As vazões de pico dos hidrogramas simulados pelo HEC-HMS foram usadas como dados de entrada para a modelação hidráulica, realizada pelo *software* HEC-RAS, que considerou escoamento permanente com regime misto. Neste trabalho também foram mapeadas as manchas de inundação referentes a uma mesma chuva, tanto para o ano de 1976 quanto para 2005. Este processo foi realizado com auxílio da extensão HEC-GeoRAS. Ao se comparar a vazão de pico para as condições de urbanização da bacia em 1976, com a vazão máxima simulada para a situação de 2005, percebe-se um significativo aumento do escoamento superficial decorrente da crescente impermeabilização do solo. Tal processo também acarretou em um incremento acentuado das áreas inundáveis, conforme modelado pelo HEC-RAS. Com base nos resultados obtidos, os autores recomendam que o gerenciamento das inundações deva considerar a bacia hidrográfica como um todo, independente dos municípios que ela abrange. Também se concluiu que é necessário um planejamento que ordene o uso e ocupação do solo, a fim de se evitar situações como a ocorrida na bacia do rio *Adyar*.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção é detalhada a metodologia aplicada ao presente trabalho. Primeiramente é descrita a área de estudo, com informações sobre o uso e ocupação do solo atual da bacia do Córrego do Gregório. 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, o processo de delimitação de uso e ocupação do solo é descrito, assim como o zoneamento presente no Plano Diretor do Município de São Carlos, necessário à construção dos cenários. Segue-se a este tópico a explanação acerca das medidas estruturais e não-estruturais levadas em conta no estudo.

Os itens subsequentes tratam da construção dos cenários analisados, indicando quais medidas de controle e valores de CN foram adotados para as sub-bacias em cada um deles. Em seguida foi detalhado o processo de modelação hidrológica e hidráulica realizado no estudo, com a demonstração dos cálculos dos parâmetros necessários.

4.1. Área de estudo

Este estudo foi aplicado a uma parcela da bacia hidrográfica do Córrego do Gregório, o qual nasce a leste da cidade de São Carlos, a aproximadamente 900 m de altitude e percorre cerca de 7 km até sua foz no Córrego do Monjolinho, este também localizado na área urbana da cidade. O curso d'água cruza a área urbana de São Carlos no sentido leste-oeste, passando pelo centro comercial da cidade, região densamente povoada e ocupada por áreas de intenso comércio. A área total de sua bacia hidrográfica é de 18,93 km² e duas regiões com características distintas podem ser identificadas: uma urbanizada e outra em processo de urbanização (GRACIOSA, 2010).

A região em urbanização apresenta área de 10,4 km² e está compreendida entre a cabeceira do córrego e o Fórum Municipal. A região mais a montante (próxima a nascente do córrego) apresenta características rurais, sendo ocupada principalmente por pastagens. Originalmente a região era ocupada por vegetação de cerrado, e atualmente apenas alguns resquícios de mata ciliar (já bastante degradada) podem ser encontrados ao longo do córrego. Mais a jusante, o processo de urbanização encontra-se mais avançado, com a presença de alguns terrenos não ocupados, mas já loteados. Nessa área, o leito menor do córrego tem

seção natural, apesar de sofrer processos erosivos acentuados nas margens. Já o leito maior encontra-se ocupado por avenidas marginais (GRACIOSA, 2010; SANTOS et al., 2008).

A região em processo de urbanização consolidado, compreendida entre o Fórum Municipal e a foz, no Córrego do Monjolinho, sofre frequentemente com problemas de inundação, principalmente no trecho entre o Fórum e o Mercado Municipal. Uma série de intervenções no canal principal, como retificação de seção, estrangulamentos por pontes, alterações na geometria e revestimento do canal, entre outras, levam a modificações no sistema de equilíbrio natural e acabam por aumentar o impacto das enchentes. A intensa impermeabilização do solo nessa parte da bacia, juntamente com uma rede de microdrenagem subdimensionada, aumenta as vazões de pico e diminui o tempo de concentração da bacia, o que contribui sobremaneira com os prejuízos causados por eventos hidrológicos severos (GRACIOSA, 2010).

Tais ocorrências resultam em prejuízos de grandes proporções, pois as regiões mais afetadas pelas inundações compreendem o centro comercial de São Carlos. Desse modo, é possível perceber que a falta de políticas públicas voltadas para o controle de risco de inundações foi marcante no desenvolvimento urbano da cidade, e ainda hoje, o descaso com o tema continua a pautar a ocupação de novas áreas da bacia do Córrego do Gregório.

Neste estudo a bacia não foi considerada em sua totalidade. Como um dos objetivos essenciais deste trabalho é avaliar as áreas inundadas da região do Mercado Municipal de São Carlos, as áreas mais a jusante da bacia hidrográfica não foram contempladas. Assim sendo, a região estudada compreende desde as cabeceiras da bacia até uma seção do córrego próxima ao encontro da Avenida Alfredo Maffei (avenida marginal) com a Rua Visconde de Inhaúma, com uma área total de 17,45 km². Esta área, que corresponde à parcela estudada da bacia do Córrego do Gregório, pode ser visualizada na Figura 5, a seguir:

Figura 5 – Delimitação da bacia do Córrego do Gregório com indicação da hidrografia, Mercado Municipal e Fórum Municipal

Uma importante informação a respeito da área de estudo diz respeito às suas características pedológicas, cujo conhecimento é necessário ao processo de modelação hidrológica. A bacia estudada apresenta predomínio de Latossolo Vermelho Amarelo, com presença de Latossolo Vermelho Escuro próximo aos cursos d'água. Ambos os tipos de solo foram considerados neste estudo como sendo pertencentes ao grupo hidrológico B conforme o método SCS (LORANDI, 1985; SARTORI; LOMBARDI NETO; GENOVEZ, 2005).

4.2. Dados topográficos

Os dados topográficos utilizados no presente trabalho são formados por: banco de dados digitalizados da bacia, fornecido pelo Centro de Divulgação Científica e Cultural (CDCC); mapa digital com curvas de nível de 1 em 1 metro para a região do mercado municipal, levantadas pela empresa OESA (Organização e Engenharia S.A.), a partir de levantamento aerofotogramétrico executado em janeiro de 1970 pela empresa Aeromapa Brasil S.A., e digitalizadas por Graciosa (2010); levantamento topográfico de algumas seções transversais do Córrego do Gregório, realizado com auxílio do Núcleo de Hidrometria, do CRHEA – Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Avançada, centro vinculado à Escola de Engenharia de São Carlos.

As informações obtidas junto ao CDCC, órgão pertencente à Universidade de São Paulo, consistem em um arquivo de formato CAD com a delimitação da bacia hidrográfica do Córrego do Gregório, curvas de nível de 5 em 5 metros, alguns pontos cotados e o mapeamento do sistema viário. Esse conjunto de dados foi utilizado na delimitação das sub-bacias, geração de um modelo digital do terreno da bacia (MDT) e cálculo do tempo de concentração de cada uma, como será detalhado mais adiante.

As curvas de nível de 1 em 1 metro levantadas pela OESA também foram obtidas em arquivo de formato CAD, gentilmente cedido pela Engenheira Graciosa. A autora digitalizou as curvas de nível das áreas adjacentes ao Mercado Municipal de São Carlos com o objetivo de mapear as inundações ocorridas nessa região. O arquivo resultante da digitalização foi então disponibilizado para a realização do presente trabalho, sendo utilizado para o mapeamento de áreas inundáveis através de modelação hidráulica. Este processo será detalhado no item 4.9 – Modelação hidráulica.

O levantamento topográfico das seções transversais do córrego foi realizado com estação total modelo TCR 407 da marca Leica, em 11 seções, a saber: 1 - imediatamente a jusante do destamponamento do córrego, próximo à Rua Visconde de Inhaúma; 2 - na altura da Avenida São Carlos; 3 - na ponte da Rua Dona Alexandrina; 4 - na ponte da Rua São Joaquim; 5 - na ponte da Rua Dom Pedro II; 6 e 7 - imediatamente a jusante e a montante da ponte da Rua Rui Barbosa; 8 - poucos metros a montante da seção anterior, onde há um alargamento da seção do córrego; 9 e 10 - duas seções próximas à ponte da Rua Campos Sales; 11 - a aproximadamente 50 metros a montante da ponte da Rua Campos Sales. A seguir tem-se, na Figura 6, uma indicação das seções transversais levantadas.

Figura 6 – Indicação dos locais onde as seções transversais foram levantadas

4.3. Delimitação das sub-bacias

A delimitação das sub-bacias utilizadas na modelação hidrológica foi uma informação importante obtida a partir de geoprocessamento. A partir dos dados topográficos fornecidos pelo CDCC, levantamento da rede de microdrenagem feito por Collodel (2009) e localização dos reservatórios para amortecimento de cheias, previstos no Plano Diretor de Drenagem Urbana Ambientalmente Sustentável do Município de São Carlos (PMSC, 2011), delimitaram-se as sub-bacias, resultando na configuração expressa a seguir:

Figura 7 – Delimitação das sub-bacias para modelação hidrológica, com numeração utilizada no estudo e indicação da hidrografia

A delimitação das sub-bacias 3, 5, 6, 8 e 9 foi realizada desta forma, pois em seus exutórios planejam-se construir reservatórios para o amortecimento de cheias. Desse modo, para que a simulação destes dispositivos ocorra adequadamente, tal configuração se faz necessária. Maiores explanações acerca dos reservatórios podem ser vistas no item 4.5.3 – Medidas estruturais, enquanto a localização de cada barramento está expressa no Anexo C.

Em seu estudo, Collodel (2009) fez um levantamento detalhado de toda a rede de microdrenagem da bacia do Córrego do Gregório, indicando a localização das bocas de lobo e o traçado da rede. Com esses dados, foi possível traçar as sub-bacias de forma que as áreas de drenagem referentes às bocas de lobo fossem consideradas, como é mostrado na Figura 8, a seguir:

Figura 8 – Exemplo de traçado de sub-bacia em que é considerada a rede de microdrenagem

4.4. Delimitação do uso e ocupação do solo

O processo de delimitação do uso e ocupação do solo foi realizado com base em uma imagem do dia 2 de junho de 2011, obtida através do satélite World View 2. O arquivo da imagem contém uma banda pancromática e quatro multiespectrais: vermelho, verde, azul e infravermelho próximo. A fim de se reconhecer as diferentes feições presentes na bacia do Gregório, foram realizadas composições entre as bandas, as quais passaram por um processo de fusão com a banda pancromática para refinar sua resolução espacial, resultando em *pixels* de 0,5 m por 0,5 m. Esta etapa foi realizada com o auxílio do *software* ArcGIS 9.3.

O ArcGIS 9.3 também foi utilizado na vetorização manual da imagem de satélite. A partir do reconhecimento dos diferentes usos do solo, definiram-se 6 classes: Parques e canteiros, Floresta, Terrenos baldios e demais espaços abertos, Área urbana, Agricultura, e Pastagem.

A classe “Parques e canteiros” compreende as praças e parques presentes na bacia, assim como os canteiros centrais de avenidas e rotatórias. O item “Florestas” é composto por fragmentos florestais, matas ciliares e áreas ocupadas com silvicultura. Os “Terrenos baldios e demais espaços abertos” são formados por terrenos baldios urbanos e algumas áreas rurais com solo exposto, como estradas de terra. A classe “Área urbana” abrange os loteamentos urbanos ocupados e as vias pavimentadas. Já a classificação “Agricultura” é formada pelas lavouras circunscritas à área de estudo, e, por fim, o item “Pastagem” compreende as áreas de pasto, ocupadas por pecuária extensiva.

O mapa resultante deste processo de geoprocessamento da bacia do Córrego do Gregório pode ser visualizado na Figura 9, onde se vê a delimitação de cada classe. A partir da classificação do uso do solo da área de estudo, é possível atribuir um valor de CN a cada sub-bacia do sistema, etapa que será exposta em maiores detalhes posteriormente.

Figura 9 – Uso do solo na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório com base em imagem de satélite de 2 de junho de 2011

As áreas correspondentes a cada categoria utilizada na classificação do uso do solo, assim como suas porcentagens em relação à área total, podem ser visualizadas na tabela a seguir:

Tabela 1 - Áreas e porcentagens correspondentes a cada classe de uso do solo

Classe de uso do solo	Área (m²)	Porcentagem (%)
Parques e canteiros	400.887	2,30
Terrenos baldios e demais espaços abertos	2.801.336	16,06
Área urbana	8.453.181	48,46
Agricultura	694.977	3,98
Floresta	1.948.072	11,17
Pastagem	3.144.028	18,03
Total	17.442.248	100

Ao analisar os dados gerados pela interpretação da imagem de satélite, percebe-se que a área de estudo apresenta significativa ocupação urbana, principalmente nas regiões mais a jusante da bacia hidrográfica. Esta área corresponde à porção da cidade com maior adensamento populacional, além de abrigar o centro comercial de São Carlos.

As regiões a montante na bacia hidrográfica concentram os usos essencialmente rurais, com predomínio de pastagens. Também se fazem presentes lavouras e matas ciliares dos córregos que ali nascem, como os Córregos do Sorregotti, Lazarini e o próprio Gregório.

Considerando esta classificação do uso do solo e a delimitação das sub-bacias apresentada anteriormente, é possível definir a porcentagem que os diferentes tipos de uso representam para cada sub-bacia. Os resultados que expressam a porcentagem de área ocupada por cada classe nas sub-bacias, assim como suas áreas totais, podem ser visualizados na tabela a seguir:

Tabela 2 - Área das sub-bacias e porcentagem relativa a cada classe de uso do solo

Sub-bacia	Área total (m²)	Parques (%)	Terrenos baldios (%)	Área urbana (%)	Agricultura (%)	Floresta (%)	Pastagem (%)
1	1.597.795	0,00	5,14	2,24	22,92	19,11	50,59
2	1.349.366	0,00	1,55	0,94	20,21	17,47	59,83
3	865.454	1,38	14,91	13,21	0,00	18,65	51,85
4	392.052	1,36	10,80	26,53	0,00	21,07	40,24
5	188.991	0,00	3,00	1,08	12,29	9,55	74,07
6	645.155	7,79	39,06	27,02	2,22	6,17	17,74
7	2.214.448	0,53	27,44	42,82	0,06	6,70	22,45
8	538.384	0,00	10,13	16,24	0,00	62,72	10,91
9	363.343	0,84	13,39	50,07	0,20	21,82	13,68
10	718.825	3,84	12,54	73,27	1,28	9,07	0,00
11	676.579	2,73	17,28	79,46	0,00	0,54	0,00
12	899.996	11,76	5,03	81,61	1,01	0,58	0,00
13	1.190.867	3,22	3,28	91,85	0,00	1,64	0,00
14	5.038.564	2,03	24,88	62,90	0,00	8,78	1,40
15	765.842	0,77	5,78	93,45	0,00	0,00	0,00

Através da análise da Tabela 2, percebe-se que as sub-bacias 10, 11, 12, 13, 14 e 15 são consideravelmente urbanizadas. Tais bacias localizam-se nas porções mais a jusante na bacia hidrográfica do Gregório, onde estão as áreas mais adensadas e o centro comercial de São Carlos. Já as sub-bacias 1, 2, 3, 4 e 5 são predominantemente rurais, com uso do solo essencialmente voltado a pastagens. Essas regiões localizam-se nas áreas mais a montante da bacia do Gregório, próximas às suas cabeceiras. As demais sub-bacias encontram-se numa região de transição entre o rural e o urbano.

Estes dados levantados da imagem de satélite foram levados em consideração para se construir o Cenário 1 – Atual, o qual serviu de base para simulação hidrológica e hidráulica. A montagem dos cenários, com suas diferentes previsões para o uso e ocupação do solo, está expressa no tópico 4.5.4. – Gênese dos cenários e cálculo do CN.

4.5. Cenários prospectivos

A proposição de cenários de uso e ocupação do solo da bacia do Gregório teve como base o zoneamento presente no Plano Diretor do Município de São Carlos, medidas estruturais do Plano Diretor de Drenagem Urbana Ambientalmente Sustentável do Município de São Carlos e medidas não-estruturais propostas por Alves (2005). É importante destacar que os cenários presentes neste trabalho foram baseados nos cenários propostos por Alves (2005) e simulados por Boldrin (2005), e assim, apresentam muitas semelhanças com os cenários dos autores mencionados.

4.5.1. Zoneamento

Conforme apresentado no item 3.6. – Plano Diretor do Município de São Carlos, o zoneamento do Plano Diretor do Município de São Carlos divide seu território nas seguintes zonas: Zona 1 - Ocupação induzida, Zona 2 - Ocupação condicionada, Zona 3A - Recuperação e ocupação controlada, Zona 3B - Recuperação e ocupação controlada, Zona 4A - Regulação e ocupação controlada, Zona 4B - Regulação e ocupação controlada, Zona 5A - Proteção e ocupação restrita, Zona 5B - Proteção e ocupação restrita, Zona 6 - Produção agrícola familiar e Zona 7 - Uso predominantemente agrícola. Dessas, as Zonas 1, 2, 3A, 3B, 5A, 5B e 6 se fazem presentes na área de estudo, conforme indicado na Figura 10, a seguir:

Figura 10 – Zoneamento do Plano Diretor do Município de São Carlos dentro da área de estudo

4.5.2. Medidas não-estruturais

As medidas não-estruturais propostas neste estudo são baseadas nas encontradas nos trabalhos de Alves (2005) e Boldrin (2005). Para compor os cenários que as utilizam, foram escolhidas as seguintes medidas:

- Averbação de reserva legal nas áreas ainda não ocupadas da bacia hidrográfica;
- Considerar um terço das áreas públicas como área verde.

Pelo Código Florestal, na região de São Carlos a reserva legal deve corresponder a 20% da propriedade rural, e, uma vez averbada, não pode ser suprimida, mesmo quando o seu entorno sofre processo de loteamento (BRASIL, 2001b).

Já a questão das áreas públicas é contemplada no Plano Diretor do Município de São Carlos. Segundo essa lei, 18% da área dos novos loteamentos deve corresponder a áreas públicas, das quais 10% é destinada ao uso institucional e 8% a áreas de lazer. Dessa forma,

propõe-se como medida não estrutural que um terço dessas áreas seja ocupado com vegetação, totalizando 6% das áreas dos novos loteamentos.

4.5.3. Medidas estruturais

As medidas estruturais consideradas na elaboração dos cenários são constituídas por 5 reservatórios de retenção *in-line*, cujos projetos encontram-se na versão preliminar do Plano Diretor de Drenagem Urbana Ambientalmente Sustentável do Município de São Carlos. Os barramentos propostos localizam-se no Córrego do Sorregotti (1 reservatório), Córrego do Lazarini (2 reservatórios) e no próprio Gregório (2 reservatórios). A localização destes dispositivos pode ser visualizada no Anexo C, onde os reservatórios mencionados são identificados por G1 - B 93.5, G2 - B 83.5, S1 - B 84.5, La1 - B 97.5 e La2 - B 98.5.

O plano contém informações necessárias à modelação dos reservatórios, tais como curvas cota-volume e o projeto das descargas de fundo e vertedores das barragens, os quais permitem calcular as curvas cota-descarga ou volume-descarga de cada reservatório.

As curvas cota-área e cota-volume de cada reservatório podem ser visualizadas nas figuras 11 a 15, a seguir:

Figura 11 – Curvas cota-área e cota-volume do reservatório G1 - B 93.5. Fonte: PMSC, 2011

Figura 12 – Curvas cota-área e cota-volume do reservatório G2 – B. 83.5. Fonte: PMSC, 2011

Figura 13 – Curvas cota-área e cota-volume do reservatório S1 – B. 84.5. Fonte: PMSC, 2011

Figura 14 – Curvas cota-área e cota-volume do reservatório La1 – B. 97.5. Fonte: PMSC, 2011

Figura 15 – Curvas cota-área e cota-volume do reservatório La2 – B. 98.5. Fonte: PMSC, 2011

A relação entre o nível da água e a vazão foi determinada com base em Porto (2006), que fornece as equações que calculam a vazão veiculada pelas descargas de fundo e vertedores de cada reservatório. A equação referente às descargas de fundo, conhecida como *lei dos orifícios* está expressa a seguir:

$$Q = C_d A \sqrt{2gH}$$

Onde:

Q: Vazão (m³/s)

C_d: Coeficiente de descarga (adimensional)

A: Área da seção transversal da tubulação de descarga (m^2)

g: Aceleração da gravidade (m/s^2)

H: Diferença de nível entre a superfície do reservatório e a linha de centro da seção de saída da descarga de fundo (m)

Para as descargas de fundo em questão – que consistem em tubulações – do ponto de vista prático, considera-se o escoamento sujeito à lei dos orifícios, em que o efeito das perdas de carga está embutido no coeficiente C_d . Nos casos em que o resultado da divisão do comprimento (L) pelo diâmetro (D) da tubulação está entre 5 e 100, a estrutura é considerada como *tubo muito curto*, que é sujeito à lei dos orifícios. Neste caso, a determinação dos coeficientes C_d pode ser consultada na obra de Lencastre² (1972 apud PORTO, 2006), que fornece os valores de C_d para condutos circulares de concreto em aresta arredondada e aresta viva, sendo esta última a empregada nos projetos. Mostra-se na Tabela 3, a seguir, para cada reservatório, os valores de comprimento (L), diâmetro (D), o resultado da divisão de um pelo outro (L/D) e os valores de C_d utilizados nos cálculos:

Tabela 3 - Valores de comprimento (L), diâmetro (D), resultado da divisão de um pelo outro (L/D) e coeficientes de descarga (C_d) das descargas de fundo de cada reservatório

Reservatórios	L(m)	D(m)	L/D	C_d
G1 – B 93.5	56,30	0,80	70,38	0,58
G2 – B 83.5	27,35	0,80	34,19	0,67
S1 – B. 84.5	38,80	0,80	48,50	0,63
La1 – B 97.5	20,20	0,80	25,25	0,70
La2 – B 98.5	27,10	0,80	33,88	0,67

É importante destacar que os valores de C_d foram obtidos por meio de interpolação e extrapolação dos dados presentes na tabela construída por Lencastre, pois esta não contempla nenhum dos valores de L e D utilizados neste estudo.

Visto que a tubulação de descarga se encontra junto ao fundo, ocorre a contração incompleta do jato que escoar pelo orifício. Portanto é necessário que se faça uma correção no coeficiente de descarga C_d , a fim de se levar em conta estes efeitos. Esta correção é realizada com a equação a seguir, desenvolvida para orifícios circulares (PORTO, 2006):

² LENCASTRE, A. **Manual de Hidráulica Geral**. São Paulo: Edgard Blücher, 1972. 411 p.

$$C_d^* = C_d(1 + 0,13K)$$

Onde:

C_d^* : Coeficiente de descarga corrigido (adimensional)

K: Coeficiente que expressa a relação entre a parte do perímetro em que há supressão da contração e o perímetro total do orifício, considerado igual a 0,25 para orifícios circulares junto ao fundo do canal (adimensional)

Dessa forma, o cálculo do coeficiente de descarga corrigido resultou nos valores apresentados na Tabela 4, a seguir:

Tabela 4 - Coeficientes de descarga corrigidos (C_d^*) para os descarregadores de fundo de cada reservatório

	Reservatórios				
	G1 – B 93.5	G2 – B 83.5	S1 – B. 84.5	La1 – B 97.5	La2 – B 98.5
C_d^*	0,60	0,69	0,65	0,72	0,69

As equações dos vertedores também foram estabelecidas com base em Porto (2006). O reservatório G1 – B 93.5 apresenta um vertedor com perfil padrão Creager ou WES, enquanto todos os outros têm vertedores de soleira espessa. O equacionamento dos vertedores tipo Creager ou WES é visualizado a seguir:

$$Q = C L_v h^{3/2}$$

$$C = 2,215 \left(\frac{h}{h_d} \right)^{0,148}$$

Onde:

Q: Vazão (m^3/s)

C: Coeficiente de vazão (adimensional)

L_v : Largura do vertedor (m)

h: Carga sobre a soleira (m)

h_d : Carga estática associada à vazão de projeto (m)

Os vertedores do tipo soleira espessa horizontal têm sua vazão de descarga calculada pela seguinte equação:

$$Q = C 1,704 b h^{3/2}$$

Onde:

b: Largura do canal (m)

C: Coeficiente de vazão (adimensional)

O coeficiente de vazão é obtido a partir de tabelas que relacionam este parâmetro com a carga sobre a soleira e com seu comprimento, considerado igual a 0,9 metros para todos os reservatórios que contam com este tipo de vertedor. A tabela utilizada neste estudo está presente em Porto (2006).

Desse modo foi possível construir as curvas que expressam a relação entre cota-descarga e, conseqüentemente, volume-descarga. O cálculo destas últimas é necessário à modelação hidrológica realizada pelo programa HEC-HMS, conforme será mais bem explicado adiante. As curvas que relacionam o volume armazenado no reservatório com a vazão de descarga podem ser vistas nas Figuras 16 a 20, a seguir:

Figura 16 – Curva volume-descarga para o reservatório G1 – B 93.5

Figura 17 – Curva volume-descarga para o reservatório G2 – B 83.5

Figura 18 – Curva volume-descarga para o reservatório S1 – B 84.5

Figura 19 – Curva volume-descarga para o reservatório La1 – B 97.5

Figura 20 – Curva volume-descarga para o reservatório La2 – B 98.5

4.5.4. Gênese dos cenários e cálculo do CN

O cálculo do CN das sub-bacias de cada cenário foi baseado no resultado da foto-interpretção da imagem de satélite e no zoneamento do plano diretor. Para tanto, foram utilizadas tabelas feitas pelo USDA (1986), presentes no Anexo D, que informam o valor de

CN de diversos tipos de uso do solo, para os quatro grupos hidrológicos do solo e condição de umidade antecedente II. Calculou-se um valor de CN para cada zona de acordo com as especificações de cada cenário, considerando o grupo hidrológico do solo B. Os resultados destes cálculos, assim como as explicações acerca da determinação do uso do solo para cada cenário estão expressos nos tópicos adiante.

4.5.4.1. Cenário 1 – Atual

Este cenário representa as condições atuais de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório. O cálculo do CN de cada sub-bacia foi realizado a partir da classificação do uso do solo, feita manualmente com base na imagem de satélite, como explicado anteriormente. Atribuiu-se um valor de CN a cada feição presente na imagem a partir de tabelas elaboradas pelo USDA (1986), as quais podem ser vistas no Anexo D.

A classe “Área urbana” compreende, conforme já mencionado, os loteamentos ocupados e as vias pavimentadas. Através da vetorização da imagem de satélite, estimou-se que as vias pavimentadas ocupam 16,54% da superfície abrangida por esta classe, e, segundo a classificação do USDA, apresenta CN igual a 98. Os 83,46% restantes, referentes aos lotes ocupados, tiveram suas áreas permeáveis estimadas com base no estudo de Garotti, Imoto e Barbassa (2007). Os autores obtiveram as porcentagens da área impermeável diretamente conectada (AIDC), área impermeável não conectada (AINC) e área permeável (AP) para diversos tipos de uso do solo na cidade de São Carlos, conforme indicado na tabela a seguir:

Tabela 5 - Valores percentuais de AIDC, AINC e AP obtidos para São Carlos

Áreas homogêneas	AIDC (%)	AINC (%)	AP (%)
Misto	84,9	7,8	7,2
Residencial $\leq 125 \text{ m}^2$	94,3	0,2	5,5
$125 < \text{Residencial} \leq 200 \text{ m}^2$	72,6	14,7	12,7
$200 < \text{Residencial} \leq 300 \text{ m}^2$	87,7	6,2	6,1
$300 < \text{Residencial} \leq 400 \text{ m}^2$	81,8	10,5	7,6
$400 < \text{Residencial} \leq 600 \text{ m}^2$	74,3	15,0	10,6
$600 < \text{Residencial} \leq 1200 \text{ m}^2$	60,8	30,8	8,5
Residencial $> 1200 \text{ m}^2$	72,5	20,3	7,1

Fonte: GAROTTI; IMOTO; BARBASSA, 2007

Assim, a classe "Área urbana" foi dividida nas seguintes regiões, para as quais se calculou um valor representativo de áreas permeáveis e impermeáveis: Vila Prado, Jardim São Carlos, Jardim Macarengo, Vila Santo Antônio e Vila Faria, Jardim Cardinali e Porta do Sol, Parque dos Timburis, Jardim Tangará, Jardim de Cresci e Azulville, Vila Monteiro, Jardim Cruzeiro do Sul e Misto (região próxima à Av Getúlio Vargas, onde há indústrias, residências e estabelecimentos comerciais).

Para cada região, mediu-se a área de alguns lotes com a imagem de satélite, a fim de se obter a porcentagem relativa a cada tipo de ocupação indicado na Tabela 5. Com base nestes resultados foi calculada a porcentagem de áreas permeáveis para cada diferente região da bacia, às quais foi atribuído um valor de CN igual a 61, associado a áreas gramadas em boas condições. Às áreas impermeáveis (diretamente conectadas e não conectadas), o valor de CN estabelecido foi 98. Na Tabela 6, a seguir, indicam-se para cada região da área urbana, as porcentagens de área permeável (AP), área impermeável (AI) e o CN médio.

Tabela 6 - Áreas permeáveis, impermeáveis e CN médio das diferentes regiões

Região	AP (%)	AI (%)	CN médio
Vila Prado	8,12	91,88	95,00
Jd São Carlos	8,36	91,64	94,91
Jd Macarengo	9,20	90,80	94,60
Vila Sto Antonio e Vila Faria	8,35	91,65	94,91
Jd Cardinali e Porta do Sol	7,73	92,27	95,14
Parques dos Timburis	7,49	92,51	95,23
Jd Tangará	9,36	90,64	94,54
Jd de Cresci e Azulville	8,67	91,33	94,79
Vila Monteiro	8,21	91,79	94,96
Jd Cruzeiro do Sul	8,43	91,57	94,88
Misto	7,20	92,80	95,34

4.5.4.2. Cenário 2 – Plano diretor

O Cenário 2 – Plano diretor, procurou representar a ocupação futura da bacia do Córrego do Gregório se for seguido o zoneamento das macrozonas rural e urbana, previsto no Plano Diretor do Município de São Carlos. Assim, foram mantidas as áreas classificadas como “Área urbana” e “Parques e canteiros” do Cenário 1, porém foi alterado o uso de todas as outras de acordo com as diretrizes do plano.

As áreas das Zonas 1 - Ocupação induzida, 2 - Ocupação condicionada e 3A - Recuperação e ocupação controlada, foram divididas da seguinte forma: 18% para áreas públicas, sendo 3% permeável (CN 61) e 15% impermeável (CN 98), conforme estabelecido por Alves (2005); 16,54% para vias pavimentadas (CN 98) e 65,46% para os lotes. Estes últimos, segundo o plano diretor, devem ter 15% de áreas permeáveis (CN 61), ficando os outros 85% como áreas impermeáveis (CN 98). Desse modo, o cálculo do CN médio para essas zonas resultou num valor de 93,26. A porcentagem referente às áreas vegetadas foi de 12,82%, parâmetro importante no cálculo do tempo de concentração das sub-bacias, conforme será visto adiante.

A Zona 3B – Recuperação e ocupação controlada, também apresentou os mesmos 18% destinados às áreas públicas, com 3% permeável e 15% impermeável; 16,54% para vias pavimentadas e 65,46% para os lotes, adotando-se os mesmos valores de CN usados nas Zonas 1, 2 e 3A para as áreas públicas. Contudo, nessa zona, o coeficiente de permeabilidade (CP) foi dado da seguinte forma: 15% para lotes com até 125 m²; 30% para lotes maiores que 300 m²; e para os lotes cuja área está entre 125 e 300 m², o coeficiente foi dado segundo a equação a seguir, presente no Anexo B, que indica os coeficientes de cada zona do plano diretor (PMSC, 2005):

$$CP = 0,0857A_l + 4,286$$

Onde:

A_l: Área do lote (m²)

A fim de se estabelecer um CP representativo a todos os lotes da Zona 3B, foi medida a área de diversas parcelas da zona e calculada uma média, que resultou em 168,32 m². Dessa forma, aplicando-se a equação anterior, chegou-se a um valor de CP de 18,71% para os lotes da Zona 3B. Esta zona também apresenta um coeficiente de cobertura vegetal (CCV) igual a

10%, o que significa que enquanto 18,71% da área de cada lote deve ser permeável, pelo menos 10% dessa área deve ser coberta com vegetação. Assim, se atribuiu CN igual a 56 – referente a vegetação arbustiva – para 10% da superfície dos lotes; CN de 61 para 8,71%, que representa as áreas permeáveis que não estão computadas no CCV; e CN 98 para as áreas impermeáveis, as quais cobrem 81,29% da superfície dos parcelamentos. O cálculo do CN médio da Zona 3B resulta, portanto, no valor de 92,03. Já as áreas cobertas com vegetação correspondem a 15,24% do total da zona.

As Zonas 5A e 5B - Proteção e ocupação restrita, foram divididas da seguinte forma: 18% para áreas públicas, sendo 3% permeável (CN 61) e 15% impermeável (CN 98); e o restante, que compreende 82% da região, foi destinado a chácaras de recreio. As chácaras apresentam CP e CCV igual a 50%, o que significa que metade de suas áreas – correspondente a 41% do total das zonas – deve ser coberta com vegetação. Neste caso, atribuiu-se às regiões vegetadas um valor de CN igual a 55, que corresponde a florestas em boas condições, segundo a classificação presente no Anexo D. A outra parcela da superfície das chácaras, também 41% do total, foi considerada como área impermeável, com CN igual a 98. Assim, o cálculo da média ponderada dos CNs destas zonas resulta num valor de 79,26, e as áreas vegetadas cobrem 44% da superfície.

À Zona 6 – Produção agrícola familiar, foi atribuído um CN de 75, referente a culturas plantadas em curvas de nível em boas condições, situação verificada na imagem de satélite e através de visitas a campo. A esta zona, a porcentagem de área coberta por vegetação foi considerada como 100%.

Este cenário também considerou o estabelecimento de Áreas de Preservação Permanente (APPs) em uma faixa de 30 metros ao longo dos corpos d'água da bacia, e 50 metros ao redor das nascentes, conforme estabelece a Lei nº 7803, que altera o Código Florestal (BRASIL, 1989). A essas áreas foi dado CN relativo a florestas em boas condições, igual a 55. Neste cenário não foram consideradas desapropriações, portanto as APPs já invadidas por áreas urbanas não foram alteradas.

A seguir, na Figura 20, pode-se ver um mapa que indica as diferentes classes de uso do solo utilizadas na construção deste cenário:

Figura 21 – Configuração de uso e ocupação do solo aplicada ao Cenário 2, com indicação das zonas do plano diretor e delimitação das sub-bacias

4.5.4.3. Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais

O Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais, pretendeu simular uma situação futura em que são aplicadas as diretrizes de zoneamento do Plano Diretor do Município de São Carlos, e os reservatórios de retenção idealizados no Plano Diretor de Drenagem Urbana Ambientalmente Sustentável do Município de São Carlos. Este cenário apresentou exatamente a mesma forma de uso e ocupação do solo do Cenário 2 – Plano diretor, descrita no tópico anterior. A diferença entre os dois é a presença dos reservatórios descritos no item 4.5.3. – Medidas estruturais, no exutório das sub-bacias 3, 5, 6, 8 e 9.

Neste cenário, o reservatório S1 - B 84.5 encontra-se no exutório da sub-bacia 3, o reservatório G1 - B 93.5 está no exutório da sub-bacia 5, o G2 - B 83.5 na sub-bacia 6, o La1 - B 97.5 na sub-bacia 8 e o La2 - B 98.5 no exutório da sub-bacia 9.

4.5.4.4. Cenário 4 – Plano diretor e medidas não-estruturais

A construção deste cenário contemplou a utilização das medidas não-estruturais mencionadas no item 4.5.2. – Medidas não-estruturais para as regiões ainda não ocupadas da bacia do Gregório. A delimitação do uso do solo utilizada para este cenário é essencialmente a mesma do Cenário 2, conforme visto na Figura 21, porém os valores de CN e as porcentagens referentes a áreas cobertas com vegetação são diferentes para as zonas, ainda que as frações dos novos loteamentos destinadas a áreas públicas e vias pavimentadas continuem as mesmas.

No Cenário 4, as áreas das Zonas 1 - Ocupação induzida e 3A - Recuperação e ocupação controlada, foram divididas da seguinte forma: 18% para áreas públicas, sendo 6% permeável (CN 61) e 12% impermeável (CN 98); 16,54% para vias pavimentadas (CN 98) e 65,46% para os lotes. Estes últimos, com 15% de áreas permeáveis (CN 61), ficando os outros 85% como áreas impermeáveis (CN 98). Assim, o cálculo do CN médio para essas zonas resultou num valor de 92,15. A porcentagem referente às áreas vegetadas foi de 15,82%.

O cálculo do CN da Zona 3B foi realizado da mesma maneira como está demonstrado no item 4.5.4.2. – Cenário 2 – Plano Diretor, com a diferença de que as áreas públicas foram compostas de um terço de áreas vegetadas – 6% permeável (CN 61) e 12% impermeável (CN 98) – o que resultou num valor médio de CN para esta zona igual a 90,92, e 18,24% de área coberta com vegetação.

Já a Zona 2 - Ocupação condicionada, foi idealizada da seguinte maneira: 18% da sua superfície destinada a áreas públicas, sendo 6% permeável (CN 61) e 12% impermeável (CN 98); 16,54% para vias pavimentadas (CN 98); 20% para as reservas legais, cujo uso do solo foi considerado como florestas em boas condições, o que corresponde a um CN de 55. Portanto, 45,46% das áreas desta zona correspondem aos lotes, aos quais foram atribuídos os mesmos coeficientes empregados no Cenário 2. Esta configuração de uso e ocupação do solo resulta num CN ponderado de 84,46, e num total de 33,35% de áreas vegetadas.

As Zonas 5A e 5B – Proteção e ocupação restrita, foram divididas da seguinte maneira: 18% da área destinada a áreas públicas, sendo 6% permeável (CN 61) e 12% impermeável (CN 98); 20% para as reservas legais (CN 55); e os 61% restantes considerados chácaras de recreio, as quais apresentam os mesmos coeficientes e CNs das chácaras do Cenário 2. Dessa forma, o CN médio calculado para estas áreas foi de 73,85, e a superfície coberta com vegetação corresponde a 57% do total.

A Zona 6 – Produção agrícola familiar, também considerou a implantação de reserva legal, que correspondeu a 20% da área, com CN de 55. O restante da zona manteve a mesma

cobertura do Cenário 2, com CN de 75. Assim, o CN médio é igual a 71, e, novamente, a Zona 6 apresentou 100% de sua área coberta com vegetação.

Assim como no Cenário 2, neste cenário também foram consideradas APPs de 30 metros ao longo dos rios e APPs de 50 metros no entorno das nascentes. A estas áreas foi atribuído CN igual a 55 (florestas em boas condições).

4.5.4.5. Cenário 5 - Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais

Este cenário consiste em uma combinação dos Cenários 3 e 4. Nele, as características de uso e ocupação do solo são consideradas iguais às do Cenário 4, com os mesmos coeficientes e valores de CN para cada zona. Entretanto, como adicional, este cenário apresenta as medidas estruturais do Cenário 3, ou seja, os reservatórios de retenção nos exutórios das sub-bacias 3, 5, 6, 8 e 9, que foram detalhados no tópico 4.5.3. – Medidas estruturais.

Dessa forma este cenário tem como objetivo verificar possíveis efeitos sinérgicos advindos da combinação entre medidas estruturais e não-estruturais.

4.5.4.6. Cenário 6 – Sem plano diretor

Este cenário procurou representar uma forma de ocupação da bacia do Gregório em que não houve ação do poder público com o objetivo de regular o uso e ocupação do solo nos loteamentos. Nele, todas as zonas do plano diretor foram ocupadas da mesma forma.

As áreas da Zona 1 – Ocupação induzida, Zona 2 – Ocupação condicionada, Zonas 3A e 3B – Recuperação e ocupação controlada, Zonas 5A e 5B – Proteção e ocupação restrita, e Zona 6 – Produção agrícola familiar, foram divididas da seguinte forma: 18% para áreas públicas, sendo 3% permeável (CN 61) e 15% impermeável (CN 98). Os 82% restantes foram ocupados da mesma forma que a classe “Área urbana”, presente no Cenário 1. Para se estimar o CN deste tipo de ocupação, calculou-se a média dos CNs de cada região da área urbana, presentes na Tabela 5, e adicionou-se a porcentagem correspondente às vias pavimentadas (CN 98), de 16,54%. Dessa forma, o CN médio resultante das novas ocupações foi igual a 95,40, e foi atribuído a todas as zonas do plano diretor presentes na bacia do Gregório. O cálculo das áreas vegetadas resultou no valor de 7,03%

Ainda assim, as APPs em torno das nascentes e ao longo dos cursos d'água foi considerada para as regiões onde ainda não haviam sido invadidas, com CN igual a 55.

4.5.4.7. Cenário 7 – Hipotético

Este cenário foi construído de modo a representar a ocupação da bacia hidrográfica do Gregório caso as diretrizes do Plano Diretor do Município de São Carlos e as medidas não-estruturais propostas tivessem sido implantadas desde o início da ocupação. Assim, o Cenário 7 simula uma ocupação planejada de maneira prévia ao assentamento da população, ou seja, “como deveria ter sido”.

As medidas não-estruturais propostas no Cenário 4 foram aplicadas a todas as zonas do plano diretor, inclusive às regiões já ocupadas por lotes e vias. As APPs também foram consideradas ao longo de todos os rios e nascentes, independente da ocupação. É importante destacar que este cenário considerou a existência de mais 2 córregos, cujas APPs também foram levadas em consideração. São eles: o Córrego do Simeão, que nasce na região da Praça Itália e é afluente da margem esquerda do Gregório na altura da Rua Episcopal; e um pequeno córrego afluente da margem direita do Gregório, e que deságua entre os Córregos do Lazarini e Sorregotti. Atualmente estes dois cursos d'água se encontram totalmente tamponados, porém, neste cenário, ambos são considerados e suas APPs respeitadas.

Dessa forma, as Zonas 1, 2, 3A e 3B foram divididas da seguinte forma: 18% da sua superfície destinada a áreas públicas, sendo 6% permeável (CN 61) e 12% impermeável (CN 98); 16,54% para vias pavimentadas (CN 98); 20% para as reservas legais (CN 55); e 45,46% para os lotes, aos quais foram atribuídos os mesmo coeficientes empregados no Cenário 2. Considerou-se que os lotes da Zona 3B também apresentaram CP de 15%, como os das outras zonas. Com isso, o CN médio resultante para todas essas áreas é de 84,46, e as áreas vegetadas representam 33,35% de sua superfície.

Já as Zonas 5A e 5B tiveram suas áreas delimitadas da seguinte forma: 18% para áreas públicas, sendo 6% permeável (CN 61) e 12% impermeável (CN 98); 20 % para as reservas legais (CN 55); e os 61% restantes considerados chácaras de recreio, as quais apresentam os mesmos coeficientes e CNs das chácaras do Cenário 2. Assim, o CN calculado para estas regiões tem o valor de 73,85, e as áreas cobertas com vegetação respondem por 57% da área total.

Neste cenário, a Zona 6 tem as mesmas características apresentadas no Cenário 4, ou seja, 80% da área destinada às lavouras e 20% à reserva legal, com CN médio de 71 e 100% de cobertura vegetal.

A seguir é possível ver na Figura 22 um mapa que indica a delimitação do uso do solo para o Cenário 7, com o zoneamento do plano diretor e as APPs dos cursos d'água e nascentes:

Figura 22 – Configuração do Cenário 7 para a área de estudo

4.5.5. CN das sub-bacias para cada cenário

Com o detalhamento do uso e ocupação do solo para cada cenário – incluindo o cálculo do coeficiente CN para as diferentes zonas do plano diretor – e a delimitação das sub-bacias, expressa no item 4.3 – Delimitação das sub-bacias, foi possível calcular o CN de cada sub-bacia para cada cenário, com o objetivo de proceder à modelação hidrológica. O resultado do cálculo do CN das sub-bacias pode ser visualizado na Tabela 7, a seguir:

Tabela 7 - Valores de CN médio para cada sub-bacia e para cada cenário

Sub-bacia	Cenários						
	1	2	3	4	5	6	7
1	66,51	77,73	77,73	72,88	72,88	91,46	72,38
2	62,99	77,26	77,26	73,38	73,38	90,92	72,27
3	68,97	88,68	88,68	82,60	82,60	91,38	80,68
4	72,95	83,67	83,67	82,98	82,98	89,41	80,19
5	65,55	84,09	84,09	77,71	77,71	91,12	77,32
6	78,97	90,79	90,79	85,62	85,62	92,08	82,59
7	78,98	93,29	93,29	88,70	88,70	94,16	82,75
8	66,55	88,53	88,53	82,34	82,34	89,59	80,45
9	80,17	90,93	90,93	87,38	87,38	91,54	81,80
10	87,39	91,75	91,75	91,79	91,79	92,01	82,28
11	90,50	94,34	94,34	93,56	93,56	94,61	82,25
12	91,24	92,80	92,80	92,61	92,61	92,90	83,17
13	93,11	94,50	94,50	94,43	94,43	94,57	83,52
14	85,11	93,67	93,67	90,66	90,66	94,20	83,49
15	93,32	94,95	94,95	94,73	94,73	95,04	83,08

Diante dos resultados apresentados, nota-se que o Cenário 6 - Sem plano diretor, apresenta valores altos de CN, o que representa uma intensa impermeabilização do solo e reflete um processo de urbanização desorganizado. É importante frisar que este cenário aplica o padrão de urbanização presente na bacia do Gregório às áreas ainda não ocupadas, o que pode se concretizar caso o poder público não seja capaz de organizar adequadamente a ocupação das áreas mais altas da bacia.

Nas Figuras 23 a 27, a seguir, é possível visualizar mapas que mostram faixas de valores de CN para cada sub-bacia em cada cenário.

Figura 23 – Faixas de CN para o Cenário 1 – Atual

Figura 24 – Faixas de CN para o Cenário 2 – Plano diretor, e Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais

Figura 25 – Faixas de CN para o Cenário 4 – Plano diretor e medidas não estruturais, e Cenário 5 – Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais

Figura 26 – Faixas de CN para o Cenário 6 – Sem plano diretor

Figura 27 – Faixas de CN para o Cenário 7 – Hipotético

4.6. Tempo de concentração das sub-bacias

O tempo de concentração das sub-bacias foi calculado neste estudo com a fórmula de George Ribeiro³ (1961 apud GARCEZ, 1967). Esta equação foi escolhida devido aos resultados do estudo de Silveira (2005), que comparou o desempenho de 23 fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais, verificando o ajuste de dados observados com dados simulados. O autor concluiu que para pequenas bacias tanto urbanas quanto rurais – cujas áreas variaram de 1 a 39 km² para bacias rurais, e de 6 a 600 ha para as bacias urbanas – a fórmula de George Ribeiro apresentou bons resultados.

A referida equação encontra-se expressa a seguir:

$$t_c = \frac{16L_t}{(1,05 - 0,2p)(100S_m)^{0,04}}$$

Onde:

³ RIBEIRO, G. Acerca do cálculo da vazão de obras d'arte: tempo de concentração. **Revista do Clube de Engenharia**. Rio de Janeiro, n. 294, p.16-19, 1961.

t_c : tempo de concentração (min)

L_t : comprimento do talvegue (km)

S_m : declividade média da bacia (m/m)

p : fração da área da bacia coberta com vegetação (adimensional)

A fração da área coberta com vegetação para cada sub-bacia varia de acordo com o cenário, já os parâmetros L_t e S_m independem da situação futura. Os valores considerados para cada parâmetro, assim como o resultado dos cálculos dos tempos de concentração podem ser visualizados no item 5.1 – Simulação hidrológica, da seção 5 – Resultados e discussão.

O parâmetro S_m pôde ser calculado através da geração de um modelo digital de terreno (MDT) da área de estudo, o qual deu a possibilidade de se verificarem as cotas topográficas de qualquer ponto da bacia. Seu cálculo consistiu na razão entre o desnível máximo do percurso do talvegue e seu comprimento (L_t).

O tempo de concentração também foi calculado para a bacia do Gregório em sua totalidade para todos os cenários, a fim de se determinar a duração da chuva de projeto, a qual deve ser a mesma em todas as simulações. Dessa forma, foi escolhido o maior tempo de concentração para servir de base aos cálculos subsequentes, que foi o do Cenário 7 – Hipotético, igual a 117 minutos, arredondado para 120 minutos (2 horas).

4.7. Chuvas de projeto

Para que fosse possível gerar hidrogramas, e posteriormente avaliar os efeitos causados pelas suas vazões de pico, foi necessário o cálculo de chuvas de projeto. Este termo refere-se às precipitações utilizadas nas simulações hidrológicas. Neste cálculo, foi utilizada a curva IDF (intensidade-duração-frequência) proposta por Barbassa (1991) para o município de São Carlos. Ela relaciona a intensidade da chuva em questão com sua duração e seu tempo de retorno, ou seja, o período em que o evento é igualado ou superado. Tal curva pode ser descrita pela equação a seguir:

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

Onde:

i: intensidade (mm/h)

T: período de retorno (anos)

t: duração da chuva (min)

No presente estudo, foram analisadas chuvas de projeto para tempos de retorno de 25, 50 e 100 anos. A duração da chuva de projeto foi determinada em função do cálculo do tempo de concentração da bacia hidrográfica do Gregório, considerado 120 minutos, conforme descrito no item 4.6. – Tempo de concentração das sub-bacias.

Com o cálculo da intensidade da chuva de projeto e sua duração, foi obtido o volume total precipitado. Assim, para se realizar a modelação, é necessário que haja uma distribuição temporal do volume precipitado. Para tanto, optou-se pelo método dos blocos alternados, explicado detalhadamente em Zahed Filho e Marcellini (1995). A distribuição temporal dos volumes calculados através da curva IDF proposta por Barbassa (1991) resultou nos seguintes hietogramas, expressos nas Figuras 28 a 30, a seguir:

Figura 28 – Hietograma da chuva de projeto com tempo de retorno de 25 anos

Figura 29 – Hietograma da chuva de projeto com tempo de retorno de 50 anos

Figura 30 – Hietograma da chuva de projeto com tempo de retorno de 100 anos

É importante frisar que o intervalo de tempo da duração de cada bloco do hietograma deve ser menor ou igual a $1/10$ do tempo de concentração das bacias, visando uma maior precisão nos resultados (IPH, 2005). Assim, foi escolhido o intervalo de 1 minuto, o qual se encaixou nesta situação para a quase totalidade das sub- bacias, conforme é demonstrado no item 5.1. – Simulação hidrológica, da seção 5 – Resultados e discussão. A construção dos

hietogramas foi realizada com auxílio do *software* ABC6, desenvolvido pelo Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões, LabSid, vinculado ao Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

4.8. Modelação hidrológica: o HEC-HMS

O processo de modelação hidrológica foi realizado com o auxílio do *software* HEC-HMS, desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos. O programa é de domínio público, sendo, desse modo, aplicado em diversos estudos no mundo todo (CAMPOS, 2009). Tal fato configura uma grande vantagem apresentada pelo *software*, o que justificou sua escolha.

Neste estudo, a modelação realizada pelo programa em questão necessitou da entrada das seguintes informações:

- Topologia do sistema a ser analisado;
- Escolha do modelo meteorológico e determinação de seus parâmetros;
- Seleção de um método de separação do escoamento e determinação de seus parâmetros;
- Seleção de um método de transformação chuva-vazão e determinação de seus parâmetros;
- Seleção de um método para calcular o amortecimento das ondas de cheia e determinação de seus parâmetros;
- Estabelecimento das curvas cota-volume e volume-descarga para os reservatórios de amortecimento;
- Determinação do intervalo de tempo para o cálculo dos hidrogramas.

Conforme descrito no item 3.11.1.3. – O *software* HEC-HMS, da Revisão Bibliográfica, o sistema pode ser configurado utilizando os seguintes elementos: sub-bacia (*subbasin*), trecho (*reach*), nó (*junction*), fonte (*source*), sumidouro (*sink*), reservatório (*reservoir*) e derivação (*diversion*). Através de associações entre eles, monta-se a topologia da bacia hidrográfica a ser estudada, em que, para cada elemento do sistema deve ser indicado qual o outro imediatamente a jusante. Neste caso foram utilizados os elementos: sub-bacia,

trecho, nó e reservatório. Nas Figuras 31 e 32, a seguir, são mostradas as duas diferentes topologias utilizadas no estudo. A primeira indica a topologia usada para os cenários que não contaram com os reservatórios, enquanto a segunda mostra o caso dos cenários em que os reservatórios foram considerados.

Figura 31 – Topologia do sistema para os Cenários 1, 2, 4, 6 e 7

Figura 32 – Topologia do sistema para os Cenários 3 e 5

O elemento “sub-bacia” requer, como dado de entrada básico, que o usuário informe sua área. Os demais dados de entrada estão sujeitos aos métodos escolhidos para a separação do escoamento e transformação da chuva em vazão, conforme será detalhado adiante.

O modelo meteorológico escolhido para determinação das precipitações leva a denominação de “Hietograma especificado” (*Specified Hyetograph*), onde são inseridas tabelas com os valores dos hietogramas de blocos alternados expressos no item 4.7. – Chuvas de projeto. Para o “Hietograma especificado” é necessário definir a unidade de sua apresentação, que foi selecionada como “Milímetros incrementais” (*Incremental Milimeters*) e o intervalo de tempo considerado para os blocos, previamente escolhido como 1 minuto.

A separação do escoamento foi realizada pelo método SCS *Curve Number*, já explicado anteriormente no item 3.11.1.1. – O Modelo SCS *Curve Number*, da Revisão Bibliográfica. O parâmetro necessário à realização dos cálculos que compõem esta etapa é o coeficiente CN de cada sub-bacia, indicado no item 4.5.5. – CN das sub-bacias para cada cenário. Já a transformação da precipitação efetiva em vazão foi feita pelo método do Hidrograma Unitário do SCS, também explanado na Revisão Bibliográfica. Neste método, o dado de entrada necessário é o tempo de concentração de cada sub-bacia, explicado no item 4.6. – Tempo de concentração das sub-bacias, cujos resultados estão expressos no item 5.1 – Simulação hidrológica, da seção 5 – Resultados e discussão. A escolha de tais métodos se justifica pelo fato de serem de fácil aplicação e amplamente utilizados.

Dentre os métodos disponíveis para calcular a propagação da onda de cheia nos canais, escolheu-se o método da Onda Cinemática. Para tanto, foi necessário especificar o formato da geometria das seções transversais do canal, seu comprimento (L_c), coeficiente n de *Manning* (n), declividade (S_c), largura do fundo (b , para canais trapezoidais e retangulares) e declividade das paredes (Z , para canais trapezoidais ou retangulares). Este último parâmetro é adimensional, e se refere à razão entre a distância horizontal e a distância vertical das paredes laterais do trapézio. Na Tabela 8, a seguir, são indicados os trechos de canais considerados, mostrando os nós ligados por cada trecho e todos os parâmetros citados anteriormente.

Tabela 8 - Dados dos trechos do canal utilizados pelo HEC-HMS

Trecho	Nós ligados	Formato	L_c (m)	n	S_c (m/m)	b (m)	Z
1	1-2	Trapezoidal	282,16	0,030	0,0242	4	2
2	2-3	Trapezoidal	541,70	0,030	0,0092	4	2
3	3-4	Trapezoidal	1118,23	0,030	0,0162	4	2
4	7-12	Trapezoidal	858,62	0,025	0,0630	6	1
5	12-13	Trapezoidal	654,10	0,025	0,0153	6	1
6	13-14	Retangular	631,33	0,020	0,0130	7	-
7	14-15	Retangular	338,55	0,020	0,0044	7	-
8	15-16	Retangular	591,1	0,020	0,0083	7	-

A determinação das curvas cota-volume e volume-descarga para os reservatórios de detenção está detalhada na subseção 4.5.3. – Medidas estruturais. Estes dados foram inseridos no HEC-HMS na forma de tabelas, que, em seguida, foram associadas aos elementos de “reservatório” (*reservoir*) para proceder às simulações. Por fim, o intervalo de tempo determinado para o cálculo dos hidrogramas foi de 1 minuto, a menor de todas as opções. Tal intervalo foi escolhido com o intuito de se conferir maior precisão aos hidrogramas gerados.

Com a entrada dos dados mencionados, foi possível gerar os hidrogramas que passam por cada nó, assim como os hidrogramas gerados em cada sub-bacia e hidrogramas afluentes e efluentes a cada reservatório e trecho de canal. As vazões máximas de alguns destes hidrogramas foi utilizada na modelação hidráulica, como está descrito no tópico seguinte.

4.9. Modelação hidráulica: o HEC-RAS

A modelação hidráulica teve como objetivo efetuar os cálculos dos perfis de superfície da água em escoamento no canal estudado, e assim, analisar as consequências das cheias simuladas pelo modelo hidrológico.

Para tanto, foram utilizados em conjunto o *software* HEC-RAS, que faz parte da plataforma HEC (*Hydrologic Engineering Center*); o ArcGIS 9.3; e uma extensão que faz a comunicação entre os dois programas, o HEC-GeoRAS. Este último permite a retirada de informações necessárias à modelação hidráulica a partir modelos digitais de terreno (MDT). Desse modo, as manchas de inundação podem ser traçadas com auxílio do HEC-GeoRAS,

através da sobreposição dos níveis d'água simulados no HEC-RAS ao modelo digital do terreno.

Os procedimentos necessários à simulação hidráulica foram iniciados com a geração de um MDT a partir das curvas de nível de 1 em 1 metro levantadas pela OESA e digitalizadas por Graciosa (2010). Com a extensão HEC-GeoRAS, foram criados os *layers* auxiliares que transmitem as informações do sistema analisado ao HEC-RAS, através da geração de um arquivo chamado *RAS GIS Import File*. Este arquivo extrai informações do MDT que são utilizadas como dados de entrada no HEC-RAS. Estas informações são compostas essencialmente por dados da geometria do sistema, como o detalhamento de seções transversais do canal – as quais podem ser editadas posteriormente –, distância entre elas, localização de pontes e o comprimento do canal analisado.

O trecho do Gregório que passou pelo processo de modelação hidráulica está compreendido entre a seção 11, próxima à Rua Campos Sales, e a seção 1, na altura da Rua Visconde de Inhaúma, onde o córrego é destamponado. Ambas as seções foram mencionadas na seção 4.2 – Dados topográficos. Embora a análise da mancha de inundação tenha sido feita apenas até a Rua José Bonifácio, optou-se por realizar a modelação até a Rua Visconde de Inhaúma para que fossem considerados eventuais efeitos de jusante na área analisada. A Figura 33, a seguir, indica a localização dessas ruas e das seções 1 e 11, dentro da área de estudo.

Figura 33 – Indicação da localização das ruas e seções que limitam a área onde foi realizada a modelação hidráulica

Com a representação inicial do sistema, o modelo do córrego pôde ser editado já no HEC-RAS. As seções transversais levantadas com estação total foram então inseridas no modelo, através da edição das seções extraídas do MDT. Também foram criadas, por meio de interpolação, seções extras entre as já existentes, com o objetivo de conferir estabilidade à simulação. Outro dado inserido nesta etapa é atribuição dos coeficientes n de *Manning* à calha do rio e às várzeas. Para todos os cenários, excluindo o Cenário 7, o n de *Manning* para o trecho que vai do Fórum Municipal até a Rua Rui Barbosa foi assumido como 0,025, referente a canais de terra com vegetação rasteira no fundo e nos taludes (PORTO, 2006). Da Rua Rui Barbosa até o final do córrego, este coeficiente apresentou o valor de 0,02, associado a canais de alvenaria em más condições de manutenção. Às várzeas foi atribuído um valor maior, igual a 0,035, devido ao fato de apresentarem diversos obstáculos ao escoamento. Já para o Cenário 7, tanto para as várzeas quanto para a calha do córrego, o valor do n de *Manning* escolhido foi de 0,035, referente a canais naturais, cobertos de cascalhos e vegetação (PORTO, 2006). Este cenário também não considerou a existência de pontes, que significariam intervenções nas APPs.

O HEC-RAS também permite que sejam editadas as características das pontes consideradas. Neste caso, foram inseridas as pontes das seguintes ruas: Campos Sales, São Paulo, Rui Barbosa, Dom Pedro II, São Joaquim e Alexandrina. O trecho tamponado subsequente, que vai desde a Avenida São Carlos até as proximidades da Rua Visconde de Inhaúma também é computado no modelo como uma ponte. Foram editadas a geometria das seções transversais das pontes e suas larguras vistas em planta.

Após a edição destes dados, foi criado um arquivo responsável por conter os dados do escoamento. O regime de escoamento escolhido neste estudo foi o permanente, pois a simulação do regime não-permanente foi impossibilitada devido a instabilidades na modelação. Segundo Graciosa (2010), a existência de dados observados de vazão para as seções imediatamente a jusante do trecho simulado forneceria as condições de contorno necessárias ao modelo para proceder à simulação do regime não-permanente. No HEC-RAS, um valor de vazão pode ser associado a um canal, e alterações deste valor podem ser feitas em cada seção transversal. A área escolhida para a modelação hidráulica abrangeu parte das sub-bacias 12, 13 e 14, sendo que, nesta etapa, considerou-se que esta última contribui de forma pontual. Assim, os dados de escoamento foram computados de forma que a vazão inicial do córrego corresponde à vazão máxima que passa pelo exutório da sub-bacia 12, nó 13. Ao longo da sub-bacia 13, a contribuição vai sendo acrescentada aos poucos, ao passo que quando o córrego passa na altura da Rua Episcopal, há um acréscimo de vazão pontual,

correspondente à contribuição do Córrego do Simeão, que drena a sub-bacia 14. Na Figura 34, a seguir, são mostrados os pontos onde o escoamento superficial das sub-bacias em questão altera a vazão do Córrego do Gregório.

Figura 34 – Entrada de vazões para simulação hidráulica

Deve-se destacar que os dados de vazão utilizados nesta etapa correspondem às vazões de pico dos hidrogramas construídos na simulação hidrológica. A tabela que contém os valores de vazão utilizados para simular o escoamento está presente no item 5.2. – Simulação hidráulica, na seção 5 – Resultados e discussão.

Além dos dados de vazão, também é necessária a entrada de condições de contorno de montante e jusante. Para a modelação do regime permanente, foi escolhida a condição “profundidade normal”, que requer como dados de entrada o estabelecimento das declividades imediatamente a montante e a jusante do trecho analisado. Com auxílio do modelo digital do terreno, tais informações foram calculadas, e obteve-se o valor de 0,0044 m/m para a região a jusante do trecho, e 0,0045 m/m para a área de montante.

Posteriormente à entrada dos dados do escoamento foi realizada a simulação, que calculou os níveis da lâmina d’água nas seções transversais. O arquivo gerado foi então exportado de volta ao ArcGIS 9.3 novamente através do HEC-GeoRAS. Já no ambiente do ArcGIS 9.3, foi feita a sobreposição das lâminas d’água com o MDT da área de estudo, o que gerou dois arquivos: um polígono (vetor) com o delineamento da mancha de inundação, e um *raster* em que cada célula contém um valor referente à profundidade da inundação.

Com as manchas de inundação de cada cenário foi então possível proceder ao cálculo de suas áreas, feitos através do ArcGIS 9.3, cujos resultados estão expressos e discutidos na seção 5.2. – Simulação hidráulica.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Simulação hidrológica

Conforme já mencionado na seção 4 – Materiais e métodos, a simulação hidrológica foi realizada seguindo o método SCS *Curve Number* para determinar a precipitação efetiva, e o hidrograma unitário do SCS na transformação chuva-vazão.

O método SCS *Curve Number* basea-se na atribuição do coeficiente CN para a bacia hidrográfica em análise. Neste estudo, esta etapa foi detalhada no item 4.5.5. – CN das sub-bacias para cada cenário, da seção 4 – Materiais e métodos.

Já a transformação da chuva em vazão, através do método do hidrograma unitário do SCS, depende do cálculo do tempo de concentração de cada sub-bacia. Este parâmetro foi determinado pela fórmula de George Ribeiro, que, por sua vez, necessita dos seguintes dados: comprimento do talvegue, sua declividade e fração da área da bacia coberta com vegetação. O item 4.6. – Tempo de concentração das sub-bacias, da seção 4 – Materiais e métodos, faz uma explanação sobre esta equação. Na Tabela 9 é possível visualizar o comprimento do talvegue e sua declividade média para cada sub-bacia. Já as Tabelas 10 e 11, indicam, respectivamente, a fração da bacia coberta com vegetação e o tempo de concentração propriamente dito para as sub-bacias em cada cenário.

Tabela 9 - Comprimento do talvegue e declividade média de cada sub-bacia da área de estudo

Sub-bacia	Comprimento do talvegue (m)	Declividade média (m/m)
1	2238	0,034
2	1915	0,034
3	1251	0,040
4	965	0,036
5	282	0,024
6	541	0,0092
7	1118	0,018
8	684	0,073
9	554	0,018
10	914	0,022
11	860	0,0063
12	654	0,015
13	629	0,016
14	3582	0,015
15	597	0,0084

Tabela 10 - Fração da área coberta com vegetação nas sub-bacias para cada cenário

Sub-bacia	Cenários						
	1	2	3	4	5	6	7
1	0,93	0,48	0,48	0,60	0,60	0,15	0,61
2	0,98	0,49	0,49	0,60	0,60	0,16	0,61
3	0,78	0,24	0,24	0,38	0,38	0,16	0,42
4	0,63	0,22	0,22	0,36	0,36	0,19	0,43
5	0,87	0,33	0,33	0,48	0,48	0,16	0,49
6	0,67	0,23	0,23	0,34	0,34	0,23	0,38
7	0,52	0,21	0,21	0,23	0,23	0,07	0,37
8	0,85	0,24	0,24	0,38	0,38	0,19	0,42
9	0,54	0,19	0,19	0,27	0,27	0,16	0,39
10	0,29	0,17	0,17	0,20	0,20	0,16	0,38
11	0,24	0,11	0,11	0,12	0,12	0,09	0,38
12	0,23	0,18	0,18	0,19	0,19	0,18	0,36
13	0,14	0,09	0,09	0,10	0,10	0,09	0,35
14	0,42	0,11	0,11	0,12	0,12	0,09	0,35
15	0,13	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,36

Tabela 11 - Tempos de concentração de cada sub-bacia para cada cenário

Sub-bacia	Tempo de concentração de cada cenário (min)						
	1	2	3	4	5	6	7
1	39,47	35,73	35,73	36,62	36,62	33,39	36,71
2	34,15	30,62	30,62	31,39	31,39	28,65	31,41
3	21,21	18,90	18,90	19,45	19,45	18,61	19,61
4	15,88	14,59	14,59	14,99	14,99	14,51	15,21
5	4,97	4,43	4,43	4,57	4,57	4,27	4,58
6	9,49	8,64	8,64	8,85	8,85	8,64	8,91
7	18,48	17,35	17,35	17,39	17,39	16,87	17,91
8	11,48	10,08	10,08	10,38	10,38	10,00	10,47
9	9,19	8,55	8,55	8,69	8,69	8,51	8,91
10	14,28	13,94	13,94	14,03	14,03	13,91	14,56
11	13,98	13,63	13,63	13,68	13,68	13,60	14,40
12	10,25	10,15	10,15	10,16	10,16	10,14	10,52
13	9,66	9,58	9,58	9,59	9,59	9,58	10,09
14	58,36	54,77	54,77	54,88	54,88	54,55	57,45
15	9,39	9,30	9,30	9,31	9,31	9,30	9,85

Outro fator importante da simulação hidrológica realizada pelo HEC-HMS é o efeito que as medidas estruturais, usadas nos Cenários 3 e 5 e descritas no item 4.5.3. – Medidas estruturais, implicam em seus hidrogramas de jusante.

Para ilustrar tal efeito, são apresentadas as Figuras de 35 a 39, nas quais é possível ver os hidrogramas afluentes e efluentes a cada um desses dispositivos para o Cenário 3, considerando uma chuva de projeto com tempo de retorno de 100 anos. Os hidrogramas referentes aos demais cenários e tempos de retorno podem ser visualizados no Apêndice A.

Figura 35 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório G1 – B 93.5, no exutório da sub-bacia 5, para o Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais, e tempo de retorno de 100 anos

Figura 36 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório G2 – B 83.5, no exutório da sub-bacia 6, para o Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais, e tempo de retorno de 100 anos

Figura 37 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório S1 – B 84.5, no exutório da sub-bacia 3, para o Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais, e tempo de retorno de 100 anos

Figura 38 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório La1 – B 97.5, no exutório da sub-bacia 8, para o Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais, e tempo de retorno de 100 anos

Figura 39 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório La2 – B 98.5, no exutório da sub-bacia 9, para o Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais, e tempo de retorno de 100 anos

De posse dos dados de entrada necessários à simulação hidrológica, foi possível calcular os hidrogramas de cada sub-bacia no HEC-HMS, os quais foram amortecidos na rede de canais através do método da Onda Cinemática. Nas Figuras 40 a 42, a seguir, são mostrados os hidrogramas calculados no exutório do sistema em cada cenário, nó 16, para os tempos de retorno considerados no estudo: 25, 50 e 100 anos. No Apêndice B é possível visualizar os hidrogramas que passam pelos nós 2 e 13. Estes pontos foram escolhidos pelo fato de suas áreas de montante representarem duas situações distintas: enquanto as regiões a montante do nó 2 apresentam usos essencialmente rurais, a maior parte das áreas a montante do nó 13 se encontram em processo de urbanização ainda não consolidado.

Figura 40 – Hidrogramas calculados para o exutório da área de estudo, nó 16, para um tempo de retorno de 25 anos

Figura 41 – Hidrogramas calculados para o exutório da área de estudo, nó 16, para um tempo de retorno de 50 anos

Figura 42 – Hidrogramas calculados para o exutório da área de estudo, nó 16, para um tempo de retorno de 100 anos

A fim de melhor comparar os resultados obtidos nos cenários, a Tabela 12, a seguir, apresenta os picos das vazões indicados nos hidrogramas mostrados anteriormente.

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

Cenários	Tempo de retorno		
	25 anos	50 anos	100 anos
1 – Situação atual	148,7	197,2	258,7
2 – Plano diretor	253,2	316,1	392,4
3 – Plano diretor e medidas estruturais	198,6	244,8	299,9
4 – Plano diretor e medidas não-estruturais	219,3	278,9	351,3
5 – Plano diretor, medidas estruturais e não-estruturais	176,8	222,2	276,1
6 – Sem plano diretor	278,8	345,6	425,9
7 – Hipotético	147,3	199,3	264,6

De posse dos resultados obtidos com a simulação hidrológica, algumas observações podem ser feitas. Primeiramente, percebe-se que o Cenário 6 possui as maiores vazões de pico dentre todos os cenários analisados, em consequência da impermeabilização quase total do

solo da bacia hidrográfica do Córrego do Gregório. Como esta situação decorreria do total descaso do poder público com o processo de ocupação do solo urbano - e consequentemente as porções mais altas da bacia seriam ocupadas da mesma forma que as mais baixas - torna-se nítido que o planejamento urbano tem um papel preponderante no controle de inundações. A simulação deste cenário demonstra que é necessário impor normas ao uso e ocupação do solo a fim de evitar um aumento significativo da cheia natural.

A simulação do Cenário 2 demonstrou que somente as diretrizes constantes no Plano Diretor do Município de São Carlos não são suficientes para evitar inundações na bacia do Gregório. Tal constatação é baseada na comparação entre os resultados deste cenário e os da situação atual. A simulação deste cenário revelou um acréscimo na vazão de pico de 70% para uma chuva de projeto com tempo de retorno de 25 anos, 60% para chuva com tempo de retorno de 50 anos e 52% para 100 anos de tempo de retorno. Boldrin (2005) chega à conclusão semelhante, ao verificar que, para um cenário que simula as diretrizes do plano diretor, uma chuva de tempo de retorno de 10 anos extrapola o leito menor do córrego em uma seção próxima ao Fórum Municipal, que, no presente estudo, corresponde ao nó 13. Desse modo, faz-se necessária a existência de outros mecanismos reguladores da ocupação urbana, ou uma revisão das diretrizes contidas no plano. Os resultados obtidos com este cenário serviram como base para uma análise das medidas de controle de inundações consideradas neste estudo, pois os Cenários 3, 4, 5 e 7 também consideram as diretrizes do plano, além de utilizarem medidas estruturais, não-estruturais ou ambas. Logo, os resultados das simulações destes cenários foram comparados com os obtidos para o Cenário 2, conforme pode ser visto adiante.

As medidas estruturais consideradas neste estudo - os reservatórios de detenção propostos no Plano Diretor de Drenagem Urbana Ambientalmente Sustentável do Município de São Carlos - diminuíram significativamente os picos de vazão. É possível perceber o efeito que os barramentos causam na vazão de pico dos hidrogramas ao se comparar os resultados do Cenário 2 com os do Cenário 3, visto que ambos apresentam as mesmas características de uso do solo. Os valores máximos de vazão obtidos para o Cenário 3 foram cerca de 20% menores para os três tempos de retorno estudados, respectivamente 198,6 m³/s, 244,8 m³/s e 299 m³/s. Contudo, os picos obtidos ainda são maiores que os calculados para o cenário atual, o que significa que essas medidas, se aplicadas isoladamente, não equacionam satisfatoriamente o problema das inundações do Córrego do Gregório.

O Cenário 4 considerou 20% de reserva legal e um terço das áreas públicas coberta com vegetação para as regiões ainda não ocupadas, além de delimitar as Áreas de Preservação

Permanente ao redor dos rios e nascentes, conforme apresentado por Alves (2005) e simulado por Boldrin (2005). Tais medidas resultaram em uma diminuição das vazões máximas em comparação ao Cenário 2: 13,4%, 11,8% e 10,5%, para os tempos de retorno de 25, 50 e 100 anos, respectivamente. Todavia, quando comparadas com as medidas estruturais, as não-estruturais não tiveram o mesmo desempenho na redução do pico das cheias. Isto ocorre devido à bacia do Córrego do Gregório apresentar um grau avançado de urbanização, com uma grande parte de sua área já impermeabilizada. Desse modo, a aplicação das medidas não-estruturais se restringe às áreas ainda não loteadas, que se concentram nas cabeceiras da bacia hidrográfica.

A efetividade das medidas não-estruturais pode ser verificada com a simulação do Cenário 7, que considera a aplicação das diretrizes do plano diretor e as medidas não-estruturais em toda a extensão da bacia hidrográfica. Assim, este é um cenário hipotético, que mostra como a ocupação da bacia do Gregório deveria ter acontecido caso fosse bem planejada. Sua simulação demonstrou resultados expressivos quanto à redução das vazões máximas, pois, de todos os cenários prospectivos, este foi o que apresentou os menores picos, fato corroborado pelo estudo de Boldrin (2005). A resposta do Cenário 7 às chuvas de projeto mostra a importância de se pensar a drenagem da bacia hidrográfica anteriormente à sua ocupação, e assim, planejá-la de forma a harmonizar os usos do solo com o ciclo hidrológico.

Os resultados também reforçam a ideia de que as medidas não-estruturais têm um caráter essencialmente preventivo, já que sua aplicação na bacia ocupada, situação representada no Cenário 4, não apresentou o mesmo desempenho demonstrado no Cenário 7. Contudo, este último cenário não é aplicável à área de estudo, servindo apenas para demonstrar como seria a situação da bacia se o planejamento fosse realizado previamente à urbanização, além de promover uma discussão quanto à efetividade das medidas não-estruturais. Apesar de reduzir significativamente as cheias, as vazões máximas calculadas para o cenário hipotético apresentam valores bem próximos aos obtidos para a condição atual, que já é problemática. Alves (2005), ao construir um cenário semelhante, indicou na bacia do Gregório a localização das áreas verdes referentes à reserva legal, que foram averbadas contíguas às APPs, de forma a ampliar o corredor verde ao longo do rio. A autora destaca que a localização dessas reservas pode representar uma solução às inundações causadas por chuvas intensas, pois, ao ocupar seu leito maior, a planície de inundação não atingiria as vias e lotes, ficando circunscrita à faixa ocupada pelas APPs e reservas.

Dentre os cenários aplicáveis, o que apresentou os melhores resultados foi o 5, que utiliza simultaneamente os dois tipos de medidas de controle de inundações. Em comparação

ao Cenário 2, que só considera as diretrizes do plano diretor, as medidas em questão são responsáveis por uma redução nas vazões de pico de 30,2%, 29,7% e 29,6% quando são analisadas, respectivamente, as chuvas de projeto com períodos de retorno de 25, 50 e 100 anos. Tal constatação aponta um caminho interessante a ser considerado no planejamento da drenagem urbana, pois se pode verificar um efeito sinérgico quando há a associação das medidas estruturais com as não-estruturais. Os resultados obtidos indicam a importância de se estudar outras configurações, com a utilização de outros tipos de medidas estruturais e não-estruturais em diferentes associações.

Outro ponto a se destacar é a gradativa perda de eficiência das medidas não-estruturais com o aumento do tempo de retorno do evento. Ao comparar as vazões de pico dos Cenários 2, 4, 5, e 7 com a do Cenário 6, que é totalmente urbanizado, evidencia-se esta constatação. Conforme a intensidade da chuva aumenta, a diferença entre as vazões máximas do Cenário 6 e os picos dos demais cai em termos percentuais. Dessa forma, é possível notar que, para eventos extremos, o processo de infiltração da chuva no solo passa a não ser suficiente para absorver as precipitações. Com isso, os picos de vazão dos cenários que fazem uso das medidas não-estruturais se aproximam das vazões máximas calculadas para o Cenário 6.

Como o Cenário 3, que utiliza medidas estruturais, não apresenta este efeito, – em comparação ao Cenário 6, os picos alcançados com o Cenário 3 são 40,4%, 41,2% e 42,0% menores, para os períodos de retorno de 25, 50 e 100 anos, respectivamente – conclui-se que os reservatórios de retenção foram projetados considerando precipitações do porte das avaliadas neste estudo.

5.2. Simulação hidráulica

A simulação hidráulica foi realizada com suporte do programa HEC-RAS, cujos resultados foram exportados ao ArcGIS, a fim de se realizar a análise espacial da malha de inundação. Com o objetivo de simplificar a modelação, foi considerado regime permanente neste estudo. Os mapas de inundação foram gerados a partir da sobreposição do nível d'água simulado no HEC-RAS com o modelo digital do terreno, processo que foi realizado com auxílio da extensão HEC-GeoRAS.

Para tanto, foram inseridos como dados de entrada os valores de vazão máxima associados aos nós abrangidos pela área de estudo. A simulação hidráulica foi realizada no trecho do córrego do Gregório situado entre a Rua Campos Sales e a Rua Visconde de

Inhaúma, conforme foi indicado na Figura 33, na seção 4 – Materiais e métodos. Assim, o trecho foi modelado considerando as vazões de pico que passam pelos exutórios das bacias 12 (nó 13) e 13 (nó 14), que aportam de modo distribuído, e a contribuição da bacia 14, que aporta de modo concentrado próximo à Rua Episcopal. Este esquema de aporte de vazões pode ser visualizado na Figura 34, da seção 4 – Materiais e métodos.

Os valores de vazão admitidos na simulação hidráulica para os exutórios das sub-bacias 12 e 13 (nós 13 e 14, respectivamente) e para o trecho que conta com a contribuição da sub-bacia 14 estão expressos na tabela a seguir:

Tabela 13 - Picos de vazão para cada ponto da bacia considerado no estudo

Cenários	Vazões máximas para cada ponto (m³/s)								
	Nó 13			Nó 14			Sub-bacia 14		
	TR 25	TR 50	TR 100	TR 25	TR 50	TR 100	TR 25	TR 50	TR 100
1	96,6	131,5	176,0	124,0	165,6	218,4	131,8	176,2	232,5
2	183,3	229,6	285,6	216,1	269,6	335,0	233,6	291,4	362,2
3	129,5	159,3	194,1	161,1	198,4	242,2	179,4	221,3	270,6
4	155,3	198,9	252,1	186,5	238,0	299,8	200,2	255,4	322,0
5	113,9	143,2	177,7	143,9	181,1	224,6	158,4	199,0	247,5
6	208,1	258,3	318,5	240,3	298,1	366,5	259,4	321,8	396,1
7	110,5	149,5	198,2	128,7	174,3	231,4	136,7	184,7	245,0

Desse modo, foi possível proceder à simulação das lâminas d'água e posterior processamento no SIG, a fim de gerar os mapas de inundação. Tais mapas podem ser visualizados nas Figuras 43 a 63:

Figura 43 – Mancha de inundação para o Cenário 1 – Atual, com tempo de retorno de 25 anos

Figura 44 – Mancha de inundação para o Cenário 1 – Atual, com tempo de retorno de 50 anos

Figura 45 – Mancha de inundação para o Cenário 1 – Atual, com tempo de retorno de 100 anos

Figura 46 – Mancha de inundação para o Cenário 2 – Plano Diretor, com tempo de retorno de 25 anos

Figura 47 – Mancha de inundação para o Cenário 2 – Plano Diretor, com tempo de retorno de 50 anos

Figura 48 – Mancha de inundação para o Cenário 2 – Plano Diretor, com tempo de retorno de 100 anos

Figura 49 – Mancha de inundação para o Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais, com tempo de retorno de 25 anos

Figura 50 – Mancha de inundação para o Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais, com tempo de retorno de 50 anos

Figura 51 – Mancha de inundação para o Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais, com tempo de retorno de 100 anos

Figura 52 – Mancha de inundação para o Cenário 4 – Plano diretor e medidas não-estruturais, com tempo de retorno de 25 anos

Figura 53 – Mancha de inundação para o Cenário 4 – Plano diretor e medidas não-estruturais, com tempo de retorno de 50 anos

Figura 54 – Mancha de inundação para o Cenário 4 – Plano diretor e medidas não-estruturais, com tempo de retorno de 100 anos

Figura 55 – Mancha de inundação para o Cenário 5 – Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais, com tempo de retorno de 25 anos

Figura 56 – Mancha de inundação para o Cenário 5 – Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais, com tempo de retorno de 50 anos

Figura 57 – Mancha de inundação para o Cenário 5 – Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais, com tempo de retorno de 100 anos

Figura 58 – Mancha de inundação para o Cenário 6 – Sem plano diretor, com tempo de retorno de 25 anos

Figura 59 – Mancha de inundação para o Cenário 6 – Sem plano diretor, com tempo de retorno de 50 anos

Figura 60 – Mancha de inundação para o Cenário 6 – Sem plano diretor, com tempo de retorno de 100 anos

Figura 63 – Mancha de inundação para o Cenário 7 – Hipotético, com tempo de retorno de 100 anos

Para cada cenário e tempo de retorno, calculou-se a área inundada na região de estudo, limitada a leste pela Rua Campos Sales, e a oeste pela Rua José Bonifácio. Os resultados encontram-se na tabela a seguir:

Tabela 14 - Área ocupada pela mancha de inundação, em m², para cada cenário

Cenário	Tempo de retorno (anos)		
	25	50	100
1	87.123	97.912	108.751
2	108.632	117.958	130.201
3	97.299	105.761	112.921
4	103.169	112.537	121.618
5	95.060	103.786	111.790
6	113.271	121.780	133.335
7	100.155	110.327	119.132

Ao se analisar os resultados obtidos com as simulações hidráulicas, observa-se a presença de algumas áreas críticas quanto à inundação. Destaca-se a junção do Córrego do Simeão com o Córrego do Gregório, na sua margem esquerda, próxima à Rua Episcopal. Esta

região é uma das mais afetadas em todos os cenários devido à topografia, que apresenta cotas mais baixas ao longo do antigo curso do Córrego do Simeão. O Mercado Municipal, suas áreas de jusante e o trecho entre as Ruas Dom Pedro II e São Paulo, na margem esquerda do Gregório, também são atingidas em todos os cenários, inclusive nos que apresentam as menores manchas, como o Cenário 1 e o 5. As proximidades do Fórum Municipal também aparecem como áreas críticas, já que são inundadas até mesmo nos cenários que apresentaram as menores vazões de pico. Estas informações são corroboradas, em parte, por Graciosa (2010), que, ao simular manchas de inundação ao longo do Córrego do Gregório, observou situações problemáticas principalmente nas regiões próximas ao Mercado Municipal e ao Fórum.

As simulações dos cenários que apresentaram as maiores manchas de inundação, Cenários 2 e 6, revelaram áreas inundáveis ao longo de toda a margem esquerda do Gregório. Essas regiões também são atingidas em todas as simulações que consideraram 100 anos de período de retorno. Já a várzea da margem direita é afetada principalmente a partir da Rua Dona Alexandrina, situação verificada em todas as simulações.

A exemplo do que se observou na simulação hidrológica, o Cenário 2 apresentou valores altos para as áreas inundadas, o que mostra, novamente, que apenas as diretrizes presentes no zoneamento do Plano Diretor do Município de São Carlos não são suficientes para evitar os prejuízos. Entretanto, até mesmo as medidas propostas no Cenário 5, que é o cenário futuro com prognóstico mais favorável, não foram capazes de equacionar o problema, visto que as áreas críticas mencionadas anteriormente são atingidas até mesmo na simulação que utilizou o menor tempo de retorno.

Os resultados obtidos também mostram que, para todas as simulações, as manchas de inundação localizam-se próximas ao canal, atingindo, no máximo, dois quarteirões na altura da Rua Episcopal. Esta informação também é observada por Graciosa (2010), que acrescenta que este fato é decorrente da topografia acentuada da bacia hidrográfica do Córrego do Gregório. Os cálculos das áreas correspondentes às manchas confirmam essa constatação. Ao se calcular o acréscimo ocorrido quando se comparam os cenários mais contrastantes – Cenário 1 e Cenário 6 – verifica-se um aumento na área de 30,0% para o tempo de retorno de 25 anos, 24,4% para tempo de retorno de 50 anos e 22,6% para tempo de retorno de 100 anos, bem menores que os acréscimos das vazões de pico para os cenários mencionados.

Observa-se também que o Cenário 7 apresenta valores relativamente altos para as áreas inundadas, apesar das vazões máximas serem as menores dentre todas as situações analisadas, com exceção do Cenário 1. Isto acontece devido ao valor atribuído para o

coeficiente de rugosidade de Manning, n , do canal. Como o Cenário 7 considera uma situação hipotética, em que não houve intervenções na calha do rio e nas APPs, foi atribuído um coeficiente n de 0,035 para o canal, bem maior que o valor presente nos outros cenários, 0,02, associado a canais de alvenarias em más condições de manutenção. Desse modo, o canal do Cenário 7 é mais rugoso, e por isso necessita de uma área molhada maior para veicular a mesma vazão, o que resulta em maiores manchas de inundação. Contudo, ao se considerar as APPs de 30 metros de cada lado do rio e as reservas legais junto às APPs, as cheias não alcançariam as áreas ocupadas.

Dessa forma, pode-se concluir que nenhum dos cenários avaliados foi capaz de resolver a questão das inundações. Este fato mostra a importância de se planejar a urbanização das bacias hidrográficas de forma prévia, evitando-se assim a ocupação das áreas ribeirinhas. A ideia de se averbar as reservas legais junto às APPs, proposta por Alves (2005), se mostra como uma solução interessante, porém infactível neste estudo de caso. Assim, há de se avaliar diferentes soluções para a bacia hidrográfica do Córrego do Gregório, visando a adoção de outras medidas não-estruturais que proporcionem uma convivência mais harmoniosa da população ribeirinha com as inundações. Exemplos de medidas que poderiam ser consideradas são os sistemas de alerta antecipado e seguros contra inundações, estes últimos, analisados em detalhes no trabalho de Graciosa (2010).

A geração das manchas de inundação através do HEC-RAS e da plataforma HEC-GeoRAS também possibilita a visualização da profundidade da lâmina d'água na região analisada. A importância desta análise reside no fato de que quanto maior a profundidade da inundação, maiores são os prejuízos causados. Neste trabalho, foi escolhido o Cenário 6, com tempo de retorno de 100 anos, para uma análise das diferentes profundidades da mancha na área de estudo.

Figura 64 – Profundidades associadas à mancha de inundação do Cenário 6 – Sem plano diretor, com tempo de retorno de 100 anos

Percebe-se pela figura que uma das áreas mais críticas é a chegada do Córrego do Simeão, entre as ruas Episcopal e Nove de Julho, na margem esquerda do Córrego do Gregório. Este fato se constitui em um grande problema, visto que essa área concentra diversos estabelecimentos comerciais. Grandes prejuízos também seriam causados aos comerciantes instalados no Mercado Municipal de São Carlos, localizado na margem direita do Gregório, entre a Avenida São Carlos e a Rua Episcopal, local cujas profundidades da mancha de inundação chegam a ultrapassar 2 metros.

As regiões próximas ao Fórum Municipal e entre as ruas Dom Pedro II e Rui Barbosa, na margem esquerda, também merecem atenção especial por apresentarem profundidades expressivas da mancha. Outra área afetada é o quarteirão entre a Avenida São Carlos e a Rua Dona Alexandrina, na margem direita, porém sua inundação não causaria maiores prejuízos, devido à área em questão abrigar uma praça.

Nesse contexto, o trabalho de Righetto e Menciondo (2004) corrobora algumas informações. Segundo os autores, o histórico das piores inundações ocorridas nesta região indica que as maiores cotas foram registradas nas ruas Nove de Julho e Episcopal. O estudo ainda traz importantes contribuições à discussão, pois os autores entrevistaram diversos comerciantes estabelecidos no Mercado Municipal e proximidades, e constataram serem grandes os prejuízos sofridos pelos lojistas em decorrência de inundações. Assim, concluíram

que há uma carência dos comerciantes desta região quanto a um serviço de seguro contra inundações.

6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Este estudo teve como proposta analisar os hidrogramas e manchas de inundação referentes a diversos cenários de uso e ocupação do solo, a fim de se verificar o efeito de medidas estruturais, não-estruturais e a associação entre as duas.

Visto que não houve calibração dos modelos, devido à falta de dados observados de vazão ao longo do Córrego do Gregório, este trabalho apresenta um caráter essencialmente comparativo entre os cenários estudados. Os resultados obtidos permitem que se compare um cenário com outro quanto aos hidrogramas e áreas inundáveis, porém não representam com fidelidade 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.

Ainda que a falta de dados observados não tenha permitido uma simulação mais exata, pode-se afirmar que a metodologia proposta foi bem sucedida, pois foi possível inferir conclusões quanto ao efeito das medidas de controle de inundações na área de estudo, objetivo central deste trabalho.

A partir dos hidrogramas gerados, conclui-se que, entre os cenários factíveis, o que apresentou os resultados mais favoráveis (menores vazões de pico) foi o Cenário 5, que considerou a associação entre as medidas estruturais e não-estruturais. Este resultado indica um aspecto interessante no contexto do controle de inundações, que mostra a importância de se analisar esse tipo de combinação, dada a grande diversidade de medidas de controle de inundação existentes. Assim, abre-se um extenso leque de possibilidades para pesquisas futuras visando avaliar o efeito sinérgico dessas associações.

Percebe-se também que neste caso, onde a bacia está intensamente urbanizada, a adoção das medidas não-estruturais consideradas não é tão efetiva. Entretanto, verificou-se que ao incorporar este tipo de medida na fase inicial do planejamento urbano, os resultados são significativamente melhores, o que ficou claro com a simulação do Cenário 7. Dessa forma, torna-se visível o caráter preventivo das medidas não-estruturais, conforme mencionado por Walesh (1989). Tais resultados mostram a importância do planejamento urbano para o controle de inundações. Segundo Canholi (2005), este processo de planejamento requer a consideração da bacia hidrográfica como unidade de gestão, independente dos municípios englobados por ela. Esta abordagem torna imprescindível a

formulação de políticas integradoras do desenvolvimento dos municípios, que extrapolem seus limites político-administrativos (GROSTEIN, 2001).

O estudo de medidas de controle não-estruturais também foi focado nos trabalhos de Boldrin (2005) e Alves (2005), os quais obtiveram resultados semelhantes quanto à comparação dos cenários.

Os reservatórios de retenção, propostos pelo Plano Diretor de Drenagem Urbana Ambientalmente Sustentável do Município de São Carlos, apresentaram bons resultados na diminuição das vazões de pico. Contudo, tais medidas não podem ser vistas como única solução, pois a simulação do Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais, revelou que as vazões máximas obtidas ainda são maiores que as do Cenário 1 – Atual, o qual já é bastante problemático. Além disso, apresentam altos custos associados à sua implantação, sendo assim, indicados apenas onde o problema já está instalado, de forma corretiva (WALESH, 1989).

Já a simulação hidráulica mostrou que há ocorrência de inundações na área central estudada para todos os cenários simulados, sem exceção. Estes resultados mostram ser necessários estudos de outros tipos de medidas de controle para minimizar os prejuízos. Dada a dificuldade, ou impossibilidade, de se conter o córrego dentro de seu leito menor, percebe-se que é preciso abordar a utilização de medidas que visam harmonizar a convivência entre a população e as inundações.

Segundo Tucci (2005), as inundações são fenômenos naturais em que o rio ocupa seu leito maior. Assim, a não ocupação dessas áreas é uma saída mais econômica em comparação à adoção das dispendiosas medidas estruturais corretivas. Os resultados deste estudo mostram a dificuldade em resolver a problemática das inundações, e evidenciam que a abordagem preventiva do problema pode apresentar resultados mais eficazes, através de uma adequada regulação do uso do solo.

Dessa forma, conclui-se que, embora este trabalho seja basicamente comparativo, seus resultados colaboram com a discussão acerca do planejamento urbano e do controle de inundações, e mostram que esses dois aspectos são indissociáveis.

Por fim, são feitas algumas recomendações para estudos futuros:

- Implantação de rede de monitoramento hidrometeorológico na bacia do Córrego do Gregório e em outras bacias da área urbana de São Carlos;
- Calibração dos modelos hidráulicos e hidrológicos a partir dos dados observados;
- Estudo de outras associações entre medidas estruturais e medidas não-estruturais, considerando inclusive a possibilidade de desapropriações e desocupações e/ou substituição

dos usos atuais para outros que convivam melhor com as inundações, como: parques lineares, jardins, campos esportivos, etc.;

- Avaliação dos prejuízos causados pelas inundações da área, com vista ao estabelecimento de uma relação custo-benefício para embasar alternativas de desocupação e desapropriação de áreas críticas e substituição de usos;

- Abordagem de medidas que façam o controle na fonte do escoamento superficial, como pavimentos permeáveis, trincheiras de infiltração nos lotes e telhados verdes;

- Desenvolvimento de metodologias que permitam a simulação das medidas de controle na fonte através dos modelos hidrológicos, de forma a avaliar o desempenho conjunto dessas medidas no contexto global da bacia hidrográfica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÁGUAS DA MEMÓRIA: um percurso pelos córregos esquecidos de São Carlos. ... e as chuvas chegaram. 08 Jun. 2011b. Disponível em: <<http://aguasdamemoria.wordpress.com/2011/06/08/e-as-chuvas-chegaram-a-folha-19-de-setembro-1966/>> . Acesso em: 12 Fev. 2012.

ÁGUAS DA MEMÓRIA: um percurso pelos córregos esquecidos de São Carlos. Obras no Córrego do Gregório. 28 Jun. 2011a. Disponível em: <<http://aguasdamemoria.wordpress.com/2011/06/28/obras-no-corrego-gregorio/>> . Acesso em: 12 Fev. 2012.

ALI, M. et al. Simulation of the impacts of land-use change on surface runoff of Lai Nullah Basin in Islamabad, Pakistan. **Landscape and Urban Planning**. v. 102, p. 271-279, 2011.

ALMEIDA, R. C. Roteiro histórico sub-bacia do Córrego do Gregório, 2000. Disponível em: <http://www.cdcc.usp.br/CESCAR/Conteudos/05-05-07/ROTEIRO_HISTORICO.pdf>. Acesso em: 8 Fev. 2012.

ALMEIDA NETO, et al. Análise dos componentes do balanço hídrico em uma bacia urbana experimental. In: III SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS CENTRO-OESTE, 2004, Goiânia. **Anais...** Goiânia, 2004.

ALVES, E. M. **Medidas não-estruturais na prevenção de enchentes em bacias urbanas: cenários para a bacia do Gregório, São Carlos – SP.** 2005. 149 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

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

BARROS, R. M. **Previsão de Enchentes para o Plano Diretor de Drenagem Urbana de São Carlos (PDDUSC) na Bacia Escola do Córrego do Gregório.** 2005. 279 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

BBC BRASIL. Enchente no Rio já é a 4ª mais fatal dos últimos 12 meses no mundo. **BBC Brasil**, Brasília, 13 jan. 2011. Disponível em: <http://www.bbc.co.uk/portuguese/noticias/2011/01/110113_chuvas_compilacao_cred_rw.shtml>. Acesso em: 25 Jan. 2012.

BERRY, J. K. GIS in island resource planning: a case study in map analysis. In: MAGUIRE, D. J.; GOODCHILD, M. F.; RHIND, D. W. **Geographical Information Systems: Principles and Applications**. Volume 2: Applications. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1991. cap. 55, p. 285-295.

BOLDRIN, R. S. **Avaliação de cenários de inundações urbanas a partir de medidas não-estruturais de controle**: trecho da bacia do Córrego do Gregório, São Carlos – SP. 2005. 202 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

BOUNDS, D. G.; GALI, S. Updated hydrologic model development for the Little Calumet River watershed. In: Watershed Management Conference 2010: Innovations in Watershed Management under Land Use and Climate Change. **Proceedings...** Madison: ASCE, 2010.

BRAGA, B. P. F. Non-structural flood control measures – introductory notes for a special issue for urban waters. **Urban Water**. Guest Editorial, v. 1, 1999.

BRASIL. Câmara dos Deputados. Comissão de Desenvolvimento Urbano e Interior. Secretaria Especial de Desenvolvimento Urbano da Presidência da República. Caixa Econômica Federal. Instituto Pólis. **Estatuto da cidade**: guias para implementação pelos municípios e cidadãos. 2ª edição. Brasília: Centro de Documentação e Informação, Coordenação de Publicações, 2002. 273 p.

BRASIL. Lei nº 7.803, de 18 de julho 1989. Altera a redação da Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, e revoga as Leis nº 6.535, de 15 de junho de 1978, e 7.511, de 7 de julho de 1986. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 20 Jul. 1989.

BRASIL. Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 10 Jul. 2001a.

BRASIL. Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001. Altera os arts. 1o, 4o, 14, 16 e 44, e acresce dispositivos à Lei no 4.771, de 15 de setembro de 1965, que institui o Código Florestal, bem como altera o art. 10 da Lei no 9.393, de 19 de dezembro de 1996, que dispõe sobre o Imposto sobre a Propriedade Territorial Rural - ITR, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 24 Ago. 2001b.

BUTLER, D.; DAVIES, J. W. **Urban Drainage**. 2ª edição. New York: Spon Press, 2004. 543 p.

CÂMARA, G. **Introdução ao geoprocessamento**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 1999.

CÂMARA, G.; DAVIS, C. Introdução. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (Eds.). **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 2001. cap 1, p. 1-1 – 1-5.

CAMPOS, J. N. B. **Lições em modelos e simulação hidrológica**. Fortaleza: ASTEF/Expressão Gráfica, 2009. 166 p.

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. São Paulo: Oficina de textos, 2005. 301 p.

CAPONERA, D. A. **Principles of water law and administration**: national and international. Rotterdam: Balkema, 1992. 260 p.

CHEN, J.; HILL, A. A.; URBANO, L. D. A GIS-based model for urban flood inundation. **Journal of Hydrology**. v. 373, p. 184-192. 2009.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. 1ª edição. São Paulo: Edgard Blücher, 1999. 236 p.

COLLODEL, M. G. **Aplicação do modelo hidrológico SWMM na avaliação de diferentes níveis de detalhamento da bacia hidrográfica submetida ao processo de transformação chuva-vazão**. 2009. 219 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

CRED – Centre of Research on the Epidemiology of Disasters. EM – DAT: The International Disaster Database, 2012. Disponível em: <<http://www.emdat.be/database>>. Acesso em: 26 Jan. 2012.

CROSBIE, P. Object-oriented design of GIS: a new approach to environmental modeling. In: GOODCHILD, M. F. et al. (Eds.) **GIS and Environmental Modeling**: Progress and Research Issues. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996, p. 383-386.

DAVIS, C.; CÂMARA, G. Arquitetura de Sistemas de Informação Geográfica. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (Eds.). **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 2001. cap. 3, p. 3-2 – 3-35.

DEVESCOVI, R. C. B. **Urbanização e acumulação**: um estudo sobre a cidade de São Carlos. São Carlos: Arquivo de História Contemporânea, UFSCar, 1987. 261 p.

FABBRO NETO, F. **Avaliação ambiental estratégica para planos de uso e ocupação do solo**: um estudo sobre o plano diretor municipal. 2010. 103 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

FAISAL, I. M.; KABIR, M. R.; NISHAT, A. Non-structural flood mitigation measures for Dhaka City. **Urban Water**. v. 1, p. 145-153. 1999.

FALCOSKI, L. A. N. **Metodologia de análise e avaliação do ambiente construído**: Desenho urbano x infraestrutura. 1988. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1989.

FCTH – Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica. Hidrologia urbana – Capacitação tecnológica e transferência de tecnologia em drenagem urbana, 2003. Disponível em: <<http://www.fcth.br/public/cursos/praiagrande/1HidrologiaUrbana.pdf>>. Acesso em: 20 Fev. 2011.

GARCEZ, L. N. **Hidrologia**. São Paulo: Edgard Blücher, EDUSP, 1967. 249 p.

GAROTTI, L. M.; IMOTO, T. S.; BARBASSA, A. P. Uso da área impermeabilizada diretamente conectada como base para estimação do coeficiente de escoamento superficial e comparação com outras estimativas. In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. **Anais...** São Paulo, 2007.

GOLDENFUM, J. A.; TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, A. L. L. Stormwater management in the humid tropics. In: PARKINSON, J. N.; GOLDENFUM, J. A.; TUCCI, C. E. M. (Eds.). **Integrated Urban Water Management: Humid Tropics**. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), 2010. cap 3, p. 49-68.

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

GROSTEIN, M. D. Metrópole e expansão urbana: a persistência de processos “insustentáveis”. **São Paulo em Perspectiva**, São Paulo, v. 15, n. 1, p. 13-19, 2001.

HOUAISS Dicionário da língua portuguesa. Rio de Janeiro: Editora Objetiva, 2009.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo 2010: população do Brasil é de 190.732.694 pessoas. **Sala de imprensa**, 29 nov. 2010. Disponível em : <http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=1766>. Acesso em: 24 Jan. 2012.

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

KNEBL, M. R. et al. Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. **Journal of Environmental Management**, v. 75, p. 325-336, 2005.

LORANDI, R. **Caracterização dos solos das áreas urbana e suburbana de São Carlos (SP) e suas aplicações**. 1985. 181 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1985.

MACHADO, E. S. **Modelo hidrológico determinístico para bacias urbanas**. 1981. 286 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1981.

MAGUIRE, D. J. An overview and definition of GIS. In: MAGUIRE, D. J.; GOODCHILD, M. F.; RHIND, D. W. **Geographical Information Systems: Principles and Applications**. Volume 1: Principles. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1991. cap. 1, p. 9-20.

MENDES, C.A.B.; GREHS, S. A. Enfoques econômicos para dilemas ambientais de cidades: análises em bacias hidrográficas. **Revista de desenvolvimento econômico**. Salvador, ano IX, n. 15, p. 69-78. 2007.

MENDES, H. C. et al. Levantamento histórico de inundações na sub-bacia do Gregório, São Carlos – SP, a partir de análise de notícias de jornais antigos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 16, 2005, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: ABRH, 2005. p. 1-13.

MERWADE, V.; COOK, A.; COONROD, J. GIS techniques for creating river terrain models for hydrodynamic modeling and flood inundation mapping. **Environmental Modelling & Software**. v. 23, p. 1300-1311. 2008.

NASCIMENTO, N. O.; BAPTISTA, M. B.; KAUARK-LEITE, L. A. Stormwater management problems in a tropical city – the Belo Horizonte case study. In: Impacts of Urban Growth on Surface Water and Groundwater Quality, 1999. **Proceedings of IUGG 99 Symposium HS5**, Birmingham, IAHS Publ. n. 259, 1999. p. 299-305.

NASCIMENTO, N. O.; BAPTISTA, M. B. Aspectos Institucionais e de Financiamento dos Sistemas de Drenagem Urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, v. 7, n. 1, p. 29-49. 2002.

ODUM, E. P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1988. 432 p.

OESA – Organização e Engenharia S.A. Sistema de drenagem de águas pluviais da bacia do Córrego do Gregório – Sistema proposto – Planta. São Carlos: 1971. Levantamento aerofotogramétrico executado em janeiro de 1970 pela Aeromapa Brasil S.A. Escala 1:2.000.

OLIVEIRA, R. C. **Medidas não estruturais na prevenção e controle de enchentes em áreas urbanas, como subsídios para o planejamento de uso e ocupação do solo**: estudo de caso – bacia do córrego do Gregório – São Carlos (SP). 1999. 133 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

PARK, J. H.; HUR, Y. T. Development and application of GIS based K-DRUM for flood runoff simulation using radar rainfall. **Journal of Hydro-environment Research**. doi: 10.1016/j.jher.2011.05.005. In press.

PMSC – Prefeitura Municipal de São Carlos. **Conferência da cidade**: Diagnóstico para elaboração do Plano Diretor de São Carlos, 2003. 1 CD-ROM.

PMSC – Prefeitura Municipal de São Carlos. Lei nº 13.691, de 25 de novembro de 2005. Institui o Plano Diretor do Município de São Carlos e dá outras providências. São Carlos, 25 Nov. 2005b. Disponível em: <http://www.saocarlos.sp.gov.br/images/stories/pdf/Lei_13691_05_Plano_Diretor.pdf>. Acesso em: 01 Fev. 2012.

PMSC – Prefeitura Municipal de São Carlos. Processo de Elaboração do Plano Diretor, 2005a. Disponível em: <<http://www.saocarlos.sp.gov.br/index.php/utilidade-publica/plano-diretor.html>>. Acesso em: 01 Fev. 2012.

PMSC – Prefeitura Municipal de São Carlos. Secretaria Municipal de Obras. SHS Consultoria e Projetos de Engenharia S/S Ltda. **Plano Diretor de Drenagem Urbana Ambientalmente Sustentável**. São Carlos: 2011. 213 p. Relatório Síntese. Volume II – Medidas Estruturais, Medidas Não Estruturais e Custos. Contrato nº 87/09 – Processo nº 6.965/07.

PORTO, R. L.L. et al. Drenagem Urbana. In: TUCCI, C. E. M. (Ed.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2ª edição. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 2001. cap. 21, p. 805-848.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 4ª edição. São Carlos: EESC-USP, Projeto REENGE, 2006. 519 p.

RIBEIRO, C. A. G.; MENDIONDO, E. M. Sinaleira ambiental como estratégia de gestão de risco de inundação – estudo de caso na população da micro-bacia do Gregório, São Carlos, SP (Brasil). In: Jornadas Internacionales sobre Gestión Del Riesgo de Inundaciones y Deslizamientos de Laderas, 2007. São Carlos. **Anais...** São Carlos, 2007.

RIGHETTO, A. M. **Hidrologia e recursos hídricos**. São Carlos: EESC-USP, Projeto REENGE, 1998. 819 p.

RIGHETTO, J. M.; MENDIONDO, E. M. Avaliação de riscos hidrológicos: principais danos e causas e proposta de seguro contra enchentes. In: III SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS CENTRO-OESTE, 2004, Goiânia. **Anais...** Goiânia, 2004.

ROBINETTE, A. Land management applications of GIS in the state of Minnesota. In: MAGUIRE, D. J.; GOODCHILD, M. F.; RHIND, D. W. **Geographical Information Systems: Principles and Applications**. Volume 2: Applications. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1991. cap. 54, p. 275-283.

ROBINSON, M. et al. Classification of different sustainable flood retention basin types. **Journal of Environmental Sciences**. v. 22, n. 6, p. 898-903, 2010.

ROCHA, J. V. O sistema de informações geográficas no contexto do planejamento integrado de bacias hidrográficas. In: ORTEGA, E. **Engenharia ecológica e agricultura sustentável: Exemplos de uso da metodologia energética-ecossistêmica**. Campinas: Unicamp, 2003. cap. 20. Disponível em: <<http://www.fea.unicamp.br/docentes/ortega/livro/C20-SIGPIBH-Jansle.pdf>>. Acesso em: 20 Fev. 2012.

SANTOS, S. A. M. et al. **Roteiro Visita: Sub-bacia hidrográfica do Córrego do Gregório**. São Carlos: CDCC, Centro de Divulgação Científica e Cultural, 2008, 38 p.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 10, n. 4, p. 5-18, 2005.

SHEAFFER, J. R. **Urban storm drainage management**. New York: M. Dekker, 1982. 271 p.

SILVEIRA, A. L. L. Aspectos Históricos da Drenagem Urbana no Brasil. In: TUCCI, C. E. M.; GOLDENFUM, J. A.; DEPETTRIS, C.; PILAR, J. **Hidrologia Urbana na Bacia do Prata**, ABRH, CAPEs, IPH/UFRGS, SETCIP, UNNE, p. 11-17.

SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 10, n. 1, p. 5-23, 2005.

SINGH, V. P. **Computer Models of Watershed Hydrology**. Highlands Ranch: Water Resources Publications, 1995. 1130 p.

SURIYA, S.; MUDGAL, B. V. Impact of urbanization on flooding: The Thirusoolam sub watershed – A case study. **Journal of Hydrology**. v. 412, p. 210-219, 2012.

TUCCI, C. E. M. A necessidade do planejamento da drenagem urbana. In: TUCCI, C. E. M.; MARQUES, D. M. L. M. **Avaliação e controle da drenagem urbana**. 1ª edição. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 2000. cap 7.1, p. 499-502.

TUCCI, C. E. M. Águas urbanas. **Estudos Avançados**. São Paulo, v. 22, n. 63, p. 97-112, 2008.

TUCCI, C. E. M. Controle de Enchentes. In: _____ (Ed.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2ª edição. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 2001. cap. 16, p. 621-658.

TUCCI, C.E.M. **Gestão das inundações urbanas**. Porto Alegre, 2005. Disponível em : <http://www.sedur.ba.gov.br/pemapes/pdf/material_tecnico/Manual_Gestao_Inundacoes_Urbanas_Tucci_2005.pdf>. Acesso em: 18 Jan. 2012.

TUCCI, C. E. M. Inundações Urbanas. In: TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T (Eds.). **Drenagem Urbana**. 1ª edição. Porto Alegre: ABRH/Editora da Universidade/UFRGS, 1995. cap. 1, p. 15-36.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998. 669 p.

TUCCI, C. E. M.; GENZ, F. Controle do Impacto da Urbanização. In: TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T (Eds.). **Drenagem Urbana**. 1ª edição. Porto Alegre: ABRH/Editora da Universidade/UFRGS, 1995. cap. 7, p. 277-347.

TUCCI, C. E. M.; VILLANUEVA, A. O. N. Flood control measures in União da Vitória and Porto União: structural vs. non-structural measures. **Urban Water**. v. 1, p. 177-182. 1999.

UNITED NATIONS, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. **World Population Prospects: The 2010 Revision, Volume I: Comprehensive Tables**. New York, 2011. Disponível em: <http://esa.un.org/wpp/Documentation/pdf/WPP2010_Volume-I_Comprehensive-Tables.pdf> Acesso em: 24 Jan. 2012.

USACE – US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. **HEC - HMS Hydrologic Modeling System: User's Manual**. Davis: HEC, 2010a. 306 p.

USACE – US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. **HEC – RAS River Analysis System: User's Manual**. Davis: HEC, 2010b. 785 p.

USDA – United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Conservation Engineering Division. **Urban Hydrology for Small Watersheds**. Technical Release 55. 2ª edição. Washington: NRCS, 1986. 164 p.

USDA – United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. Hydrographs. In: _____. **National Engineering Handbook**. Washington: NRCS, 2007. cap 16.

WALESH, S. G. **Urban Surface Water Management**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1989. 518 p.

WALTERS, C. J. Systems ecology: the systems approach and mathematical models in ecology. In: ODUM, E. P. **Fundamentals of Ecology**. 3ª edição. Philadelphia: W. B. Saunders Company, 1971. cap. 10. p. 276-292.

WANIELISTA, M. P.; YOUSEF, A. Y. **Stormwater Management**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1993. 579 p.

ZAHED FILHO, K.; MARCELLINI, S. S. Precipitações Máximas. In: TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T (Eds.). **Drenagem Urbana**. 1ª edição. Porto Alegre: ABRH/Editora da Universidade/UFRGS, 1995. cap. 2, p. 37-76.

**APÊNDICE A – Hidrogramas afluentes e efluentes aos reservatórios de retenção para
os Cenários 3 e 5**

Figura 65 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório G1 – B 93.5 para o Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais, e tempo de retorno de 25 anos

Figura 66 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório G2 – B 83.5 para o Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais, e tempo de retorno de 25 anos

Figura 67 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório S1 – B 84.5 para o Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais, e tempo de retorno de 25 anos

Figura 68 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório La1 – B 97.5 para o Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais, e tempo de retorno de 25 anos

Figura 69 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório La2 – B 98.5 para o Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais, e tempo de retorno de 25 anos

Figura 70 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório G1 – B 93.5 para o Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais, e tempo de retorno de 50 anos

Figura 71 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório G2 – B 83.5 para o Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais, e tempo de retorno de 50 anos

Figura 72 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório S1 – B 84.5 para o Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais, e tempo de retorno de 50 anos

Figura 73 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório La1 – B 97.5 para o Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais, e tempo de retorno de 50 anos

Figura 74 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório La2 – B 98.5 para o Cenário 3 – Plano diretor e medidas estruturais, e tempo de retorno de 50 anos

Figura 75 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório G1 – B 93.5 para o Cenário 5 – Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais, e tempo de retorno de 25 anos

Figura 76 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório G2 – B 83.5 para o Cenário 5 – Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais, e tempo de retorno de 25 anos

Figura 77 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório S1 – B 84.5 para o Cenário 5 – Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais, e tempo de retorno de 25 anos

Figura 78 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório La1 – B 97.5 para o Cenário 5 – Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais, e tempo de retorno de 25 anos

Figura 79 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório La2 – B 98.5 para o Cenário 5 – Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais, e tempo de retorno de 25 anos

Figura 80 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório G1 – B 93.5 para o Cenário 5 – Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais, e tempo de retorno de 50 anos

Figura 81 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório G2 – B 83.5 para o Cenário 5 – Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais, e tempo de retorno de 50 anos

Figura 82 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório S1 – B 84.5 para o Cenário 5 – Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais, e tempo de retorno de 50 anos

Figura 83 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório La1 – B 97.5 para o Cenário 5 – Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais, e tempo de retorno de 50 anos

Figura 84 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório La2 – B 98.5 para o Cenário 5 – Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais, e tempo de retorno de 50 anos

Figura 85 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório G1 – B 93.5 para o Cenário 5 – Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais, e tempo de retorno de 100 anos

Figura 86 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório G2 – B 83.5 para o Cenário 5 – Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais, e tempo de retorno de 100 anos

Figura 87 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório S1 – B 84.5 para o Cenário 5 – Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais, e tempo de retorno de 100 anos

Figura 88 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório La1 – B 97.5 para o Cenário 5 – Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais, e tempo de retorno de 100 anos

Figura 89 – Hidrogramas afluente e efluente ao reservatório La2 – B 98.5 para o Cenário 5 – Plano diretor, medidas estruturais e medidas não-estruturais, e tempo de retorno de 100 anos

APÊNDICE B – Hidrogramas que passam pelos nós 2 e 13, para cada cenário e tempo de retorno

Figura 90 – Hidrogramas que passam pelo nó 2, para tempo de retorno de 25 anos

Figura 91 – Hidrogramas que passam pelo nó 2, para tempo de retorno de 50 anos

Figura 92 – Hidrogramas que passam pelo nó 2, para tempo de retorno de 100 anos

Figura 93 – Hidrogramas que passam pelo nó 13, para tempo de retorno de 25 anos

Figura 94 – Hidrogramas que passam pelo nó 13, para tempo de retorno de 50 anos

Figura 95 – Hidrogramas que passam pelo nó 13, para tempo de retorno de 100 anos

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

Fontes

- SMH DU - Secretaria Municipal de Habitação e Desenvolvimento Urbano
- SMAA - Secretaria Municipal de Agricultura e Abastecimento
- SAAE - Serviço Autônomo de Água e Esgoto
- Base digitalizada pelo setor de geoprocessamento do SAAE, a partir da base cartográfica IBGE/DSG escala 1:50.000 e atualizações realizadas por meio de levantamento aerofotogramétrico de 1998 e cartas do IGC
- IGC - Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo

Projeção Universal Transversa de Mercator (Datum horizontal: SAD 69)

Legenda

Zona 1 - Ocupação Induzida	Zona 4 - Regulação e Ocupação Controlada
Zona 2 - Ocupação Condicionada	Zona 5 - Proteção e Ocupação Restrita
Zona 3 - Recuperação e Ocupação Controlada	Zona 6 - Produção Agrícola Familiar
Campi Universitários	Zona 7 - Uso Predominantemente Agrícola
Rodovia	Perímetro Urbano
Córrego	Limite do Município
	Ferrovia

Prefeitura Municipal de São Carlos

PLANO DIRETOR DO MUNICÍPIO DE SÃO CARLOS

Zoneamento do Município

Escala: 1:60.000

Cada centímetro equivale a 600 metros

Base Cartográfica: ver fontes

Elaboração: SMH DU

Data: Outubro de 2005

ANEXO B – Coeficientes aplicados a cada zona do Plano Diretor do Município de São Carlos (PMSC, 2005b)

Plano Diretor de São Carlos - COEFICIENTES	
Macrozona Urbana	Macrozona de Uso Multifuncional Rural
Zona 1 – Ocupação Induzida CO = 70% CAB = 2 CAM = 3,5 CA = 1,4 para uso estritamente residencial unifamiliar CP = 15%	Zona 4 – Regulação e Ocupação Controlada CO = 30% para chácaras de recreio CO = 70% para demais parcelamentos CA = 0,3 para chácaras de recreio CA = 1 para demais parcelamentos CA = 1,4 para EHI S CP = 40% para chácaras de recreio CP = 20% para demais parcelamentos obs.: Chácaras de Recreio serão admitidas somente na Zona 4A, com lotes mínimos de 1.500m ²
Zona 2 – Ocupação Condicionada CO = 70% CAB = 1,4 CAM = 3 nos eixos da zona 2* CA = 1,4 para uso estritamente residencial unifamiliar CP = 15%	Zona 5 – Proteção e Ocupação Restrita CO = 25% CA = 0,25 CP = 50% CCV = 50% obs.: Parcelamento mínimo: Zona 5A: 1.500m ² Zona 5B: 3.000m ²
Zona 3A – Recuperação e Ocupação Controlada CO = 70% CA = 1,4 para EHI S CA = 1 para demais parcelamentos CP = 15%	Definições: <i>Coeficiente de Ocupação:</i> $CO = \frac{\text{área da projeção da edificação}}{\text{área do lote}}$ 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) <i>Coeficiente de Aproveitamento:</i> $CA = \frac{\text{área edificada}}{\text{área do lote}}$ <i>Coeficiente de Permeabilidade:</i> $CP = \frac{\text{área permeável} \times 100}{\text{área do lote}}$ <i>Coeficiente de Cobertura Vegetal:</i> $CV = \frac{\text{área vegetada} \times 100}{\text{área do lote}}$
Zona 3B – Recuperação e Ocupação Controlada CO = 70% para lotes de 125m ² CO = 70% a 50% para lotes de 125,01m ² a 300m ² (CO = 84,287 – 0,11429 x área) CO = 50% para lotes maiores que 300m ² CA = 1,4 para EHI S CA = 1 para demais parcelamentos CP = 15% para lotes de 125m ² CP = 15% a 30% para lotes de 125,01m ² a 300m ² (CP = 0,0857 x área + 4,286) CP = 30% para lotes maiores que 300m ² CCV = 10% obs: máximo de 2 pavimentos	* eixos da zona 2: Av. Henrique Gregori, Av. Grécia e Av. Theodureto de Camargo

esta folha é apenas um resumo; para informações mais precisas e atualizadas, consulte sempre os anexos da lei 13.691/05 – Plano Diretor do Município de São Carlos

Figura 96 – Coeficientes aplicados às Zonas 1, 2, 3A, 3B, 4 e 5

ANEXO C – Localização dos reservatórios (PMSC, 2011)

ANEXO D – Valores de CN para diferentes tipos de uso do solo (USDA, 1986)

Tabela 15 - Valores de CN para áreas urbanas

Cover description		Curve numbers for hydrologic soil group			
Cover type and hydrologic condition	Average percent impervious area ⁴	A	B	C	D
Fully developed urban areas (vegetation established)					
Open space (lawns, parks golf courses, cemeteries, etc.):					
Poor condition (grass cover < 50%)		68	79	86	89
Fair condition (grass cover 50% to 75%)		49	69	79	84
Good condition (grass cover > 75%)		39	61	74	80
Impervious areas:					
Paved parking lots, roofs, driveways, etc. (excluding right-of-way)		98	98	98	98
Streets and roads:					
Paved; curbs and storm sewers (excluding right-of-way)		98	98	98	98
Paved; open ditches (including right-of-way)		83	89	92	93
Gravel (including right-of-way)		76	85	89	91
Dirt (including right-of-way)		72	82	87	89
Western desert urban areas:					
Natural desert landscaping (pervious areas only)		63	77	85	88
Artificial desert landscaping (impervious weed barrier, desert shrub with 1 to 2 inch sand or gravel mulch, and basin borders)		96	96	96	96
Urban districts					
Commercial and business	85	89	92	94	95
Industrial	72	81	88	91	93
Residential districts by average lot size:					
1/8 acre or less (town houses)	65	77	85	90	92
1/4 acre	38	61	75	83	87
1/3 acre	30	57	72	81	86
1/2 acre	25	54	70	80	85
1 acre	20	51	68	79	84
2 acres	12	46	65	77	82
Developing urban areas					
Newly graded areas (pervious areas, no vegetation)		77	86	91	94

⁴ The average percent impervious area shown was used to develop the composite CN's. Other assumptions are as follows: impervious areas are directly connected to the drainage system, impervious areas have a CN of 98, and pervious areas are considered equivalent to open space in good hydrologic condition.

Tabela 16 - Valores de CN para áreas agrícolas

Cover description			Curve numbers for hydrologic soil group			
Cover type	Treatment ⁵	Hydrologic condition ⁶	A	B	C	D
Fallow	Bare soil	-	77	86	91	94
	Crop residue cover (CR)	Poor	76	85	90	93
		Good	74	83	88	90
Row crops	Straight row (SR)	Poor	72	81	88	91
		Good	67	78	85	89
	SR + CR	Poor	71	80	87	90
		Good	64	75	82	85
	Contoured (C)	Poor	70	79	84	88
		Good	65	75	82	86
	C + CR	Poor	69	78	83	87
		Good	64	74	81	85
	Contoured and terraced (C&T)	Poor	66	74	80	82
		Good	62	71	78	81
	C&T + CR	Poor	65	73	79	81
		Good	61	70	77	80
Small grain	SR	Poor	65	76	84	88
		Good	63	75	83	87
	SR + CR	Poor	64	75	83	86
		Good	60	72	80	84
	C	Poor	63	74	82	85
		Good	61	73	81	84
	C + CR	Poor	62	73	81	84
		Good	60	72	80	83
	C&T	Poor	61	72	79	82
		Good	59	70	78	81
	C&T + CR	Poor	60	71	78	81
		Good	58	69	77	80
Close- seeded or broadcast legumes or rotation meadow	SR	Poor	66	77	85	89
		Good	58	72	81	85
	C	Poor	64	75	83	85
		Good	55	69	78	83
	C&T	Poor	63	73	80	83
		Good	51	67	76	80

⁵ Crop residue cover applies only if residue is on at least 5% of the surface throughout the year

⁶ Hydrologic condition is based on combination factors that affect infiltration and runoff, including (a) density and canopy of vegetative areas, (b) amount of round cover, (c) amount of grass or close-seeded legumes, (d) percent of residue cover on the land surface (good $\geq 20\%$) and (e) degree of surface roughness.

Poor: Factors impair infiltration and tend to increase runoff.

Good: Factors encourage average and better than average infiltration and tend to decrease runoff.

Tabela 17 - Valores de CN para outros tipos de áreas agrícolas

Cover description		Curve numbers for hydrologic soil group			
Cover type	Hydrologic condition	A	B	C	D
Pasture, grassland, or range – continuous forage for grazing. ⁷	Poor	68	79	86	89
	Fair	49	69	79	84
	Good	39	61	74	80
Meadow – continuous grass, protected from grazing and generally mowed for hay.	-	30 ⁸	58	71	78
Brush – brush-weed-grass mixture with brush the major element. ⁹	Poor	48	67	77	83
	Fair	35	56	70	77
	Good	30	48	65	73
Woods- grass combination (orchard or tree farm). ¹⁰	Poor	57	73	82	86
	Fair	43	65	76	82
	Good	32	58	72	79
Woods. ¹¹	Poor	45	66	77	83
	Fair	36	60	73	79
	Good	30 ⁵	55	70	77
Farmsteads – buildings, lanes, driveways, and surrounding lots.	-	59	74	82	86

⁷ Poor: < 50% ground cover or heavily grazed with no mulch.
Fair: 50 to 75% ground cover and not heavily grazed.
Good: > 75% ground cover and lightly or only occasionally grazed.

⁸ Actual curve number is less than 30; use CN = 30 for runoff computations

⁹ Poor: < 50% ground cover.
Fair: 50 to 75% ground cover.
Good: > 75% ground cover.

¹⁰ CN's shown were computed for areas with 50% woods and 50% grass (pasture) cover. Other combinations of conditions may be compute from the CN's for woods and pasture.

¹¹ Poor: Forest litter, small trees, and brush are destroyed by heavily grazing or regular burning.
Fair: Woods are grazed but not burned, and some forest litter covers the soil.
Good: Woods are protected from grazing, and litter and brush adequately cover the soil.

Tabela 18 - Valores de CN para regiões áridas e semiáridas

Cover description		Curve numbers for hydrologic soil group			
Cover type	Hydrologic condition ¹²	A ¹³	B	C	D
Herbaceous – mixture of grass, weeds, and low-growing brush, with brush the minor element.	Poor		80	87	93
	Fair		71	81	89
	Good		62	74	85
Oak-aspen – mountain brush mixture of oak brush, aspen, mountain mahogany, bitter brush, maple, and other brush.	Poor		66	74	79
	Fair		48	57	63
	Good		30	41	48
Pinyon-juniper – pinyon, juniper, of both; grass understory.	Poor		75	85	89
	Fair		58	73	80
	Good		41	61	71
Sagebrush with grass understory.	Poor		67	80	85
	Fair		51	63	70
	Good		35	47	55
Desert shrub – major plants include saltbrush, greasewood, creosotebush, blackbrush, bursage, palo verde, mesquite, and cactus	Poor	63	77	85	88
	Fair	55	72	81	86
	Good	49	68	79	84

¹² Poor: < 30% ground cover (litter, grass, and brush overstory).

Fair: 30 to 70% ground cover.

Good: > 70% ground cover.

¹³ Curve numbers for group A have been developed only for desert shrub.