

Universidade Federal do Espírito Santo
Centro Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental

PATRÍCIA COVRE BASTOS

**EFEITOS DA URBANIZAÇÃO SOBRE VAZÕES
DE PICO DE ENCHENTE**

Vitória

2009

PATRÍCIA COVRE BASTOS

**EFEITOS DA URBANIZAÇÃO SOBRE VAZÕES
DE PICO DE ENCHENTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Centro Tecnológica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Ambiental.

Área de Concentração: Recursos Hídricos

Orientador: Prof. Antônio Sérgio Ferreira
Mendonça, Ph.D

Vitória
2009

PATRÍCIA COVRE BASTOS

**EFEITOS DA URBANIZAÇÃO SOBRE VAZÕES
DE PICO DE ENCHENTE**

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Antônio Sérgio Ferreira Mendonça, Ph.D
Orientador - UFES

Prof. Dr. Daniel Rigo
Examinador interno - UFES

Prof. Dr. José Antônio Tosta dos Reis
Examinador externo - IFES

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

B327e Bastos, Patrícia Covre, 1979-
Efeitos da urbanização sobre vazões de pico de enchente /
Patrícia Covre Bastos. – 2009.
136 f. : il.

Orientador: Antônio Sérgio Ferreira Mendonça.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito
Santo, Centro Tecnológico.

1. Planejamento urbano. 2. Drenagem. 3. Inundações. I.
Mendonça, Antonio Sergio Ferreira. II. Universidade Federal do
Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 628

Dedicatória

A Macários Afonso Nolasco...marido na próxima primavera.

A Telmo e Marilene, exemplos...em todas as estações.

À Casa de Oração São Francisco de Assis...que não me deixa esquecer que há verão...por mais tenebroso que seja o inverno.

Agradecimentos

Ao Prof. Antônio Sérgio, pela confiança e oportunidade;

Aos meus pais, que me ensinaram agir com determinação e coragem;

Ao Mac, futuro marido, que teve paciência de esperar pelo nosso casamento;

Aos seres da Casa de Oração São Francisco de Assis...obrigada vovô...obrigada crianças;

Ao Departamento de Engenharia Ambiental pelo auxílio em diversos momentos;

À Rose, pela prestatividade;

Ao CNPq, pela bolsa de estudo concedida;

Enfim, a todos aqueles que participaram deste processo, com palavras de estímulo, incentivo e carinho.

Muito Obrigada!

LISTA DE FIGURAS

Figura 01	Evolução da mancha urbana de São Paulo.....	19
Figura 02	Estimativa da velocidade média em canais rasos.....	64
Figura 03	Fluxograma para estimativa de vazão máxima regional.....	71
Figura 04	Hidrograma Unitário Curvilíneo e Triangular do SCS.....	80
Figura 05	Determinação de C_t indicada para o HUS de Snyder pelo CUHP.....	82
Figura 06	Determinação do fator de pico (F_p) para o HUS de Snyder pelo CUHP.....	82
Figura 07	HU sintético de Snyder.....	84
Figura 08	Arquitetura de um Sistema de Informações Geográficas.....	85
Figura 09	Localização geográfica da bacia do Córrego dos Monos no Estado do Espírito Santo.....	88
Figura 10	Bacia hidrográfica do Córrego dos Monos e as três sub-bacias avaliadas.....	90
Figura 11	Imagem aérea da Bacia hidrográfica do Córrego dos Monos e as três sub-bacias avaliadas.....	90
Figura 12	Relação entre a ocupação urbana e rural da Bacia do Córrego dos Monos para os diferentes cenários.....	97
Figura 13	Relação entre a ocupação urbana e rural da Sub-bacia 01 para os diferentes cenários.....	97
Figura 14	Relação entre a ocupação urbana e rural da Sub-bacia 02 para os diferentes cenários.....	97
Figura 15	Relação entre a ocupação urbana e rural da Sub-bacia 03 para os diferentes cenários.....	97
Figura 16	Cenários da evolução urbana na bacia do Córrego dos Monos: (a) pré-urbanização, (b) urbanização inicial, (c) urbanização atual, (d) urbanização projetada.....	98
Figura 17	Cenários da evolução urbana na sub-bacia 01 (SB01): (a) pré-urbanização, (b) urbanização inicial, (c) urbanização atual, (d) urbanização projetada.....	99
Figura 18	Cenários da evolução urbana na sub-bacia 02 (SB02): (a) pré-urbanização, (b) urbanização inicial, (c) urbanização atual, (d) urbanização projetada.....	100
Figura 19	Cenários da evolução urbana na sub-bacia 01 (SB01): (a) pré-urbanização, (b) urbanização inicial, (c) urbanização atual, (d) urbanização projetada.....	101
Figura 20	Modelo sombreado (a) e Declividade da bacia hidrográfica do Córrego dos Monos (b), Cachoeiro de Itapemirim, ES.....	102
Figura 21	Zoneamento urbano da Bacia dos Monos e expansão projetada.....	105
Figura 22	Zoneamento urbano e expansão projetada: (a)SB01, (b) SB02 e (c) SB03.....	107
Figura 23	Imagem aérea do Bairro Gilson Carone.....	108
Figura 24	Tempo de concentração da bacia hidrográfica do Córrego dos Monos calculado sob diferentes métodos.....	110
Figura 25	Tempo de concentração da sub-bacia 01 (SB01) calculado sob diferentes métodos.....	110
Figura 26	Tempo de concentração da sub-bacia 02 (SB02) calculado sob diferentes métodos.....	111
Figura 27	Tempo de concentração da sub-bacia 03 (SB03) calculado sob diferentes métodos.....	111
Figura 28	Chuvas máximas de projeto para várias durações e período de retorno de 50 anos.....	112

Figura 29	Intensidades máximas de projeto para várias durações e período de retorno de 50 anos.....	113
Figura 30	Valores de CN para cada cenário.....	115
Figura 31	Vazões de pico (a) e comparação de incremento de vazão (b) entre cenários da bacia do Córrego dos Monos (BCM).....	119
Figura 32	Vazões de pico (a) e comparação de incremento de vazão (b) entre cenários da sub-bacia 01 (SB01).....	119
Figura 33	Vazões de pico (a) e comparação de incremento de vazão (b) entre cenários da sub-bacia 02 (SB02).....	120
Figura 34	Vazões de pico (a) e comparação de incremento de vazão (b) entre cenários da Sub-bacia 03 (SB03).....	120
Figura 35	Hidrogamas BCM de acordo com os Métodos (a) Racional, (b) Racional Modificado, (c) SCS, (d) Snyder (Porto et al, 1995) e (e) Snyder (Tucci, 2004).....	122
Figura 36	Hidrogamas SB 01 de acordo com os Métodos (a) Racional, (b) Racional Modificado, (c) SCS, (d) Snyder (Porto et al, 1995) e (e) Snyder (Tucci, 2004).....	123
Figura 37	Hidrogamas SB 02 de acordo com os Métodos (a) Racional, (b) Racional Modificado, (c) SCS, (d) Snyder (Porto et al, 1995) e (e) Snyder (Tucci, 2004).....	124
Figura 38	Hidrogamas SB 03 de acordo com os Métodos (a) Racional, (b) Racional Modificado, (c) SCS, (d) Snyder (Porto et al, 1995) e (e) Snyder (Tucci, 2004).....	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 01	Número de municípios com serviço de drenagem urbana por existência de legislação municipal que exige a aprovação e implantação de sistema de drenagem pluvial para loteamentos novos e/ou populares (%).....	34
Tabela 02	Número municípios que sofreram inundações ou enchentes por fatores agravantes (%).....	34
Tabela 03	Vantagens e desvantagens no emprego das diferentes formas de redução e retenção do escoamento superficial direto.....	38
Tabela 04	Medidas alternativas - vantagens e desvantagens.....	44
Tabela 05	Comparativo entre as classificações estabelecidas por Horton e Strahler.....	46
Tabela 06	Valores de CN para bacias urbanas e suburbanas/Condição AMC II de umidade antecedente.....	55
Tabela 07	Valores de CN para bacias rurais/Condição AMC II de umidade antecedente.....	56
Tabela 08	Classificação dos grupos hidrológicos do solo e suas capacidades de infiltração.	57
Tabela 09	Correção de CN para outras condições iniciais de umidade.....	58
Tabela 10	Determinação do período de retorno em função da ocupação da área.....	61
Tabela 11	Valores de períodos de retorno.....	62
Tabela 12	Valores de n para escoamento em superfícies (<i>overland flow</i>).....	63
Tabela 13	Valores de n para revestimento usuais de canais.	64
Tabela 14	Sumário de fórmula para cálculo do tempo de concentração (t_c).....	65
Tabela 15	Velocidade média para cálculo do t_c , em m/s, segundo método cinemático definido pelo SCS.....	66
Tabela 16	Coeficientes da equação das curvas i-d-f para algumas cidades brasileiras.....	77
Tabela 17	Coeficiente de deflúvio (escoamento) superficial (C).....	79
Tabela 18	Características físicas das áreas de estudo.....	89
Tabela 19	Características morfométricas das áreas de estudo.....	103
Tabela 20	Índices urbanísticos estabelecidos pelo PDM para usos comercial/serviço e industrial.....	106
Tabela 21	Precipitações efetivas e suas respectivas durações para $T_r=50$	113
Tabela 22	Valores de CN atribuídos a cada uso do solo presente nas áreas de estudo.....	114
Tabela 23	Coeficiente “S” e início da chuva excedente para cada cenário.....	116
Tabela 24	Valores de C atribuídos a cada uso do solo presente nas áreas de estudo.....	116
Tabela 25	Valores ponderados de C para cada cenário de estudo.....	117
Tabela 26	Vazões de pico simuladas na área de estudo e os respectivos incrementos de vazão em relação ao cenário anterior.....	118

LISTA DE ABREVIATURAS

AM	<i>Automated Mapping</i>
CADD	<i>Computer Aided Design and Drafting</i>
CUHP	Colorado Urban Hydrograph Procedure
DER/SP	Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FM	<i>Facility Management</i>
GIS	<i>Geographic Information Systems</i>
HU	Hidrograma Unitário
HUS	Hidrograma Unitário Sintético
IBGE	Instituto Brasileiro de Estatística e Geografia
IDF	Relação: Intensidade x Duração x Frequência
LID	<i>Low Impact Development</i>
MDT	Modelo Digital do Terreno
PDDrU	Plano Diretor de Drenagem Urbana
PDM	Plano Diretor Municipal
PDU	Plano Diretor Urbano
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
PRCI	Porcentagem do comprimento do talvegue modificado ou da bacia tornada impermeável
REM	Radiação eletromagnética
SCS	Soil Conservation Service
SERFHAU	Serviço Federal de Habitação e Urbanismo
SIG	Sistema de Informações Geográficas
UTM	Sistema de Projeção Universal Transversal de Mercator

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área de drenagem
a, b, c, d	Parâmetro de ajuste da equação de chuvas intensas
A_i	Área da bacia correspondente à ocupação desejada
a_v	Relação entre área coberta de vegetação e área total da bacia
C	Coefficiente de escoamento superficial
CA	Coefficiente de aproveitamento
C_i	Coefficiente de escoamento superficial correspondente à ocupação desejada
C_m	Coefficiente de manutenção
CN	Número de curva
C_p	Capacidade de armazenamento
C_t	Porcentagem de impermeabilização da bacia
D	Duração da chuva excedente
D_d	Densidade de drenagem
D_h	Densidade hidrográfica
F	Fator de infiltração
f	Fator de ajuste do Método Racinonal
FA	Fator de ajuste a ser aplicado a t_R
F_p	Fator de pico
H	Diferença de elevação entre montante e jusante do rio principal (m)
H_b	Diferença de elevação entre montante e jusante na bacia (m)
H_m	Amplitude Altimétrica Máxima
i	Declividade do curso d'água
I	Intensidade média da precipitação (mm/h)
I_a	Perda inicial da precipitação acumulada
I_b	Taxa mínima de infiltração correlacionado à condutividade hidráulica saturada.
I_c	Índice de Circularidade
I_{GA}	Taxa de infiltração (Green & Ampt)
I_i	Taxa de infiltração inicial
i_l	Declividade longitudinal do fundo do canal (m/m)
I_r	Índice de rugosidade
I_t	Taxa de infiltração no tempo t_{ss}
K	Coefficiente $t_c, DNOS$
K_c	Coefficiente de Compacidade
K_{ch}	Condutividade hidráulica saturada aparente do solo
K_f	Fator de Forma
Kn	Média dos coeficientes de Manning ao longo dos cursos d'água mais importantes da bacia
L	Maior comprimento
L'	Comprimento de cada trecho do talvegue(km)
L''	Comprimento do curso d'água(km)
L_{CG}	Distância da seção principal ao ponto do rio mais próximo do centro de gravidade da bacia (km)
L_f	Profundidade da frente de umidade
L_i	Comprimento total dos canais por ordem

L_m	Largura média
L_{mi}	Comprimento médio dos canais por ordem
I_A	Abstração inicial
L_t	Comprimento total da rede de drenagem
n	Coefficiente de rugosidade de Manning
N_i	Número de Canais por Ordem de Ramificação
N_t	Número Total de Canais
P	Perímetro da bacia
P_E	Precipitação efetiva (mm)
P_T	Precipitação total (mm)
Q	Volume real de escoamento superficial
Q_p	Vazão de pico (m^3/s);
R_b	Razão de bifurcação
R_h	Raio hidráulico do canal (m)
R_{lm}	Razão de comprimento médio
R_r	Relação de Relevo
S	Coefficiente de armazenamento superficial (Retenção potencial máxima)
S_{Ia}	Perdas iniciais
S_{in}	Índice de Sinuosidade
t	Duração da precipitação (h)
t'_r	Tempo de recessão
t_b	Tempo de base
t_c	Tempo de concentração
TO	Taxa de ocupação
t_p	Tempo de ocorrência de pico (h)
TP	Taxa de permeabilidade
T_{prec}	Duração da precipitação (h)
T_r	Período de retorno
t_R	Duração da precipitação excedente (h);
t_{ss}	Tempo de saturação superficial do solo
V	Velocidade média do escoamento (m/s)
V_t	Volume da precipitação no período t (mm);
V_t	Velocidade média do escoamento no trecho
V_t	Velocidade média em cada um dos trechos (m/s)
φ	Índice de escoamento superficial (mm/h)
φ_f	Potencial gravitacional final
φ_r	Coefficiente de retardamento
ω	Índice de escoamento superficial (mm/h)

RESUMO

A frequência e magnitude de ocorrência de enchentes em algumas cidades brasileiras motivaram o desenvolvimento desse estudo, tendo como principal objetivo o maior conhecimento a respeito das interferências das ações de ordenamento territorial sobre questões relacionadas com as inundações urbanas e a investigação dos efeitos negativos provenientes da correlação entre a ocupação antrópica e o sistema de drenagem urbana.

Fez-se diagnóstico entre instrumentos de gerenciamento de uso e ocupação do solo e questões relacionadas com enchentes e inundações, tais como os Planos Diretores Urbanos, com o auxílio de ferramentas de geoprocessamento, como Sistemas de Informações Geográficas e estudo de técnicas que considerassem a influência do uso e ocupação do solo para definição de vazões de projetos de sistemas de drenagem.

Objetivando quantificar os acréscimos nas vazões de cheia decorrentes dos avanços da urbanização, caracterizada principalmente pelo aumento de áreas impermeáveis, foi realizado estudo de caso na Bacia do Córrego dos Monos, Cachoeiro de Itapemirm, ES, onde pode-se comparar condições atuais e futuras no que tange às vazões de enchentes considerando os métodos Racional, Racional Modificado, do Soil Conservation Service e de Snyder em quatro cenários distintos: pré-urbanização e urbanizações inicial, atual e futura.

A partir dos resultados fornecidos pela análise multitemporal da cobertura superficial do solo, realizada através da quantificação das áreas permeáveis e impermeáveis do terreno, pode-se concluir que o avanço do processo de urbanização na bacia hidrográfica do Córrego dos Monos tem significativo efeito negativo sobre o sistema hidrológico da região. Pode-se observar também como instrumentos de uso e ocupação do solo podem incrementar expressivamente os picos de enchentes nas saídas. Sendo assim, os resultados gerados, através da aplicação dos modelos para simulação de vazões de pico, revelam que a influência do processo de adensamento urbano sobre o incremento dessas vazões é expressivo.

As técnicas de geoprocessamento utilizadas apresentaram-se como boas alternativas para minimização das dificuldades de espacialização dos elementos hidrológicos e de uso e ocupação do solo. A integração do software do tipo SIG com os processos de avaliação dos recursos

hídricos possibilitou, de forma eficiente, representar a variabilidade espacial e temporal dos elementos envolvidos.

ABSTRACT

The frequency and magnitude of floods occurrence in some Brazilian cities led the development of this study. The main goal of in increasing knowledge about the interference of the shares of land use issues related to urban flooding and investigation of adverse effects from the correlation between the human occupation and urban drainage system.

Through Bibliographical Review has been made between diagnostic instruments for management use and occupation of land and issues related with floods, such as the Urban Managing Plans, with the aid of geoprocessing tools, such as Geographic Information Systems and study of techniques that considered the influence of the use and occupation of the ground for definition of outflows of projects of draining systems.

To quantify the increases in flood flows resulting the advances of urbanization, characterized by an increase in impervious areas, there was a case study in the basin of the stream of Monos, Cachoeiro of Itapemirm, ES, where it can compare current conditions and future regard to considering the flow of flood by methods Rational, Modified Rational, the Soil Conservation Service and Snyder in four different scenarios: pre-planning and initial developments, present and future.

From the results provided by multitemporal analysis of soil surface cover, performed by quantification of permeable and impermeable areas of land, we can conclude that the advancement of the process of urbanization in the watershed of the stream of Monos have significant effect on the system water in the region. It can be observed also as tools for use and occupation of the soil can significantly increase the peak flood in output. Thus, the results generated by the application of models for simulation of peak flows indicate that the influence of the urban density on the growth of these flows is significant. The techniques of GIS, were used as good alternatives for minimizing the difficulties of spatial elements of water and soil use and occupation. The integration of GIS software of the type with the processes of assessment of water resources has, effectively, to represent the spatial and temporal variability of the elements involved.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	ix
LISTA DE SÍMBOLOS.....	x
RESUMO.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
CAPÍTULO 01 - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	16
1.1 Introdução.....	16
1.2 Objetivos.....	17
1.2.1 Objetivo Geral	17
1.2.2 Objetivos Específicos	17
CAPÍTULO 02 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 Planejamento Urbano	19
2.1.1 A evolução da ocupação do território brasileiro.....	19
2.1.2 Instrumentos de Gestão de Uso e Ocupação do Solo.....	20
2.1.3 Gestão dos Recursos Hídricos Integrada ao Planejamento Urbano: aspectos legais	24
2.1.4.1 Plano Diretor de Drenagem Urbana.....	30
2.2 Drenagem Urbana.....	31
2.2.1 Controle das águas do escoamento superficial	35
2.2.1.1 Medidas Estruturais	35
2.2.1.2 Medidas Não Estruturais	39
2.2.1.3 Soluções Alternativas ou Compensatórias	40
2.2.2 Descrição morfométrica de bacias hidrográficas.....	44
2.2.3 Escoamento superficial.....	52
2.2.3.1 Precipitação excedente: métodos de análise.....	52
2.2.3.1.1 Equações de infiltração.....	53
2.2.3.1.2 Índices:	54
2.2.3.1.3 Relações funcionais:	54
2.2.3.2 Período de retorno (T_r):	60
2.2.3.3 Tempo de concentração (t_c):.....	62
2.2.3.4 Vazões máximas de projeto.....	68
2.2.3.4.1 Vazão máxima de projeto com base no ajuste de distribuição estatística: ..	69
2.2.3.4.2 Vazão máxima de projeto com base na regionalização de vazões:	69
2.2.3.4.3 Vazão máxima de projeto com base na precipitação excedente:.....	71
2.2.3.4.3.1 Hidrograma Unitário Sintético (HUS):.....	72
2.3 Sistemas de Informações Geográficas aplicado à gestão de uso e ocupação do solo	84
CAPÍTULO 03 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	88
3.1 Área de estudo	88
3.2 Configuração espacial: cenários	91
3.3 Parâmetros morfométricos e hidrológicos:.....	92
3.4 Análise de permissividade legal de uso e ocupação do solo:	93
3.5 Determinação das vazões de projeto:	93

CAPÍTULO 04 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	96
4.2 Análise morfométrica:	102
4.3 Análise de permissividade legal:	103
4.4 Análise hidrológica:.....	109
4.4.1 Tempo de concentração (t_c):	109
4.4.2 Precipitação efetiva (P_e):	111
4.4.3 Número de Curva – CN:.....	113
4.4.4 Coeficiente de escoamento - C:.....	116
4.4.5 Vazões de pico:.....	117
CAPÍTULO 05 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	126
CAPÍTULO 06 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	128
CAPÍTULO 07 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	130

CAPÍTULO 01 - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 Introdução:

O acelerado e desordenado processo de urbanização ocorrido nas últimas décadas transformou os centros urbanos em áreas apresentando altas densidades populacionais, cujos efeitos negativos refletem diretamente sobre os aparelhos urbanos referentes a recursos hídricos e, em especial, sobre o sistema de drenagem. A ausência de planejamento urbano capaz de equacionar os impactos da urbanização sobre os processos hidrológicos, a pressão demográfica e a especulação imobiliária fazem com que a concepção do sistema de drenagem urbana esteja, sobretudo, condicionada ao parcelamento, ocupação e usos do solo, assim como ao sistema viário.

O incremento das inundações em áreas urbanas é causado por diversos fatores que, atuando isolada ou congruente, definem o nível e extensão dos danos causados. A ocupação dos solos citadinos, muitas vezes desrespeitando o sistema de drenagem natural das águas, favorece ao aterramento das margens dos rios, riachos, lagoas e à ocupação de áreas de amortecimento de cheias, tornando freqüentes os problemas relacionados com as enchentes urbanas que, agravados pela impermeabilização do solo, fazem com que cidades do mundo inteiro mobilizem esforços na busca de equações mais equilibradas entre crescimento populacional e ocupação não-planejada dos espaços urbanos.

As inundações atingem a população não apenas com a interrupção das atividades das áreas inundadas e os danos materiais, mas, sobretudo, com a propagação de doenças de veiculação hídrica, além de perdas humanas, seja por enfermidades ou pelo imprevisto do evento em si. O grande contingente populacional ocupando áreas de risco, como várzeas e encostas de morros, incrementam ações de desmatamento e erosão do solo que, associadas ao aumento do índice de superfície impermeabilizada decorrente das atividades antrópicas de uso e ocupação do território, favorecem ao gradativo aumento do volume de escoamento superficial e às conseqüentes enchentes.

Os diversos fatores anteriormente citados, que aumentam as vazões dos cursos d'água, associados ao ineficiente gerenciamento de uso e ocupação do solo, na maioria das vezes, tornam os sistemas de drenagem urbana obsoletos e a falta de investimentos para controlar os eventos de cheias, tanto no planejamento como na execução e manutenção, corroboram com a

inoperância do sistema, na medida em que coexistem com problemas tais como obras mal executadas e galerias obstruídas.

A inconsistência relativa ao cadastro e séries históricas de dados hidrológicos e meteorológicos confiáveis também contribui para o acréscimo das inundações urbanas à medida que induz ao emprego de técnicas que, além de empíricas, foram, na maioria das vezes, desenvolvidas para aplicação em outras regiões, onde a realidade climática é consideravelmente diferenciada da brasileira, ou para casos específicos e pontuais, como aeroportos e pistas de pouso de aeronaves.

Na maior parte das metrópoles, o crescimento das áreas urbanizadas se processou de forma acelerada e, somente em raras e destacáveis exceções, a drenagem urbana foi considerada fator preponderante no planejamento dessa expansão. O estudo das interferências da ocupação antrópica sobre o sistema de drenagem e de metodologias de controle do escoamento superficial torna-se importante à medida que a atuação do homem sobre o solo influencia, sobremaneira, na eficiência do sistema de controle de cheias adotado pela municipalidade e favorece à definição da correlação entre a gestão das águas e do planejamento territorial.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral da dissertação é o maior conhecimento a respeito das interferências das ações de ordenamento territorial sobre questões relacionadas com as inundações urbanas e a investigação dos efeitos negativos provenientes da correlação entre a ocupação antrópica e o sistema de drenagem urbana.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do presente estudo são:

- Diagnosticar a interface entre instrumentos de gerenciamento de uso e ocupação do solo e questões relacionadas com enchentes e inundações com o auxílio de ferramentas de geoprocessamento;
- Análise de alterações em vazões de enchentes em função da variação temporal das características morfométricas da rede de drenagem associadas às alterações de uso e ocupação do solo;

- Análise de zoneamentos urbanísticos que, prevenindo ou evitando impactos ambientais em áreas inundáveis, possibilitem o incremento de dispositivos de prevenção e avaliação da ocupação de áreas sob risco de enchentes;
- Estudo de caso, em bacia específica, comparando condições atuais e futuras no que tange às vazões de enchente, considerando diferentes métodos hidrológicos.

CAPÍTULO 02 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Planejamento Urbano:

2.1.1 A evolução da ocupação do território brasileiro:

A ocupação dos espaços urbanos no Brasil ocorreu de maneira gradativa e absorveu características dos diversos ciclos econômicos que, até a década de 1930, exerceram significativa influência na maneira como se distribuía a população sobre o território brasileiro que, visto como uma propriedade rural constituída por concentrações populacionais parcialmente isoladas e desconectadas entre si, configurava-se por pequenas vilas, em geral, localizadas no litoral (Bonduki, 1996).

A crise econômica mundial que atingiu o Brasil durante um período de dinamismo demográfico e econômico no auge do ciclo do café paulista, em 1930, provocou dispersão de contingentes populacionais significativos no qual parcela da população, desmobilizada pela cafeicultura, dirigiu-se para as fronteiras internas, ocupando progressivamente diversas áreas do interior, enquanto outra parte iniciou a migração em direção às cidades (Chaffun, 1996).

A Figura 01 ilustra o panorama da evolução do crescimento na cidade de São Paulo, onde nota-se o desenvolvimento da mancha urbana paulista em cerca de 100 anos. São Paulo é um exemplo do processo pelo qual passaram diversas cidades pelo mundo, especialmente nos países em desenvolvimento que, de maneira geral, tornaram-se grandes atrativos principalmente a partir da Revolução Industrial, possibilitando o ingresso no trabalho fabril e levando massas humanas a deixarem o campo em busca de melhores condições de vida nos núcleos urbanos.

Bonduki (1996) destaca a década de 70 como de consolidação de processo de intensa redistribuição populacional no Brasil ocorrida em função do progressivo esvaziamento rural, deslocamentos em direção à fronteira agrícola e contínuo processo de metropolização. Uma das principais causas do agravamento dos problemas ambientais ocorridos nesse período, segundo o autor, foi o acelerado crescimento populacional e, conseqüentemente, o incremento de atividades como indústria, agropecuária e extração de minerais, que levou à utilização dos recursos naturais em larga escala e conseqüente acréscimo na produção de resíduos.

Entre 1980 e 1991, ocorreu expressivo aumento do número de cidades brasileiras com população acima de 20mil habitantes, aumentando de 496 para 685 cidades. A maior parte desse acréscimo ocorreu na categoria de cidades de 20 a 50mil habitantes, onde as áreas rurais contemplavam apenas 21,8% dos domicílios particulares permanentes (Chaffun, 1996).

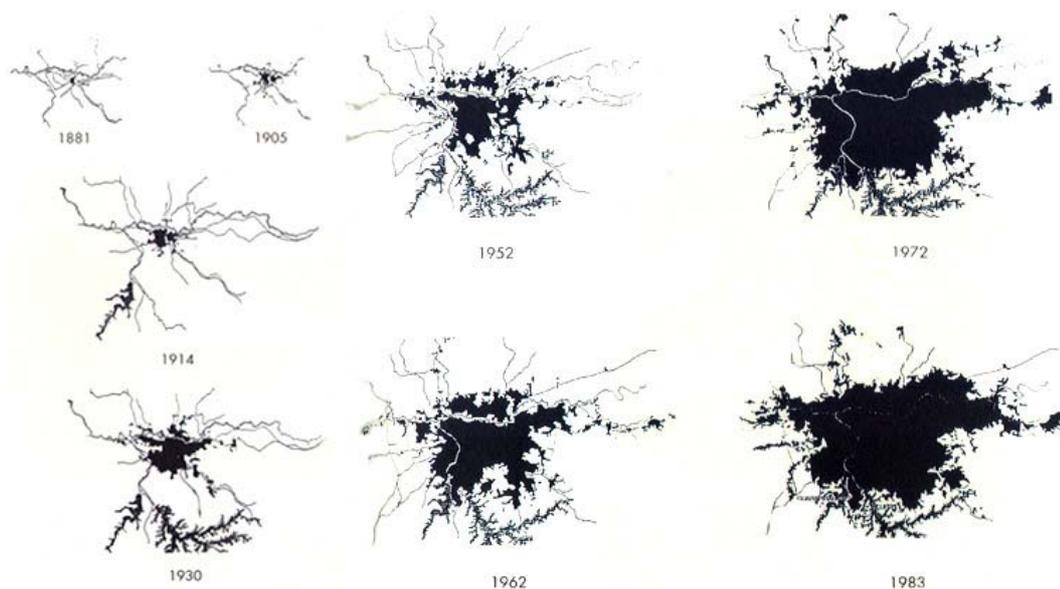


Figura 01: Evolução da mancha urbana de São Paulo.
Fonte: Rogers, 1997

Chaffun (1996) ressalta que a significativa alteração ocorrida no final do século XX foi a intensidade dos processos de degradação ambiental que acompanharam a urbanização, resultando em crescente vulnerabilidade das cidades, problema agravado pela intensidade da ocupação urbana. A falta de alternativas de moradia popular e de lotes urbanos a preços acessíveis, particularmente nas grandes cidades, forçou os grupos mais pobres da população a ocuparem, ilegalmente, espaços impróprios para assentamentos, como encostas íngremes, várzeas inundáveis, beiras de rio e cursos d'água e áreas de proteção de mananciais que, em geral, apresentam-se como locais de risco para o tipo de moradia precária dessa população, principalmente quando associada à infra-estrutura básica deficiente.

2.1.2 Instrumentos de Gestão de Uso e Ocupação do Solo

As Leis de Uso e Ocupação do Solo são instrumentos que disciplinam e definem a distribuição espacial das atividades sócio-econômicas. A primeira fase do processo de regularização de uma ocupação já estabelecida ou a determinação de diretrizes para um novo assentamento deve ocorrer através do zoneamento, instrumento de gestão que trata de um conjunto de regulamentações, prescrevendo os tipos de uso adequados a cada porção do território (Mota, 2003).

A Lei de Zoneamento (Lei de Uso do Solo) estabelece, no âmbito do território municipal, a sua compartimentação em zonas diferenciadas, para as quais são estabelecidos os usos adequados e os critérios de ocupação, tais como residencial, industrial e comercial, que devem ser definidos considerando características do ambiente natural, de forma a proteger áreas tais como recursos

hídricos e suas planícies de inundações, encostas, ecossistemas costeiros, áreas de recarga de aquíferos e de amortecimento de cheias, terrenos suscetíveis à erosão, locais com vegetação natural ou de valor paisagístico, áreas de importância histórico-cultural, entre outras.

Os possíveis problemas gerados pela incompatibilidade de usos dizem respeito, principalmente, ao desequilíbrio ambiental, à vulnerabilidade a acidentes e catástrofes, naturais ou não, à disponibilidade de infra-estrutura e à preservação do patrimônio histórico e paisagístico.

No que tange aos recursos hídricos, o zoneamento das águas é considerado por Maciel Jr. (2000) como um instrumento de gestão para o qual a definição dos usos adequados ou não para as diversas áreas de uma bacia hidrográfica, estabelecidos em função das características naturais, da sua situação em termos de ocupação atual e do que se pretende para o futuro, possibilitam a garantia da qualidade ambiental necessária ao homem e às diversas formas de vida.

Diferentemente das Leis de Zoneamento, diretamente relacionadas com o uso de uma área específica, a Lei de Parcelamento do Solo, definida pela Lei Federal 6766, de dezembro de 1979, estabelece diretrizes para projetos de loteamento, desmembramento ou remembramento de glebas urbanas. Considerado um dispositivo de valor para o controle da ocupação do solo, é através da aprovação do parcelamento que o município pode exigir distribuição adequada dos lotes, equipamentos e vias públicas, protegendo a qualidade ambiental (Mota, 2003). Os parâmetros mais usuais são o tamanho mínimo do lote, estipulado em função da zona; as áreas de doação obrigatórias, para equipamentos públicos, áreas verdes e sistema viário; as dimensões mínimas de ruas e a infra-estrutura a ser implantada, obrigatoriamente, pelo loteador (Carneiro et al, 2006).

Para melhor preservar as condições ambientais, o projeto de loteamento, além de prever lotes maiores com baixa densidade, deve, na distribuição de vias públicas e de lotes, considerar a topografia do terreno, os caminhos naturais de escoamento das águas e preservar áreas marginais aos recursos hídricos, de valor ecológico ou as ambientalmente “críticas”, tais como zonas de vegetação, de encostas, de recarga de aquíferos ou sujeitas à erosão (Mota, 1985).

Orientado pelo poder municipal e contemplando as diretrizes para o uso e ocupação do solo, o instrumento básico da política de desenvolvimento e de expansão urbana é o Plano Diretor Urbano (PDU) que, como parte integrante do processo de planejamento municipal, é previsto pelo Estatuto das Cidades como obrigatório para cidades com população acima de vinte mil habitantes.

De acordo com Mota (2003), as diretrizes do PDU devem ser formuladas visando assegurar as condições adequadas de vida aos habitantes e, para tal, objetivar a proteção dos recursos naturais.

Nas etapas de elaboração, desde o levantamento das condições existentes à formulação das diretrizes e elaboração da legislação básica, o Plano deve ter como objetivo a conservação do meio ambiente urbano, visando a otimização da utilização dos recursos disponíveis. De acordo com o autor, os principais objetivos do PDU devem ser:

- regular o uso, ocupação e parcelamento do solo urbano a partir da capacidade de suporte do meio físico e da infra-estrutura, preservando os ecossistemas e recursos naturais;
- preservar e conservar o patrimônio de interesse histórico, arquitetônico, cultural e as visuais significativas dos principais marcos da paisagem urbana;
- ampliar a oferta de áreas para a produção habitacional de interesse social e promover a regularização fundiária;
- promover a acessibilidade universal, garantindo o acesso adequado de todos os cidadãos a qualquer ponto do território, através da rede viária, cicloviária e do sistema de transporte coletivo.
- promover o saneamento ambiental em seus diferentes aspectos;
- reduzir os riscos urbanos e ambientais.

O Plano deve ser um documento dinâmico cuja execução, com participação da comunidade, esteja sujeita tanto à constante avaliação quanto à reformulação, adequando-se ao desenvolvimento da cidade (Mota, 2003). Apesar de já tratarem de aspectos de preservação ambiental do espaço, em geral, o instrumento não contempla dispositivos de prevenção de ocupação de áreas de risco de enchentes, espaços que quanto mais ocupados ainda mais dificultam e encarecem as soluções disponíveis para mitigar os efeitos das inundações, cujo controle deve iniciar pela regulamentação do solo urbano através de um Plano que contemple as enchentes (Tucci, 2005).

Para a efetividade do controle do uso e ocupação do solo o PDU toma partido de índices que, norteadores do espaço, auxiliam na concretização do ordenamento territorial. Os índices urbanísticos contribuem com a conservação ambiental à medida que procuram resolver questões relacionadas à impermeabilização do solo, definição de densidades populacionais, altura e volume das edificações, porcentagem de áreas livres, recuos e afastamentos mínimos das edificações, assim como questões individuais, pertinentes a cada situação. De acordo com Mota (2003) esses índices devem ser definidos conforme exemplificado a seguir:

- Controle de impermeabilização dos terrenos: nas áreas internas aos lotes serão definidas taxas de ocupação e taxas de permeabilidade, de forma a serem preservadas áreas mais extensas em condições naturais;

- Definição de densidades populacionais: em função da capacidade de ocupação do lote e da disponibilidade dos serviços de infra-estrutura. Essas densidades são calculadas de maneira empírica, tendo como base critérios como dimensões mínimas para os lotes, uso e características do meio, número de habitações por unidade de área e número de empregados por área ocupada;
- Altura e volume das edificações: estabelecidos através do coeficiente de aproveitamento, taxa de ocupação e índice de elevação, os quais deverão considerar, entre outros aspectos, a circulação de ar, iluminação, a insolação e a preservação da paisagem natural;
- Porcentagens de áreas livres: áreas destinadas aos equipamentos de uso público;
- Recuos mínimos das edificações: com vistas a garantir ventilação, insolação, iluminação e o isolamento de outras atividades.

A inter-relação dos índices urbanísticos é responsável pela ambiência das cidades, tendo papel fundamental para o bem estar da população e, conseqüentemente, para a melhoria da qualidade de vida. Além de gabarito, número máximo de pavimentos a construir, distâncias mínimas de afastamentos e número de vagas de garagem ou de estacionamento de veículos, o PDU determina zoneamentos e coeficientes a fim de efetivar o preconizado, conforme explicitado a seguir:

- Coeficiente de Aproveitamento (*CA*):

O *CA* é um fator estabelecido para cada uso nas diversas zonas que, relacionando a área construída da edificação à área do lote a ser edificado, determina o potencial construtivo máximo de cada lote, ou seja, quanto, vertical ou horizontalmente, pode-se ter de área construída naquela porção de terreno. O *CA* é calculado segundo a seguinte equação:

$$CA = \frac{\textit{área construída}}{\textit{área total do lote}} \quad (1)$$

- Taxa de Ocupação (*TO*):

A *TO* é um percentual que, expresso pela relação entre a área da projeção da edificação e a área do lote, define e regula o percentual de área livre, não edificada, que deve existir dentro de cada lote. É calculado segundo a seguinte equação:

$$TO = \frac{\textit{área de projeção da edificação}}{\textit{área total do lote}} \quad (2)$$

- Taxa de Permeabilidade (*TP*):

A *TP* é um percentual que, expresso pela relação entre a área do lote sem pavimentação impermeável e sem construção no subsolo e a área total do lote, define e regula, em cada lote, o quantitativo de área livre à infiltração do excedente hídrico precipitado. Dotada de vegetação que contribua para o equilíbrio climático e propicie alívio para o sistema público de drenagem urbana, representa a relação entre a área descoberta e permeável do terreno em relação a sua área total. A *TP* é calculada segundo a seguinte equação:

$$TP = \frac{\text{área permeável do lote}}{\text{área total do lote}} \quad (3)$$

São relevantes as relações entre o tamanho do lote, a taxa e ocupação e a infra-estrutura sanitária existente assim como o aproveitamento de terrenos destinados às áreas livres, geralmente exigidos pelas leis de uso e ocupação do solo que, localizados preferencialmente em áreas marginais aos recursos hídricos, de vegetação a preservar, de encostas, nos caminhos naturais de escoamento da água, ou em outros locais de valor ambiental, auxiliam na eficiente relação entre uso e ocupação do solo e preservação dos recursos hídricos (Mota, 1985).

O Estatuto das Cidades determina que o PDU deveria ser elaborado, ou revisto, no caso dos municípios já contemplados por planos de ordenamento urbano, até meados do ano de 2006, o que representou avanço para um razoável número de municípios brasileiros que, com exceção das grandes metrópoles, não atualiza a sua legislação urbanística com periodicidade, que, na maior parte das vezes, trata-se de normas antigas, elaboradas na década de 70, sob inspiração do Serviço Federal de Habitação e Urbanismo (SERFHAU) ou de órgãos estaduais de planejamento (Carneiro et al, 2006).

2.1.3 Gestão dos Recursos Hídricos Integrada ao Planejamento Urbano: aspectos legais

A legislação ambiental brasileira passou por um processo de transformação no qual o conceito retrógrado, de enfoque essencialmente sanitaria e corretivo, foi substituído por uma visão mais global, de caráter prioritariamente preventivo, e abrangendo, além do sistema natural, elementos como saúde e cidadania. Entretanto, no que tange às inovações e aos aspectos relativos à quebra de estruturas tradicionais enraizadas, essa evolução nem sempre é acompanhada à aplicação eficiente e coerente da própria lei (Maciel Jr., 2000).

O processo participativo e descentralizado preconizado pelas mais recentes legislações coloca a sociedade civil organizada como uma das instituições oficiais da política de gestão dos recursos hídricos, favorecendo o processo como um todo na medida em que apresenta-se como contraponto a interesses específicos e de caráter político, que possam permear as iniciativas e tomadas de decisões.

De acordo com a Constituição Federal Brasileira de 1988 que, pela primeira vez no país, incluiu um capítulo relativo a Meio Ambiente, é competência comum da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios, proteger o meio ambiente e combater a poluição em qualquer de suas formas, assim como preservar florestas, fauna e flora.

No que tange aos recursos hídricos a Constituição introduziu significativas mudanças que refletiram no Código das Águas que, elaborado sob a ética do aproveitamento dos recursos hídricos para fins hidrelétricos, até então considerados fator primordial ao desenvolvimento econômico do país, foi estabelecido por Decreto Federal em 1934 e alterado pelo Decreto 852 em 1938, contemplando os primeiros esforços à orientação da política de recursos hídricos no qual determina seu uso prioritário sendo o atendimento de necessidades essenciais à vida.

O Código ressalta a necessidade de concessão e (ou) autorização para a derivação de águas públicas, define o conceito de poluidor/pagador, prevendo a responsabilização financeira e penal para atividades contaminadoras dos mananciais hídricos e indica os princípios de planejamento dos recursos hídricos, alguns deles adotados nos atuais conceitos de gerenciamento de bacias hidrográficas, como a preocupação com a saúde pública, fauna e flora.

Por falta de regulamentação de seu conteúdo e inércia no que tange à operacionalização, na prática, as ações do Código não foram efetivadas, mas seus princípios perduraram e embasaram as atuais legislações, como a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), que após seis anos de trâmite no Congresso Nacional, tendo como antecedente o Projeto de Lei 2249/91, foi sancionada em 1997 culminando na Lei Federal 9433, que regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal de 1988 e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

Agregando princípios, normas e padrões da gestão de águas adotados por diversos países à realidade hídrica brasileira, a PNRH expõe os principais aspectos do modelo sistêmico de integração participativa. Ao abordar instrumentos legais primordiais para sua implementação, objetiva incluir os usuários e a sociedade em geral nas decisões sobre o bem público água

através do incentivo à utilização racional e integrada, assegurando a disponibilidade do recurso em padrões de qualidade adequados aos diversos usos e a prevenção e defesa contra eventos hidrológicos extremos.

A PNRH insere no contexto de gestão dos recursos hídricos instrumentos tais como os Planos de Recursos Hídricos, o enquadramento de corpos de água, a outorga dos direito de uso e cobrança pelo uso dos recursos hídricos assim como o sistema de informações sobre recursos hídricos. Para a concretização das metas estabelecidas na PNRH os instrumentos de gestão preconizados, empregados de maneira integrada e complementar, mostram-se de fundamental importância à efetividade do sistema de gerenciamento dos recursos hídricos e o monitoramento e avaliação periódica das ações apresentam-se necessários na medida em que se trata de um recurso natural que envolve variáveis múltiplas e atemporais, como densidade populacional, condições climáticas e, até mesmo, nível e diversidade cultural das populações que interagem diretamente no meio.

A sintonia dos agentes econômicos e sociais propostos, que se dá através dos Comitês das bacias, constitui um elemento essencial ao sucesso da Política sendo, portanto, de suma importância a persistência de uma gestão participativa, cuja integração de acordos em consenso com os instrumentos devem induzir a ações paralelas entre a política de recursos hídricos e as demais políticas de governo.

As diretrizes nacionais para o saneamento básico foram estabelecidas em 2007 pela Lei Federal nº 11.445 que, com base na universalidade, integralidade e equidade, define o saneamento básico por um conjunto de serviços, infra-estruturas e instalações operacionais que englobam abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, manejo de resíduos sólidos e limpeza urbana e drenagem e manejo das águas pluviais urbanas, adotando como um de seus fundamentos a “disponibilidade, em todas as áreas urbanas, de serviços de drenagem e de manejo das águas pluviais adequados à saúde pública e à segurança da vida e do patrimônio público e privado”.

Desde a Constituição de 1988 são consideráveis os avanços percebidos na gestão dos recursos hídricos, entretanto, mesmo as legislações mais recentes, tal como a PNRH, não apresentam textos legais que definam com clareza a relação entre a gestão das águas e o planejamento do território, cuja competência e responsabilidade é, sobretudo, do governo municipal. A ausência formal, ou real, de alguns instrumentos, demonstra que são patentes as indefinições quanto ao papel central do município como formulador, implementador e fiscalizador

de políticas urbanas de impacto nos recursos hídricos, quer através de determinações contidas em planos diretores, leis de uso e ocupação do solo, zoneamentos, códigos de obras, parcelamentos do solo ou políticas de regularização fundiária urbana (Nunes, 2007).

A complementaridade entre os instrumentos específicos do sistema de gestão dos recursos hídricos e os de controle do uso do solo urbano foram diagnosticados pelo Estatuto das Cidades, Lei Federal nº10.257 de julho de 2001, que regulamenta os artigos 182 e 183 da Constituição Federal Brasileira e a execução da política urbana, tendo como objetivo ordenar o pleno desenvolvimento das funções sociais da cidade e da propriedade urbana em prol do bem coletivo, da segurança e do bem-estar dos cidadãos, bem como do equilíbrio ambiental, trazendo elementos empíricos e teóricos para uma melhor fundamentação dos princípios de gestão integrada dos recursos hídricos.

A Constituição de 1988 e o Estatuto da Cidade redefiniram as competências locais do ponto de vista da normativa urbana criando novos instrumentos de intervenção fundados no princípio da “função social da propriedade”, trazendo expectativas de que o quadro acima apontado venha a se modificar. O Estatuto reconhece a importância da consideração de questões de natureza ambiental ao definir diretrizes para a política urbana garantindo o “*direito a cidades sustentáveis, entendido como o direito à terra urbana, à moradia, ao saneamento ambiental, à infra-estrutura urbana, ao transporte e aos serviços públicos, ao trabalho e ao lazer*”¹. Outrossim, coloca entre outras diretrizes a “*compatibilização necessária do crescimento das cidades com os recursos ambientais de forma a evitar e corrigir as distorções do crescimento urbano e seus efeitos negativos sobre o meio ambiente*”² e a “*adoção de padrões de expansão urbana compatíveis com os limites da sustentabilidade ambiental, social e econômica não só do Município e do território sob sua área de influência*”³.

Carneiro et al (2006) admitem que é através da implementação de instrumentos como o zoneamento que a atividade de planejamento do território concretiza-se. Perante a necessidade de conhecer as relações entre os instrumentos e sistemas gestores do ordenamento territorial e os de gerenciamento dos recursos hídricos por bacias hidrográficas, unidade base de gerenciamento dos recursos hídricos, focaram seu trabalho na discussão de questões relativas à integração da gestão dos recursos hídricos com o planejamento do uso do solo urbano e no entendimento das correlações entre o vínculo a nível conceitual e as práticas operacionais de articulação entre esses

1 Lei nº 10 257 de 10 de julho de 2001 (Estatuto da Cidade), Brasília, Senado Federal, 2001, art.2º, inciso I.

2 Ibid,art.2º,inciso IV.

3 Ibid,art.2º, inciso VII.

instrumentos, principalmente relacionando questão da gestão do uso do solo nos planos de recursos hídricos, sobretudo em relação aos Planos Diretores de Desenvolvimento Urbano.

A definição do zoneamento, o controle específico do parcelamento do solo, bem como a fixação de parâmetros urbanísticos - tais como dimensões mínimas de lotes, recuos, índices de aproveitamento, ocupação e elevação e porcentagens de áreas livres ou destinadas a usos comunitários - são atribuições próprias da esfera municipal, sendo ampla a sua competência no que tange ao disciplinamento do uso e ocupação do solo. É papel do governo municipal proceder à interlocução com a sociedade, visando regular as ações coletivas e individuais, públicas e privadas que ocorrem no território e a maneira como essa relação vem se configurando ao longo do tempo e os efeitos depredatórios que apresenta são os mais fortes indícios de que as legislações municipais são, em grande medida, inadequadas para tratar de questões fundamentais para a preservação de recursos hídricos.

Regulamentada pelo Estatuto das Cidades, anteriormente disposta no artigo 182 da Constituição Federal, a função social da propriedade urbana se cumpre à medida em que a propriedade é usada de forma compatível com as determinações do Plano Diretor Urbano (PDU), também denominado, em algumas cidades, de Plano Diretor Municipal (PDM). Além da edificação de habitações em áreas adequadas, essa função também é cumprida quando se impede ou restringe a utilização de áreas impróprias para edificações em face de condições específicas do local – alagadiças, em terreno íngreme, áreas de preservação natural, nascentes, etc. Os instrumentos de controle do uso e ocupação do solo atualmente disponíveis e assegurados por lei são ferramentas fundamentais para o desenvolvimento urbano em bases sustentáveis e deveriam ser utilizados de forma complementar aos instrumentos preconizados pelo Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (Carneiro et al, 2006).

Segundo Silva e Porto (2003), o sistema institucional de planejamento e gestão dos recursos hídricos enfrenta quatro ordens de desafios de integração, a saber:

- integração entre sistemas/atividades diretamente relacionados ao uso da água na área da bacia hidrográfica, em particular o abastecimento público, a depuração de águas servidas, o controle de inundações, a irrigação, o uso industrial, o uso energético, ou ainda sistemas com impacto direto sobre os mananciais, como o de resíduos sólidos, tendo em vista a otimização de aproveitamentos múltiplos sob a perspectiva de uma gestão conjunta de qualidade e quantidade;

- integração territorial/jurisdicional com instâncias de planejamento e gestão urbana – os municípios e o sistema de planejamento metropolitano – tendo em vista a aplicação de medidas preventivas em relação ao processo de urbanização, evitando os agravamentos de solicitações sobre quantidades e qualidade dos recursos existentes, inclusive ocorrências de inundações;
- articulação reguladora com sistemas setoriais não diretamente usuários dos recursos hídricos, como habitação e transporte urbano, tendo em vista a criação de alternativas reais ao processo de ocupação das áreas de proteção a mananciais e das várzeas, assim como a viabilização de padrões de desenvolvimento urbano que, em seu conjunto, não impliquem agravamento nas condições de impermeabilização do solo urbano e de poluição sobre todo o sistema hídrico da bacia, à parte as áreas de proteção aos mananciais de superfície;
- articulação com as bacias vizinhas, tendo em vista a celebração de acordos estáveis sobre as condições atuais e futuras de importação de vazões e de exportação de águas utilizadas na bacia.

No contexto da política de gestão dos mananciais hídricos pode-se citar a outorga como exemplo de instrumento administrativo que, ao conferir, ou não, a permissão para que o usuário possa captar ou lançar águas servidas nos cursos de água, permite o cumprimento do fundamento da PNRH de proporcionar o uso múltiplo das águas, assim como possibilita direcionar as decisões à utilização racional e integrada com foco no desenvolvimento sustentável, além de subsidiar a cobrança pelo uso desse recurso natural.

Algumas legislações estaduais de recursos hídricos estabelecem critérios para a outorga do uso da água, mas não legislam sobre a outorga relativa ao despejo de efluentes de drenagem pluvial. A legislação ambiental estabelece normas e padrões de qualidade da água dos rios por meio de classes, mas não define restrições em relação aos efluentes da drenagem urbana lançados nos rios. Como aparelho de regulação propriamente dito, a outorga poderia ser utilizada para uma melhor compatibilização entre os usos da água, racionalizando a forma como a água é utilizada e a distribuição espacial dos usuários dos recursos hídricos nas bacias hidrográficas.

As questões ambientais relativas aos recursos hídricos encontram embasamento na legislação para que, não somente instituições governamentais embutam-se dos deveres e direitos pertinentes ao recurso natural água, mas, sobretudo, abrem espaço para que grupos sociais organizem-se e, efetivamente, complementem e interajam com a problemática. O processo participativo e descentralizado, preconizado pelas mais recentes legislações, coloca a sociedade

civil organizada como uma das instituições oficiais da política de gestão dos recursos hídricos, favorecendo o processo como um todo na medida em que se mostram como contraponto aos interesses específicos, de caráter político ou privado, que permeem as iniciativas e tomadas de decisões.

Nesse contexto de descentralização e fomento à democracia, o processo de municipalização da gestão dos recursos hídricos não deve ser interpretado como transferência à municipalidade das responsabilidades do Estado ou da União, mas como capacitação e auxílio na execução das tarefas que, de fato, competem aos municípios, apresentando-se como alternativa à multiplicação dos resultados e incremento do interesse dos grupos em participar da ação (Maciel Jr., 2000).

Ao dar centralidade às questões municipais relacionadas aos recursos hídricos, busca-se ressaltar o papel determinante do município no planejamento do território e sua influência na gestão das águas, ao qual cabe articular os instrumentos específicos do sistema de gerenciamento dos recursos hídricos com instrumentos de regulação que agem sobre o território.

2.1.4.1 Plano Diretor de Drenagem Urbana

O Plano Diretor de Drenagem Urbana (PDDrU) é o instrumento que, com base no diagnóstico de todo o sistema de drenagem natural e artificial, contém as diretrizes que garantam a adequada circulação da água na superfície do solo.

Visando regulamentar a ocupação do solo em uma área urbana o Plano busca indicar medidas estruturais e não-estruturais relacionadas ao sistema de drenagem, tendo como finalidade mitigar os problemas causados pelas inundações, buscando equilibrar o desenvolvimento com as condições ambientais das cidades, e integrando-se aos planos de esgotamento sanitário, resíduos sólidos e principalmente ao Plano Diretor Urbano dos municípios (Ramos, 1999).

De acordo com Maciel Jr. (2000) ao apresentar medidas para remediar os problemas já existentes em decorrência da urbanização o PDDrU deve, também, expor soluções preventivas à ocorrências de enchentes e inundações em áreas que, futuramente, venham a ser urbanizadas. As ações para controle de enchentes e inundações em áreas urbanizadas geralmente possuem custo elevado porque implicam medidas estruturais cujo planejamento a médio e longo prazo pode substituí-las por medidas preventivas a custos significativamente baixos.

Cardoso Neto (2008) ressalta alguns fatores que influenciam, de maneira determinante, na eficiência do sistema, tais como a existência de meios legais e institucionais para que se possa elaborar uma política factível de drenagem urbana, a efetivação de uma política de ocupação de várzeas de inundação que não conflita com a política de drenagem urbana, a disponibilização de recursos financeiros e meios técnicos que tornem viáveis a aplicação da política, além de consórcio com empresas que dominem eficientemente as tecnologias necessárias e se encarreguem da implantação das obras.

Além de evitar medidas locais de caráter restritivo, que frequentemente deslocam o problema para outros locais agravando inundações a jusantes, Cardoso Neto (2008) acrescenta ainda que o PDDrU deve possibilitar a identificação de áreas a serem preservadas e a seleção das que possam ser adquiridas antes que sejam ocupadas, loteadas ou que seus preços se elevem e tornem a aquisição proibitiva. O zoneamento de várzeas de inundação, a articulação com outras atividades urbanas, tais como abastecimento de água e esgoto e transporte público e o incentivo à elaboração de campanhas educativas que visem informar à população sobre a natureza e origem dos problemas de enchentes, também são apontados pelo autor como ações inerentes ao Plano.

De acordo com Sheaffer e Wright (1982), citado por Canholi (2005), os principais objetivos dos Planos são:

- manutenção das regiões ribeirinhas ainda não urbanizadas em condições que minimizem as interferências com a capacidade de escoamento e armazenamento do talvegue;
- redução gradativa do risco de inundações a que estão expostas pessoas e propriedades;
- redução do nível de danos por enchentes;
- assegurar que projetos de prevenção e correção sejam congruentes aos objetivos gerais do planejamento urbano;
- minimização dos problemas de erosão e assoreamento;
- controle da poluição difusa;
- incentivo à utilização alternativa das águas de chuvas coletadas, para uso industrial, irrigação e abastecimento.

2.2 Drenagem Urbana

As profundas desigualdades regionais existentes na infra-estrutura de saneamento fazem da universalização e da melhoria dos serviços de abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana, coleta de lixo e drenagem urbana, um objetivo a ser alcançado, ainda hoje,

pelos Estados, pois essas são algumas das interferências antrópicas que impactam, sobremaneira, o ambiente, principalmente, quando urbanizado. A distribuição espacial, qualidade e eficiência das redes e dos serviços oferecidos, assim como a natureza relacional do saneamento básico com a preservação do meio ambiente estão intrinsecamente correlacionados às políticas orientadas ao equilíbrio do desenvolvimento e à promoção do bem-estar da população (Guimarães, 1984).

O processo de urbanização intervém no sistema de drenagem natural das águas à medida que interfere no meio através de aterramentos, seja de cursos d'água ou de mananciais, desmatamentos, ocupação de áreas de amortecimento de cheias, assoreamento de recursos hídricos, impermeabilização do solo e execução de obra artificiais de drenagem. A drenagem das águas pode ser favorecida quando são tomadas medidas como a adequada manutenção da cobertura vegetal e preservação do caminho natural das águas, controle da ocupação de encostas, do parcelamento e da ocupação do solo, preservação de áreas de amortecimento de cheias e áreas alagadas e adoção de faixas de proteção às margens dos recursos hídricos.

Não somente regiões eventual e naturalmente inundáveis, como as planícies de inundação e áreas de amortecimento de cheias, devem ser preservadas. O caminho de escoamento natural das águas muitas vezes se configura por vales secos e úmidos que, inutilizados no período de estiagem, devem permanecer desobstruído, pois é um dos trajetos percorridos pelo excedente hídrico durante as precipitações (Canholi, 2005).

Cada vez mais comum nas cidades brasileiras, as inundações devem ser tratadas no âmbito do sistema de gestão da água da região pois, interferindo diretamente nos recursos hídricos da bacia, o sistema de drenagem deve ser projetado, executado e operado em consonância com os demais serviços públicos da cidade.

Concentrar e gerir de modo eficiente a drenagem de uma cidade ou região ainda é um desafio para as cidades brasileiras. Atuando de modo caótico e ineficiente, são diversos os órgãos responsáveis por essa infra-estrutura sendo que, em geral, perpetram suas obras sem considerar as existentes ou previstas por outras entidades, criando um aglomerado de obras que, elaboradas sem as devidas informações hidrológicas e hidráulicas, quando não se transformam em elementos que atenuam ou transferem o problema, por não suportarem o acelerado aumento da demanda tornam-se, em pouco tempo, obsoletas (Barros, 2005).

Ao tratar dos impactos do sistema de drenagem sobre a qualidade das águas, Tucci (2003) ressalta que as principais causas são a poluição existente no ar que se precipita junto com a água e lavagem das superfícies urbanas contaminadas com diferentes componentes orgânicos, metais e resíduos sólidos, representados por sedimentos erodidos pelo aumento da vazão e lixo urbano depositado ou transportado para a drenagem. O carreamento desses poluentes para os corpos hídricos pode resultar em poluição superior à provocada pelo despejo de esgoto sem tratamento, considerando que 90% da carga do escoamento pluvial ocorre na fase inicial da precipitação, ou seja, nos primeiros 25mm, segundo o autor.

No que tange à abrangência da rede de drenagem, independentemente do tamanho da extensão da rede e de sua eficiência, conforme Tabela 01, que apresenta o número de municípios com serviço de drenagem urbana por existência de legislação municipal que exige a aprovação e implantação de sistema de drenagem pluvial para loteamentos novos e/ou populares, cerca de 78,6% dos municípios brasileiros eram contemplados por serviços de drenagem urbana à época da Plano Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2000). De acordo com o porte populacional dos municípios, os dados revelam que a existência dos serviços de drenagem varia segundo o tamanho da população. Nos municípios com até 20.000 habitantes, em 74,8% há rede de drenagem e à medida que o porte populacional cresce, a proporção do serviço aumenta, chegando a 100% nos municípios com mais de 500.000 habitantes.

As diferenças entre os municípios de pequeno e grande porte, no que se refere aos serviços de drenagem urbana, segundo a mesma pesquisa, têm como causa principal a falta de recursos enfrentada pelos municípios pequenos, que priorizam investimentos que possam ser atendidos por pequenos orçamentos, além das características climáticas, geográficas, geológicas ou topográficas de determinadas regiões que podem demandar menores investimentos neste serviço, como é o caso de algumas áreas do Nordeste do Brasil. Outro motivo apresentado pelo IBGE que explica essas diferenças é a própria demanda de populações mais organizadas dos municípios mais populosos que, com melhores níveis educacionais e socioeconômicos, criam canais de reivindicação formais e outras formas de pressão popular por melhores serviços.

A Tabela 01 também denota melhor distribuição de rede de drenagem melhor beneficiada em áreas mais desenvolvidas. Nesse contexto, a Região Sul é apresentada com 94,4% dos municípios sendo contemplados com rede de drenagem urbana, enquanto no Sudeste, onde se concentra mais da metade da população brasileira, é possível encontrar rede de

drenagem em 88,1% dos municípios. A Região Norte, com 49,4%, apresenta a menor proporção de municípios favorecidos pelo sistema.

Tabela 01: Número de municípios com serviço de drenagem urbana por existência de legislação municipal que exige a aprovação e implantação de sistema de drenagem pluvial para loteamentos novos e/ou populares (%).

Existência legislação municipal que exige aprovação e implantação de sistema drenagem pluvial p/loteamentos novos e/ou populares	Brasil e Região Geográfica					
	Brasil	Norte	Nordeste	Sudeste	Sul	Centro-Oeste
Total de municípios com serviço de drenagem urbana	78,57	49,44	68,66	88,12	94,39	70,85
Existe	35,03	12,47	16,28	50,54	56,26	19,73
Não existe	43,20	36,53	52,15	37,03	37,88	50,90
Sem declaração	0,35	0,45	0,22	0,54	0,26	

Fonte: IBGE – Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, 2000.

Segundo dados do IBGE, 22,43% dos municípios brasileiros sofreram com inundações no início do século XXI e a inadequada manutenção de equipamentos de fácil acesso, como bueiros e bocas de lobo, apresenta-se como principal agravante ao evento. O Sudeste é a região brasileira mais suscetível às conseqüências das enchentes, sendo que, dos 32,5% dos municípios que estiveram sujeitos às inundações à época da PNSB, 15,61% devem-se à obstrução dos equipamentos citados e 11,52% são conseqüência do adensamento populacional a que esses centros urbanos vêm sendo submetidos, conforme demonstra Tabela 02, que exprime a relação entre o número municípios que sofreram inundações ou enchentes e seus fatores agravantes.

Tabela 02: Número de municípios que sofreram inundações ou enchentes por fatores agravantes (%)

Brasil e Região Geográfica	Fatores agravantes								
	Municípios que sofreram inundações ou enchentes nos últimos dois anos	Dimensionamento inadequado de projeto	Obstrução de bueiros/ bocas de lobo	Obras inadequadas	Adensamento populacional	Leçol freático	Existência de interferência física	Outros	Sem declaração
Brasil	22,43	6,16	11,46	6,26	7,10	3,72	5,41	4,30	0,05
Norte	12,69	1,78	8,46	3,56	3,56	2,90	1,78	2,90	0,22
Nordeste	13,32	3,53	6,88	3,75	4,20	3,02	3,19	1,45	0,06
Sudeste	32,35	9,96	15,61	8,70	11,52	4,14	7,80	6,60	0,06
Sul	30,72	7,94	16,57	8,97	8,20	5,00	7,85	6,73	-
Centro-Oeste	10,09	2,24	4,04	2,91	2,91	2,47	2,69	2,24	

Fonte: IBGE – Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, 2000.

2.2.1 Controle das águas do escoamento superficial

O escoamento superficial é estimado pelo volume de água excedente, que não evapora nem mesmo infiltra ou percola no solo, e sua estreita relação com a precipitação se dá na medida em que quanto maior for a intensidade da precipitação, maior será a parcela de chuva que contribuirá para as vazões superficiais.

Em algumas regiões, até o início da década de 1970, predominava a política de controle dos impactos do sistema de drenagem que, considerando os princípios sanitaristas, baseava-se na prática de escoar a água precipitada o mais rápido possível. Tucci (2003) apresenta estudos mostrando que essa metodologia tem como consequência imediata o aumento das inundações à jusante devido à impermeabilização, podendo aumentar em até sete vezes, esse volume. Por motivos como esse, por exemplo, esse tipo de solução foi abandonada e hoje, prioriza-se projetos mais racionais, que desenvolvam técnicas de amortecimento do pico dos hidrogramas e diminuição da vazão máxima à jusante, através da retenção.

Silva e Porto (2003) ressaltam a importância da duração da precipitação no processo de escoamento superficial, pois, eventos de longa duração mesmo que de menor intensidade, podem produzir consideráveis volumes de escoamento superficial, resultante do encharcamento do solo e consequente diminuição da capacidade de infiltração.

Outro fator que afeta o escoamento, também destacado pelo autor, é o climático. Através de interferências como temperatura, velocidade do vento, pressão atmosférica e umidade do ar, influencia na evaporação e contribui com o incremento do volume escoado. Também colaboram com esse processo fatores fisiográficos, tais como tipo, uso e cobertura do solo e existência de sistema de drenagem artificial ou de obras hidráulicas, que podem afetar a capacidade de infiltração e o tempo que a água demora para chegar ao nível de inundação.

As medidas de controle do escoamento superficial devem ser adotadas de acordo com o estágio de desenvolvimento da área de estudo, buscando priorizar o uso de medidas sustentáveis que minimizem, também, os impactos da poluição (Tucci, 2003).

2.2.1.1 Medidas Estruturais

As medidas denominadas estruturais são ferramentas de controle de escoamento superficial direto que, constituídas por estruturas físicas de engenharia, destinam-se a desviar, deter, reduzir ou escoar, com maior rapidez e menores níveis, as águas pluviais (Ramos, 1999). São técnicas tradicionais que, de acordo com Silva (2006), direcionam a drenagem de águas

pluviais em áreas urbanas à canalização do escoamento, tendo como exemplos mais comuns a construção de galerias subterrâneas e a retificação e revestimento de rios, admitindo intenção explícita do transporte da água pluvial o mais rápido possível para fora do meio urbano. O autor ressalta que o acelerado processo de urbanização, observado mundialmente, evidencia as limitações do uso dos sistemas tradicionais cujas experiências denotam soluções insustentáveis, atuando, em geral, na transferência da cheia à jusante, sem soluções definitivas para o problema da inundação.

Do mesmo modo, os custos das canalizações são altos, muitas vezes impraticáveis em virtude da carência financeira dos municípios e o lançamento das exurradas acaba poluindo os rios. Com o crescimento urbano e a intensa impermeabilização do solo, as soluções não comportam o aumento das vazões escoadas superficialmente, sendo inevitável a ocorrência de inundações em pontos críticos do sistema. Em decorrência do considerável aporte de recursos financeiros necessários para a execução das obras, as medidas estruturais nem sempre são projetadas para propiciar proteção absoluta, além de induzirem à falsa sensação de segurança e à consequente ampliação da ocupação de áreas inundáveis (Tucci, 2004).

As técnicas estruturais de controle do escoamento superficial podem variar de acordo com itens tais como o tamanho da área a ser drenada, índice de permeabilidade do solo, tipo de uso e ocupação do solo, características físicas, hidrológicas e hidráulicas, assim como o risco adotado para o sistema de drenagem e as obras de infra-estrutura urbana existentes (Barros, 2005). O autor destaca as seguintes técnicas:

- Sistemas de coleta de água pluvial no lote e lançamento na rede: correspondem a todas as obras de coleta de água superficial no lote e transporte até a rede de drenagem;
- Sistemas de microdrenagem: sistemas de condutos pluviais a nível de loteamento ou de rede primária urbana, tais como boca de lobo, galerias, poços de visita e caixas de ligação;
- Sistemas de macrodrenagem: sistemas que abrangem córregos, rios, canais e galerias de maior porte, receptores da água coletada pela microdrenagem;
- Reservatórios para controle de cheias: barramentos construídos em rios para conter o excesso de chuva e proteger áreas à jusante;
- Reservatórios urbanos de retenção ou bacias de retenção: pequenos reservatórios, também conhecidos como “piscinões”, destinados a conter o excesso de chuva e proteger áreas à jusante;

- Drenagem forçada em áreas baixas: conjunto de obras constituídas por diques e estações de bombeamento em áreas abaixo do nível d'água das cheias de córregos próximos;

Ramos (1999) enuncia alguns programas de drenagem que, pautados no enfoque no aumento da condutividade hidráulica em casos de enxurradas, efetuam a coleta das águas de escoamento superficial direto e direcionam-na a um rápido transporte até o ponto de despejo, através dos sistemas de micro e macro-drenagem. O aparelho de drenagem quando pautado nesse contexto apresenta-se retrógrado à medida que é responsável pelo aumento de vazões e, conseqüentemente, dos níveis e áreas de inundações à jusante.

Para a efetividade do sistema, além de adequados projetos e execução, faz-se necessário um eficiente programa de manutenção para o qual devem ser incentivados a limpeza e desobstrução periódicas assim como a remoção de vegetação arbustiva ribeirinha, principalmente para caso de canais subterrâneos e obras de desassoreamento.

O autor também apresenta outra visão de gerenciamento de medidas estruturais onde o enfoque é direcionado ao armazenamento da água no ponto de origem, de maneira que a contenção do excedente precipitado é, posteriormente liberada, de maneira lenta e contínua, no sistema de galerias e canais. A nível de drenagem, esse sistema apresenta uma visão mais aprimorada pois prioriza a solução na fonte, diminuindo, ou evitando, a aceleração de picos de cheias, entretanto, no que tange à manutenção, requer programa criterioso na medida em que o armazenamento de água pode favorecer a proliferação de vetores, como insetos e ratos, assim como faz-se necessária a sistemática remoção de decantados, como lodos e detritos urbanos.

O uso de reservatórios em espelhos d'água permanentes, por exemplo, favorece ao controle de grandes áreas de drenagem com liberação de pequenas descargas, além de serem esteticamente agradáveis, passíveis de recreação e habitat para a vida aquática. Todavia, por requererem grandes áreas, tornam-se passíveis de poluição pelas enxurradas e processos de sedimentação, além de favorecerem à propagação de insetos e algas. A Tabela 03 demonstra outros exemplos do emprego das diferentes formas de redução e retenção do escoamento superficial, apontando suas respectivas vantagens e desvantagens.

Tabela 03: Vantagens e desvantagens no emprego das diferentes formas de redução e retenção do escoamento superficial direto.

MEDIDAS	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Cisterna	<p>Água pode ser utilizada para:</p> <ul style="list-style-type: none"> Proteção contra incêndio Rega de terras Processos industriais Refrigeração <p>Reduz o deflúvio superficial direto, ocupando pequenas áreas</p> <p>A área acima da cisterna, pode ser usado para outros fins.</p>	<p>Custos relativamente altos de instalação</p> <p>Custo requerido pode ser restritivo se a cisterna receber águas de grande áreas de drenagem</p> <p>Requer manutenção</p> <p>Acesso restritivo</p> <p>Reduz o espaço disponível do subsolo para outros usos</p>
Jardim suspenso	<p>Esteticamente agradável</p> <p>Redução do deflúvio superficial direto e dos níveis de ruído</p> <p>Valorização da fauna e da flora</p>	<p>Carga estrutural elevada</p> <p>Alto custo de instalação e manutenção</p>
Armazenamento em telhados (empregando tubos condutores verticais estreitos)	<p>Retardo do deflúvio superficial direto</p> <p>Efeito de isolamento térmico do edifício</p> <p>Auxílio ao combate à incêndio</p>	<p>Carga estrutural elevada</p> <p>Manutenção da tomada d'água dos tubos condutores</p> <p>Formação de ondas e cargas</p> <p>Infiltração pelo telhado</p>
Telhado com rugosidade aumentada	<p>Retardo do deflúvio superficial direto: detenção nas ondulações ou no cascalho</p>	<p>Carga estrutural elevada</p>
Pavimento permeável	<p>Redução do deflúvio superficial direto</p> <p>Recarga do lençol freático</p> <p>Pavimentações tipo cascalho podem ser economicamente mais viáveis que asfalto ou concreto</p>	<p>Entupimento dos furos, ou poros.</p> <p>Compactação da terra abaixo do pavimento ou diminuição da permeabilidade do solo devido ao cascalho</p> <p>Obstrução por gramas e ervas daninhas</p>
Canais gramados e faixas de terrenos cobertos por vegetação	<p>Retardo do deflúvio superficial direto</p> <p>Recarga do lençol freático</p> <p>Esteticamente agradável</p>	<p>Manutenção</p>
Reservatórios ou bacias de detenção	<p>Retardo do deflúvio superficial direto</p> <p>Benefício recreativo e estético</p> <p>Possibilidade de controle de extensas áreas de drenagem, liberando descargas relativamente pequenas</p>	<p>Requer grandes áreas</p> <p>Custos de manutenção</p> <p>Área de proliferação de vetores, como insetos</p> <p>Sedimentação do reservatório</p>
Tanque séptico transformado para armazenamento e descarga de lençol freático	<p>Baixo custo de instalação</p> <p>Redução do deflúvio superficial direto (infiltração/armazenamento)</p> <p>A água pode ser usada para:</p> <ul style="list-style-type: none"> • proteção contra incêndio • rega de jardins • recarga de lençol freático 	<p>Manutenção periódica (remoção de sedimentos)</p> <p>Possíveis danos à saúde</p> <p>Eventualmente requer bombeamento para esvaziamento após tormenta.</p>
Grama com alta capacidade de retardamento (elevada rugosidade)	<p>Retardo do deflúvio superficial direto</p> <p>Aumento da infiltração</p>	<p>Manutenção periódica</p>
Escoamento dirigido sobre terrenos gramados	<p>Retardo do deflúvio superficial direto</p> <p>Aumento da infiltração</p>	<p>Possibilidade de erosão</p> <p>Água parada em depressão ou gramado</p>

Fonte: Ramos (1999)

2.2.1.2 Medidas Não Estruturais

As medidas denominadas de não estruturais buscam o controle do uso e ocupação do solo e a diminuição da vulnerabilidade dos ocupantes das áreas de risco dos efeitos das inundações através de soluções que não alteram o regime de escoamento superficial das águas, buscando resolver a problemática através da introdução de normas, regulamentos e programas que visem, por exemplo, ao disciplinamento do uso e ocupação do solo, à implementação de sistemas de alerta e à conscientização da população para a manutenção dos dispositivos de drenagem (Ramos, 1999). Pode-se dizer que as soluções estruturais possuem como foco os efeitos das inundações, já as não estruturais, em geral, tomam como ponto de partida a solução da causa, sob abordagem preventiva.

Canholi (2005) afirma que medidas não estruturais podem ser mais eficazes, com custos mais baixos e horizontes mais longos de atuação e as divide em quatro grupos onde o primeiro deles é o de ações de regulamentação do uso e ocupação do solo, que visam prevenir contra os fatores de ampliação dos deflúvios, representados pela impermeabilização intensiva da área de drenagem e pela ocupação das extensões ribeirinhas inundáveis, fatores que sobrecarregam a capacidade natural de armazenamento e o escoamento das calhas dos rios. Tucci (2003) e Barros (2005) ressaltam que, das medidas não estruturais, a legislação, encontrando no PDDrU a base para o desenvolvimento sustentável de instrumentos de comando e controle, é uma das mais importantes.

Os outros dois grupos contemplam a educação ambiental voltada ao controle da poluição difusa, erosão e lixo, e o seguro-enchente, que pode ser calculado a partir da determinação dos riscos associados às cheias. O quarto, e último grupo, contempla o programa de sistema de alerta e previsão de inundações, com objetivo de evitar o fato surpresa que, muitas vezes, pode provocar vítimas fatais e grandes prejuízos pelo alagamento de vias, aprisionamento de veículos, inundações de edificações e de equipamentos, além de facilitar ações preventivas de isolamento ou retirada de pessoas e bens materiais das áreas sujeitas a inundações, assim como a adoção de desvios de tráfego.

Além dos quatro grupos citados por Canholi (2005), Barros (2005) acrescenta outros, tais como;

- Outorga para controle de cheias: representando a concessão para a execução de obras que venham a interferir no regime do curso d'água, tendo como característica beneficiar não apenas o sistema de drenagem local mas, sobretudo, evitar a

construção de obras que, apesar de úteis para uma dada região, podem ser prejudiciais para outras à jusante;

- Fixação de critérios para projetos de drenagem: definição de normas a fim de evitar projetos incompatíveis numa mesma região. Requer uma gestão centralizada, elaboração de PDDrU assim como a normatização de procedimentos, tais como técnicas de dimensionamento hidrológico, critérios de projetos para a micro e macrodrenagem, entre outros;
- Fixação de critérios para obras de infra-estrutura, tais como pontes, passarelas e viadutos;
- Adoção de medidas de controle de cheias no próprio lote ou medidas individuais de convivência;
- Restabelecimento parcial da capacidade de retenção no lote: baseando-se no princípio de que o lote deve reter a parcela de chuva que não permitiu infiltrar.

2.2.1.3 Soluções Alternativas ou Compensatórias

Em função da necessidade de reduzir a poluição difusa devido à urbanização e atividades agrícolas, de atenuar os picos de escoamento superficial e de diminuir os riscos e impactos causados ao meio ambiente por transbordamentos (*overflows*) em sistemas unitários durante os períodos chuvosos, a difusão e o uso de medidas alternativas ocorreu, inicialmente, nos países desenvolvidos (Ice, 2004).

Silva (2006) define soluções alternativas como um conjunto de idéias que se opõem ao conceito de evacuação rápida das águas pluviais, sugerido pelas soluções tradicionais, e, ao invés disso, procuram compensar os impactos da urbanização sobre o escoamento superficial, de forma a recuperar as condições de pré-urbanização que, por esse motivo, também são conhecidas como soluções compensatórias.

Canholi (2005) insere essas técnicas em um grupo de ações que ainda não se encontram disseminadas e ressalta que as mais destacadas são as que visam incrementar o processo da infiltração, reter os escoamentos em reservatórios e retardar o fluxo nas calhas dos córregos e rios.

Aplicações de soluções alternativas têm sido frequentemente reportadas no contexto de urbanizações de baixo impacto (*LID – Low Impact Development*), integrantes de uma linha de estudos urbanísticos que buscam o desenvolvimento de tecnologias de baixo impacto, dedicadas

a proteger o meio ambiente baseando-se em técnicas de projeto adequadas a cada região em busca da reversão das características hidrológicas aproximando-as, ao máximo, das condições pré-urbanização.

O propósito da utilização de elementos alternativos para controle do escoamento superficial, tal como a utilização de faixas gramadas ao longo de passeios, criando áreas de retardamento e disposição do escoamento gerado em calçadas, contribui para o desenvolvimento de uma abordagem sustentável para o problema. A flexibilidade dessas soluções permitem que sejam aplicadas em diferentes escalas, tais como pequenas glebas urbanas a loteamentos completos, controlando o escoamento o mais próximo possível da origem. Silva (2006) ressalta que esses sistemas podem ocorrer sem restrições ao processo de urbanização, pois as soluções alternativas podem ser implantadas à medida que a urbanização progride, evitando reestruturações periódicas e poupando o município de custos excessivos.

As soluções alternativas procuram favorecer a detenção superficial e a infiltração da água pluvial combinada, muitas vezes, com processo de armazenamento temporário. Normalmente são destinadas a atuar sobre o escoamento proveniente de pequenas áreas de contribuição como lotes, ruas, passeios e, nesse caso, o controle é realizado na fonte.

Os dispositivos de controle na fonte são classificados em dois tipos, os dispositivos de armazenamento e os dispositivos de infiltração. Esses retiram água do sistema pluvial, promovendo sua absorção pelo solo para redução do escoamento pluvial, tais como pavimentos porosos, trincheiras de infiltração, faixas e valas gramadas, que são alguns exemplos típicos de tais dispositivos, mais adequados às escalas do lote e do loteamento. Já aqueles, normalmente, têm por objetivo primordial o retardo do escoamento pluvial para sua liberação defasada, e com pico amortecido, ao seu destino, podendo até ser um ponto de captação de uma rede pluvial existente. Reservatórios residenciais em lotes, bacias de retenção e detenção nos loteamentos ou na macrodrenagem são exemplos típicos desses dispositivos de armazenamento (Silveira, 2002; Silva, 2006).

Alguns fatores específicos são apontados por Silveira (2002) como os responsáveis pela grande dificuldade de implementação do controle na fonte da drenagem urbana, tais como a resistência de profissionais desatualizados, a falta de capacidade técnica dos municípios para atuar na fiscalização e controle de forma efetiva e a falta de tratamento de esgoto e de um sistema eficiente de limpeza urbana.

Diferentemente das canalizações, que visam prioritariamente promover o afastamento rápido dos escoamentos e, ainda, o aproveitamento dos fundos-de-vaie como vias de tráfego, tanto laterais aos canais como sobre os mesmos, as técnicas de reservação objetivam a contenção temporária para subsequente liberação. A tecnologias de detenção pode ser aplicada mediante diversas situações (Canholi, 2005):

- em cada lote: mediante pequenos reservatórios associados, por exemplo, a áreas permeáveis, nos pavimentos e pisos;
- nas sub-bacias: em bacias de detenção maiores, fechadas;
- a céu aberto: as áreas permanecem secas nos períodos de estiagem, podendo ser utilizadas como áreas de lazer.

As bacias de detenção auxiliam na melhoria da qualidade da água no que se refere aos efeitos da poluição difusa e de transporte de sedimentos, causada pelas águas provenientes de lavagem do sistema viário e da ocupação do solo, que são lançadas nos córregos. Durante o tempo de residência das águas nos reservatórios ocorrem a sedimentação e decantação dos poluentes, que serão removidos e dispostos convenientemente em aterros sanitários.

Essas tecnologias também contribuem efetivamente para o gerenciamento das águas no meio urbano à medida que protegem as cidades contra inundações e corroboram na manutenção na qualidade dos corpos receptores, pois a detenção e infiltração de parte das águas pluviais antes de atingirem a rede convencional de drenagem conduz à melhoria da qualidade da água de escoamento superficial e à redução da poluição difusa (Silveira, 2002; Ice, 2004; Canholi, 2005; Silva, 2006).

Importante ressaltar que a eficiência dessas soluções está condicionada às características locais, como tipo de solo, regime de precipitações, topografia, qualidade das águas de drenagem, dentre outros. Por isso a transferência de resultados ou métodos de outros locais é bem menos aceitável do que era para as soluções tradicionais (Silva, 2006). Nesse sentido é impossibilitada a simples adoção de resultados encontrados em outras áreas, havendo a necessidade de se experimentar o comportamento desses dispositivos para cada região, de forma a obter resultados que comprovem a aplicabilidade, ou não, das soluções para um determinado contexto específico.

O retardamento da onda de cheia é apresentado por Canholi (2005) como mais uma das soluções alternativas ao controle do escoamento superficial. Em alguns casos, a aceleração dos escoamentos resultante das canalizações convencionais dos sistemas de drenagem, torna-se mais

deletéria, quanto ao potencial de provocar inundações, do que a própria impermeabilização da bacia. A técnica resulta no aumento do tempo de percurso da onda de cheia, com a conseqüente ampliação do tempo de concentração da bacia e, finalmente, a redução nos picos de vazão, obtidos através da diminuição da velocidade média de translação do escoamento alcançada pela canalização quando baseada em determinados procedimentos, tais como:

- manutenção, tanto quanto possível, do traçado natural do curso d'água original, fixando-se as curvas e eventuais alargamentos existentes;
- redução das declividades a partir da introdução de degraus ou a manutenção das declividades naturais;
- adoção de patamares para as seções hidráulicas, mantendo-se as vazões mais freqüentes contidas no leito menor. No leito maior devem ser previstos parques e áreas de lazer implantando vegetação arbustiva e gramados;
- para o escoamento de base, pode-se adotar um canaleta no fundo da calha, revestido com pedra argamassada ou concreto, para proteção contra erosão de pé e para facilitar os trabalhos de manutenção.

Uma outra solução apresentada por Canholi (2005) é o sistema de *polders* que, compostos por diques de proteção, redes de drenagem e sistema de bombeamento, visam proteção de áreas ribeirinhas ou litorâneas que se situam em cotas inferiores às dos níveis d'água que ocorrem durante os períodos de enchentes ou marés. Apesar de ser uma medida estrutural de alto custo, o autor exemplifica os *polders* citando o implantado em São Paulo, às margens do rio Tietê, cujo custo total foi estimado em US\$ 2 milhões, contra uma proposta de alteamento da ponte, orçada em US\$ 15 milhões.

A Tabela 04 apresenta algumas medidas alternativas descrevendo vantagens e desvantagens do sistema.

Tabela 04: Medidas alternativas - vantagens e desvantagens

Medidas Alternativas	
<ul style="list-style-type: none"> • Utilização de faixas gramadas ao longo de passeios, criando áreas de retardamento e disposição do escoamento gerado em calçadas • Uso de bacias de retenção, poços de infiltração, trincheiras de infiltração, telhados verdes • Aplicação de superfícies permeáveis • Uso de reservatórios de retenção • Retardamento da onda de cheia • Polders 	
Desvantagens	Vantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Preocupação com manutenção frequentes, a fim de se evitar a perda de desempenho e aumentar a vida útil • Utilização de tecnologias condicionadas a características de solo (tipo, uso e ocupação, topografia), lençol subterrâneo • Aplicação recente, resultando na falta de padrões de projeto e na escassez de informações a respeito do seu funcionamento a longo prazo • Risco de contaminação do solo e aquífero 	<ul style="list-style-type: none"> • Diminuição do risco de inundação e contribuição para a melhoria da qualidade da água no meio urbano • Redução ou mesmo eliminação da rede de microdrenagem local • Minimização das intervenções à jusante de novas áreas loteadas • Boa integração com o espaço urbano e possibilidade de valorização da água no meio urbano por meio de áreas verdes e de lazer • Melhoria da recarga de água subterrânea, normalmente reduzida em razão da impermeabilização de superfícies, com conseqüente manutenção da vazão de base dos pequenos rios urbanos. • Baixos custos de implantação.

Fonte: Adaptado de Urbonas e Stahre (1993) *apud* Silva (2006) e Canholi (2005)

2.2.2 Descrição morfométrica de bacias hidrográficas

A estreita relação entre as características físicas e o regime hidrológico de uma bacia hidrográfica auxilia na avaliação de seu desempenho. À medida que estabelece relações e comparações com dados hidrológicos conhecidos, pode-se determinar indiretamente o comportamento em seções ou locais de interesse nos quais faltem dados ou em regiões deficientes em instalações hidrométricas (Vilella e Matos, 1975).

Os elementos físicos possibilitam conhecer a variação espacial do regime hidrológico para o qual a rede de drenagem atua como um sensor indicador das alterações ocorridas no interior de seu perímetro, refletindo mudanças condicionadas por processos naturais ou de origem antrópica (Collares, 2000).

A bacia hidrográfica é definida por Garcez (1974) como um “conjunto de áreas com caimento superficial para determinada seção transversal de um curso d’água medidas as áreas

em projeção horizontal”. Pode-se dizer que essas áreas de captação natural são compostas por um conjunto de superfícies vertentes e uma rede de drenagem formada por cursos d’água que confluem até resultar um leito único no exutório (Tucci, 2004).

O estudo dessas ramificações e a classificação das bacias de acordo com as ordens de seus cursos d’água, que reflete o grau de ramificação ou bifurcação dentro de uma bacia, é um importante parâmetro a ser considerado no processo de caracterização morfométrica. Collares (2000) pontua que a análise das redes de drenagem reflete mudanças condicionadas por processos naturais e atividades antrópicas, seja por meio das alterações na qualidade da água ou na própria configuração da rede. A avaliação de modificações temporais, sejam por mudanças na estruturação, forma ou mesmo pela perda ou aparecimento de novos canais fazem da rede de drenagem um geoindicador das condições ambientais da bacia.

O tipo e o desenvolvimento do sistema de drenagem de uma bacia, o qual é constituído pelo rio principal e seus tributários, indicam a maior ou menor velocidade com que a água deixa a bacia hidrográfica (Ribeiro, 2002). Dos parâmetros a serem considerados no processo de caracterização morfométrica tem-se a classificação da bacia conforme a ordem de seus cursos d’água, que estabelecem a hierarquia fluvial. Nesse contexto, uma primeira classificação foi introduzida por Robert Horton, em 1945, que desenvolveu uma análise quantitativa para o sistema de drenagem, onde os canais de primeira ordem são aqueles que não possuem tributários; os de segunda ordem só recebem tributários de primeira ordem; os de terceira ordem podem receber tributários de primeira e segunda ordens e assim sucessivamente. O rio principal é representado pelo canal de maior ordem, permanecendo com este valor hierárquico da sua nascente até a foz.

Conforme sintetizado na Tabela 05, Arthur Strahler, em 1957, propôs uma sistemática de classificação com modificações à hierarquia dos canais proposta por Horton, onde os canais sem tributários são considerados como de primeira ordem; da confluência de dois canais de primeira ordem surgem os canais de segunda ordem, e assim sucessivamente, sendo a ordem da bacia hidrográfica correspondente ao valor do canal de maior ordem. Esse procedimento elimina o conceito de que o rio principal deva ter o mesmo número de ordem da nascente até a foz, como proposto por Horton, e facilita a classificação dos canais, eliminando a necessidade de se refazer a ordenação a cada confluência e a subjetividade da classificação das nascentes (Tucci, 2004).

Tabela 05: Comparativo entre as classificações estabelecidas por Horton e Strahler.

Canais	Horton (1945)	Strahler (1957)
1ª ordem	Não possuem tributários	Canais menores sem tributários, estendendo-se da nascente até a confluência
2ª ordem	Recebem somente tributários de primeira ordem	Surgem a partir da confluência de dois canais de primeira ordem
3ª ordem	Recebem tributários de segunda e de primeira ordem	Surgem a partir da confluência de dois canais de segunda ordem e podem receber tributários de primeira ordem e assim sucessivamente
4ª ordem	Recebem tributários de terceira ordem e de ordens inferiores e assim sucessivamente	Surgem a partir da confluência de dois canais de terceira ordem e podem receber tributários de ordens inferiores e assim sucessivamente
Rio Principal	Canal de maior ordem, o qual permanece neste grau hierárquico desde a sua nascente até a foz	Apresenta o maior número de ordens variáveis, pois a cada confluência ele passa a apresentar uma posição hierárquica superior

Fonte: Adaptado de Tucci (2004).

Collares (2000) subdividiu as variáveis morfométricas em dois grupos: as relativas à morfologia, denominando-as de variáveis morfológicas, tais como área, perímetro, comprimento, entre outras; e as relativas à composição da rede de drenagem, denominando-as de variáveis da rede de drenagem, tais como número total de rios, comprimento total da rede de drenagem e comprimento total de canais por ordem, entre outras.

A investigação dos sistemas dos padrões de drenagem também envolvem questões relacionadas à caracterização de formas anômalas diferentes do arranjo geral dos canais assim como densidade de textura de drenagem, sinuosidade dos elementos textuais de drenagem, angularidade (ângulo de confluência dos canais), tropia (presença de um ou mais direções preferenciais de linha de drenagem predominante) e assimetria dos canais de drenagem (presença de elementos com tamanho e/ou estrutura desiguais); entretanto, neste trabalho, foram investigadas as características morfométricas descritas a seguir:

a) Área de Drenagem(A) e Perímetro da Bacia(P):

Constituem parâmetros básicos a serem utilizados para o cálculo de outras variáveis e correspondem, respectivamente, à projeção horizontal delimitada pelos divisores topográficos da bacia, expressa em km^2 , e ao comprimento periférico à bacia, expresso em km (Villela & Matos, 1975).

Tucci (2004) ressalta que a importância da Área de Drenagem dá-se, também, pelo fato de possibilitar a definição da potencialidade hídrica da bacia hidrográfica pois seu valor quando multiplicado pelo da lâmina de chuva precipitada define o volume de água recebido pela bacia.

b) Maior Comprimento(L) e Largura Média(L_m):

Simulando o caminho que a água percorre dentro da bacia até atingir seu exutório, determinando o tempo de resposta da bacia, o Maior Comprimento(L) e Largura Média(L_m), expressos em km, podem ser determinadas adotando o maior comprimento como representativo ao comprimento do maior eixo longitudinal da bacia e a largura média é o resultado da divisão da área(A) pelo maior comprimento(L) (Silva, 2000; Collares, 2000; Fontes, 1997, citado em Ribeiro, 2002).

c) Coeficiente de Compacidade (K_c):

Também denominado de índice de Gravelius, o K_c é determinada pela relação entre o perímetro da bacia (P) e a circunferência de um círculo de área igual à da bacia (Garcez, 1974; Villela & Matos, 1975; Genovez, 2001).

$$K_c = \frac{P}{2\pi r} \quad \rightarrow \quad K_c = \frac{0,28P}{\sqrt{A}} \quad (4)$$

Índices como o Coeficiente de Compacidade (K_c), de Circularidade (I_c) e o Fator Forma (K_f) determinam grandezas diretamente relacionadas com a forma da bacia, influenciando, diretamente, o tempo de concentração. Genovez (2001) define tempo de concentração como o “tempo que leva a gota que cai no ponto mais distante da bacia para atingir a seção em estudo, contado a partir do início da chuva”. Logo, ao subtenderem a forma da bacia, esses índices determinam quanto da bacia está contribuindo simultaneamente para a seção em estudo, o que determina a maior ou menor tendência para enchentes.

Christofolletti (1974) confere significância ao K_c pela sua peculiaridade de possibilitar descrever e interpretar tanto a forma quanto o processo de alargamento, ou alongamento, das bacias hidrográficas. Quanto mais irregular for a bacia tanto maior será o coeficiente de compacidade e um coeficiente mínimo, igual à unidade ($K_c=1$), corresponde à bacias circulares que determinam, caso os outros fatores sejam iguais, ser mais acentuada a disposição da bacia para enchentes (Christofolletti, 1974; Villela & Matos, 1975; Genovez, 2001).

d) Índice de Circularidade (I_c):

Inicialmente proposto por Miller (1953), apud Christofolletti (1974), é determinado pela divisão da área da bacia (A) e a área de um círculo de igual perímetro (A_c), logo:

$$I_c = \frac{A}{A_c} \quad (5)$$

Semelhante ao Coeficiente de Compacidade o valor determinado pelo I_c quanto mais se aproxima da unidade ($I_c = 1,0$) a bacia tende à forma circular.

e) Fator de Forma (K_f):

Assim como os outros índices relacionados à forma, o Fator de Forma (K_f) também determina maior ou menor vocação da bacia hidrográfica para as enchentes, entretanto, nesse caso, uma bacia com K_f baixo é menos sujeita a enchentes que outra de mesmo tamanho porém com maior K_f . Isso ocorre devido à tendência natural de uma bacia estreita e longa, com K_f baixo, ter menos possibilidade de ocorrência de chuvas intensas cobrindo simultaneamente toda a extensão. A contribuição dos tributários atinge o curso d'água principal em vários pontos, afastando-se, portanto, da condição de bacia circular, na qual a concentração de todo o deflúvio da bacia se dá num só ponto (Genovez, 2001).

Grandeza adimensional, o K_f é a relação entre a largura média (\bar{L}) e o maior comprimento, ou comprimento axial da bacia (L). Logo, temos:

$$K_f = \frac{\bar{L}}{L} \quad \text{mas, } \bar{L} = \frac{A}{L}$$

$$\text{logo, } K_f = \frac{A}{L^2} \quad (6)$$

d) Amplitude Altimétrica Máxima (H_m) e Relação de Relevô (R_r):

Inicialmente introduzida por Schumum, em 1956, também denominada de “relevô máximo da bacia”, a Amplitude Altimétrica Máxima (H_m) corresponde à diferença altimétrica, em metros, entre a altitude da desembocadura e a altitude do ponto mais alto situado em qualquer lugar da divisória topográfica (Christofoletti, 1974; Collares, 2000; Silva, 2000; Ribeiro, 2002).

O ponto mais alto da bacia hidrográfica, eventualmente, pode ser representado por uma situação excepcional na área de estudo, logo, a fim de evitar resultados que mascarem a realidade Christofoletti (1974) recomenda que o valor a ser utilizado para o ponto máximo seja a média de, pelo menos, dez dos pontos mais elevados situados entre os canais de primeira ordem e o trecho superior da bacia.

A Relação de Relevô (R_r), expressa em metros por quilômetro, representa a relação H_m e o maior comprimento da bacia (L), medido paralelamente à principal linha de drenagem, sendo assim:

$$R_r = \frac{H_m}{L} \quad (7)$$

O índice é representativo da topografia da área, correlacionando-se à velocidade de escoamento superficial e ao tempo que leva a água da chuva para se concentrar nos leitos fluviais que constituem a rede de drenagem, o que significa que quanto maior a R_r , mais elevados serão os desníveis entre as cabeceiras e a foz.

e) Índice de Sinuosidade (Sin):

Fator controlador da velocidade do escoamento, o índice de sinuosidade (Sin) descreve o grau de sinuosidade ou divagação dos cursos d'água. Constitui um fator representativo da velocidade de escoamento das águas, pois representa a relação entre o comprimento do rio principal da bacia (L) e o seu comprimento vetorial (L_{vet}), também denominado de comprimento do talvegue, ambos em metros, logo (Villela & Matos, 1975):

$$Sin = \frac{L}{L_{vet}} \quad (8)$$

f) Número Total de Canais (N_t) e Número de Canais por Ordem de Ramificação (N_i):

Essenciais para o cálculo de outras variáveis, os valores correspondentes ao número de canais além de permitirem uma avaliação primária das alterações ocorridas na bacia, tal como perda ou aumento da quantidade de canais, são particularmente interessantes quando analisadas suas inter-relações por meio da razão de bifurcação.

Em sua pesquisa Collares (2000) concluiu que ocorreram alterações significativas na composição da rede de drenagem da bacia hidrográfica do Rio Capivari, SP, no intervalo de 23 anos analisados, para os quais foi observada diminuição nos canais de primeira ordem, onde as bacias que mais se modificaram foram as urbanas ou em processo de urbanização.

g) Comprimento total da rede de drenagem (L_t), Comprimento total dos canais por ordem (L_i) e Comprimento médio dos canais por ordem (L_{mi}):

Assim como as variáveis N_t e N_i , os comprimentos L_t , L_i e L_{mi} são obtidas de maneira similar, pela observação topológica da rede de drenagem.

h) Razão de bifurcação (R_b):

Baseado nas variáveis introduzidas por Horton em 1945, anteriormente citadas, a Razão de bifurcação (R_b) expressa a relação entre o número total de segmentos de uma certa ordem (N_i) e o número total dos de ordem imediatamente superior (N_{i+1}), corroborando com a classificação estabelecida por Strahler (Christofolletti, 1974). Assim, temos:

$$R_b = \frac{N_i}{N_{i+1}} \quad (9)$$

Strahler (1952), apud Ribeiro (2002), afirma que a R_b é um coeficiente altamente instável e apresenta pequenas taxas de variação de uma região para outra, exceto em área com forte controle estrutural, encontrando, em regiões com homogeneidade geológica, valores que variam entre 3 e 5, já Christofolletti (1974) assume que os resultados não devem ser inferiores a 2. Em seus estudos Collares (2000) encontrou valores com grande variabilidade numérica, considerando altos os maiores que 4,8, médios os entre 3,4 e 4,8 e baixos os menores que 3,4.

i) Razão de comprimento médio (R_{lm}):

A razão de bifurcação (R_b) assim como a de comprimento médio (R_{lm}) não são índices comumente utilizados em análises geoambientais pois resumem-se a refletirem a estruturação interna dos canais na bacia; entretanto, assim como utilizados por Collares (2000), são de grande valia em análises temporais comparativas, simulando mudanças ocorridas no período de análise e alterações internas, mesmo quando não apresentam variações no número de canais ou em variáveis dimensionais.

A R_{Lm} expressa a relação do comprimento médio dos canais de determinada ordem (L_{mi}) e o comprimento médio dos canais de ordem imediatamente inferior ($L_{m(i-1)}$), sendo assim temos (Christofolletti, 1974):

$$R_{Lm} = \frac{L_{mi}}{L_{m(i-1)}} \quad (10)$$

j) Densidade de drenagem (D_d):

Expressando as disponibilidades de canais de escoamento para o fluxo de água e materiais detríticos e o grau de dissecação de relevo, resultante da atuação da rede de relevo, o índice de densidade de drenagem (D_d) é considerado por Villela & Matos (1975) uma boa referência para avaliação do grau de desenvolvimento de um sistema de drenagem que, variando inversamente proporcional à extensão do escoamento superficial, fornece uma indicação da eficiência da drenagem da bacia.

À medida que aumenta o valor numérico da D_d , há diminuição quase proporcional da extensão dos componentes fluviais das bacias de drenagem e seus índices, de acordo com Villela & Matos (1975), variam de 0,5km/km², referente a bacias com drenagem pobre, a 3,5km/km² ou mais, para bacias bem drenadas.

Conforme adotado anteriormente, tendo L_t representando o comprimento total dos cursos d'água e A a área de drenagem, para o cálculo da D_d , temos (Christofolletti, 1974; Villela & Matos, 1975; Tucci, 2004):

$$D_d = \frac{L_t}{A} \quad (11)$$

Tucci (2004) ressalta a importância da precisa identificação do mapa fonte pois como os índices e medidas de fisiografia referentes à rede de drenagem são dependentes da escala dos mapas utilizados, esta deve acompanhar o resultado dos cálculos.

k) Densidade hidrográfica (D_h):

A Densidade hidrográfica (D_h) corresponde à relação entre o número de rios ou cursos d'água (N_t) e a área da bacia (A). Christofolletti (1974) indica que, com base no sistema de ordenação determinado por Strahler, o número de rios deve corresponder aos canais de primeira ordem, considerando que todo o rio tem início em uma nascente. Sendo assim (Christofolletti, 1974; Collares, 2000; Villela & Matos, 1975):

$$D_h = \frac{N_t}{A} \quad (12)$$

Christofolletti (1974) considerou a D_h uma variável de grande importância por representar o comportamento hidrológico de uma determinada área em um dos seus aspectos fundamentais, que é a capacidade de gerar novos cursos d'água, cujas alterações antrópicas a que uma bacia pode estar submetida reflete em variações temporais nos valores da D_h .

l) Coeficiente de manutenção (C_m):

De correlação inversa à densidade de drenagem (D_d), o coeficiente de manutenção (C_m) representa a área mínima em uma bacia necessária à manutenção de um metro de canal de escoamento, sendo calculada de acordo com a seguinte expressão (Christofolletti; 1974):

$$C_m = \left(\frac{1}{D_d} \right) \cdot 1000 \quad (13)$$

Christofolletti (1974) explica que a expressão é multiplicado por 1000 para que o resultado seja expresso em m^2/m , isto é quantidade de metro quadrado para cada metro linear de canal de escoamento.

m) Índice de rugosidade (I_r):

O índice de rugosidade (I_r) expressa um dos aspectos da análise dimensional da topografia no qual, combinando as características de declividade e comprimento das vertentes com a densidade de drenagem, representa um valor adimensional correlacionando a amplitude altimétrica (H_m) e a densidade de drenagem (D_d). Logo, temos (Christofoletti, 1974):

$$I_r = H_m \cdot D_d \quad (14)$$

Patton e Baker (1976), apud Christofoletti (1974), demonstraram que áreas potencialmente assoladas por “cheias relâmpagos” são previstas como possuidoras de elevados índices de rugosidade.

2.2.3 Escoamento superficial:

Conforme definido por Villela & Matos (1975), o escoamento superficial envolve o excesso de precipitação que ocorre logo após uma chuva intensa, que se desloca livremente sobre a superfície até um rio, alimentado tanto pelo excedente de precipitação como pelas águas subterrâneas, sendo foco da maioria dos estudos hidrológico ligados ao aproveitamento da água superficial e à proteção contra os fenômenos provocados pelo seu deslocamento.

Tanto fatores climáticos, relacionados à precipitação, quanto fisiográficos, relacionados às características físicas da bacia, interferem no sistema de escoamento superficial. No que tange aos climáticos Villela & Matos (1975) destacam a intensidade e a duração da precipitação assim como a precipitação antecedente. Já para os fisiográficos são destacados a área, a forma, a permeabilidade e a capacidade de infiltração, bem como a topografia da bacia.

2.2.3.1 Precipitação excedente: métodos de análise:

Em uma bacia urbana o estudo, avaliação e atualização dos fatores fisiográficos tornam-se de grande importância na medida em que a incessante alteração da cobertura superficial do solo dá-se em detrimento da ampliação de áreas impermeáveis, influenciando, sobretudo, no incremento do escoamento superficial, na diminuição do tempo de concentração e, conseqüentemente, na antecipação e elevação dos picos de cheias.

As metodologias de análise e quantificação da efetiva parcela do total precipitado que gera o escoamento superficial consideram não apenas o volume precipitado, mas, também, os volumes evaporados, retidos nas depressões e os infiltrados (Tucci, 2004). A capacidade de infiltração, por exemplo, é um dos fatores mais importantes a serem considerados pois somente

quando a intensidade de chuva superar ou igualar a capacidade de infiltração é que dá-se o início do escoamento superficial (Genovez, 2001). A seguir serão descritas algumas das particularidades dos métodos de análise.

2.2.3.1.1 Equações de infiltração:

A metodologia que adota equações de infiltração é um procedimento que assume que a parcela de infiltração é geralmente maior ao início e decai ao longo da precipitação até atingir um patamar constante (Canholi, 2005). Podem ser estabelecidas através de métodos tais como os definidos por Horton e Green & Ampt, *apud* Tucci (2004) e Canholi (2005).

Para os casos de um solo submetido a precipitações com intensidade sempre superior à capacidade de infiltração, Horton representa o decaimento da infiltração com o tempo, da seguinte forma:

$$I_t = I_b + (I_i - I_b)e^{-kt} \quad (15)$$

onde t = tempo decorrido desde a saturação superficial do solo; I_t = taxa de infiltração no tempo t ; I_i = taxa de infiltração inicial; I_b = taxa mínima de infiltração, esse último correlacionado à condutividade hidráulica saturada (k).

Green & Ampt, *apud* Tucci (2004), apresentaram método derivando a equação de Darcy, através da simplificação no fenômeno da propagação da frente de umidade no interior do solo, tendo assim:

$$I = K' \left[\frac{(\varphi_f + L)}{L} \right] \quad (16)$$

onde I = taxa de infiltração; K' = condutividade hidráulica saturada aparente do solo (equivalente à I_b de Horton); L = profundidade da frente de umidade; φ_f = potencial gravitacional final.

Outros estudiosos também desenvolveram fórmulas para o cálculo de infiltração, tais como Berthelot (1970) e Philip (1957), citados em Tucci (2004). Canholi (2005) ressalta que, em geral, os parâmetros adotados nas Equações de Infiltração são dependentes de vários fatores que controlam o processo de infiltração e podem afetar, significativamente, o valor da razão de infiltração. Logo, tendo sua faixa de variação bastante ampla, o autor afirma ser prudente a realização de ensaios em campo para a determinação de tais parâmetros.

2.2.3.1.2 Índices:

É uma metodologia que pressupõe a determinação do escoamento superficial com base na adoção de fatores constantes, assumindo que a intensidade da infiltração é constante e determinada através de índices, tais como os índices α e ϕ , que correlacionam o total escoado e precipitado e o índice ω , que representa a infiltração média durante o tempo em que a precipitação é superior à taxa de infiltração (Tucci, 2004).

De acordo com Canholi (2005) o índice ϕ pode ser obtido por meio da relação:

$$\phi = \frac{P_T - P_E}{T_{prec}} \quad (17)$$

onde ϕ = índice (mm/h); P_T = volume precipitado (mm); P_E = precipitação efetiva, ou seja, volume excedente (mm) e T_{prec} = duração da precipitação (h).

Do mesmo modo, Tucci (2004) representa o índice ω pela seguinte equação:

$$\omega = \frac{V_t - E_t - S_{la}}{t} \quad (18)$$

onde ω = índice (mm/h); V_t = volume da precipitação no período t (mm); E_t = escoamento superficial no período t ; S_{la} = valor normalmente desconhecido e agregado como perdas iniciais e t = tempo em que a precipitação é maior que a taxa de infiltração (h).

2.2.3.1.3 Relações funcionais:

A metodologia que considera relações funcionais admite balanço de massa que considera a correlação entre a precipitação total (P_T) e a precipitação efetiva (P_E). A partir de estudos de Kohler & Richards (1962), Tucci (2004) apresenta a seguinte expressão:

$$P_E = (P_T^n + d^n) - d \quad (19)$$

onde P_E = precipitação efetiva, ou seja a precipitação que gera o escoamento superficial; P_T = precipitação total; $d = P_T - P_E$ e n = coeficiente empírico representado por $2 + 0,5d$.

Contudo, dos métodos apresentados pelos diversos autores, um dos mais difundidos é o concebido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, inicialmente desenvolvido para aplicação em áreas rurais, o método do Número de Curva (CN) definido pelo Soil Conservation Service (SCS), atual *National Resource Conservation Service* (NRCS), é especialmente utilizado em áreas que não dispõem de variada gama de dados hidrológicos e representa os efeitos da combinação entre grupos hidrológicos, uso e ocupação do solo, características do solo e umidade antecedente através da equação:

$$P_E = \frac{(P_T - 0,2S)^2}{P_T + 0,8S} \quad (20)$$

validada para $P_T > 0,2S$, onde P_E = precipitação efetiva e P_T = precipitação total.

A variável S representa a capacidade potencial máxima da bacia para absorver a água que, infiltrando, não fará parte do escoamento. Condicionada ao tipo e ocupação do solo, S pode ser determinada através de tabelas que a correlacionam com o fator CN (Número de Curva), através da seguinte equação:

$$S = \frac{254(100 - CN)}{CN} \quad (21)$$

O CN foi um fator determinado empiricamente através da análise de mais de 3 mil tipos de solo e coberturas vegetais, portanto para sua estimativa devem ser observados os valores tabelados disponíveis em função do tipo de solo e do uso e ocupação existente na área de interesse, conforme Tabelas 06 e 07.

Tabela 06: Valores de CN para bacias urbanas e suburbanas/Condição AMC II de umidade antecedente

Utilização ou cobertura do solo	A	B	C	D
Zonas cultivadas: sem conservação do solo	72	81	88	91
com conservação do solo	62	71	78	81
Pastagens ou terrenos em más condições	68	79	86	89
Pastagens ou terrenos baldios em boas condições	39	61	74	80
Prado em boas condições	30	58	71	78
Bosques Florestais ou zonas: com coberturas ruins	45	55	77	83
com cobertura boa	25	55	70	77
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golf, cemitérios,				
boas condições: com relva em mais de 75% da área	39	61	74	80
com relva de 50 a 75% da área	49	69	79	84
Zonas comerciais e de escritório	89	92	94	95
Zonas industriais	81	88	91	93
Zonas residenciais	% média impermeável			
Lotes de < 500m ²	65	77	85	90
1000 m ²	38	61	75	83
1300 m ²	30	57	72	81
2000 m ²	25	54	70	80
4000 m ²	20	51	68	79
Parques de estacionamento, telhados, viadutos, etc...	98	98	98	98
Arruamentos e estradas: asfaltadas e com drenagem pluvial	98	98	98	98
paralelepípedo	76	85	89	91
terra	72	82	87	89

Fonte: Tucci, 2004.

Tabela 07: Valores de CN para bacias rurais/Condição AMC II de umidade antecedente

Uso do solo	Superfície	A	B	C	D
Solo lavrado	com sulcos retilíneos em fileiras retas	77	86	91	94
		70	80	87	90
Plantações regulares	em curvas de nível	67	77	83	87
	terraceado em nível	64	76	84	88
	em fileiras retas	64	76	84	88
Plantações de cereais	em curvas de nível	62	74	82	85
	terraceado em nível	60	71	79	82
	em fileiras retas	62	75	83	87
Plantações de legumes ou cultivados	em curvas de nível	60	72	81	84
	terraceado em nível	57	70	78	89
	pobres	68	79	86	88
	normais	49	69	79	94
	boas	39	61	74	80
Pastagens	pobres, em curvas de nível	47	67	81	88
	normais, em curvas de nível	25	59	75	83
	boas, em curvas de nível	6	35	70	79
Campos permanentes	normais	30	58	71	78
	esparsas, de baixa transpiração	45	66	77	83
	normais	36	60	73	79
	densas, de alta transpiração	25	55	70	77
Chácaras	normais	56	75	86	91
Estradas de terra	más	72	82	87	89
	de superfície dura	74	84	90	92
Florestas	muito esparsas, baixa transpiração	56	75	86	91
	esparsas	46	68	78	84
	densas, de alta transpiração	26	52	62	69
	normais	36	60	70	76

Fonte: Tucci, 2004.

Quanto maior o valor do CN encontrado, ainda maior será a quantidade de escoamento superficial direto esperado para uma determinada chuva, logo, para CN=100, tem-se que toda a chuva precipitada é escoada. Ramos (1999) sugere um roteiro para a determinação do índice, conforme descrito a seguir:

a) Determinação das condições de saturação do solo e enquadramento em grupo hidrológico:

A fixação das condições de saturação do solo, ou seja, da capacidade de infiltração, que direciona ao enquadramento em um dos quatro grupos hidrológicos definido pelo *National Resource Conservation Service* para o método do SCS, é apresentada na Tabela 08.

Tabela 08: Classificação dos grupos hidrológicos do solo e suas capacidades de infiltração

	Descrição do solo	Capacidade de infiltração (cm/h)
Grupo hidrológico do solo	Areias e cascalhos profundos ($h > 1,50m$), muito permeáveis; A Possuem alta taxa de infiltração mesmo quando saturados, produzindo baixo escoamento superficial - Teor de argila até 10%.	1,20 - 0,80
	Solos arenosos, com poucos finos, menos profundos ($h < 1,50m$) e permeabilidade superior à média - Teor de argila 10–20%. B	0,80 - 0,40
	Solos pouco profundos com camadas subsuperficiais que impedem o fluxo descendente da água, gerando escoamento superficial acima da média e capacidade de infiltração abaixo da média, ou; C Solos com porcentagem elevada de argila (20–30%).	0,40 - 0,15
	Solos compostos principalmente de argila (acima de 30%), representando baixa capacidade de infiltração, ou; D Solos com nível freático elevado, ou; Solos com camada argilosa próxima à superfície, ou; Solos rasos sobre camadas impermeáveis.	0,15 - 0,00

Fonte: Adaptado de McCuen(1982), Tucci (2004) e Canholi (2005).

Genovez (2001) ressalta que em bacias hidrográficas onde são identificados dois ou mais grupos hidrológicos de solo ou diferentes usos, o CN resultará de uma média ponderada, na qual as áreas correspondentes a cada grupo hidrológico de solo são adotadas como pesos.

b) Determinação da condição de umidade antecedente:

As condições de umidade antecedente estabelecidas pelo Método do SCS, são (McCuen, 1982; Tucci, 2004):

- AMC I: situação em que os solos são secos. Na estação de crescimento a precipitação acumulada dos cinco dias anteriores é menor que 36 mm e em outro período, menor que 13 mm;
- AMC II: situação média em que os solos correspondem à umidade da capacidade de campo;
- AMC III: situação em que ocorrem precipitações consideráveis nos cinco dias anteriores e o solo encontra-se saturado. No período de crescimento, as precipitações acumuladas nos cinco dias anteriores, são maiores que 53 mm e no outro maior que 28 mm.

c) Determinação do CN para o grupo AMC II de umidade antecedente do solo:

Determina-se o valor de CN pra o grupo AMCII, através da Tabela 08 anteriormente apresentada e, posteriormente, caso seja necessário faz-se sua correção conforme o próximo item.

d) Correção do CN:

Essa é uma etapa facultativa que deve ser adotada caso o grupo de umidade antecedente em estudo não corresponda ao Grupo AMC II, adequando-o aos grupos AMC I ou AMC III, conforme objeto de estudo. Sua correção é feita de acordo com a Tabela 9, para a qual Ramos (1999) e Tucci (2004) apresentaram diferentes valores, entretanto, nesse estudo, devido à atualização dos dados, adotar-se-ão os apresentados por Tucci (2004).

Genovez (2001) ressalta um segundo caso de correção a ser feita quando a bacia apresenta dois ou mais tipos de solo ou diferentes usos e tratamentos do solo, nesses casos o autor recomenda a obtenção dos valores de CN através de uma média ponderada, onde os pesos serão as áreas da bacia onde ocorre cada caso.

Tabela 9: Correção de CN para outras condições iniciais de umidade.

AMC II	Valores correspondentes corrigidos	
	AMC I	AMC III
100	100	100
95	87	99
90	78	98
85	70	97
80	63	94
75	57	91
70	51	87
65	45	83
60	40	79
55	35	75
50	31	70
45	27	65
40	23	60
35	19	55
30	15	50
25	12	45
20	9	39
15	7	33
10	4	26
5	2	17

Fonte: McCuen, 1982.

e) Determinação da retenção potencial máxima (S):

Como o Método do SCS considera os tipos de ocupação do solo e uma bacia urbana pode apresentar diversos tipos de uso e ocupação do solo, cujas características hidrológicas podem ser diferentes, Canholi (2005), corroborando com Ramos (1999), determina a realização de uma média ponderada do CN, com relação às respectivas áreas, para a obtenção de um valor médio a ser considerado, obtendo S através da equação (21)

A determinação da variável S leva-nos ao máximo armazenamento hídrico (mm) suportado pelo solo e será utilizado para o cálculo da precipitação efetiva, conforme a fórmula:

$$P_E = \frac{(P_T - I_A)^2}{P_T - I_A + S} \quad (22)$$

válida para $P_T > 0,2S$, onde P_E = precipitação efetiva, mm (deflúvio); P_T = precipitação total (mm) e I_A = abstração inicial (Mishra et al, 2003; Canholi, 2005; Patil et al, 2007).

Correspondendo à água precipitada interceptada pela vegetação, ou retida em depressões do terreno, infiltrada ou evaporada, antes do início do deflúvio a variável I_a é estimada, preliminarmente, através da equação:

$$I_A = \lambda \cdot S \quad (23)$$

A versão original do método do SCS-CN assume $\lambda=0,2$, conforme equação 23, entretanto, considerando o conceito de I_A , λ pode assumir valores de zero a ∞ . Mays (2001), *apud* Canholi (2005), sugere que, em áreas densamente urbanizadas com substancial porcentagem de áreas impermeabilizada, para refletir o decréscimo de interceptação e de depressões que ocorre nas áreas urbanas, seja usado a seguinte equação

$$I_A = 0,1 \cdot S \quad (24)$$

O método do SCS-CN tem sido extensamente aceito por cientistas desde a sua proposição em 1956, como McCuen (1982), que elaborou um guia para a aplicação prática do método do SCS-CN em análises hidrológicas; entretanto algumas alterações no método original foram sugeridas para melhor adequação técnica a casos específicos. Por exemplo, Mishra e Singh (2002) sugeriram modificação em que a simulação hidrológica incorpora componentes de evapotranspiração, alterando a estimativa de abstração inicial e inserindo-as num sistema computacional para o cálculo da infiltração e do escoamento superficial. Mishra et al (2005) desenvolveram pesquisa em que além de sugerirem modificação no método tradicional do SCS-CN, descreveram suas características correlacionando índices de pressão de sucção às características de retenção da água no solo, sugeriram procedimentos para o cálculo da retenção potencial máxima (S) em função da precipitação total (P_T) e do volume de escoamento superficial (Q) para a precipitação antecedente de 5 dias e validaram o método modificado comparando com o original do SCS-CN.

Patil et al (2007) apontam oito modificações no método original do SCS-CN sugeridas por Mishra e Singh (2003), das quais Patil et al (2007; 2008) selecionaram três que correlacionam uso e ocupação do solo, grupo hidrológico e características de umidade antecedente do solo e abstração inicial, para avaliação comparativa das metodologias. O método original do SCS-CN

baseia-se em duas hipóteses fundamentais. A primeira iguala a relação do volume real de escoamento superficial (Q) à precipitação total (P_T), considerando a infiltração (F) e a retenção potencial máxima (S), já a segunda relaciona a abstração inicial (I_a) à retenção potencial máxima (S) (Mishra, 1999), expressas, respectivamente, pelas equações:

$$P_t = I_a + F + Q \quad (25)$$

$$\frac{P_E}{P_t - I_a} = \frac{F}{S} \quad (26)$$

Alguns casos específicos sugerem modificações no método SCS-CN. Mishra et al (1999) e Patil et al (2007; 2008) ressaltam a hipótese desconsiderada pelo método original, que considera os dois cenários extremos na resposta hidrológica das bacias, o de seca e o de enchente, avaliando apenas o volume de escoamento superficial após o início da abstração inicial. Logo na suposição de a abstração inicial igualar-se a zero ($I_A=0$) ou à retenção potencial máxima ($I_A=S$), indicando um caso particular de escoamento superficial, a representação do escoamento superficial dar-se-ia pela equação:

$$P_E = \frac{P_t^2}{S + P} \quad (27)$$

2.2.3.2 Período de retorno (T_r):

O Período de Retorno (T_r) é um termo frequentemente associado à segurança e durabilidade. Seu significado se refere ao espaço de tempo, em anos, onde provavelmente ocorrerá um fenômeno de grande magnitude, pelo menos uma vez (Brasil, 2005), ou, em outras palavras, o tempo médio em que determinado evento é igualado ou superado (Villela & Matos, 1975).

A determinação do período de retorno resulta da adoção de uma margem de risco ao qual determinada obra, ou projeto, estará sujeita. Para a determinação numérica desse parâmetro a relação benefício *versus* custo é de difícil quantificação pois quanto maior o T_r adotado, maior será a proteção oferecida à população, entretanto maior e mais onerosa será o porte da obra, sua reconstrução ou reparação do sistema em operação assim como o impacto no ambiente urbano. Cardoso Neto (1998) e Tucci (2004) ressaltam, entretanto, que o T_r é um critério a ser definido em esferas políticas, pois, uma vez que a sociedade, através de seus representantes, é quem deve decidir o risco aceitável pela comunidade e o quanto ela está disposta a pagar pela proteção conferida pelas obras. Villela & Matos (1975) acrescentam ainda que em países que adotam

seguro contra enchente, pode-se definir o T_r mais econômico relacionando-o com os custos anuais do seguro e os gastos anuais com amortização de cheia.

No Brasil, como, em geral, não são adotados seguros contra enchentes os critérios baseiam-se na vida útil da obra, no tipo de estrutura, na facilidade de reparação e ampliação e no perigo de perda de vida. Geralmente os períodos adotados no caso de microdrenagem são de 10 a 20 anos e, para pontes, definem-se tempos de recorrência de 50 a 100 anos, conforme o tipo e importância do sistema (DNIT, 2005).

Para regiões que encontram dificuldade de estabelecer o T_r de forma objetiva, devido à subjetividade dos critérios a serem adotados, Cardoso Neto (1998), corroborando com Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes, sugere que a decisão fique à critério do projetista, segundo valores apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Determinação do período de retorno em função da ocupação da área.

Tipo de obra	Tipo de ocupação	Período de retorno (anos)
Micro-drenagem	Residencial	2
Micro-drenagem	Comercial	5
Micro-drenagem	Edifício de serviços ou público	5
Micro-drenagem	Aeroporto	2-5
Micro-drenagem	Áreas comerciais e artérias de tráfego	5-10
Macro-drenagem	Áreas comerciais e residenciais	50-100
Macro-drenagem	Áreas de importância específica	500

Fonte: Adaptado de Cardoso Neto, 1998.

Nesse contexto faz-se importante a distinção entre risco e período de retorno, sendo aquele a probabilidade de a obra falhar pelo menos uma vez durante sua vida útil. Em efeito, a probabilidade (P) da vazão de projeto ser igualada ou superada durante a vida útil da obra (n), em anos, é o inverso do período de retorno (T_r), sendo assim: $P = 1/T_r$. Logo, a cada ano uma probabilidade de que a obra não falhe é igual a $1 - 1/T_r$. Portanto a possibilidade de que ela não venha a falhar em toda a sua vida útil é $(1 - 1/T_r)^n$, implicando que o risco (R), ou probabilidade, que a obra falhe pelo menos uma vez durante a vida útil é (Brasil, 2005; Cardoso Neto, 1998; Tucci, 2004):

$$R = 1 - \left[1 - \left(\frac{1}{T_r} \right) \right]^n \quad (28)$$

Diferentemente de Cardoso Neto (1998), Villela & Matos (1975) apresentam valores para a adoção de T_r correlacionando-os com a vida útil e a probabilidade da ocorrência do dano, denominada de risco permissível, conforme Tabela 11.

Tabela 11: Valores de períodos de retorno.

Risco permissível	Vida útil da obra (anos)					
	1	10	25	50	100	200
0,01	100	995	2.488	4.975	3.950	19.900
0,10	10	95	238	475	950	1.899
0,25	4	35	87	174	348	695
0,50	2	15	37	73	145	289
0,75	1,3	7,7	18	37	73	144
0,99	0,01	2,7	5,9	11	22	44

Fonte: Villela & Matos, 1975.

2.2.3.3 Tempo de concentração (t_c):

O tempo de concentração (t_c) é uma das grandezas que distingue o escoamento superficial, sendo definido como o tempo necessário para a água, precipitada no ponto mais distante da bacia, deslocar-se até a seção de interesse (Tucci, 2004). Caracterizando o período entre o fim da precipitação e o ponto de inflexão dos hidrogramas, o t_c quantifica o tempo para que toda a bacia contribua simultaneamente para o escoamento de uma dada seção (Villela & Matos, 1975).

Logo, para chuvas com duração inferiores ao t_c , somente os deflúvios de parte da bacia hidrográfica se somam na configuração do hidrograma da enchente, enquanto que, para chuvas de duração maior que o t_c , os deflúvios de todas as partes da bacia contribuem para a enchente, embora com o pico de cheia já atenuado (DNIT, 2005).

Diversas fórmulas empíricas têm sido propostas para determinar esse parâmetro em função de características físicas da bacia, da sua ocupação e da intensidade da chuva. De origem experimental, as fórmulas devem ser aplicadas em condições próximas àquelas para as quais foram determinadas e do tipo de escoamento que cada fórmula procura representar. Canholi (2005) ressalta que, como a maioria das metodologias para o cálculo do t_c foi elaborada para bacias rurais, a determinação do índice para áreas urbanas deve ser feito de modo criterioso e considera que as metodologias mais adequadas são as do SCS (1986), de Akan (1993) e Walesh (1989), que recomendam o enfoque cinemático conforma a fórmula:

$$t_c = t_s + t_n + t_q \quad (29)$$

onde, t_s = tempo de escoamento superficial (h); t_n = tempo de escoamento em canais rasos (h) e t_q = tempo de escoamento em canais ou galerias definidos (h), que são os três tipos de escoamento geralmente encontrado em bacias urbanas, calculados conforme detalhamento a seguir.

t_s → tempo de escoamento em superfícies (*overland flow*): caracterizado por pequenas espessuras de lâminas d'água com baixa velocidade, essa variável ocorre para os primeiros 50 a 100m à montante da bacia e pode ser determinado pela seguinte equação:

$$t_s = \frac{0,091(n \cdot L_t)^{0,8}}{P_2^{0,5} \cdot i^{0,4}} \quad (30)$$

onde L_t = comprimento do trecho (m); P_2 = total precipitado em 24 horas para recorrência de 2 anos (mm); i = declividade do terreno (m/m) e n = coeficiente de rugosidade de Manning ($s/m^{5/2}$), obtido através da Tabela 12, que apresenta alguns valores de n para escoamento em superfícies.

Tabela 12: Valores de n para escoamento em superfícies (*overland flow*).

Tipo de superfície	n de Manning
Asfalto liso	0,011
Concreto liso/rugoso	0,012
Pisos cerâmicos	0,015
Pavimento intertravado/paralelepípedo	0,024
Gramados (esparcos/densos)	0,15/0,24
Vegetação arbustiva (leve/densa)	0,40/0,80
Plantações rasteiras (normais)	0,13

Fonte: Ven Te Chow (1973) e Walesh (1989), apud Canholi (2005)

t_n → tempo de escoamento em canais: o escoamento da drenagem que tende, inicialmente, a concentrar-se, formando canais rasos, tem seu tempo de percurso calculado pela seguinte equação:

$$t_n = \frac{L_t}{3600 \cdot V_t} \quad (31)$$

onde L_t = comprimento do trecho de talvegue (m); V_t = velocidade média do escoamento no trecho (m/s), que é determinado de acordo com a Figura 02 .

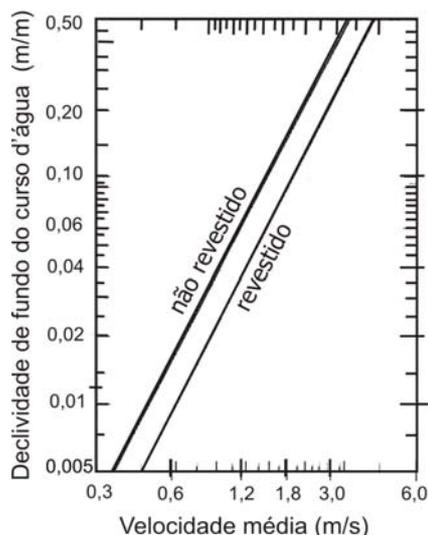


Figura 02: Estimativa da velocidade média em canais rasos.
Fonte: SCS (1986), apud Canholi (2005).

t_q → tempo de escoamento em canalizações: também utiliza coeficiente determinado por Manning. Considera o escoamento em canais naturais ou artificiais de acordo com a seguinte equação:

$$V = \frac{1}{n} \cdot i_l^{1/2} \cdot R_h^{2/3} \quad (32)$$

onde as características geométricas são obtidas através de projeto ou no campo, e V = velocidade média do escoamento (m/s); n = coeficiente de rugosidade de Manning ($s/m^{5/2}$), obtido através da Tabela 13; i_l = declividade longitudinal do fundo do canal (m/m) e R_h = raio hidráulico do canal (m).

Tabela 13: Valores de n para revestimento usuais de canais.

Revestimento do canal	Faixa de profundidade		
	0 – 0,15	0,15 – 0,60	> 0,60
Concreto liso	0,015	0,013	0,013
Concreto com juntas ou rugoso	0,018	0,017	0,017
Pedra argamassada	0,040	0,030	0,028
Solo cimento	0,025	0,022	0,020
Escavado em solo	0,045	0,035	0,025
Gabião	0,030	0,028	0,026
Gramma baixa	0,033	0,027	0,022
Gramma alta	0,035	0,033	0,030
cascalho	0,033	0,030	0,027

Fonte: Brown & Stein (1996) e Akan & Houghtalen (2003) apud Canholi (2005)..

Outros autores também definiram equações empíricas para a determinação do t_c . A Tabela 14 apresenta sumário de fórmulas para o cálculo do tempo de concentração e a fórmula

resumida para o Método Cinemático, o mesmo ilustrado anteriormente e apresentado por Canholi (2005).

Tabela 14: Sumário de fórmula para cálculo do tempo de concentração (t_c).

Método	Fórmulas para t_c (min)	Fonte
Dooge	$t_c = 21,88 \cdot A^{0,41} \cdot i^{-0,17}$ Unidades → A: km ² ; i: m/km	Porto, 1995; Porto, 2004.
DNOS	$t_c = \left(\frac{10}{K} \right) \cdot \frac{A^{0,3} \cdot L'^{0,2}}{i^{0,4}}$ Unidades → K: adm.; A: ha; L': m; i: %	DNIT, 2005.
<i>Federal Aviation Agency</i> (1970)	$t_c = 22,73 \cdot (1,1 - C) \cdot L^{0,5} \cdot i^{-0,333}$ Unidades → L: km; i: m/m	Porto, 1995; Porto, 2004; Genovez, 2001.
George Ribeiro	$t_c = \frac{16 \cdot L''}{(1,05 - 0,2 \cdot a_v) \cdot (100 \cdot i)^{0,04}}$ Unidades → L'': km; a_v : adm.; i: m/m	DNIT, 2005; Genovez, 2001.
Kirpich (1940)	$t_c = 3,989 \cdot L'^{0,77} \cdot i^{-0,385}$ Unidades → L'': km; i: m/km	Porto, 1995; Porto, 2004; Genovez, 2001.
Kirpich Modificada	$t_c = \left(1,42 \cdot \left(\frac{L'^3}{H_b} \right)^{0,385} \right) \cdot 60$ Unidades → L'': km; H_b : m	DNIT, 2005.
Método Cinemático	$t_c = \left(\frac{1000}{60} \right) \cdot \sum \frac{L'}{V_t}$ Unidades → V_t : m/s	Porto, 1995; Ramos, 1999; Porto, 2004; Genovez, 2001.
Método do Lag	$t_c = \left(16 \cdot Kn \left(\frac{L^{2,5}}{H^{0,5}} \right)^{0,33} \right) \cdot 60$ Unidades → L: km; H: m; Kn: adm.	DNIT, 2005.
Mockus	$t_c = \left(\frac{1,8 \cdot L'^{1,3} \cdot \left(\frac{1000}{CN - 9} \right)^{0,7}}{\sqrt{H_b}} \right) \cdot 60$ Unidades → L'': km; H_b : m	DNIT, 2005.
Pasini	$t_c = \left(\frac{0,107 \sqrt[3]{A \cdot L''}}{\sqrt{i}} \right) \cdot 60$ Unidades → A: km ² ; L'': km; i: m/m	DNIT, 2005.

Tabela 14 (continuação): Sumário de fórmula para cálculo do tempo de concentração (t_c).

Método	Fórmulas para t_c (min)	Fonte
SCS - Lag fórmula	$t_c = 3,42 \cdot L^{0,8} \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0,7} \cdot i^{-0,5}$ Unidades → L: km; i: m/m	Porto, 1995; Porto, 2004.
Ventura	$t_c = 0,127 \sqrt{\frac{A}{i}}$ Unidades → A: km ² ; i: m/m	DNIT, 2005.

Sendo:

- a_v = relação entre área coberta de vegetação e área total da bacia
 A = área de drenagem
 C = coeficiente de escoamento superficial do Método Racional
 CN = Número de Curva
 H = diferença de elevação entre montante e jusante do rio principal (m)
 H_b = diferença de elevação entre montante e jusante na bacia (m)
 i = declividade do talvegue → $i = H/L$
 2 (terreno argiloso, vegetação intensa, elevada absorção); = 3 (terreno comum, vegetação intensa/média, absorção média); = 4 (terreno argiloso, vegetação média/média, absorção média); = 4,5 (terreno argiloso, vegetação média, pouca absorção); = 5 (terreno com rocha, vegetação média/rala, baixa absorção); = 5,5 (terreno rochoso, vegetação rala, reduzida absorção).
 Kn = média dos coeficientes de Manning ao longo dos cursos d'água mais importantes da bacia
 L = comprimento do talvegue principal
 L' = comprimento de cada trecho (km)
 L'' = comprimento do curso d'água (km)
 V_t = velocidade média em cada um dos trechos (m/s) conforme Tabela 15.

Tabela 15: Velocidade média para cálculo do t_c , m/s, segundo método cinemático definido pelo SCS.

Descrição do escoamento	Declividade (%)			
	0 - 3	4 - 7	8 - 11	≥ 12
Em superfícies de:				
florestas	0 - 0,5	0,5 - 0,8	0,8 - 1,0	≥ 1,0
pastos	0 - 0,8	0,8 - 1,1	1,1 - 1,3	≥ 1,3
áreas cultivadas	0 - 0,9	0,9 - 1,4	1,4 - 1,7	≥ 1,7
pavimentos	0 - 2,6	2,6 - 4,0	4,0 - 5,2	≥ 5,2
Em canais:				
mal definidos	0 - 0,6	0,6 - 1,2	1,2 - 2,1	≥ 2,1
bem definidos	calcular pela fórmula de Manning			

Fonte: Porto (2004)

O DNIT (2005) apresentou análise comparativa dos t_c calculados através de procedimentos diversos e bastante difundidos para bacias com diferentes características físicas, no qual ratifica a dificuldade e a importância na escolha da fórmula a adotar. As diversas fórmulas estão diretamente relacionadas a parâmetros tais como comprimento e declividade do

talvegue, rugosidade da superfície e área de declividade da bacia, logo, foram desenvolvidas a partir de estudos experimentais específicos e, como a dispersão de seus resultados pode ser grande, devem ser utilizadas em condições semelhantes àquelas para os quais foram desenvolvidas.

Desenvolvida a partir de banco de dados do SCS de sete bacias rurais do Tennessee, região sudeste dos Estados Unidos, com canais e declividade bem definidos variando de 3 a 10% e áreas até 0,5km², DNIT (2005), Porto (2004;1995) e Genovez, (2001) apresentam a fórmula de Kirpich como uma das mais utilizadas. Embora o tipo de informação que necessite (A e L) seja uma indicação de que reflete o escoamento em canais, o fato de ter sido desenvolvida para bacias tão pequenas é um indício de que os parâmetros devem representar o escoamento superficial subestimando o valor de t_c quando $L > 10\text{km}$ (Porto, 1995). O DNIT ressalta que, em seus estudos, a fórmula apresentou velocidades próximas tanto para pequenas com para médias e grandes bacias, indicando assim sua aplicação para ambos os casos.

O Método “Lag formula”, assim como as demais metodologias do SCS, foi desenvolvido para bacias de até 8km², superestimando t_c quando comparados com Dooge e Kirpich (Porto, 1995), outras fórmulas, tais como a da *Federal Aviation Agency*, do Tempo de Retardamento-SCS e do Método Cinemático, são sugeridas pelo DNIT (2005) apenas para pequenas bacias. O Método Lag apresentou resultados representativos quando aplicadas a grandes bacias, maiores que 10 km² e o de Dooge para as com áreas entre 140 e 930km², já DNOS, Kirpich Modificada, George Ribeiro, Pasini e Ventura, são indicadas para ambos os casos (DNIT, 2005).

O DNIT (2005) ressalta que em seu estudo a fórmula de Mokus apresentou velocidades médias consideravelmente próximas para pequenas e grandes bacias, sendo seus valores os mais baixos quando comparados com as outras expressões analisadas, logo, considera ser esse o método menos recomendável para a avaliação do t_c .

Existem ainda uma série de fórmulas apresentadas por diversos autores, entretanto, devido ao estudo de caso apresentado em capítulo posterior, deu-se prioridade à explanação de métodos que considerassem diferentes características mas enfatizou-se os que correlacionam os efeitos da ocupação antrópica a nível temporal sobre t_c .

2.2.3.4 Vazões máximas de projeto

Tucci (2004) define vazão máxima de um rio como o valor que é associado a um risco de ser igualado ou ultrapassado. Esse valor é utilizado tanto na previsão de enchentes quanto nos projetos de medidas estruturais e não estruturais de controle de inundações, tais como canais, bueiros, zoneamentos e sistemas de previsão e alerta.

O risco ao qual esse trabalho explora é o da inundação, onde o extravasamento do canal traz danos à população. A enchente é determinada por Villela & Matos (1975) como um fenômeno de ocorrência de vazão relativamente grande e que, em bacias urbanas, normalmente, mas não necessariamente, causam inundações.

A previsão de enchentes atua sobre a extrapolação de dados históricos para condições mais críticas. A dificuldade na obtenção desses dados, muitas vezes, é fomentada pelo desinteresse econômico ao aproveitamento dos recursos hídricos em determinadas bacias, assim como pela carência de aparelhos registradores, como linígrafos e pluviógrafos (Genovez, 2001). No Brasil, por ser um país de grande superfície, de alto custo de uma rede hidrológica e que, frequentemente, encontra nas questões institucionais as maiores dificuldades na gestão das inundações, é comum a existência de reduzido número de postos em uma determinada região assim como séries de vazões observadas de curta duração.

Tanto séries históricas de vazão quando de precipitação são utilizadas para os cálculos de vazão máxima. A existência de poucos dados de vazão ou a ausência de quantitativo ideal levam os projetos a submeterem-se às incertezas de transformar dados de chuva em vazão (Genovez, 2001). A previsão da vazão com base na precipitação permite maior antecipação dos efeitos do evento, entretanto pode gerar maiores incertezas (Tucci, 2007).

A estimativa de inundação quando determinada com base em séries históricas de vazão devem considerar séries hidrológicas (Tucci, 2007):

- homogêneas: cuja média da vazão ou seu desvio padrão não se alterem ao longo do tempo;
- independentes: observando o ano hidrológico, que é o período entre o início do mês chuvoso e o final do mês seco. Em geral a cheia máxima de um ano não guarda dependência com a do ano seguinte;
- representativa para a avaliação do risco: poucos anos de dados muitas vezes não são necessariamente representativos do risco real de um local.

Genovez (2001) ressalta que a grande maioria dos hidrólogos considera que uma boa série de vazões deve conter, pelo menos, 30 anos de dados observados, entretanto esse é um quantitativo difícil de se obter no Brasil, principalmente para pequenas bacias, citando como exemplo o Estado de São Paulo, onde das 15 pequenas bacias rurais existente, com áreas inferiores a 400km², e que dispõem de medições de pluviógrafos e limnígrafos, nenhuma contempla 30 anos de dados de vazão.

Logo, dependendo da origem das séries históricas, se contempladas por dados de vazão ou precipitação, a vazão máxima poderá ser obtida conforme os três critérios descritos a seguir.

2.2.3.4.1 Vazão máxima de projeto com base no ajuste de distribuição estatística:

O ajuste de uma distribuição de probabilidade aos valores máximos da série de dados observados para a obtenção da vazão máxima a partir da distribuição estatística que melhor se adequa pode ser feito quando os dados disponíveis contemplam uma boa série de dados de vazão e as condições da bacia hidrográfica não se modificaram (Genovez, 2001; Tucci, 2004).

Tucci (2004) considera que as séries amostrais de vazão podem ser anuais ou parciais. Essas utilizam os valores máximos escolhidos a partir de uma determinada vazão selecionada, excluindo vazões pequenas. Já as anuais consideram as vazões máximas ocorridas em cada ano, desprezando os valores máximos ocorridos dentro do ano. Em sua publicação o autor descreve critérios e metodologia para a seleção das séries assim como para os ajustes de distribuição estatística, para o qual, corroborando com Genovez (2001), destaca que as distribuições probabilísticas mais usadas são as de Gumbel, empírica, Log Normal e Log Pearson III.

Genovez (2001) acrescenta ainda que, no caso das séries de vazão não apresentarem um quantitativo suficiente de dados, mas havendo alguns dados de vazão, pode-se calibrar um modelo chuva-vazão para enchentes, sem a peculiaridade da calibração do modelo para o ano todo. Para o caso de pequenas bacias o autor sugere a utilização de modelos tais como IPH-II (Tucci, 2005), SMAP (Tucci, 2007) e ABC (Porto, 1990, apud Genovez, 2001).

2.2.3.4.2 Vazão máxima de projeto com base na regionalização de vazões:

O método da regionalização de vazões é utilizado quando há carência de dados ou a série histórica é reduzida (Tucci, 2002; Tucci, 2004; Genovez, 2001).

A obtenção de informações hidrológicas em locais sem dados ou com poucos dados, através da transferência de informações de um local para outro, sendo uma áreas com

comportamento hidrológico semelhante, de acordo com Tucci (2002), traz um benefício adicional que é o de permitir o aprimoramento da rede coletora, à medida que a metodologia explora melhor as informações disponíveis e identifica lacunas. Entretanto, o autor ressalta que, apesar de os estudos de regionalização hidrológica cada vez mais estarem sendo utilizados de forma generalizada, sem um maior questionamento da qualidade dos resultados, não substituem uma rede adequada de monitoramento hidrológico, considerando que, devido à variabilidade das escalas dos processos hidrológicos, esse não é um método seguro para a extrapolação de dados.

Tucci (2002) explica que a regionalização pode ser realizada através de uma variável, uma função ou um parâmetro. O primeiro critério identifica o comportamento de um processo específico, tal como a vazão instantânea da seção de um rio ou a precipitação em um ponto da bacia durante 24h. O segundo avalia a relação entre uma variável hidrológica e outras variáveis explicativas ou estatísticas, como as curvas de permanência e a de probabilidade de vazão mínima. Já o terceiro critério, a determinação de parâmetros, considera características do sistema hídrico, como, por exemplo, o CN do modelo *Soil Conservation Service* e o tempo de concentração.

A Figura 03 apresenta um exemplo de fluxograma para a estimativa de vazão para o qual, em função do tamanho da série disponível de dados da área onde se deseja calcular a vazão máxima, são apresentadas diferentes entradas de dados.

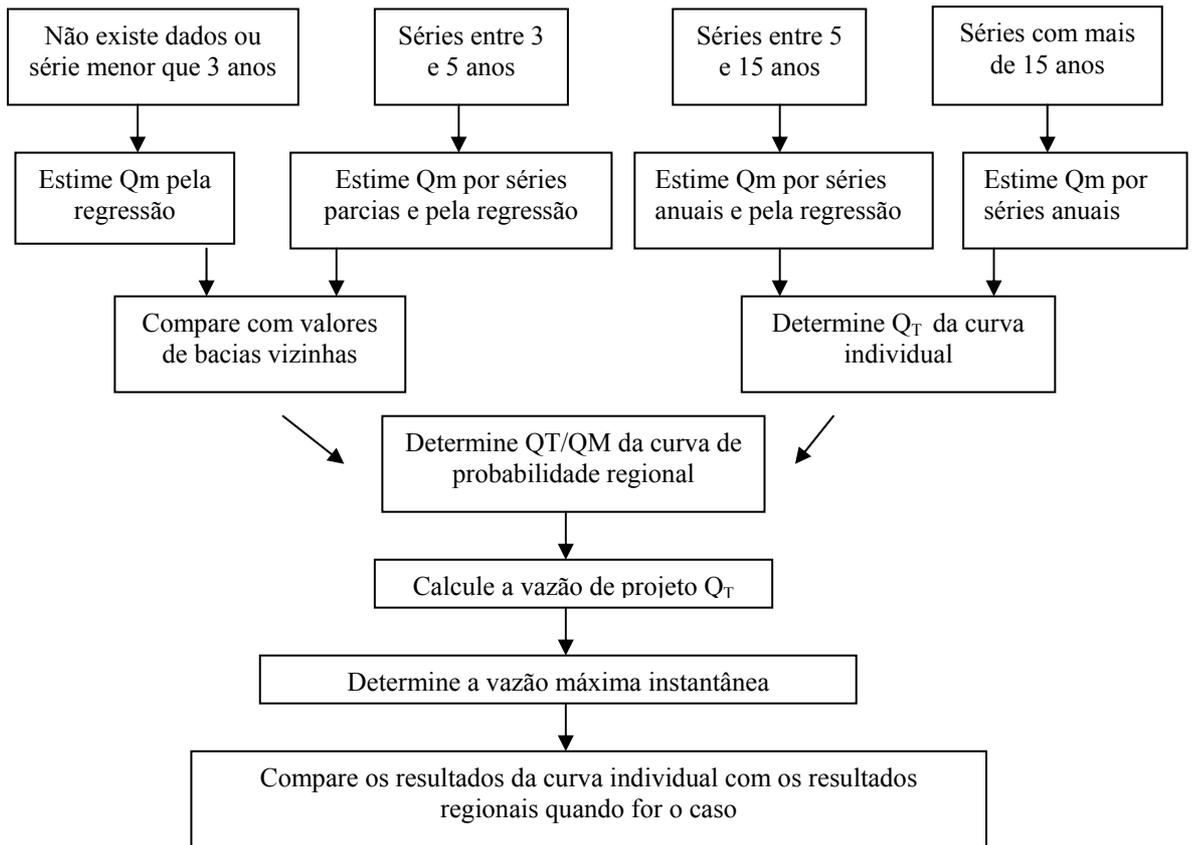


Figura 03: Fluxograma para estimativa de vazão máxima regional.

Fonte: Tucci et al (1991), apud Tucci (2007).

2.2.3.4.3 Vazão máxima de projeto com base na precipitação excedente:

Perante as dificuldades na obtenção de representativas séries históricas de vazão, a utilização de métodos e fórmulas que adotem como base de dados séries de precipitação, levou ao desenvolvimento de várias técnicas e métodos que, devido à sua maior aplicabilidade nesse trabalho, serão melhor descritas do que as baseadas em séries de vazão.

A quantificação desse volume pode ser feita através de diversas metodologias, cujas mais utilizadas, segundo Genovez (2001), são:

- Método Racional: largamente utilizado na determinação da vazão máxima de projetos para pequenas bacias, representa os principais processos de transformação da precipitação em vazão, englobando-os em apenas um coeficiente;
- Método de I-Pai-Wu Modificado: baseado em dados de 21 pequenas bacias hidrográficas do Estado de Indiana, USA, permite a determinação da vazão máxima de enchente relacionando a forma dos hidrogramas e algumas características da bacia. Inicialmente denominado de I-Pai-Wu, o método recebeu

modificações propostas por Costa (1964) e Uehara (1989), apud Genovez (2001), passando a ser chamado de I-Pai-Wu Modificado e tornando-se mais utilizado.

- Método do Hidrograma Unitário Sintético de Snyder: obtido a partir de dados da região montanhosa dos Apalaches, EUA, leva à equação que determina um Hidrograma Unitário Sintético;
- Método do Hidrograma Unitário Sintético Triangular do *Soil Conservation Service*: com finalidade de se obter um hidrograma adimensional, tem como base a determinação da vazão de pico, do tempo de pico e do tempo de base, permitindo a determinação da vazão máxima de enchente e do hidrograma de projeto;
- Método de Ven Te Chow: utilizado para a determinação das vazões de pico de pequenas bacias rurais, para o qual adota ábacos das condições climáticas e fisiológicas baseados em dados referentes ao Estado de Illinois, EUA, possibilita a determinação da vazão máxima de enchente;
- Método do Hidrograma Unitário Sintético Regionalizado: utilizando também dados de vazão é obtido através dos Hidrogramas Unitários obtidos para várias bacias de uma região, relacionado seus parâmetros a características físicas ou climatológicas das bacias em estudo.

Outros métodos também podem ser citados, tais como os de Bernard, McCarthy, Clark, Taylor e Schwarz, Commons, Mitchell, Getty e McHughs, Dooge e Warnock. A literatura especializada detalha as etapas e condicionantes de cada processo citado. Entretanto, devido à aplicação ao estudo de caso desse trabalho, melhor delinaremos o Método do Hidrograma Unitário Sintético dando ênfase aos métodos Racional, Racional Modificado, de Snyder e do *Soil Conservation Service*.

2.2.3.4.3.1 Hidrograma Unitário Sintético (HUS):

Importante ferramenta na transformação de dados de chuva em vazão, convertendo um hietograma de chuva excedente em um hidrograma de projeto, o Hidrograma Unitário (HU) baseia-se na hipótese de que, se uma bacia ideal comporta-se como um reservatório linear, pode-se demonstrar que chuvas efetivas de intensidades constantes e mesmas durações, geram hidrogramas com tempo de pico e durações iguais (Canholi, 2005). O resultado de um HU é uma gráfico em forma de curva ao longo do tempo, das vazões causadas por um determinado hietograma de chuva, e a áreas abaixo dessa curva corresponde ao volume de escoamento

superficial direto, causado por uma chuva excedente sobre toda a área de drenagem (Cristelo, 2007).

O HU corresponde à hidrógrafa unitária, ou seja, baseando-se na hipótese de que uma bacia ideal comporta-se como um reservatório linear, adota que as chuvas efetivas de intensidade constante e mesmas durações geram hidrogramas com tempos de pico e durações iguais. De acordo com Villela & Matos (1975) o volume unitário de escoamento superficial normalmente adotado é 1cm de altura de água sobre toda a bacia, ou seja, com base no hidrograma para 1cm de chuva efetiva de determinada bacia, pode-se determinar, por proporção, os deflúvios para outros valores de precipitação excedente, desde que as chuvas tenham a mesma duração.

Dados de precipitação, vazão ou, até mesmo, fórmulas empíricas podem auxiliar na determinação do HU, quando são denominados de Hidrogramas Unitários Sintéticos (HUS). A dificuldade em estabelecer uma adequada relação chuva *versus* vazão tem levado a ciência da hidrologia urbana a enfatizar a abordagem do método por meio de fórmulas empíricas, não só porque os dados em áreas urbanas são escassos, mas, sobretudo, porque em geral deseja-se determinar o hidrograma para condições futuras de ocupação da bacia, levando aos denominados HUS (Ramos, 1999; Canholi, 2005).

Villela & Matos (1975) consideram três os princípios fundamentais que regem as relações entre chuva e deflúvio para chuvas de distribuição uniforme e intensidade constante:

- para chuvas de iguais durações, as durações dos escoamentos superficiais são iguais;
- duas chuvas de mesma duração, mas com volumes escoados diferentes resultam em hidrógrafas cujas ordenadas são proporcionais aos correspondentes volumes escoados;
- considera-se que as precipitações anteriores não influenciam a distribuição no tempo do escoamento superficial de uma dada chuva.

O HUS determina a vazão de pico a partir de parâmetros relacionados com características físicas da bacia e, geralmente, representa o hidrograma em forma triangular.

Para a elaboração do HUS, Pinto et al (1976), Porto (1995), Genovez (2001) e Tucci (2004) apresentam as metodologias de Snyder (1938), para bacias de 10 a 10.000m², e do *Soil Conservation Service* (SCS). Canholi (2005), além do SCS, apresenta métodos tais como:

- Método Racional: tradicionalmente aplicado no cálculo da vazão de pico em pequenas áreas urbanas, menores que 1,0km² e com tempo de concentração, usualmente, inferior a 20 minutos, pois considera a precipitação constante em todo o processo;
- Método do SCS: desenvolvido para $t_R = 0,2t_p$ ou $t_R = 0,133t_c$, sendo t_R = a duração da precipitação excedente (h); t_p = tempo de ocorrência de pico (h) e t_c = tempo de concentração (h). Em termos práticos alguns autores, como Akan (2003) e U.S Departamento of Interior – Bureau of Reclamation (1987), apud Canholi (2005), admitem a validade do Método para $t_R \leq 0,25t_p$ ou $t_R \leq 0,17t_c$;
- Método de Santa Bárbara (SBUH – Santa Barbara Urban Hydrograph): adota a parcela impermeável da bacia, assumindo-a diretamente conectada ao sistema de drenagem, e as perdas da precipitação nessas áreas são desprezadas.
- Convolução contínua: admite a convolução na forma de integral;
- Método de Snyder (Colorado Urban Hydrograph Procedure – CUHP): hidrograma estruturado com dados de estudo específico para a cidade de Denver, nos EUA.

A chuva unitária excedente a ser utilizada para a elaboração do HU estará diretamente relacionada a um determinado tempo, logo, as bacias não são caracterizadas por um único hidrograma unitário, mas terão tantos hidrogramas quanto forem as durações consideradas. Chow et all (1988) citam como exemplo que ao admitir uma chuva excedente de 10mm, com duração de 2 horas, distribuída uniformemente sobre determinada bacia, o HUS resultante do equacionamento desses dados produzirá um HU de duas horas de duração. O autor ressalta ainda que há diversos métodos, como o da superposição de hidrogramas de menor duração, a solução de um sistema de equações lineares ou o chamado “método da curva S”, que possibilitam que, a partir do HU de uma determinada duração, obtenha-se hidrogramas para quaisquer outras durações.

Conforme citado anteriormente, devido à sua aplicabilidade ao estudo de caso desenvolvido nesse trabalho, detalharemos o Método Racional, de Snyder e do *Soil Conservation Service*, conforme explicado a seguir.

a) Método Racional:

O Método Racional é um caso particular da teoria do HU que, baseado na área da bacia, na intensidade média de precipitação e no coeficiente de escoamento superficial, tem sido

largamente usado em projetos de drenagem urbana e em aeroportos (Genovez, 2001). Embora sujeito a várias críticas, tais como a inadequacidade do método (Chow et al, 1988), o agrupamento de vários parâmetros influentes em um só coeficiente (Genovez, 2001), as aproximações das respostas obtidas (CETESB, 1979) e o fornecimento de apenas um ponto do hidrograma de escoamento superficial direto, podendo direcionar a superdimensionamentos (Ramos, 1999), muitos autores são unânimes em ressaltar que, a nível de aceitação geral, nenhum outro método superou o Racional e que seus resultados, quando devidamente aplicado, são satisfatórios.

Outra convergência entre os diversos autores é a recomendação do método para pequenas bacias hidrográficas, entretanto a fixação desses valores varia bastante entre eles. Para Wilken (1978), apud Genovez (2001), a metodologia é aplicável a bacias menores que 5km², Ramos (1999) adota áreas com dimensões inferiores a 3km².

Tucci (2004) admite as inferiores a 2km² e CETESB (1979) e Canholi (2005) corroboram aplicando o método às inferiores a 1km². Pinto et al (1976) ressaltam que, como o método não considera o armazenamento de água na bacia e as variações da intensidade e do coeficiente de deflúvio durante o transcorrer do período de precipitação, a imprecisão do método acaba sendo maior quanto maior for a área da bacia hidrográfica. Todavia os autores convergem no conceito de que, ao considerarem a duração da precipitação intensa de projeto igual ao tempo de concentração, admitem que a bacia deva ser suficientemente pequena para que essa situação ocorra.

A forma do hidrograma, em geral, é dada por triângulo isósceles, cuja base equivale ao dobro do tempo de concentração, sendo a duração da precipitação adotada igual ao tempo de concentração (Canholi, 2005).

De acordo com Tucci (2004) o Método Racional adota como princípios básicos:

- considerar a duração de precipitação intensa de projeto igual ao tempo de concentração (t_c): para que essa situação ocorra a bacia deve ser pequena, pois a duração é inversamente proporcional à intensidade. Genovez (2001) ressalta que uma exceção seriam as bacias muito alongadas, onde a vazão máxima pode ocorrer sem que toda a área esteja contribuindo;
- a não avaliação do volume de cheia e a distribuição temporal das vazões.

Conforme a fórmula estabelecida por Kuichling (1889), citada em Canholi (2005):

$$Q_p = 0,278 C i A \quad (33)$$

onde Q_p = vazão de pico (m^3/s); C = coeficiente de escoamento superficial, de deflúvio ou de “runoff”; I = intensidade média da precipitação (mm/h) e A = área total da bacia de drenagem (km^2).

Para o desenvolvimento do método devem-se estimar os parâmetros conforme detalhado a seguir.

i) Intensidade média de precipitação (i):

Como o método Racional aceita a hipótese de que a vazão máxima será atingida quando toda a área da bacia estiver contribuindo ao mesmo tempo para a seção de saída da bacia em estudo, a intensidade a ser considerada é a máxima média observada num intervalo de tempo igual ao tempo de concentração da bacia (t_c) pra o período de retorno (T_R) adotado, admitindo que a duração da precipitação é igual ao tempo de concentração da bacia (Genovez, 2001; Tucci, 2004; Canholi, 2005).

A altura de chuva para uma dada duração é determinada com base na correlação entre intensidade, duração e frequência de um determinado evento delimitado por período de tempo, resultando em curvas denominadas de i-d-f. Pinto et al (1976) apresentam equações específicas para as cidades de Porto Alegre, Curitiba, São Paulo e Rio de Janeiro, cuja fórmula genérica é apresentada em Villela e Matos (1975), Genovez (2001), Juan e Tucci (2004) e DNIT (2005) da seguinte forma:

$$i = \frac{a.Tr^b}{(t_c + c)^d} \quad (34)$$

onde i = intensidade (mm/h); T_R = tempo de retorno (anos); t_c = tempo de concentração (minutos) e “a”, “b”, “c” e “d” parâmetros que devem ser determinados para cada local apresentados conforma Tabela 16. Nos locais onde esses coeficientes ainda não foram estabelecidos deve-se usar a equação conforme parâmetros definidos para o local mais próximo da área de estudo, sendo assim ressaltamos a equação determinada por Sarmento (1985) que, baseado em série história de 53 anos do município de Vitória, ES, utilizou o método estatístico de Ven Te Chow para estabelecer uma equação específica para a região:

$$i = \frac{973,47.Tr^{0,19}}{(t_c + 20)^{0,77}} \quad (35)$$

Tabela 16: Coeficientes da equação das curvas i-d-f para algumas cidades brasileiras.

Cidade	a	b	c	d	Observação	Fonte
Porto Alegre (Redenção)	1265	$0,88/T_R^{0,05}$	12	0,052	---	DMAE (1972) apud Juan e Tucci (2004)
Porto Alegre (IPH)	509,859	0,72	10	0,196	---	Goldenfum et al (1991) apud Juan e Tucci (2004)
Porto Alegre (Aeroporto)	748,342	0,803	10	0,191	---	Goldenfum et al (1991) apud Juan e Tucci (2004)
Porto Alegre (8º D. Met.)	2491,78	1,021	16	0,192	---	Goldenfum et al (1991) apud Juan e Tucci (2004)
Lage, SC.	170	0,465	0	---	$T_R=5$ anos; $t_c \leq 20$ min.	Ullmann (1979) apud Juan e Tucci (2004)
Curitiba, PR.	5950	1,15	26	0,217	---	Wilken (1978)
São Paulo, SP.	29,13	0,89	15	0,181	em mm/min.	Wilken (1978)
São Paulo, SP.	27,96	$0,86 \cdot T_R^{-0,0144}$	15	0,112	$t_c \leq 60$ min.	Wilken (1978)
	42,23	0,82	---	0,15	$t_c > 60$ min.	Wilken (1978)
Rio de Janeiro, RJ.	1239	0,74	20	0,15	---	Wilken (1978)

ii) Coeficiente de escoamento superficial (C):

Definido com a relação entre o volume total precipitado e o volume total escoado superficialmente, o C é um índice variável e que compacta em um só valor características da chuva, da precipitação antecedente, da umidade do solo no início da precipitação, do tipo do solo, da ocupação da terra, da rede de drenagem, do efeito do armazenamento e da retenção superficial (Genovez, 2001).

Ramos (1999), corroborando com Genovez (2001), ressaltam que a determinação do C deve ser feita sob os seguintes cuidados:

- deve ser determinado para as condições futuras de urbanização da bacia
- se a ocupação da bacia for muito heterogênea deve-se calculá-lo usando a média ponderada da seguinte forma:

$$C = \frac{1}{A} \sum C_i A_i \quad (36)$$

onde C = coeficiente médio de escoamento superficial; A = áreas de drenagem da bacia (km²); C_i = coeficiente de escoamento superficial correspondente à ocupação “i” e A_i = área da bacia correspondente à ocupação “i”.

- o efeito da intensidade da chuva sobre C deve ser levado em conta por meio da correção feita em função do período de retorno, quando este excede aos representados nas tabelas. Para períodos de retorno extrapolados a correção é feita seguindo a seguinte equação:

$$C_t = 0,8 T_R^{0,1} C_{10} \quad (37)$$

onde C_t = coeficiente de escoamento superficial para período de retorno “t”; T_R = período de retorno (anos) e C_{10} = coeficiente de escoamento superficial para período de retorno de 10 anos.

Vários autores, tais como Chow et al (1988), ASCE (1969), apud Tucci (2004), CETESB (1979) e Wilken (1978), determinaram valores para C. Entretanto, neste trabalho são apresentados os de Mays (2001), apud Canholi (2005), conforme Tabela 17.

Alguns autores adotam para o Método Racional uma versão “modificada”, na qual introduzem coeficientes de abatimento e fatores de distribuição para compensar a variabilidade espacial da precipitação, de modo a estender o quanto possível este método a bacias hidrográficas de áreas superiores às estipuladas em sua forma original.

Para bacias com áreas entre 0,50 km² e 1,0 km², o DER/SP, citado por Franco (2004), propõe o Método Racional “modificado”, cuja vazão de pico obtém-se multiplicando a expressão original por um fator de ajuste, ou seja, $f = A^{-0,10}$, sendo “f” fator de ajuste e “A” a área da bacia em hectares. De acordo com o autor, a Prefeitura de Porto Alegre/ RS, adota um modelo semelhante, usando na fórmula do Método Racional um coeficiente de abatimento embutido na área da bacia. Onde $A^{0,95}$ para áreas de 30 a 50 ha e $A^{0,90}$ para áreas de 50 até 150 ha.

Pinto et al (1976) introduziram na equação do Método Racional um coeficiente de retardo que procura corrigir o fato do escoamento superficial sofrer um retardo em relação ao início da chuva, procurando uma compensação para esse efeito, que não é considerado pelo método original e possibilitando sua aplicabilidade para bacias maiores, segundo a seguinte expressão:

$$Q_p = \frac{C \cdot i \cdot A}{3,6} \varphi_r \quad , \quad (38)$$

em que φ_r é o coeficiente de retardamento, adimensional, em relação ao início da chuva, que varia de zero a 1 e pode ser expresso de duas maneiras:

$$\varphi_r = \frac{1}{\sqrt[n]{100 \cdot A}} \quad , \quad (39)$$

onde n é igual a 4 para bacias com declividade inferior a 5/1000; igual a 5 para bacias com declividade até 1/100 e igual a 6 para declividades fortes, maiores que 1/100 ou

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt[n]{100 \cdot L}} \quad , \quad (40)$$

onde L é o comprimento da bacia em km, sendo n igual a 3,5 para declividades fortes, a 3,0 para declividades médias e a 2,5 para declividades fracas.

Tabela 17: Coeficiente de deflúvio (escoamento) superficial (C).

Uso do solo	Período de retorno (anos)			
	2 - 10	25	50	100
Sistema viário				
Vias pavimentadas	0,75 - 0,85	0,83 - 0,94	0,90 - 0,95	0,94 - 0,95
Vias não pavimentadas	0,60 - 0,70	0,66 - 0,77	0,72 - 0,84	0,75 - 0,88
Áreas industriais				
Pesadas	0,70 - 0,80	0,77 - 0,88	0,84 - 0,95	0,88 - 0,95
Leves	0,60 - 0,70	0,66 - 0,77	0,72 - 0,84	0,75 - 0,88
Áreas Comerciais				
Centrais	0,75 - 0,85	0,83 - 0,94	0,90 - 0,95	0,94 - 0,95
Periféricas	0,55 - 0,65	0,61 - 0,72	0,66 - 0,78	0,69 - 0,81
Áreas Residenciais				
Gramados planos	0,10 - 0,25	0,11 - 0,28	0,12 - 0,30	0,13 - 0,31
Gramados íngremes	0,25 - 0,40	0,28 - 0,44	0,30 - 0,48	0,31 - 0,50
Condomínios com lotes >300m ²	0,30 - 0,04	0,33 - 0,44	0,36 - 0,48	0,31 - 0,50
Residências unifamiliares	0,45 - 0,55	0,50 - 0,61	0,54 - 0,66	0,26 - 0,69
Uso misto denso	0,50 - 0,60	0,55 - 0,66	0,60 - 0,72	0,63 - 0,75
Prédios/conjunto de apartamentos	0,60 - 0,70	0,66 - 0,77	0,72 - 0,84	0,75 - 0,88
Playground/praças	0,40 - 0,50	0,44 - 0,55	0,48 - 0,60	0,50 - 0,63
Áreas rurais				
Áreas agrícolas	0,10 - 0,20	0,11 - 0,22	0,12 - 0,24	0,13 - 0,25
Solo exposto	0,20 - 0,30	0,22 - 0,33	0,24 - 0,36	0,25 - 0,38
Terrenos montanhosos	0,60 - 0,80	0,66 - 0,88	0,72 - 0,95	0,75 - 0,95
Telhados	0,80 - 0,90	0,90	0,90	0,90

Fonte: Mays (2001), apud Canholi (2005)

Nos estudos de Euclides e Piccolo (1987), apud Pruski et al (2004), foi ajustada uma equação com coeficiente de correlação igual a 0,70 que permitisse estimar o valor de φ_r de acordo com a área da bacia:

$$\varphi_r = 0,278 - 0,00034 \cdot A \quad (41)$$

em que A é a área da bacia, em km². Através da aplicação da equação, os autores obtiveram valores de coeficiente de retardamento em relação ao início da chuva, válidos para áreas de 10 km² a 150 km².

b) Método do Soil Conservation Service:

Baseado na análise de grande número de hidrogramas unitários naturais de bacias das mais variadas extensões e localizações no território norte americano, o SCS apresentou um

método para hidrograma unitário sintético que tem como resultado um hidrograma em forma triangular e adimensional cuja área do triângulo corresponde ao volume precipitado.

Autores como Wilken (1978), McCuen (1982 e Genovez (2001), corroboram em determinar a aplicabilidade do método para bacias cuja vazão máxima é formada principalmente pelo escoamento superficial direto em forma de chuva, recomendando-o para bacias com áreas menores do que 2600km². Contradizendo à menção anterior, Ramos (1999) considera o método pouco flexível no que tange às constantes de atenuação de picos, por isso sugere que a aplicação da metodologia para bacias com áreas entre 3 e 250 km².

O HUS estabelecido pelo SCS dá-se conforme a Figura 04, na qual t_p representa o tempo de pico, que é o tempo decorrido desde o início do escoamento superficial ao pico do hidrograma; o tempo de recessão (t'_r) representa simula o tempo do pico do hidrograma ao retorno das condições anteriores`a precipitação e Q_p é a intensidade do pico em m³/s. A figura representa um hidrograma causado por um bloco único de chuva excedente, com duração “D” e intensidade constante durante essa duração, cujo tempo de base (t_b) simula a duração total do escoamento superficial direto, todos esses tempos são determinado em horas e a área do triângulo formado corresponde ao volume precipitado (Q).

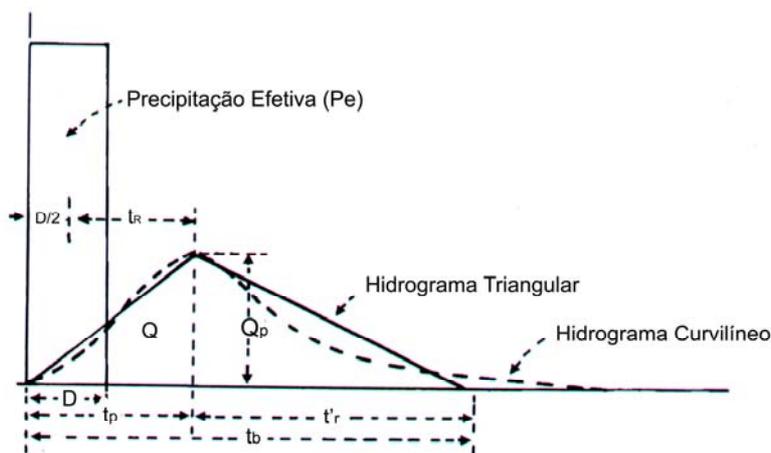


Figura 04: Hidrograma Unitário Curvilíneo e Triangular do SCS.

Fonte: Genovez, 2001, apud USBR, 1977.

Ramos (1999) adverte a importância da análise do parâmetro tempo sob a condição de t_p , pois, representando o tempo do centro de massa da chuva ao local de descarga, sintetiza os efeitos das características físicas da bacia sobre o hidrograma de chuva excedente. Quando o t_c é calculado pelo método cinemático, o SCS propõe as seguintes relações (Genovez, 2001):

$$t_p = \frac{D}{2} + (0,6 \cdot t_c) \quad (42)$$

$$t_b = 2,67 \cdot t_p \quad (43)$$

$$Q_p = \frac{2,08 \cdot A \cdot P_E}{\left(\frac{D}{2}\right) + 0,6 \cdot t_c} \quad (44)$$

onde todos os tempos são aplicados em horas; Q_p em m^3/s ; A em km^2 e P_E em cm .

No gráfico do hidrograma, o tempo de retardamento (t_R), em horas, representa o período do ponto médio da precipitação ao pico do hidrograma e é obtido pela equação:

$$t_R = 0,6 \cdot t_c \quad (45)$$

Considerando a duração da precipitação excedente (D), Canholi (2005) ressalta que o método foi desenvolvido para $D = 0,2t_p$ ou $D = 0,133t_c$, sendo esta a equação que, segundo Genovez (2001), é a que vem sendo mais usada e recomendada por ter sido especificamente desenvolvida para o método do HU do SCS. Em termos práticos alguns autores, como Akan (2003) e U.S Departamento of Interior – Bureau of Reclamation (1987), apud Canholi (2005), admitem a validade do Método para $D \leq 0,25t_p$ ou $D \leq 0,17t_c$.

Em bacias com até $8km^2$, o SCS sugere que t_R , em horas, seja calculado pela expressão (Tucci, 2004):

$$t_R = \frac{2,6 \cdot L^{0,8} \left(\left(\frac{S}{25,4} \right) + 1 \right)^{0,7}}{1900 \cdot i^{0,5}} \quad (46)$$

onde, L = comprimento do curso d'água, m ; S é obtido pela equação (21) e i = declividade, em porcentagem. Devido a alterações da cobertura da bacia, decorrentes do processo de urbanização, cujo efeito recai diretamente sobre o t_R , o SCS apresenta dois fatores de correção F_1 e F_2 que, correlacionados à porcentagem de área impermeabilizada ou ao comprimento do talvegue modificado, devem ser aplicados à expressão anterior sob valores futuros de CN , conforme a relação (McCuen, 1982; Ramos, 1999; Tucci, 2004):

$$FA = 1 - PRCI \cdot (-6789 + 335 \cdot CN - 0,4298 \cdot CN^2 - 0,0218 \cdot CN^3) \cdot 10^{-6} \quad (47)$$

onde FA = fator de ajuste a ser aplicado a t_R calculado conforme equação (41); $PRCI$ = porcentagem do comprimento do talvegue modificado ou da bacia tornada impermeável.

As alterações da cobertura da bacia, decorrentes do processo de urbanização, cujo efeito recai diretamente sobre o t_c , devem ser ajustados conforme fatores F_1 e F_2 descritos em item anterior.

c) Método de Snyder:

O Método de Snyder, também denominado de *Colorado Urban Hydrograph Procedure* (CUHP), é indicado para bacias maiores que 1km² e em locais onde inexistem dados chuva-deflúvio (CETESB, 1979).

Reeditado em 1992 pelo Distrito de Drenagem Urbana de Denver, no Colorado (Porto, 1995), Pinto et al (1976) relatam que os estudos de Snyder datam de 1938, nos quais, baseando-se em observações de rios na região montanhosa dos Apalaches, E.U.A, estabeleceu equações que, vinculadas a coeficientes adimensionais relacionados à capacidade de armazenamento (C_p) e porcentagem de impermeabilização da bacia (C_t), fornecem a base do hidrograma, ou seja, t_R , Q_p e t_b . CETESB (1979), Genovez (2001) e Canholi (2005) descrevem o método sob a seguinte equação:

$$t_p = 0,752 \cdot C_t \cdot (L \cdot L_{CG})^{0,3} \quad (48)$$

onde t_p em horas; L em km; L_{CG} = distância da seção principal ao ponto do rio mais próximo do centro de gravidade da bacia (km) e C_t = coeficiente adimensional.

Os coeficientes adimensionais C_t e C_p estipulados por Snyder estão correlacionados à porcentagem de impermeabilização da bacia e à sua capacidade de armazenamento, respectivamente. Tucci (2004) apresenta os valores tradicionais determinados por Snyder para a região dos Apalaches, determinando C_t , que tem influência sobre o tempo de pico e depende das outras características físicas específicas da bacia, com variação entre 1,35 e 1,65 e C_p , correlacionado com a vazão máxima, variando entre 0,56 e 0,69. Genovez (2001) sugere os valores indicados em tabela específica assim como as equações determinadas por Köpp e Paiva (1993), conforme as seguintes expressões:

$$C_t = 0,00005126 \cdot P^{7,891} \cdot L_{CG}^{0,362} \cdot A^{-1,887} \cdot L^{4,236} \cdot i^{0,0951} \quad (49)$$

$$C_p = 1642,4373 \cdot L^{6,889} \cdot A^{-0,4} \cdot L_{CG}^{-1,765} \cdot P^{3,396} \quad (50)$$

onde C_t e C_p são coeficientes adimensionais; P, L e L_{CG} em km; A em km² e i em m/m. Porto (1995) indica os gráficos determinados pelo CUHP, onde a Figura 05 fornece diretamente o valor de C_t , enquanto a Figura 06 fornece o fator de pico (F_p), que deve ser utilizado na Equação (51) para o cálculo de C_p .

$$C_p = 0,867 \cdot F_p \cdot C_t \cdot A^{0,15} \quad (51)$$

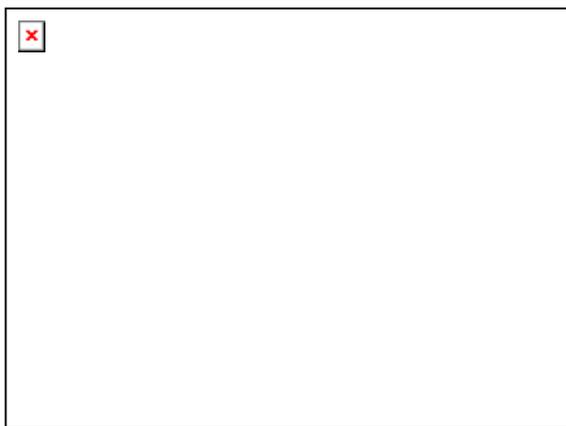


Figura 05: Determinação de C_1 indicada para o HUS de Snyder pelo CUHP.
Fonte: Porto, 1995.

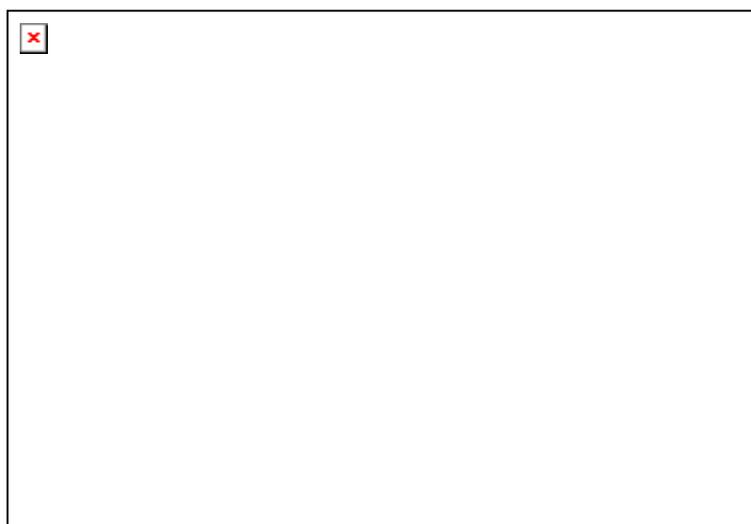


Figura 06: Determinação do fator de pico (F_p) para o HUS de Snyder pelo CUHP.
Fonte: Porto, 1995.

O tempo de duração da precipitação da precipitação que provoca o hidrograma, em horas, é calculado por:

$$D = \frac{t_p}{5,5}, \text{ e} \quad (52)$$

a vazão de pico (Q_p), em m^3/s , e o tempo base (t_b), em dias, para uma precipitação de duração D , em horas, e chuva de 1 cm de altura, são dados, respectivamente, através de:

$$Q_p = 2,76 \cdot \left(\frac{C_p \cdot A}{t_p} \right) \quad (53)$$

$$t_b = 3 + \left(\frac{t_p}{8} \right) \quad (54)$$

Observa-se em Pinto et al (1995), Genovez (2001) e Tucci (2004) que quando é necessário considerar valores de duração de precipitação D' , superiores a D , dado pela Equação 52, o valor de t_p da Equação 48 deve ser substituído por t'_p , dado por:

$$t'_p = t_p + \left(\frac{D' - D}{4} \right) \quad (55)$$

Sokolov et al (1975), apud Tucci (2004), determinaram curvas para as larguras de 75% e 50% da vazão de pico (Q_p) que, conferindo forma mais realista ao hidrograma, são representados conforme os seguintes parâmetros:

$$W_{75} = \frac{3,352}{\left(\frac{Q_p}{A} \right)^{1,08}} \quad (56)$$

$$W_{50} = \frac{5,87}{\left(\frac{Q_p}{A} \right)^{1,08}} \quad (57)$$

e representados de acordo com a Figura 07, sendo Q_p em m^3/s e W_{50} e W_{75} em horas. Para definir ainda mais a forma do hidrograma CHUP propõe que 35% da largura de W_{50} fique à esquerda do instante de ocorrência do pico, e 65% à direita. Para a largura W_{75} esses valores são respectivamente 45 % e 55%.



Figura 07: HU sintético de Snyder.

Fonte: Tucci, 2004.

2.3 Sistemas de Informações Geográficas aplicado à gestão de uso e ocupação do solo

Tendo a qualidade e a quantidade de recursos hídricos de uma bacia como reflexos do uso e ocupação do solo, a crescente importância do manejo adequado das águas urbanas tem proporcionado o desenvolvimento de modelos que representam as conseqüências dos processos físicos dessa ocupação. Sob o ponto de vista da gestão da bacia hidrográfica, toda ação de planejamento visando o ordenamento territorial, e em conseqüência, a atenuação ou eliminação

de impactos decorrentes das alterações no uso do solo, deve ser precedida de diagnósticos e monitoramentos que embasem e otimizem os processos de tomada de decisão.

As exigências quanto ao planejamento espacial, proteção e monitoramento do meio ambiente aumentam concomitantemente aos conflitos de uso da terra, tornando obsoletas as técnicas de imageamento convencionais. Nesse contexto, os *Geographic Information Systems* (GIS), ou Sistemas de Informações Geográficas (SIG), apresentam-se como tecnologia detentora do ferramental necessário à realização de análises, tendo como base dados espaciais georreferenciados, que compõem o universo da geotecnologia (Santos, 2007).

A extensão territorial de uma área objeto de estudo pode tornar inviável um mapeamento preciso e atualizado com a utilização de métodos convencionais, de aerofotogrametria, topografia e cartografia, para a manipulação de dados. No Brasil, país com grande carência de dados e informações catalogadas, a dimensão continental dificulta a tomada de decisões relativas às questões urbanas, rurais e ambientais, tornando as ferramentas de geoprocessamento em potencial suporte à gestão do uso e ocupação do solo (Campana & Eid, 2001).

O SIG, que processam dados gráficos e não gráficos (alfanuméricos) com ênfase em análises espaciais e modelagens de superfícies, além de produzir mapas mais rapidamente, barateia o custo da produção, facilita a utilização dos mapas, que passam a ser produzidos de maneira mais elaborada, possibilita a automação da atualização e revisão, além da análise quantitativa de dados espaciais, conforme esquematizado na Figura 8.

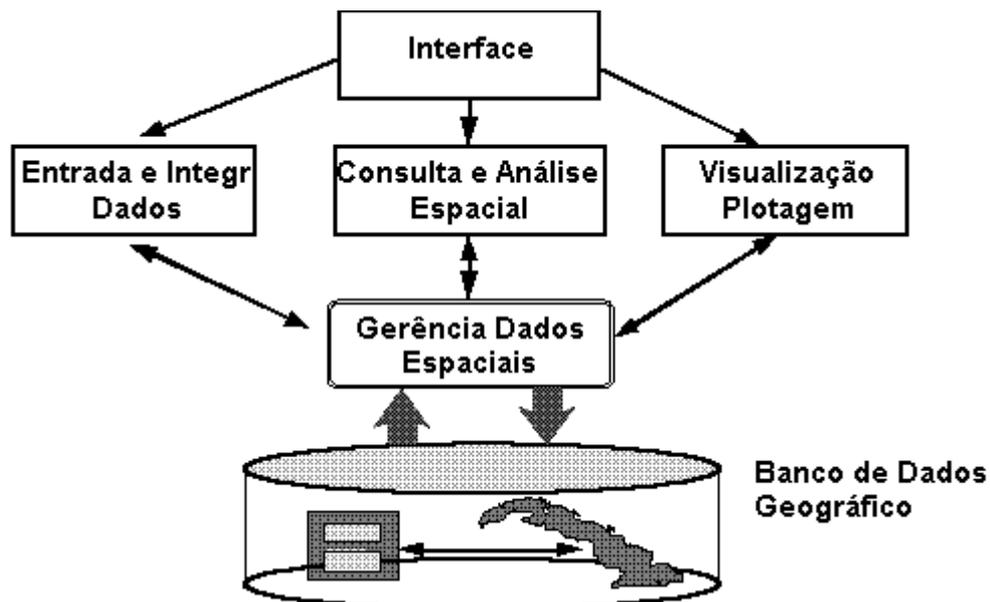


Figura 8: Arquitetura de um Sistema de Informações Geográficas.

Fonte: <http://www.dpi.inpe.br>. Acesso em 30 jun. 2008

É crescente o número de estudiosos que vêm aplicando essas tecnologias em estudos de impactos ambientais relacionando recursos hídricos e uso do solo. Sheng et al (1997) propõem o uso de SIG na classificação e avaliação de bacias hidrográficas em países em desenvolvimento e destacam a importância de ferramentas como o Modelo Digital do Terreno (MDT) na obtenção de parâmetros como borda da bacia, elevações e características das encostas e em combinação com outros fatores, como mapa geológico e de solo, para derivar cartas interpretativas.

Collares (2000) avaliou a significância de alterações ocorridas nas microbacias que compõem a bacia do rio Capivari-SP, com base em variáveis morfométricas de suas redes de drenagem, agrupando-as conforme o nível de alteração a que estiveram submetidas num período de 23 anos, digitalizou, georreferenciou e transformou as redes de drenagem dentro de um ambiente de SIG.

Com base no estudo hidrológico probabilístico e no método de Steves para a determinação de níveis d'água, Ahnert (2000) utilizou o SIG para a estimativa e determinação de áreas onde deveria haver restrição de uso do solo devido às inundações. Através de funções de interpolação, digitalização, inspeção visual e análise quantitativa, o autor elaborou cartas temáticas cuja sobreposição auxiliou na representação de áreas alagáveis em função de cotas de inundação, identificando os conflitos entre a ocupação humana e inundações associadas à determinados períodos de retorno.

Ribeiro (2002) utilizou SIG para a caracterização conjunta de atributos de terreno, da rede de drenagem e dos processos de ocupação antrópica para três sub-bacias hidrográficas que compreendem o município de Monte Mor (SP) e integram a porção média da bacia do Rio Capivari. A análise possibilitou ao autor concluir que houve diminuição do número de canais de primeira ordem e no comprimento total dos canais, mudanças que condicionaram modificações dos parâmetros de densidade de drenagem e de densidade hidrográfica em função da expansão urbana e do intensivo cultivo da cana-de-açúcar, estando também relacionados às diferentes classes de declividade e aos diversos tipos de relevo, de substrato rochoso e de material inconsolidado.

Elesbon (2004) empregou o SIG na delimitação e obtenção das características físicas e hidrológicas de sub-bacias para a automatização de parte do processo de regionalização de vazões, obtendo como principais resultados a agilidade na obtenção de variáveis físicas tais como D_d , L , A e i_p , assim como maior fidelidade aos dados de chuva, pelo uso do método das

isoietas, em comparação com o método de Thiessen e modelos e equações de regionalização mais representativos.

Freitas et al (2006) analisaram a evolução temporal e espacial da taxa de urbanização da cidade de Curitiba, através da determinação do coeficiente de permeabilidade do solo e de taxas de ocupação, obtidas através de imagens LANSAT 5, LANSAT 7-ETM+ e CBERS, com base no método do SCS-CN, obtendo dados que subsidiaram estudos de hidrologia urbana e quantificação de áreas impermeabilizadas.

Patil et al (2007) associaram o método do SCS-CN às técnicas de SIG para automatizar o processo de predição do escoamento superficial de bacias na Índia, região de grande indisponibilidade de estações hidrológicas que possuam séries históricas úteis à calibração de modelos. O SIG foi utilizado usando macros aplicativos da programação *Visual Basic for Applications* (VBA), no qual adota a metodologia tradicional do SCS para a estimativa do escoamento superficial através do CN e três de suas derivações, que levam em consideração diferentes condições de abstração inicial, propostas por Mishra e Singh (2003).

A extensa e interdisciplinar aplicação das ferramentas de SIG deve-se à agilidade na manipulação e análise de dados que, medidos, comparados e modelados matematicamente ou estatisticamente os diferentes temas, geram informações geográficas úteis que predizem a condição de um ou mais aspectos do ambiente. A maioria dos SIG inclui funções cartométricas básicas, como obter comprimento de linha, área da superfície e cálculo de declividade, assim como técnicas de análise de mapas, como a habilidade para sobrepor digitalmente vários conjunto de dados e extrair áreas que compartilham características comuns, como uso, solo e declividade (Santos, 2007)

CAPÍTULO 03 – MATERIAIS E MÉTODOS

Com base nos objetivos estabelecidos, o método que balizou essa pesquisa buscou, na Revisão Bibliográfica, levantamento de aparatos legais, institucionais e científicos que permitisse maior compreensão da correlação entre as ações de ordenamento territorial e as inundações urbanas, conforme estudo de caso descrito a seguir.

3.1 Área de estudo

Ao adotar com um de seus objetivos específicos a análise temporal de alterações ocorridas devido à interferência antrópica numa determina bacia, partiu-se da premissa de que a área escolhida para a aplicação do estudo de caso deveria ser uma bacia representativa, cuja disponibilidade de dados permitisse que o escopo de estudo fosse aplicado. Logo, a área deveria ser uma região delimitada por bacia hidrográfica específica, passível de expansão urbana, cuja interferência antrópica no meio ambiente fosse ordenada por instrumentos legais, tanto de gerenciamento de uso e ocupação do solo como de instrumentos que contenham diretrizes que visem a adequada circulação da água na superfície do solo, tais como o PDU e o PDDrU, respectivamente. Considerando estes aspectos, foi escolhida a sub-bacia do Córrego dos Monos, afluente do Rio Itapemirim, no Município de Cachoeiro de Itapemirim, ao sul do Estado do Espírito Santo, ilustrada na Figura 9, cujas características físicas são apresentadas na Tabela 18.

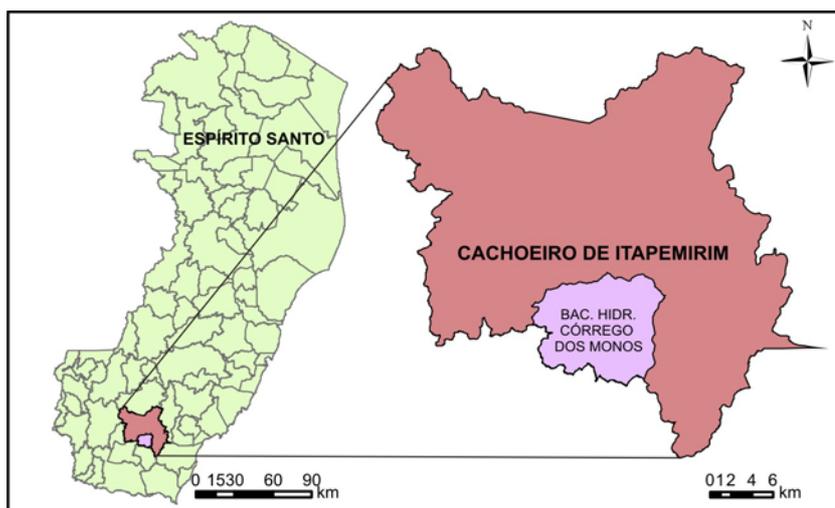


Figura 9: Localização geográfica da bacia do Córrego dos Monos no Estado do Espírito Santo.

Tabela 18: Características físicas das áreas de estudo.

Característica	Abrev.	Unid.	BCM	SB01	SB02	SB3
Área	A	km ²	95,45	18,32	20,99	6,24
Eixo longitudinal	L	km	20,51	10,00	10,48	7,11
Perímetro	P	km	47,24	21,68	23,02	14,25
Largura média (A/L)	L _m	km	4,65	1,83	2,00	0,88
Relevo máximo	H _m	m	340	250	270	120
Comprimento Vetorial	L _{vet}	m	16173,12	6679,90	7837,46	5596,17
Comprimento total da rede de drenagem	L _t	km	201,33	37,96	42,11	12,60
Número total de canais	N _t	unid.	344	86	74	23
Comprimento total dos canais por ordem de ramificação (L_i)						
1 ^a ordem	---	m	109,86	19,44	17,38	5,61
2 ^a ordem	---	m	50,70	10,17	14,43	1,80
3 ^a ordem	---	m	19,50	2,47	6,815	5,18
4 ^a ordem	---	m	15,51	5,86	3,44	----
5 ^a ordem	---	m	5,73	----	0,04	----

A representatividade da bacia para o estudo de caso pauta-se, principalmente, nas condições de uso e ocupação do solo atuais e na previsão da ampliação da percentagem de área urbanizada, atualmente em 18,56%, conforme PDU.

Com 95,45 km² de área de drenagem e situada entre as latitudes 20° 53' 00'' e 27° 75' 00'' Sul e longitudes 41° 12' 00'' e 76° 98' 00'' Oeste, a bacia do Córrego dos Monos é formada por afloramentos rochosos ao longo do rio, principalmente em pontos elevados, e por solo de caráter argiloso com acúmulo de ferro e silte, como o brunizem avermelhado, terra roxa e o podzólico vermelho, favorecendo à erosão nas áreas onduladas e montanhosas.

De acordo com os procedimentos descritos no item 3.1.1, as áreas de estudo, compreendendo a bacia do Córrego dos Monos e três sub-bacias inscritas no perímetro do Córrego, configuram-se conforme Figuras 10 e 11, são convencionadas como: BCM (Bacia do Córrego dos Monos), SB01 (Sub-bacia 01), SB02 (Sub-bacia 02) e SB03 (Sub-bacia 03).

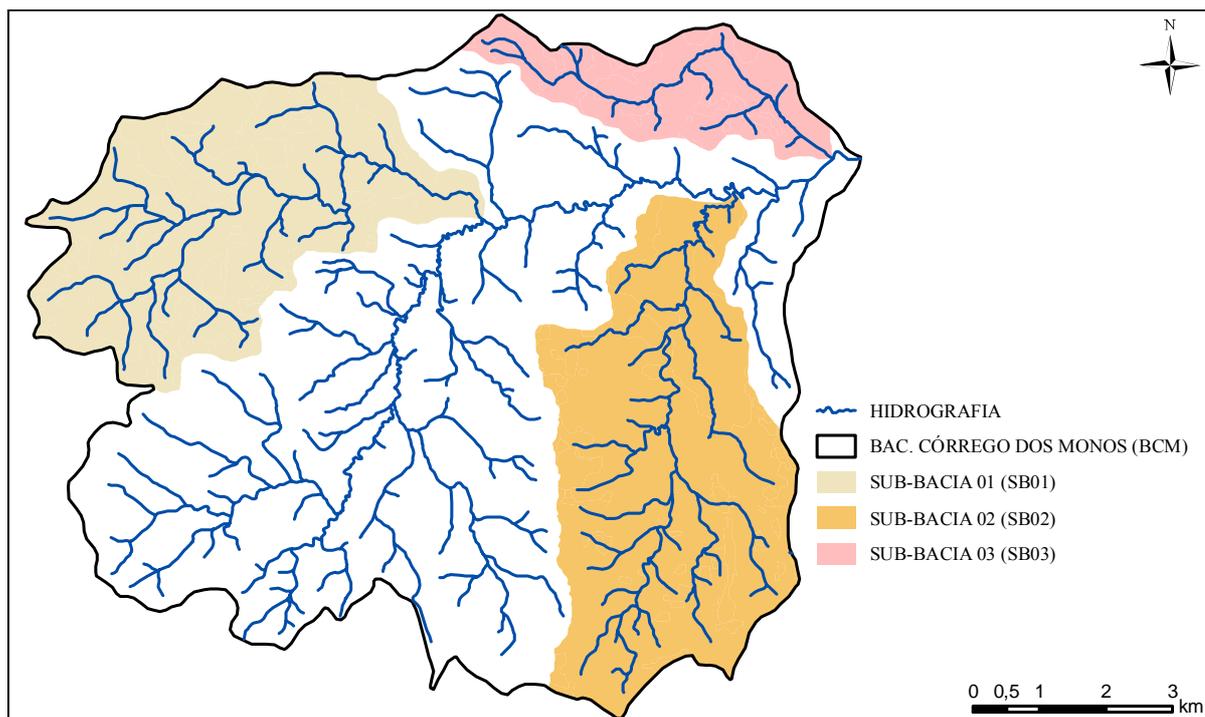


Figura 10: Bacia hidrográfica do Córrego dos Monos e as três sub-bacias avaliadas.

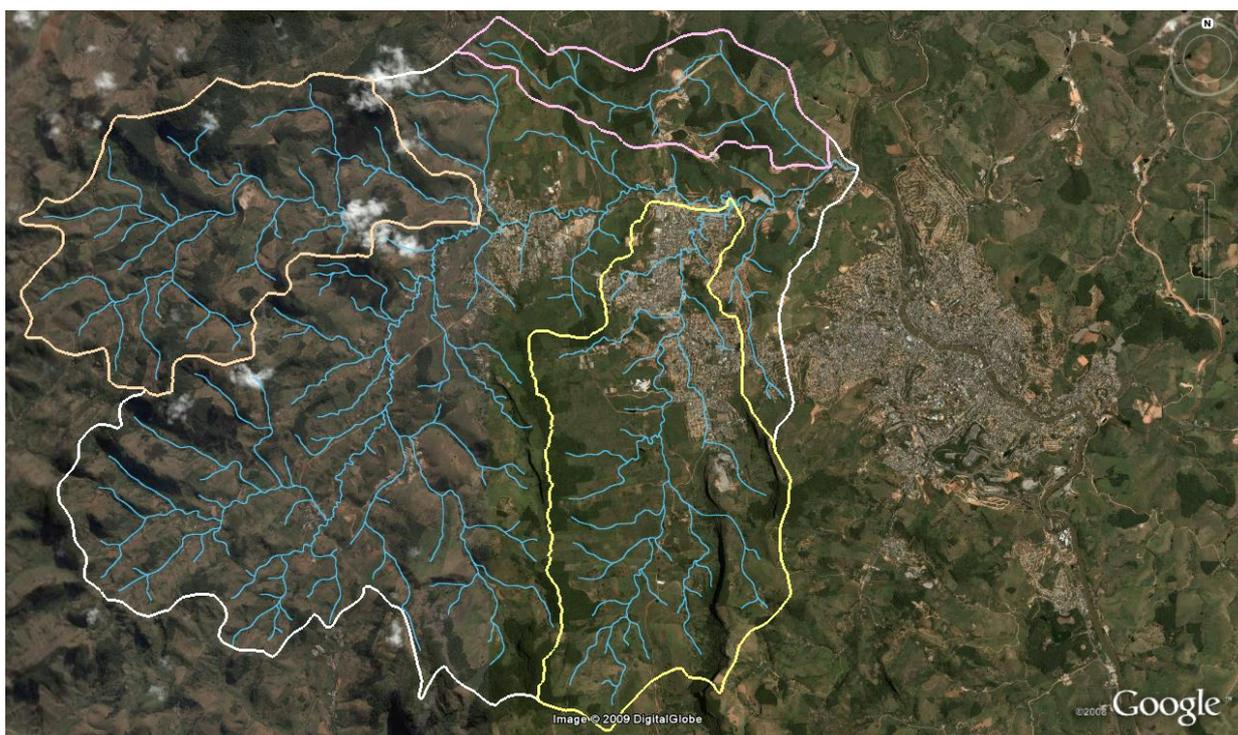


Figura 11: Imagem aérea da Bacia hidrográfica do Córrego dos Monos e as três sub-bacias avaliadas.

Fonte: Google Earth (www.earth.google.com)

3.2 Configuração espacial: cenários

Cenários ambientais podem ser imagens alternativas do futuro ricas em indicadores para contribuir na tomada de decisões, possibilitando a demonstração dos impactos que ocorreriam devido à ausência ou à implementação de planejamento. O estudo de caso contemplado nesse trabalho delimitou quatro cenários a fim de que a influência do incremento ou supressão das atividades atualmente predominantes, tais como a indústria da extração e beneficiamento de mármore e granito, a agropecuária (olericultura, café, fruticultura) e a agricultura de subsistência (milho feijão e arroz), pudessem ser questionadas. Assim, para a avaliação temporal do incremento dessas atividades e suas correlações com os impactos sobre o comportamento hidrológico da região, os cenários foram assim estipulados:

- Cenário pré-urbanização: considera a ocupação primitiva da bacia, ou seja, época em que a bacia hidrográfica era ocupada por cobertura vegetal típica da região e afloramentos rochosos naturais.
- Cenário de urbanização inicial: contempla os primeiros núcleos urbanos e alterações relativas à pastagens e áreas agrícolas, cuja base dados foi obtida a partir do Sistema Integrado de Bases Georreferenciadas do Estado do Espírito Santo (GeoBases).
- Cenário de urbanização atual: origina-se do entrelaçamento entre a base de dados utilizada no cenário de urbanização inicial e a configuração atual dos bairros, cuja delimitação é a adotada pela municipalidade local. A base de dados referente à configuração atual dos bairros foi formada a partir de mapa, em formato .pdf, do Anexo III pertencente ao PDU do Município de Cachoeiro de Itapemirim (Lei n°5890/06), obtido no sítio da Prefeitura Municipal de Cachoeiro de Itapemirim (<http://www.cachoeiro.es.gov.br>), que foi digitalizado e georreferenciado com auxílio do *software* ArcMap e, posteriormente, exportado para o ArcGis 9.2, em formato .shapefile.
- Cenário de urbanização futura: simula a ocupação urbana máxima permitida e estabelecida pelo PDU e seus respectivos usos. A base de dados foi constituída da mesma maneira que o cenário anterior, adotando mapa constante no Anexos I, VII e VIII, do PDU do Município de Cachoeiro de Itapemirim (Lei n°5890/06).

O GeoBases, criado pelo Governo do Estado do Espírito Santo, no final de 1999, constitui-se de um conjunto de planos de informações de múltiplo uso devidamente preparado para operações em SIG, formando uma base comum a todas as instituições convenientes e que foi concluído e disponibilizado aos seus convenientes em 2002.

Os critérios de uso e ocupação do solo de cada cenário foram aplicados em ambiente SIG, com auxílio do ArcGis 9.2, desenvolvido pela ESRI, tanto na bacia do Córrego do Monos como em três sub-bacia. Ilustrando como a expansão urbana influencia em questões hidrológicas da bacia, auxiliaram na melhor compreensão de como a evolução desses cenários pode atuar em níveis de micro e macro-região.

Para a delimitação das sub-bacias foi utilizado um *script* denominado *Hidrology Modeling* (esrihydrology.dll), obtido no sitio da ESRI (<http://www.esri.com>), disponível para download. Adicionado ao ArcGis 9.2, o *script* permitiu o uso da ferramenta *Watershed tool*, encontrada no *Hidrology modeling*, sobre a malha de fluxo acumulado. As bacias, obtidas em formato raster, foram posteriormente convertidas em vetorial através do *Spatial Analyst* com o auxílio do *Smooth lines* para dirimir o efeito “dentes serrilhados”.

Nos cenários estabelecidos os parâmetros C (Métodos Racional e Racional Modificado), CN (Método do SSC), C_t e C_p (Método de Snyder), foram adotados na estruturação do modelo de produção do escoamento superficial.

3.3 Parâmetros morfométricos e hidrológicos:

A caracterização morfométrica da bacia do Córrego dos Monos e das respectivas sub-bacias estudadas foi realizada por meio da utilização de índices lineares e superficiais, tais como coeficiente de compacidade, índice de circulariedade, fator forma e relação de relevo, entre outros. Esses índices, que descrevem o comportamentos da rede de drenagem e da superfície do terreno, foram inseridos no Excel por meio de informações obtidas no ArcGis 9.2 do material digitalizado.

A partir das características morfométricas e fisiográficas pôde-se calcular os parâmetros hidrológicos, como por exemplo, C, CN, C_t e C_p , necessários à obtenção das vazões de pico em cada cenário. A avaliação quantitativa uniu-se à temporal, à medida que, para cada cenário, os parâmetros foram obtidos considerando os diferentes tipos de uso e ocupação do solo, cujas características hidrológicas diferenciadas levaram ao cálculo de média ponderada dos coeficientes em relação às respectivas áreas para a obtenção de um valor final a ser considerado.

A avaliação do tempo de concentração seguiu orientação de alguns autores, tais como McCuen (1982), Porto (1995), Canholi (2005) e Patil et al (2008), e teve como pré-requisito a inserção de características de uso e ocupação do solo na metodologia. Devido às limitações impostas pelas fórmulas empíricas, foi calculado com base no Método Cinemático, que consiste

em dividir a bacia hidrográfica em trechos homogêneos e calcular a velocidade do escoamento em cada um deles.

O Tempo de Retorno adotado foi de 50 anos, obtido com base na Tabela 10, que apresenta valores para a determinação da variável em função da ocupação da área.

3.4 Análise de permissividade legal de uso e ocupação do solo:

O de permissividade legal de uso e ocupação do solo permitiu análise do comportamentos dos zoneamentos determinados pelo PDU em relação aos impactos ambientais da ocupação de áreas sob risco de enchentes, direcionando à compreensão de como os influenciam na hidrologia urbana local.

No presente trabalho, a análise foi realizada a partir da obtenção de cartas temáticas, em formato pdf., pertencentes ao PDU do município de Cachoeiro de Itapemirim (Lei nº5890/06), obtidos na sítio da Prefeitura Municipal de Cachoeiro de Itapemirim (<http://www.cachoeiro.es.gov.br>) cuja digitalização e georreferenciamento foram obtidos conforme explicado no item 3.2.

As cartas digitalizadas estão no Anexo III do PDU que, além da configuração atual dos bairros, contempla o zoneamento, e nos Anexos VII e VIII, compostos pela localização de áreas com índices de ocorrências de deslizamentos e áreas sujeitas às inundações, respectivamente. A inserção desse material no ArcGis 9.2 possibilitou a criação de novas cartas temáticas que, sobrepostas, embasaram o diagnóstico da ocupação das áreas sob risco de inundações.

3.5 Determinação das vazões de projeto:

Vários autores apresentam estudos comparativos entre vazões calculadas por vários métodos, como Steffen e Rondon (2000), que desenvolveram estudo em bacia urbana e suburbana, em região de nascente, com área de drenagem de 217,80ha, resultando na análise comparativa do Métodos Racional e Racional Modificado e de I-Pai-Wu, utilizando critério estabelecido por Fantolli, para a determinação de vazões de projeto em bacias desprovidas de medições. Concluíram que as diferenças entre os valores obtidos para as simulações foram de 5% e 10% para os Métodos de I-Pai-Wu e o Método Racional Modificado, respectivamente. Já a aplicação dos critérios de Fantolli, para a bacia estudada, apresentou pior desempenho, subestimando o valor da vazão de pico.

No presente estudo, para o cálculo das vazões de pico e simulação do escoamento superficial, foram utilizados os Métodos Racional, Racional Modificado, Hidrograma Unitário Sintético do *Soil Conservation Service* e o Hidrograma de Snyder, que possibilitam avaliação temporal e quantitativa.

Apesar de os estudiosos utilizarem o Método Racional em larga escala, alguns autores não indicam sua aplicação em bacias cujas áreas correspondem às do estudo de caso, entretanto o Método foi adotado a fim da obtenção de parâmetros comparativos para os outros métodos, principalmente em relação ao Racional Modificado. Já os Métodos Racional Modificado, Snyder e do *Soil Conservation Service*, são indicados para bacias com características similares às da área de estudo e possibilitam a análise dos impactos da urbanização sobre o sistema de drenagem através do uso de técnicas de quantificação de área impermeáveis e de representações das características superficiais do terreno para quantificar o escoamento superficial e simular picos de vazão de cheias.

Devido à simplicidade de aplicação do Método Racional e apesar de alguns estudiosos usarem-no em larga escala, segundo diversos autores não é indicado para bacias cujas áreas correspondem às do estudo de caso. Entretanto, o método foi adotado para obtenção de parâmetros comparativos em relação a outros métodos, principalmente o Racional Modificado.

A utilização de ferramenta computacional de geoprocessamento, ArcGis 9.2, possibilitou que os coeficientes C e CN fossem obtidos a partir de um valor ponderado, que considerou as áreas relativas ao uso e ocupação do solo de cada cenário como peso à obtenção do valor final.

A maior dificuldade encontrada na aplicação do método de Snyder ocorreu na determinação dos coeficientes C_t e C_p , pois quando são aplicados em bacias nos quais não puderam ser especificamente determinados, fazendo-se necessária a adoção empírica de valores obtidos para outras áreas. A diferença numérica entre esses coeficientes é significativamente grande, como pode ser observado em Pinto et al (1976), que adota $1,8 \leq C_t \leq 2,2$ e $0,56 \leq C_p \leq 0,69$ e em Genovez (2001), que cita Reda (1985) e Pio (1999), com $0,21 \leq C_t \leq 8,22$; $0,24 \leq C_p \leq 0,97$ e $1,16 \leq C_t \leq 10,11$ e $0,59 \leq C_p \leq 1,41$, respectivamente, além de outros valores anteriormente apresentados.

Como não existiam valores determinados para a área de estudo e perante a diversidade numérica apresentada pelos autores optou-se por aplicar o método considerando dois grupos de intervalos para os coeficientes: os originais, obtidos por Snyder para a região dos Apalaches,

EUA, apresentado por Tucci (2004), onde $1,35 \leq C_t \leq 1,65$ e $0,56 \leq C_p \leq 0,69$, e os apresentados por Porto et al (1995) nos gráficos das Figuras 07 e 08 e na Equação (51), que considera como parâmetro a percentagem impermeável da área de estudo, conduzindo a critério menos empírico do que os adotados pelos demais autores para a obtenção dos coeficientes C_t e C_p . Além disso, o método faz ponderação direta de aspectos relacionados com a influência do uso e ocupação do solo sobre os picos de vazão, atendendo melhor à proposta dos objetivos do presente estudo.

Para que fosse possível comparar de maneira equânime os métodos analisados e, como nos Métodos Racional, Racional Modificado e do SCS as durações das precipitações correspondem ao tempo de concentração, as vazões de pico em Snyder também foram calculadas com o uso do mesmo intervalo de tempo, levando à adoção de $D' = t_c$ e à correção do t_p , de acordo com Equação 55. Ressalta-se que, com a aplicação da Equação 53, obtêm-se a vazão de pico para uma precipitação de duração D e chuva 1 cm de altura. Todavia, com base na correção do t_p , que pode conduzir a altura de chuva superiores a 1cm, a equação foi alterada, por multiplicação pela nova altura de chuva:

$$Q_p = 2,76 \cdot \left(\frac{C_p \cdot A}{t_p} \right) \cdot P_E \quad (58)$$

em que P_E , em cm, foi calculado pelo método do SCS.

CAPÍTULO 04 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Diagnóstico temporal das áreas de estudo: cenários

Após digitalização, georreferenciamento e tratamento da base de dados existente, a sobreposição das cartas de uso e ocupação do solo embasadas em diagnóstico temporal originou, para cada área de estudo, os cenários apresentados nas Figuras 12 a 19. Ressalte-se que, em todos os casos, o cenário pré-urbanização representa a formação primária da área, configurando-se por extensões ocupadas pela cobertura vegetal típica da região e afloramentos rochosos naturais.

A BCM caracteriza-se por uma bacia rural apresentando processo crescente e acelerado de urbanização, cujo cerne da ocupação dá-se à jusante do Córrego dos Monos. Os cenários configurados pela evolução do uso e ocupação do solo são ilustrados na Figura 10. A região, que inicialmente possuía um núcleo urbano que ocupava 7,98% da área, no início do séc. XIX (GeoBases), no cenário de urbanização inicial, conforme Figura 16(b), teve um crescimento de 132,58%, podendo chegar a 410,02% em relação à situação inicial se ocupada de acordo com o PDU da cidade, correspondendo a uma área urbanizada de 59,30% da bacia, conforme visualiza-se nas Figuras 12, 13, 14 e 15.

Em nível de micro-região, a área menos atingida pelos efeitos da urbanização é a SB01, seguida da SB02, sendo que nesta a influência da evolução urbana já é significativa, passando de 19,61% no cenário inicial para 31,18% no atual, podendo chegar a 45,66% segundo as projeções do planejamento municipal. A SB03 foi a que apresentou intervenção humana em maior escala. Nesta área a influência da urbanização apresenta-se praticamente nula até o cenário inicial, com um incipiente crescimento, de 5,12%, no cenário atual, mas que, segundo projeções do PDU, pode chegar a um nível de urbanização de 93,32%, correspondendo a uma impermeabilização de quase 100%.

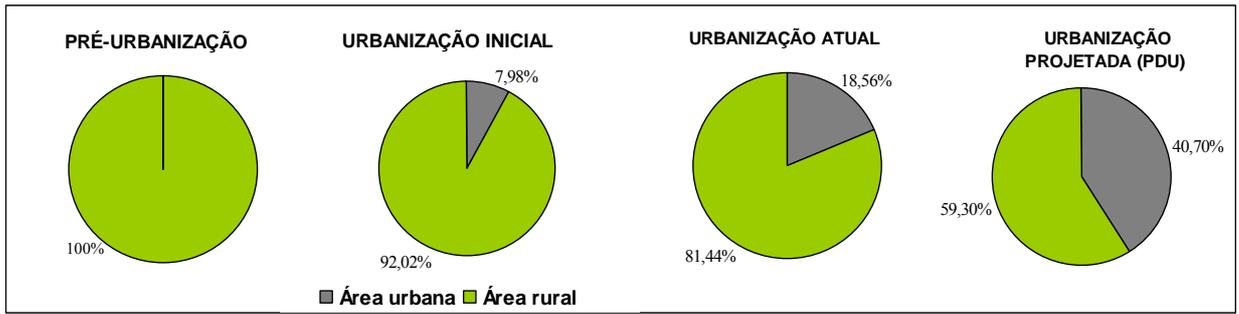


Figura 12: Relação entre ocupação urbana e rural da Bacia do Córrego dos Monos para os diferentes cenários.

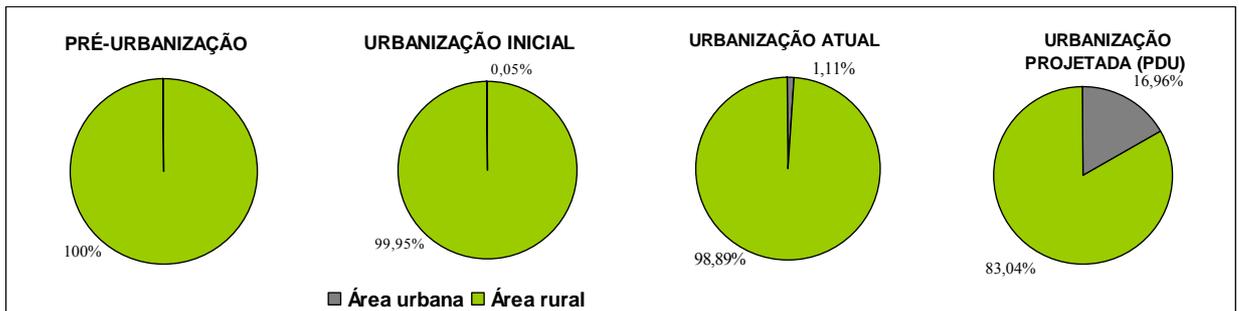


Figura 13: Relação entre ocupação urbana e rural da Sub-bacia 01 para os diferentes cenários.

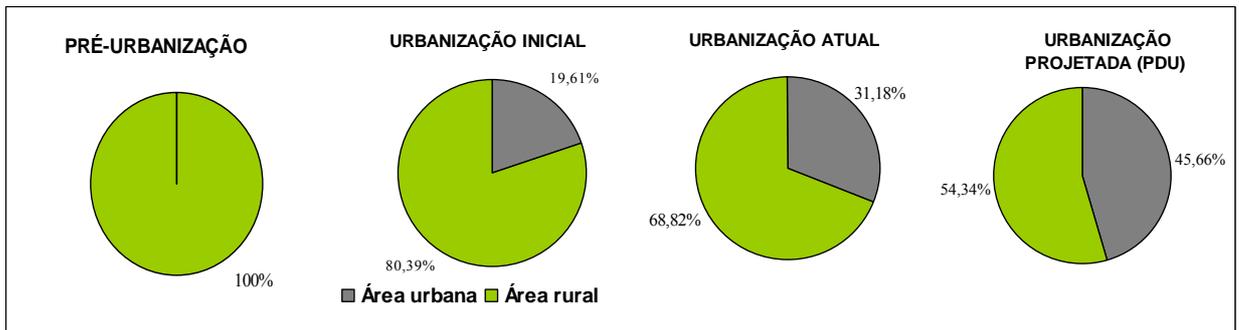


Figura 14: Relação entre ocupação urbana e rural da Sub-bacia 02 para os diferentes cenários.

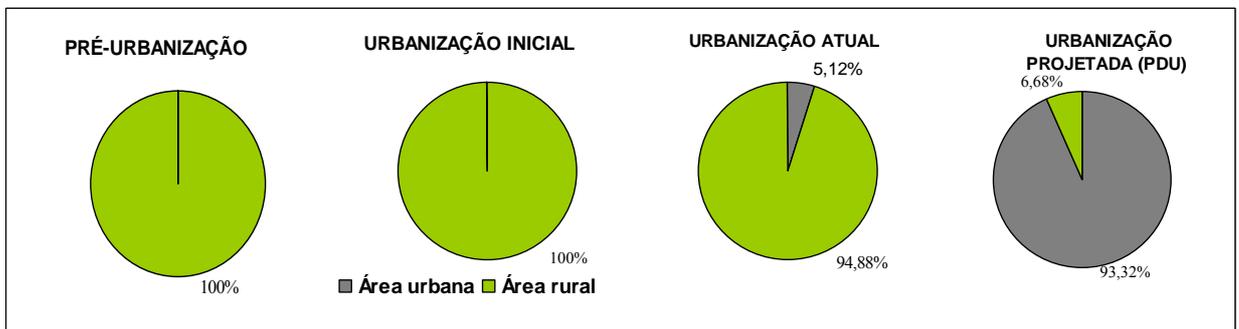


Figura 15: Relação entre ocupação urbana e rural da Sub-bacia 03 para os diferentes cenários.

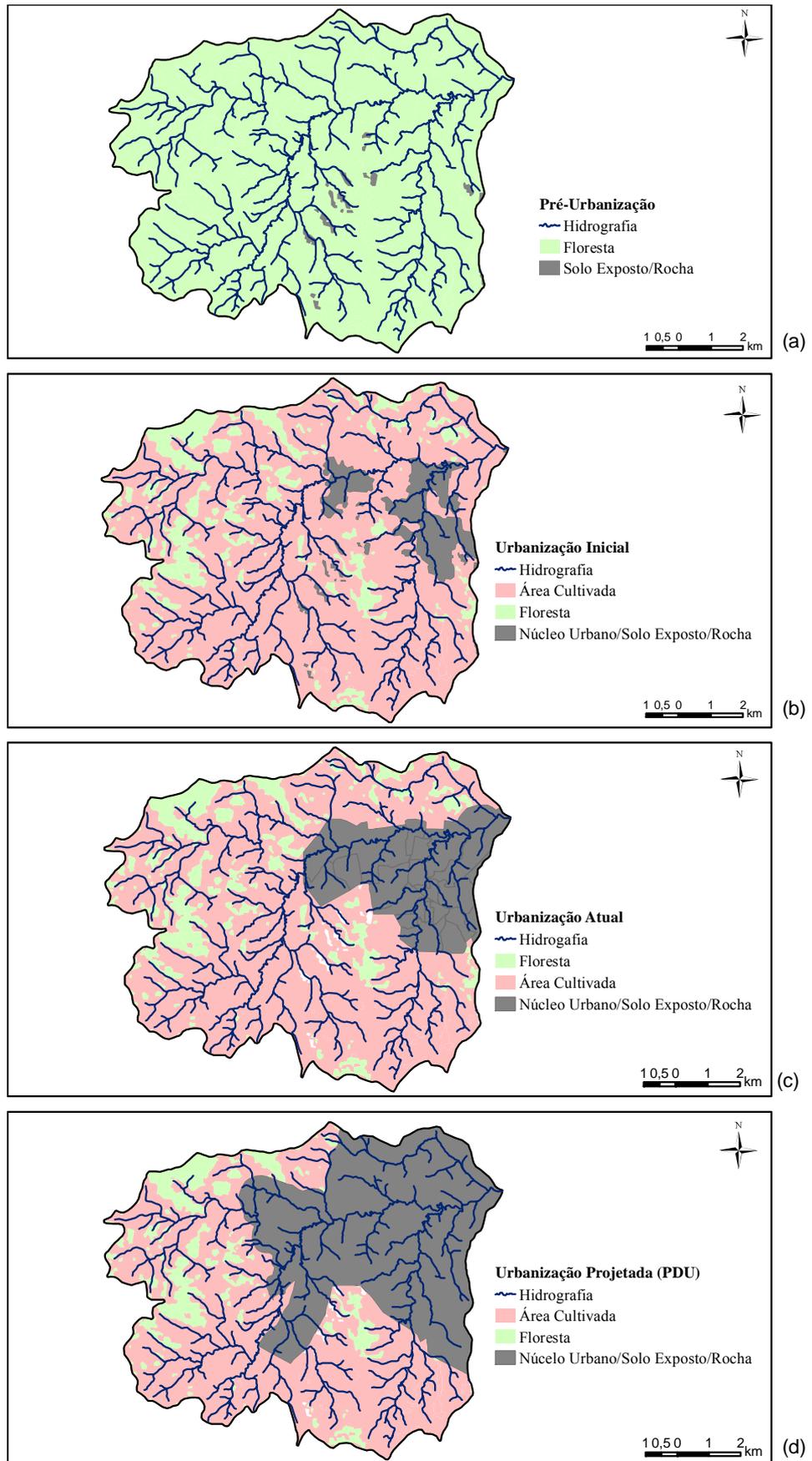


Figura 16: Cenários da evolução urbana na bacia do Córrego dos Monos: (a) pré-urbanização, (b) urbanização inicial, (c) urbanização atual, (d) urbanização projetada.

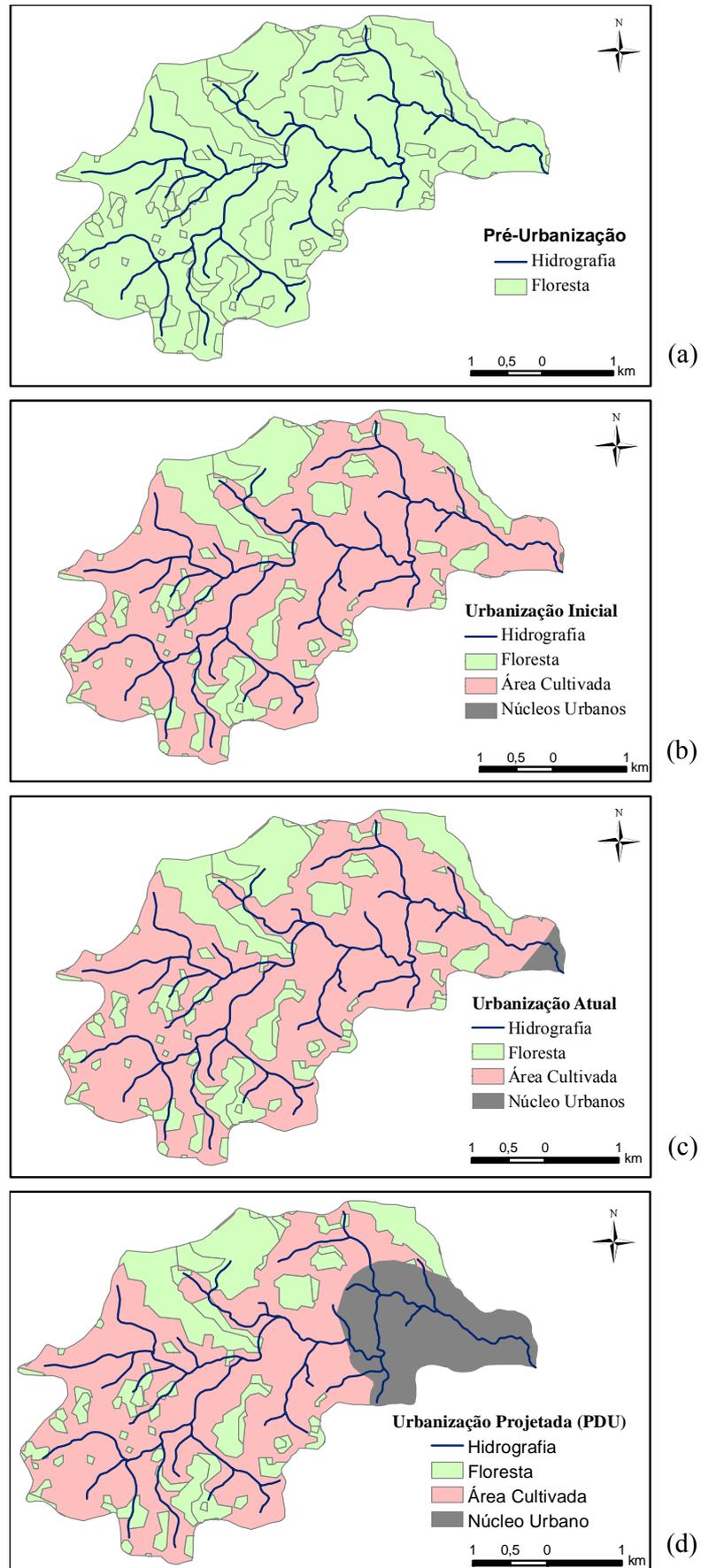


Figura 17: Cenários da evolução urbana na sub-bacia 01 (SB01): (a) pré-urbanização, (b) urbanização inicial, (c) urbanização atual, (d) urbanização projetada.

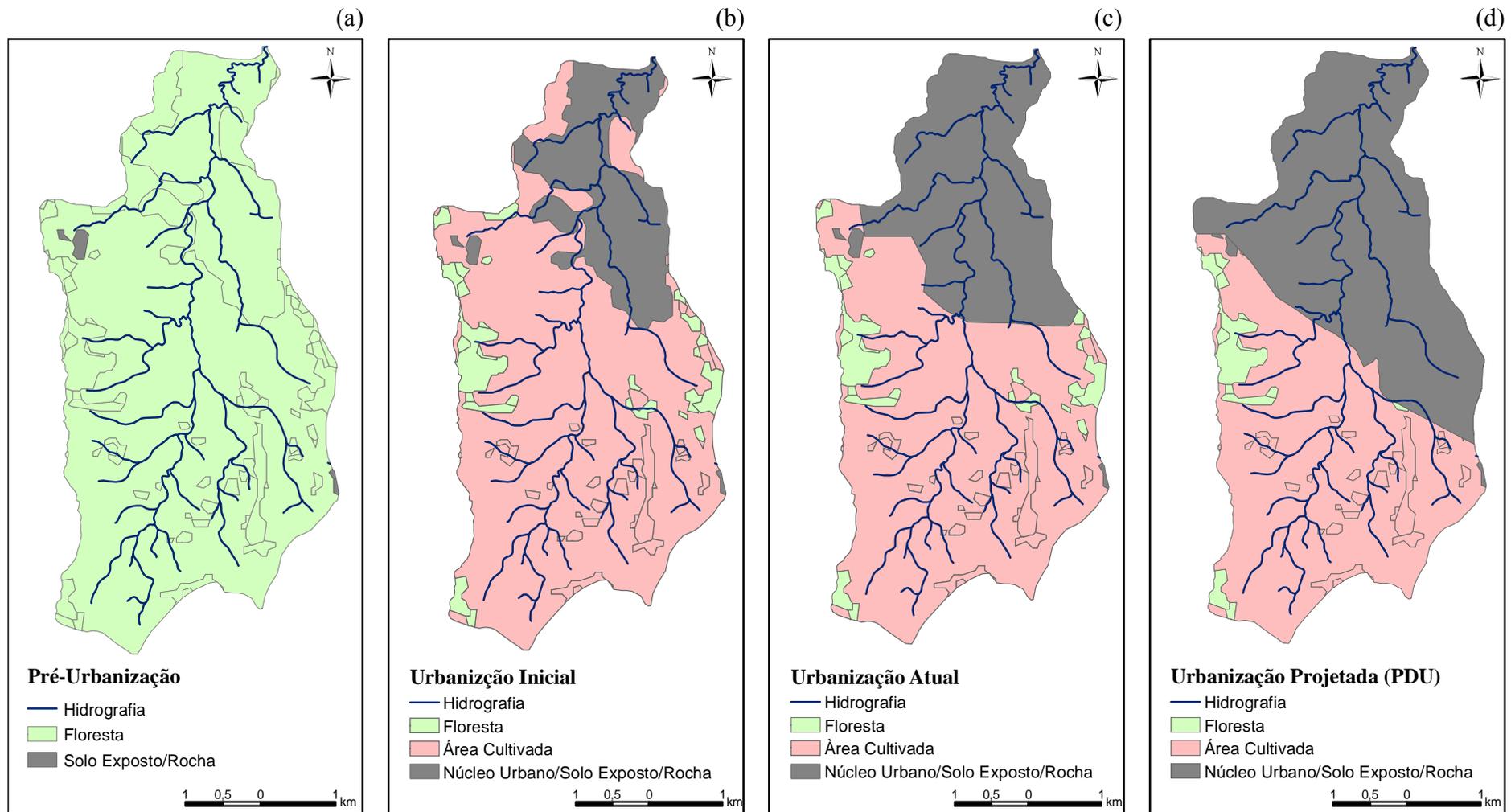


Figura 18: Cenários da evolução urbana na sub-bacia 02 (SB02): (a) pré-urbanização, (b) urbanização inicial, (c) urbanização atual, (d) urbanização projetada.

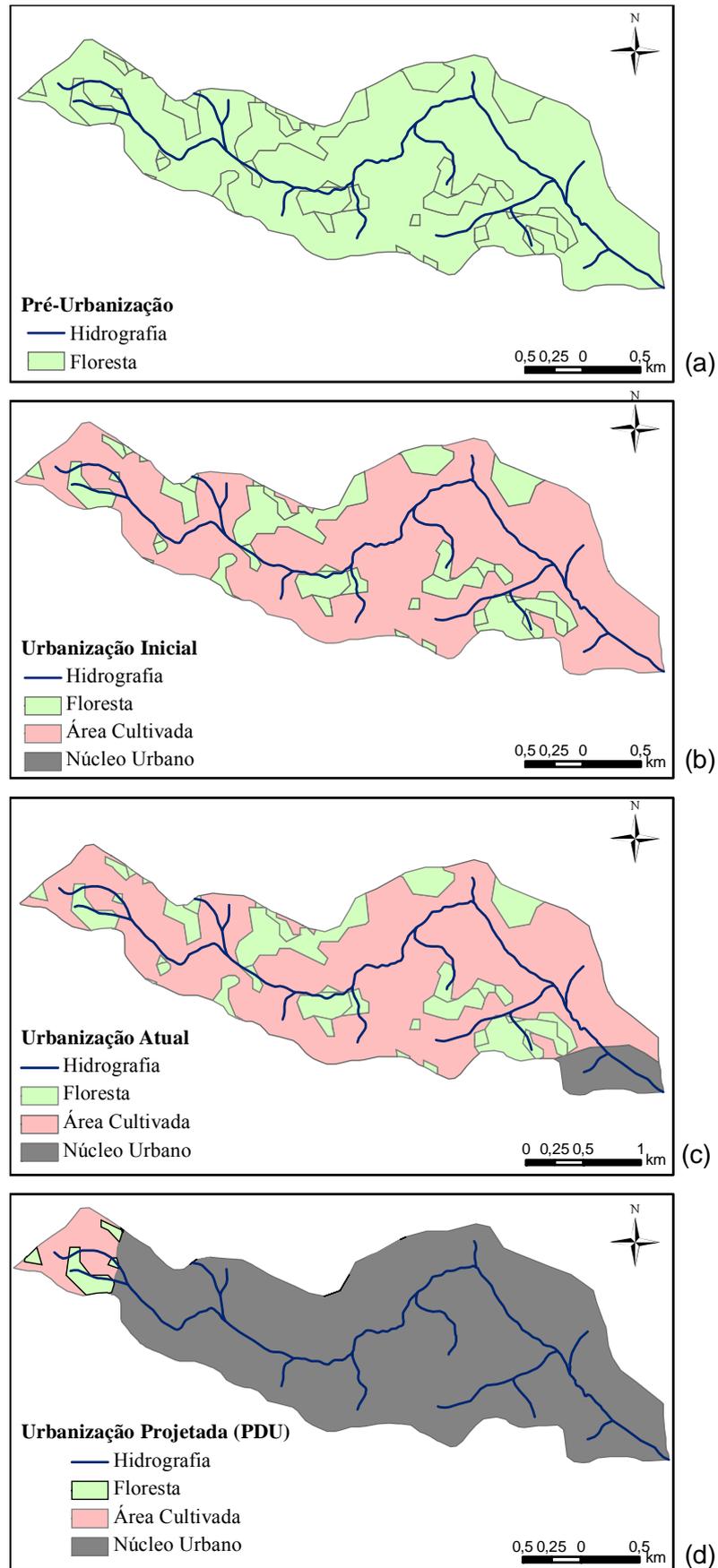


Figura 19: Cenários da evolução urbana na sub-bacia 03 (SB03): (a) pré-urbanização, (b) urbanização inicial, (c) urbanização atual, (d) urbanização projetada.

4.2 Análise morfométrica:

O conhecimento de características morfométricas, juntamente com tipo, uso e ocupação do solo existente, pode contribuir substancialmente para o planejamento do manejo de bacias hidrográficas, pois estas variáveis afetam diversas etapas do ciclo hidrológico e interferem, de forma direta, na resposta hidrológica das bacias.

A Figura 20 apresenta informações quantitativas associadas à declividade do terreno da bacia, mostrando diferenças topográficas existentes entre as áreas de estudo. O modelo sombreado simula o nível de luz refletido pelo solo ao ser iluminado. Logo, as áreas de maior declividade, por refletirem mais luz, são, portanto, mais visíveis. As classes de declividade foram separadas em seis intervalos distintos, sugeridos pela Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária (EMBRAPA, 1979). A declividade mínima, de 0 a 3%, corresponde a relevo plano, as médias, de 8 a 45%, correspondem aos relevos ondulado e fortemente ondulado, respectivamente, e a classe máxima, referente a declividades maiores que 75%, corresponde ao relevo montanhoso forte, conforme observa-se na Figura 20 (b).

A declividade influencia diretamente a relação entre a precipitação e o deflúvio da bacia hidrográfica, sobretudo devido à contribuição ao aumento da velocidade de escoamento superficial, que reduz a possibilidade de infiltração de água no solo. Observa-se que cada sub-bacia contempla diferentes níveis de declividade assim como diferentes características, tanto de uso e ocupação do solo quanto de permissividade legal de expansão.

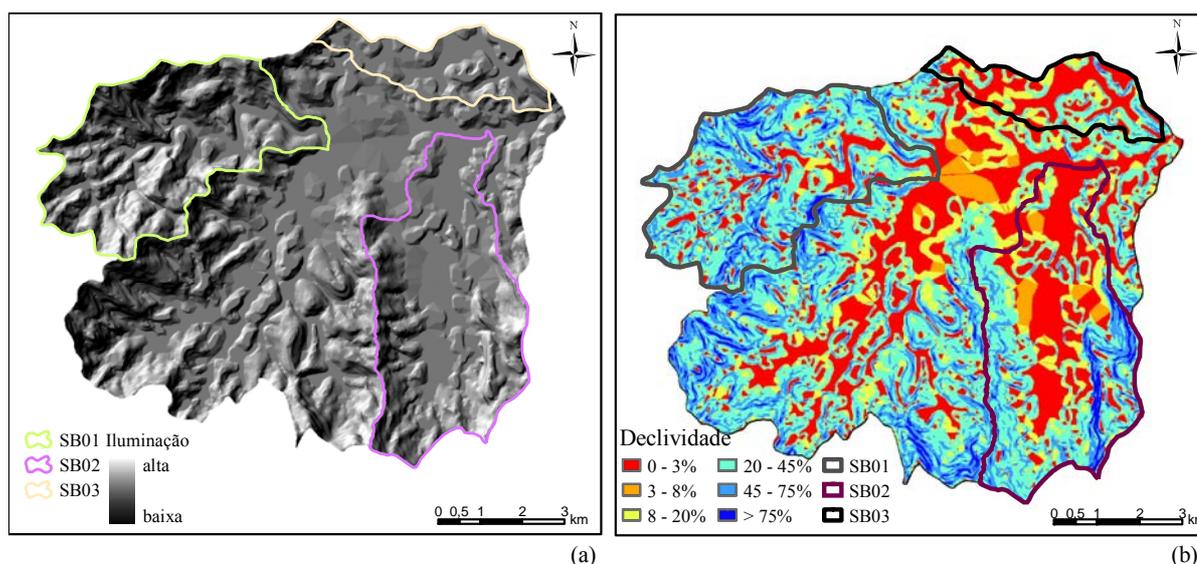


Figura 20: Modelo sombreado (a) e Declividade da bacia hidrográfica do Córrego dos Monos (b), Cachoeiro de Itapemirim, ES.

A caracterização morfométrica das bacias apresenta alguns indicativos que podem auxiliar na tomada de decisão quanto à expansão dos núcleos urbanos nessas áreas. Avaliando as características fisiográficas das sub-bacias, os índices obtidos para as SB01 e SB02 indicam pré-disposição mais acentuada para enchentes, como mostra a análise comparativa de seus coeficientes de compacidade (K_c).

Quanto mais distante da forma circular for a bacia tanto maior será o K_c e um coeficiente igual à unidade ($K_c=1$), corresponde às bacias circulares, mais propensas às enchentes. Na área de estudo, essa característica é ratificada pelos valores encontrado no índice de circularidade (I_c), pois valores que se aproximam da unidade ($I_c = 1,0$) também correspondem a áreas que tendem à forma circular, conforme pode-se observar na Tabela 19.

Os valores de outros coeficientes, tais como K_f , S_{in} , D_d e I_r , igualmente se apresentaram próximos para SB01 e SB02, indicando formas que as tornam propensas às enchentes em suas saídas. Por outro lado, o valor de $K_f = 0,12$, muito inferior a 1,00, obtido para SB03, indica que sua forma tende torná-la menos propensa às enchentes em sua foz.

Tabela 19: Características morfométricas das áreas de estudo.

Característica	Abrev.	BCM	SB01	SB02	SB3
Coeficiente de compacidade	K_c	1,35	1,42	1,41	1,60
Índice de circularidade	I_c	0,54	0,49	0,50	0,39
Fator forma	K_f	0,23	0,18	0,19	0,12
Altitude altimétrica máxima	H_m	340	250	270	120
Relação de relevo	R_r	16,58	25,00	25,76	16,88
Índice de sinuosidade	S_{in}	1,27	1,50	1,34	1,27
Densidade de drenagem	D_d	2,11	2,07	2,01	2,02
Densidade hidrográfica	D_h	3,60	4,69	3,52	3,69
Coeficiente de manutenção	C_m	474,11	482,65	498,53	494,79
Índice de rugosidade	I_r	717,14	517,98	541,60	242,53
Razão de bifurcação	R_b	1,77	1,87	1,64	4,00
		2,83	2,88	2,20	0,38
		1,40	0,67	2,00	----
		2,50	----	5,00	----
Razão de comprimento médio	R_{lm}	0,92	1,58	1,01	1,07
		1,11	0,70	1,01	1,29
		1,09	0,98	1,04	----
		0,82	----	1,36	----

4.3 Análise de permissividade legal:

Os instrumentos legais disciplinadores do uso e ocupação do solo, para terem êxito, devem incorporar-se à rotina decisória da burocracia municipal, pactuados com o conjunto da sociedade

como parte dos procedimentos licenciadores e de gestão do território e integradas às legislações que tratam de loteamentos, construções, habitações e obras de infra-estrutura, a fim de garantir a sua observância no controle e disciplinamento do uso do solo urbano (Carneiro et al, 2006). É por meio da implementação de instrumentos, como o zoneamento, por exemplo, e de suas inter-relações com os sistemas gestores do ordenamento territorial e os de gerenciamento dos recursos hídricos, por bacias hidrográficas, que a atividade de planejamento do território concretizar-se-á.

A divisão do espaço em zonas de usos preferenciais é um dos instrumentos clássicos de planejamento para o ordenamento do território, pois, a partir do zoneamento, instituem-se os parâmetros de ocupação do solo, diferenciados segundo zonas, além de ser uma das medidas de controle à minimização das enchentes de caráter preventivo e não-estrutural, gerenciando os possíveis problemas gerados pela incompatibilidade de usos, que dizem respeito, principalmente, ao desequilíbrio ambiental, à vulnerabilidade a acidentes e catástrofes, naturais ou não, à disponibilidade de infra-estrutura, e à preservação do patrimônio histórico e paisagístico. O PDM, ou PDU, do município de Cachoeiro de Itapemirim retrata, no Anexo III, o mapa de zoneamento, onde a área urbana consolidada é subdividida entre 14 zonas, conforme mapa de zoneamento da Figura 21 e índices urbanísticos apresentados na Tabela 20.

Especificamente, em relação às inundações, o PDM não contempla o assunto. No sitio da Prefeitura Municipal de Cachoeiro de Itapemirim (<http://www.cachoeiro.es.gov.br>), no link relacionado aos *downloads* relativos ao PDM, a instituição disponibiliza, no Anexo VII, mapa com pontos de alagamento sujeitos à inundação. Entretanto observa-se que o PDM não cita esse anexo nem aborda o tema das inundações.

O GeoBases possui base de dados referente às áreas alagáveis e ao digitalizar e georreferenciar as informações contidas no PDM e sobrepô-las à base de dados fornecida pelo GeoBases notou-se que são os mesmos pontos, conforme Figura 21. Percebe-se que, apesar de o PDM ter sido instituído em Outubro de 2006, após revisão determinada pelo Estatuto das Cidades, as informações foram apenas copiadas do GeoBases e que novos pontos de alagamento não foram considerados.

Mesmo trabalhado com informações pré-existentes e desatualizadas era possível que a legislação tomasse algum partido em relação à adoção de dispositivos de prevenção e minimização dos efeitos das inundações nas áreas de risco.

O zoneamento diferenciado das áreas sob risco de alagamento, a partir do aumento das taxas de permeabilidade e áreas mínimas dos lotes, da diminuição das taxas de ocupação, do incentivo à adoção de caixas de retenção para a água da chuva e da delimitação de parques lineares ao longo dos rios, evitando a ocupação desordenada de suas margens e atuando como planícies de inundação em caso de chuvas intensas, além de favorecerem à infiltração diminuiriam a quantidade de água que escorre para os cursos d'água. Entretanto, a partir do momento em que o PDM apenas reproduz pontos, sem transformá-los em áreas, determinando a abrangência ou o raio de influência dos eventos assim como ações preventivas e mitigadoras aos prejuízos causados, por exemplo, torna ineficaz a base legal que deveria fomentar uma proposta de ordenação urbana que contemplasse os afetados assim como ignora a possibilidade da ocorrência do evento em outras regiões.

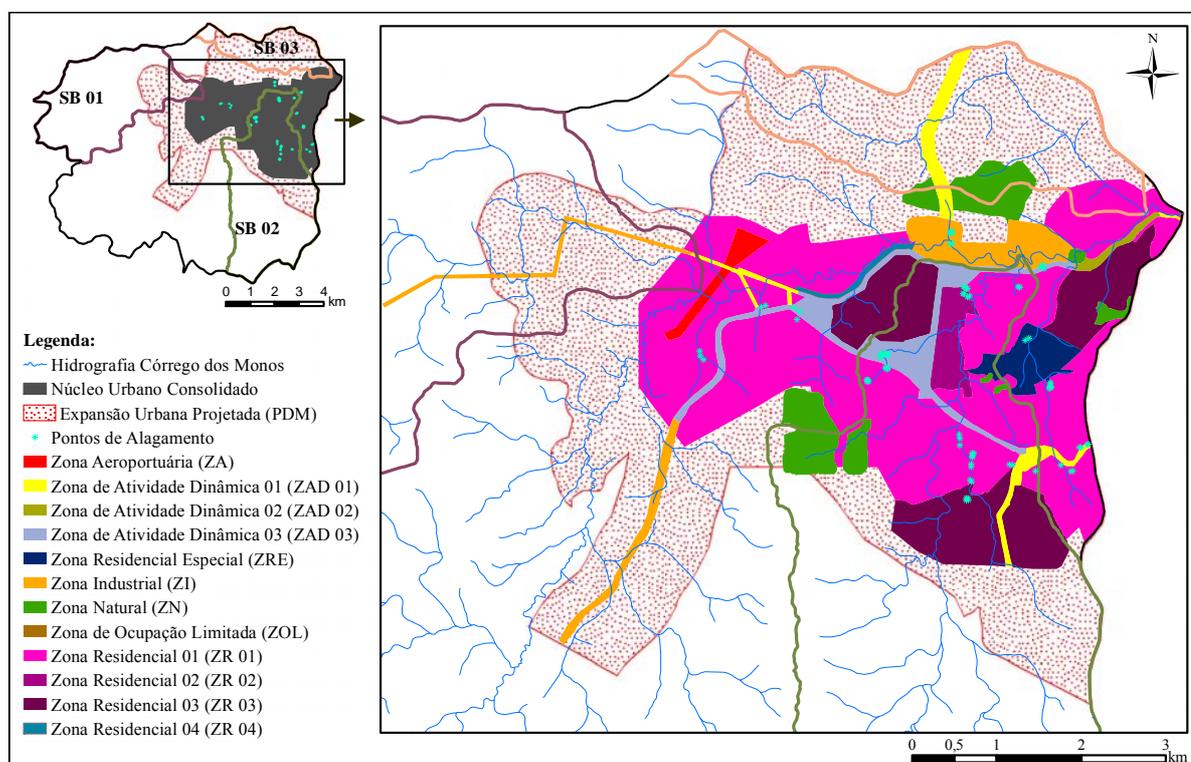


Figura 21: Zoneamento urbano da Bacia dos Monos e expansão projetada.

Tabela 20: Índices urbanísticos estabelecidos pelo PDM: usos comercial/serviço e industrial.

Zoneamento	CA (adm.)		TO (%)		TP (%)		Área mínima do lote (m ²)	
	CS	I	CS	I	CS	I	CS	I
Zona Aeroportuária (ZA)	*	*	*	*	*	*	*	*
Zona de Atividades Dinâmicas 1 (ZAD 01)	2,80	3,00	71	74	19	14	200	360
Zona de Atividades Dinâmicas 2 (ZAD 02)	2,90	*	72	74	17	14	300	360
Zona de Atividades Dinâmicas 3 (ZAD 03)	*	*	74	76	14	14	360	450
Zona Estritamente Residencial (ZER)	*	*	*	*	*	*	*	*
Zona Industrial (ZI)	NC	2,60	NC	68	NC	21	NC	1000
Zona Natural (ZN)	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
Zona de Ocupação Limitada (ZOL)	2,60	NC	66	NC	20	NC	200	NC
Zona Residencial 01 (ZR 01)	2,70	3,00	70	74	18	14	200	360
Zona Residencial 02 (ZR 02)	3,00	NC	73	NC	17	NC	240	NC
Zona Residencial 03 (ZR 03)	3,00	NC	73	NC	*	NC	240	NC
Zona Residencial 04 (ZR 04)	2,50	NC	60	NC	24	NC	375	NC

CS = uso comercial e de serviços, que subdivide-se em CS1 e SC2

I = uso industrial

NC = o uso não é contemplado naquela zona

(*) = o índice não consta nas tabelas do PDM

A Figura 22 apresenta mapa de zoneamentos das sub-bacias. Observa-se que a SB01 é a menos contemplada com o zoneamento e que, dos 16,95% da área que é zoneada, apenas 12,74% possui a zona pré-determinada e 87,26% corresponde a uma expansão urbana que é permitida pela legislação, entretanto seus parâmetros de uso e ocupação do solo não foram definidos pelo PDU, sendo apenas denominada de “área de expansão urbana”. A SB03, que, legalmente, é a mais passível de urbanização, com possibilidade de ocupação urbana de 93,26%, possui apenas 18,41% de seu zoneamento pré-determinado.

Ressalta-se a configuração espacial da Zona Natural (ZN). Na Figura 22 pode-se observar que o zoneamento das áreas naturais refere-se apenas à delimitação e proteção de remanescentes florestais e não à definição de áreas a serem preservadas e reflorestadas, como as cabeceiras dos cursos d’água e áreas de nascentes.

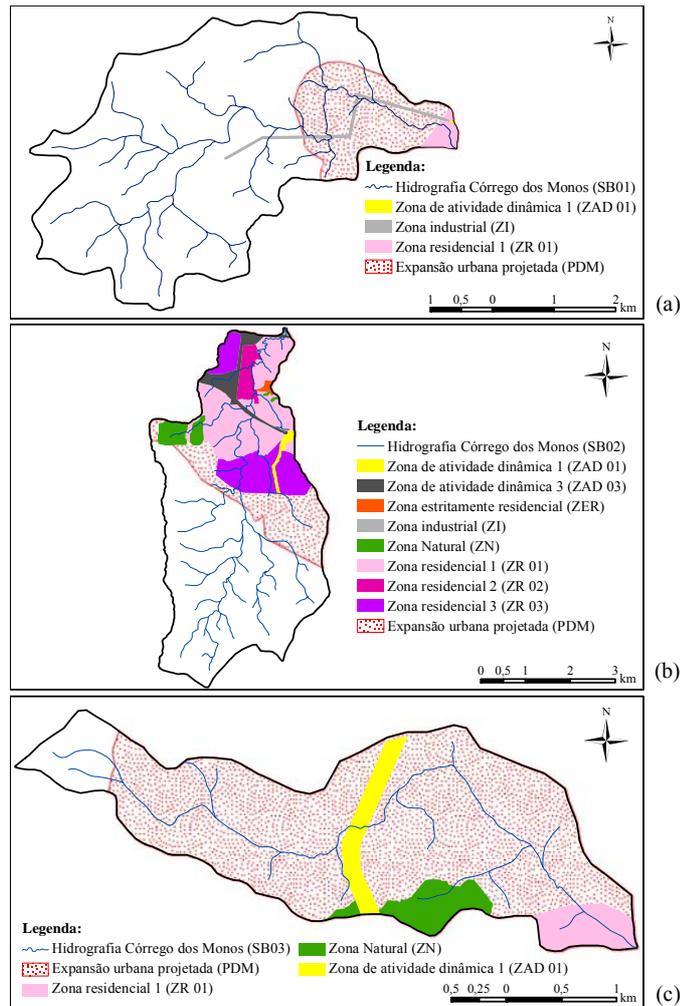


Figura 22: Zoneamento urbano e expansão projetada: (a)SB01, (b) SB02 e (c) SB03.

Das 14 zonas existentes na bacia, apenas 13 são representadas na legenda do Anexo oficial e citadas nos textos do PDM. A Zona Residencial Especial (ZRE), cujo perímetro é delimitado pelo Bairro Dr. Gilson Carone, não consta na legenda e membros da Secretaria de Planejamento Urbano da PMCI explicaram que a nomenclatura ZRE já não é mais pertinente ao Bairro Gilson Carone e que a região caracteriza-se por uma Zona Especial de Interesse Social (ZEIS), pois configura-se por área de invasão e de ocupações irregulares, transformando-se em um problema não apenas urbano, mas, sobretudo, social, onde a municipalidade, através de leis complementares, busca regularizá-la, já que a ordenação é dificultada devido ao elevado adensamento da região.

O PDM trata a ZEIS como áreas destinadas “à produção e à recuperação de habitações de interesse social, envolvendo terrenos públicos ou particulares ocupados por habitações subnormais ou por assentamentos assemelhados e lotes urbanos ou glebas subutilizados ou não utilizados, em que haja interesse público em se promover a urbanização ou a regularização jurídica da posse da terra”.

Na Figura 23, que apresenta uma imagem aérea do Bairro Dr. Gilson Carone e de seu entorno, pode-se perceber que, configurado por ruas sem calçamento e quadras e lotes de tamanhos aleatórios e esconsos, é um conglomerado urbano que difere dos demais.

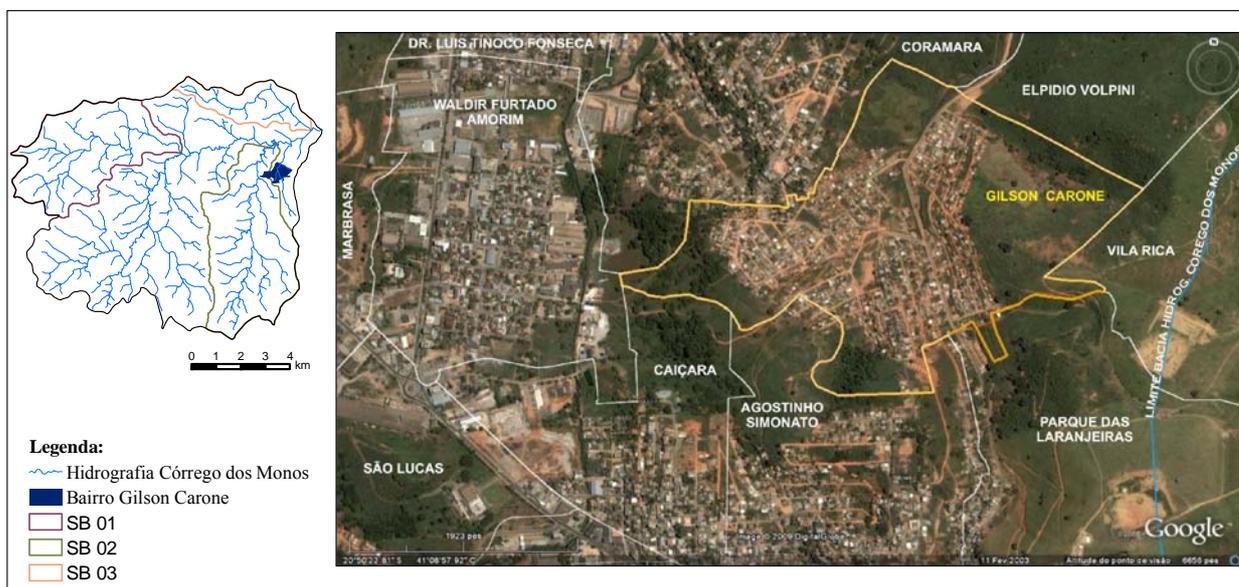


Figura 23: Imagem aérea do Bairro Gilson Carone.

Fonte: Google Earth (www.earth.google.com)

Outra lacuna do PDM, que interfere diretamente na correlação entre o uso e ocupação do solo e o efeito das inundações urbanas na região, é a delimitação do perímetro urbano que, de acordo com mapa do Anexo I e o Art. 166 do PDM, compreende área urbana consolidada e de expansão, conforme Figura 21. Todavia, o zoneamento do PDM contempla apenas a área urbana consolidada, ficando os empreendimentos e edificações a serem locados na área de expansão sujeitos à análise da Comissão Técnica Consultiva, composta por membros da Secretaria de Planejamento Urbano da PMCI. O próprio PDM, no Artigo 170, determina que “*cabera ao órgão responsável pelo planejamento municipal propor o zoneamento adequando da área de expansão urbana*”. Logo, os índices urbanísticos a serem adotados nessa área ainda não foram definidos, levando à análise de cada caso em particular.

Apresenta-se redundante a existência do zoneamento para uma área com ocupação urbana já consolidada, onde o adensamento urbano, crescente e desordenado, dificulta, sobremaneira, quaisquer atitudes de ordenamento territorial, ficando a área passível apenas à regularização, e a inexistência desse mesmo zoneamento para a região de expansão que, estendendo-se por área rural e de ocupação urbana incipiente, é a região que confere maior possibilidade da efetividade do controle do uso e ocupação do solo através dos instrumentos legais.

A análise individual e despadronizada de cada empreendimento que intencione instalar-se nessa área de expansão não é positiva para a região, na medida em que possibilita que interesses pessoais, políticos ou econômicos interfiram em decisões tendenciosas ou, até mesmo, que regiões com as mesmas características e potencialidades físicas sejam avaliadas de maneiras diferentes para usos similares. Essa é uma área que deve ser cautelosamente ocupada, pois eleva a ocupação urbana da BCM de 18,58% para 40,70% , atingindo áreas de nascentes, assim como induz sub-bacias praticamente inteiras, como a SB03, a urbanizarem-se, conforme Figura 19, com efeito hidrológico direto no incremento dos picos de vazões.

Como se observa, o município não utiliza o PDM como ferramenta sistemática para o controle da ocupação de áreas de risco às inundações. Em geral o atendimento aos afetados pelas enchentes somente é realizado depois de sua ocorrência, pois a falta de conhecimento sobre controle desses eventos por parte dos planejadores urbanos, a desorganização a níveis federal e estadual e o desgaste político do administrador público resultante de pressões da própria população que, por pouca informação técnica, requerem soluções imediatas e estruturais em detrimento do controle não-estrutural, conduzindo ao agravamento da situação.

4.4 Análise hidrológica:

4.4.1 Tempo de concentração (t_c):

O tempo de concentração é uma das funções de resposta da bacia hidrográfica mais utilizadas nas estimativas de vazões de pico e de hidrogramas de projeto. Os métodos adotados foram os que possibilitariam a considerar a evolução da ocupação urbana sobre a rede de drenagem da bacia, possibilitando, de modo simples e direto, avaliar o impacto da urbanização no regime hidrológico.

As Figuras 24 a 27 apresentam os t_c calculados pelas fórmulas dos métodos Cinemático, Lag, FAA, SCS-Lag Formula, DNOS e George Ribeiro para cada uma das áreas e seus respectivos cenários

A disparidade numérica entre os resultados dos diferentes métodos era um resultado esperado, pois, nem todos os métodos aplicados são indicados para as bacias do estudo. As diversas fórmulas estão diretamente relacionadas com parâmetros tais como comprimento e declividade do talvegue, rugosidade da superfície e área de declividade da bacia. Desta forma foram desenvolvidas a partir de estudos experimentais específicos e, como a dispersão de seus resultados pode ser grande, devem ser utilizadas em condições semelhantes àquelas para os

quais foram desenvolvidas. Sendo assim, as que melhor se adequam às bacias do estudo de caso são as dos métodos Cinemático e FAA. Observa-se a proximidade dos valores obtidos pelos dois métodos, apresentando resultados mais próximos à medida que diminui a área da bacia. Entretanto, seguindo recomendação de diversos autores, tais como Tucci (2004), Porto (2004), DNIT (2005) e Canholi (2005), as vazões de pico foram estimadas com base no t_c calculado pelo Método de Cinemático.

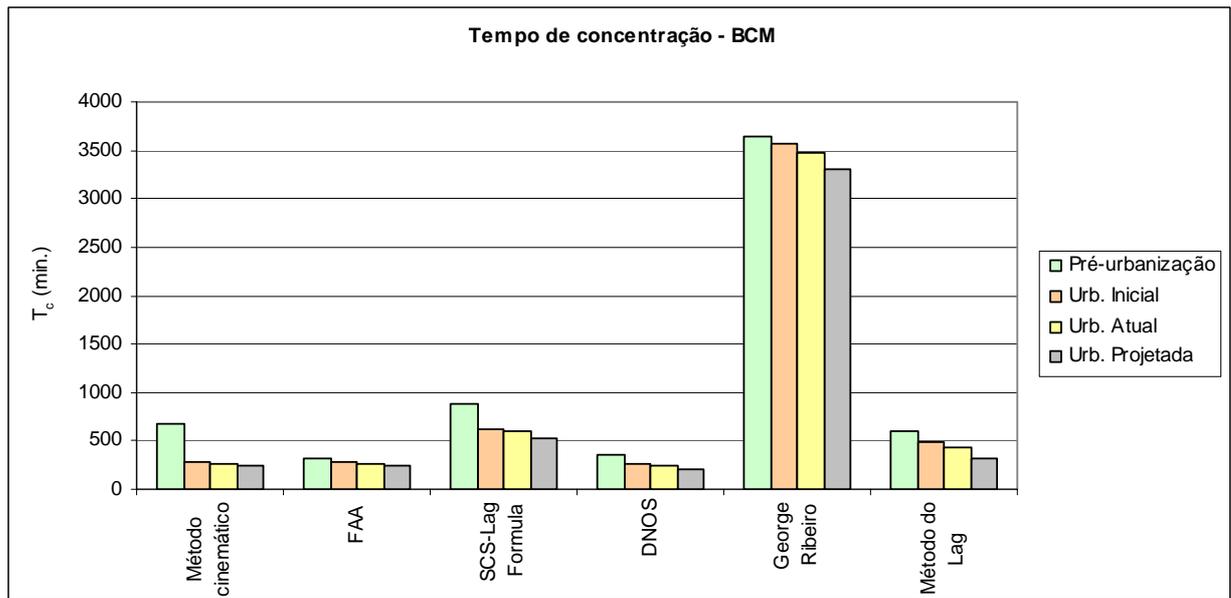


Figura 24: Tempo de concentração da bacia hidrográfica do Córrego dos Monos calculado por diferentes métodos.

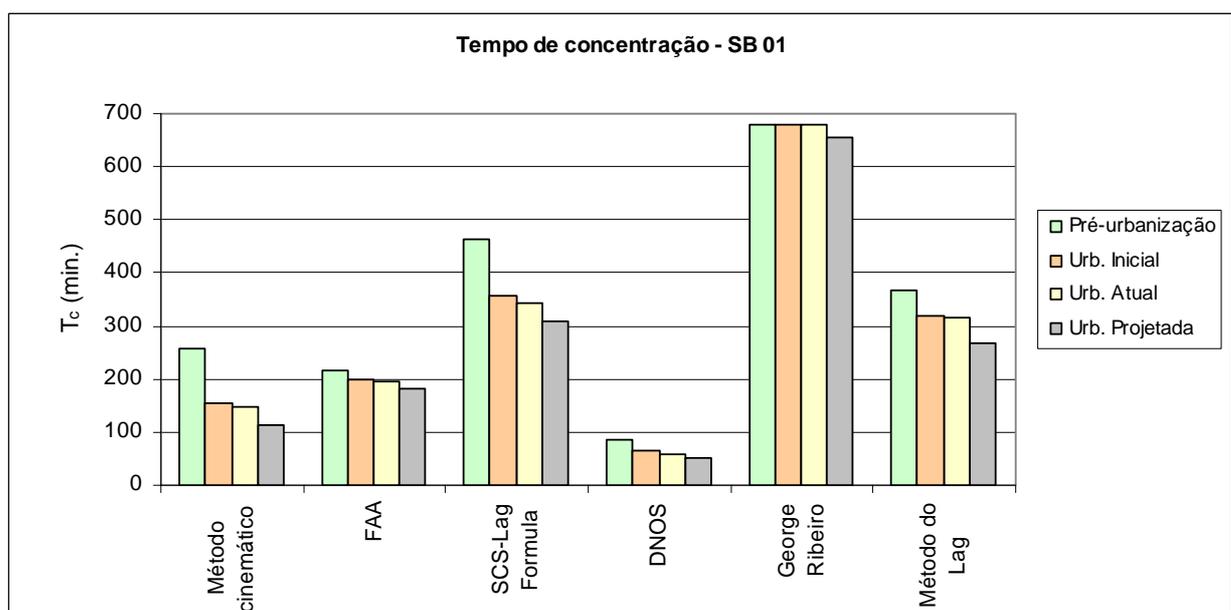


Figura 25: Tempo de concentração da sub-bacia 01 (SB01) calculado por diferentes métodos.

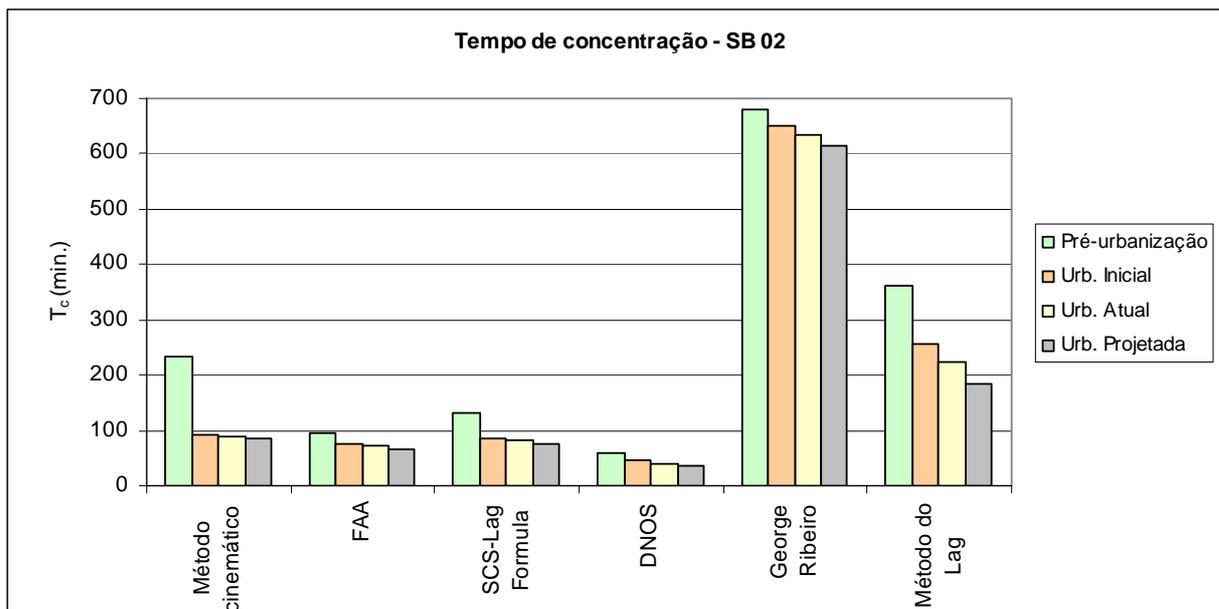


Figura 26: Tempo de concentração da sub-bacia 02 (SB02) calculado por diferentes métodos.

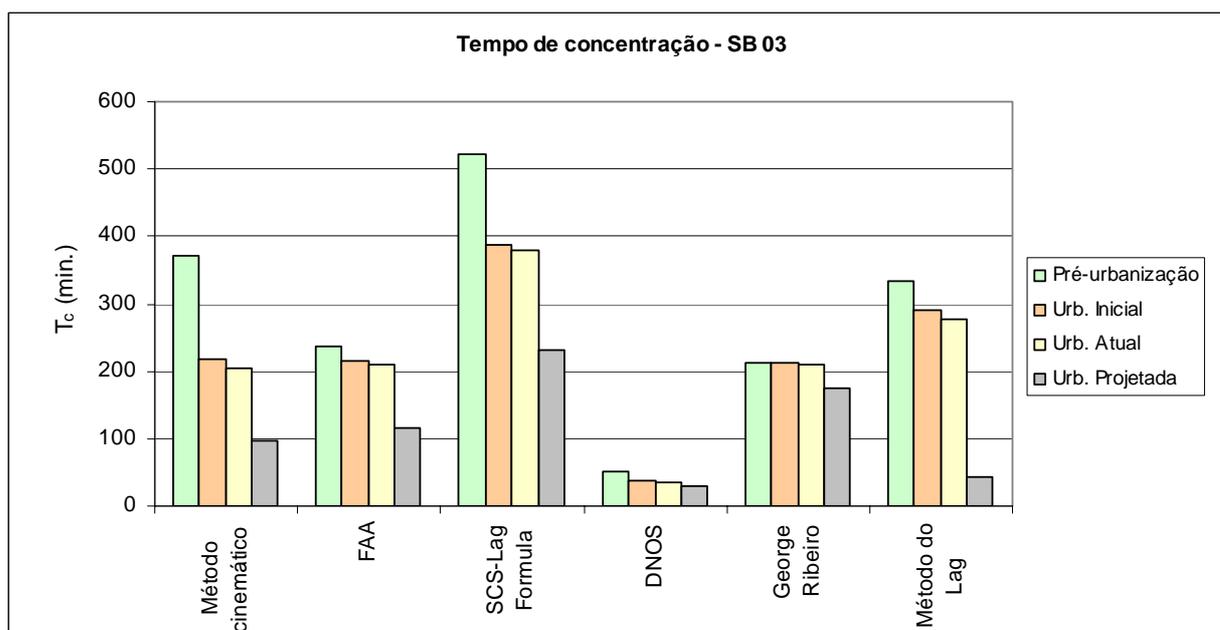


Figura 27: Tempo de concentração da sub-bacia 03 (SB03) calculado por diferentes métodos.

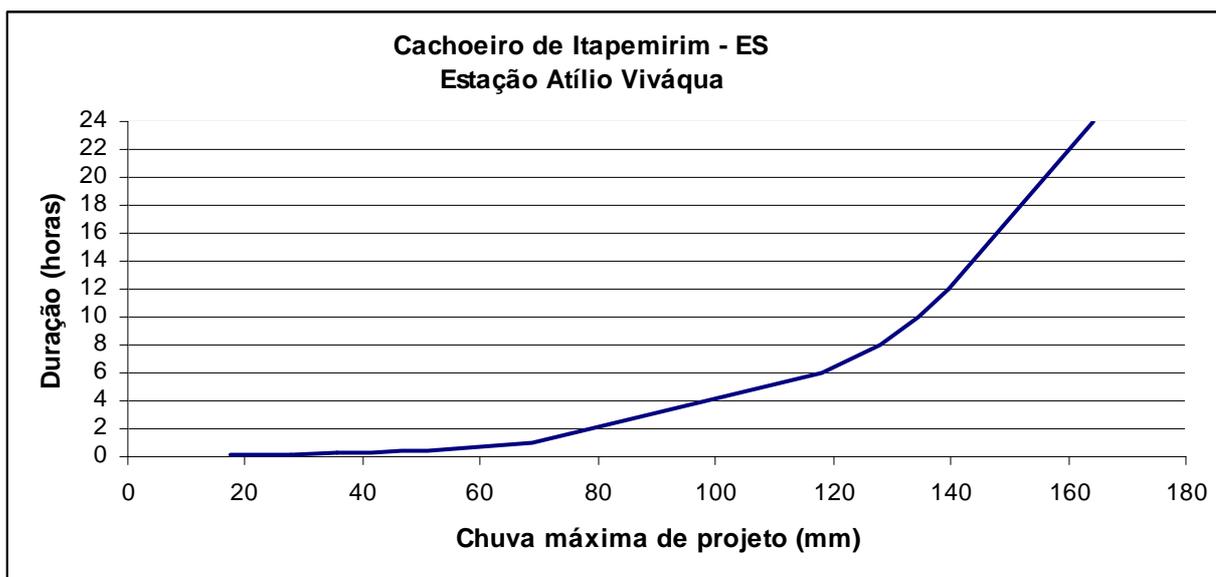
4.4.2 Precipitação efetiva (P_e):

Várias são as equações utilizadas em cálculos de intensidades máximas de chuvas para cidades específicas do país. Neste trabalho optou-se por usar dados manipulados pela Fundação Ceciliano Abel de Almeida (FCAA) que, a partir de série histórica de precipitações diárias máximas anuais, registradas durante 62 anos da Estação Atílio Vivácqua, estimou chuvas máximas anuais de projeto, para períodos de retorno de 2 a 100 anos, de acordo com os métodos

dos momentos e da máxima verossimilhança, onde a distribuição adotada foi a de Valores Extremos Tipo I (Método de Chow-Gumbel). As chuvas diárias máximas anuais estimadas foram transformadas em chuvas de durações de 5 min. a 24 horas, através de relações entre alturas pluviométricas desenvolvidas pelo DNOS e, posteriormente, calculadas as respectivas intensidades máximas anuais.

Os resultados foram apresentados em tabelas que, quando plotadas em gráficos cujos pontos foram unidos, forneceram valores para várias durações. O período de retorno adotado foi de 50 anos e os resultados estão apresentados nas Figuras 28 e 29.

No cálculo da precipitação efetiva, para obtenção de valores que pudessem ser comparados entre os métodos, para $T_r=50$ anos, adotou-se a duração da precipitação igual ao t_c , conforme apresentado na Tabela 21.



Figuras 28: Chuvas máximas de projeto para várias durações e período de retorno de 50 anos
Fonte: Modificado da Fundação Ceciliano Abel de Almeida., 2007.

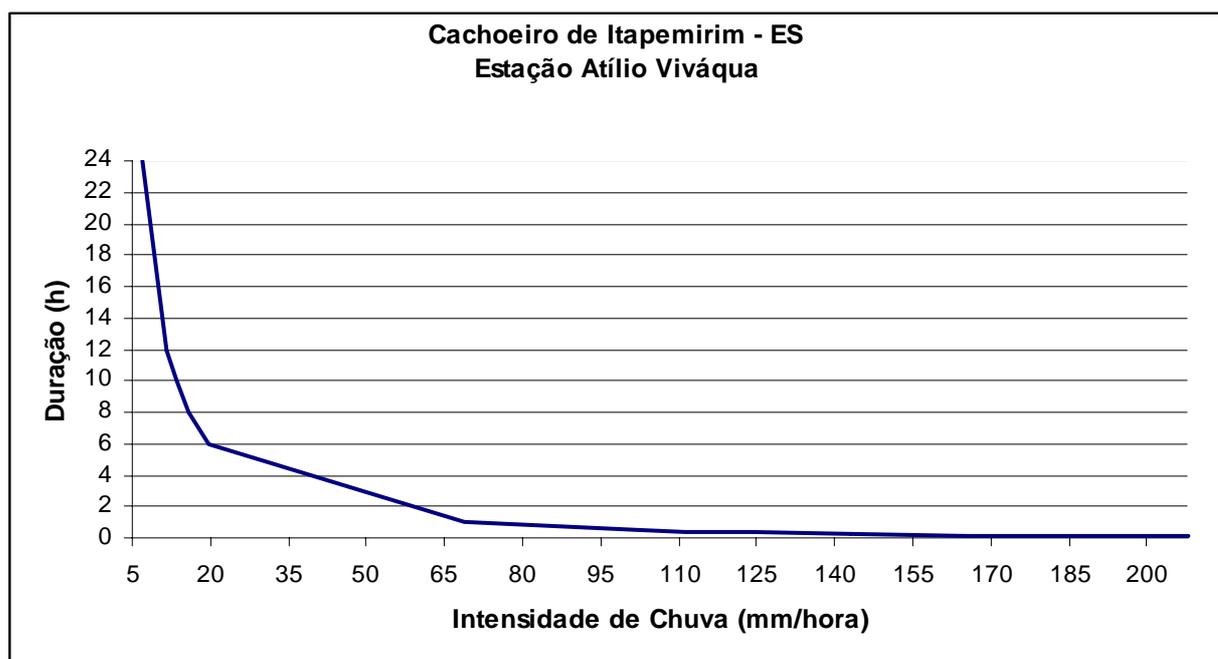


Figura 29: Intensidades máximas de projeto para várias durações e período de retorno de 50 anos.

Fonte: Modificado da Fundação Ceciliano Abel de Almeida, 2007.

Tabela 21: Precipitações efetivas e suas respectivas durações para $T_r=50$.

Cenário		Duração (horas)	P_e (mm)
Bacia do Córrego dos Monos	Pré-urbanização	11,39	43,51
	Urbanização inicial	4,81	46,34
	Urbanização atual	4,49	47,18
	Urbanização projetada (PDU)	3,98	50,02
Sub-bacia 01	Pré-urbanização	4,27	21,73
	Urbanização inicial	2,57	26,47
	Urbanização atual	2,48	26,09
	Urbanização projetada (PDU)	1,91	26,13
Sub-bacia 02	Pré-urbanização	3,88	19,74
	Urbanização inicial	1,54	26,55
	Urbanização atual	1,50	28,96
	Urbanização projetada (PDU)	1,42	32,04
Sub-bacia 03	Pré-urbanização	6,17	31,73
	Urbanização inicial	3,63	34,36
	Urbanização atual	3,42	34,17
	Urbanização projetada (PDU)	1,60	47,02

4.4.3 Número de Curva – CN:

O CN da bacia é a principal variável para estimativa da chuva excedente, segundo a metodologia do SCS. A utilização de tecnologia SIG possibilitou que a análise de mapas de uso e ocupação do solo contemplasse, concomitantemente, características quantitativas e qualitativas, na determinação de valores de CN para condições de umidade antecedente II, pois

equivale à situação média, em que os solos correspondem à umidade da capacidade de campo. Para cada grupo de uso de solo encontrado, foi estabelecido um valor de CN que contribuiu para a obtenção do CN ponderado, considerando as áreas correspondentes a cada uso do solo como pesos correspondente. A Tabela 22 mostra os valores que foram atribuídos baseados nas Tabelas 06 e 07.

Tabela 22: Valores de CN atribuídos a cada uso do solo presente nas áreas de estudo.

Uso e ocupação do solo	Grupo hidrológico	CN
Associação de floresta natural secundária em estágio inicial de crescimento com áreas de agricultura perene	C	78
Associação de pastagem, áreas agrícolas (em pousio e de subsistência) e muçununga	C	75
Culturas agrícolas	C	83
Floresta natural primária ou secundária em estágio avançado ou médio de crescimento	C	62
Núcleos urbanos	C	90
Solo exposto e afloramento Rochoso	C	87
Área de sombra possível de ser associação de pastagem, áreas agrícolas e muçununga	C	75
Área de sombra possível de ser floresta primária ou secundária em estágio avançado ou médio de crescimento	C	78

Fonte: Tucci, 2004.

Os CN ponderados foram obtidos por meio de uma composição de solos existentes nas áreas, considerando os diversos complexos hidrológicos solo-cobertura para cada cenário. O incremento dos valores do CN com a evolução da ocupação urbana já era esperado, pois, sendo seu valor função do tipo de solo e do uso e ocupação do solo, quanto maiores os graus de impermeabilização das áreas, também maiores são os CN e, conseqüentemente, ainda maiores os volumes de escoamento superficial direto esperados para uma determinada chuva.

A importância da análise desses incrementos dá-se à medida que possibilita a avaliação direta da evolução da expansão urbana e seus efeitos sobre o sistema hidrológico. Em nível macro, a bacia do Córrego dos Monos apresentava, no cenário de urbanização inicial, início do século XX, um núcleo urbano que ocupava 7,98% da área bacia. Como o crescimento natural da cidade essa ocupação atingiu uma taxa de 18,56%, que corresponde ao cenário atual de urbanização. No cenário projetado, cujo embasamento legal para o uso e ocupação do solo é, sobretudo, o PDM, essa taxa pode chegar a 40,70%. Logo, de um CN inicial cujo valor corresponderia a 62, a legislação local possibilita que esse valor chegue a 80,46, aumentando consideravelmente a cobertura impermeabilizada da bacia.

Entres as sub-bacias analisadas, a SB01 foi a que menos sofreu as conseqüências da expansão urbana projetada pelo PDM, pois, de um CN inicial de 62 chega-se a um resultado projetado de 75,43. Já a SB03 foi a bacia na qual os reflexos da urbanização foram mais percebidos, pois a proposta do PDM admite que praticamente toda a rede de drenagem esteja sob os efeitos da urbanização e onde, de um CN inicial de 62 tem-se um resultado, no cenário projetado, de 89,02, conforme demonstra a Figura 30.

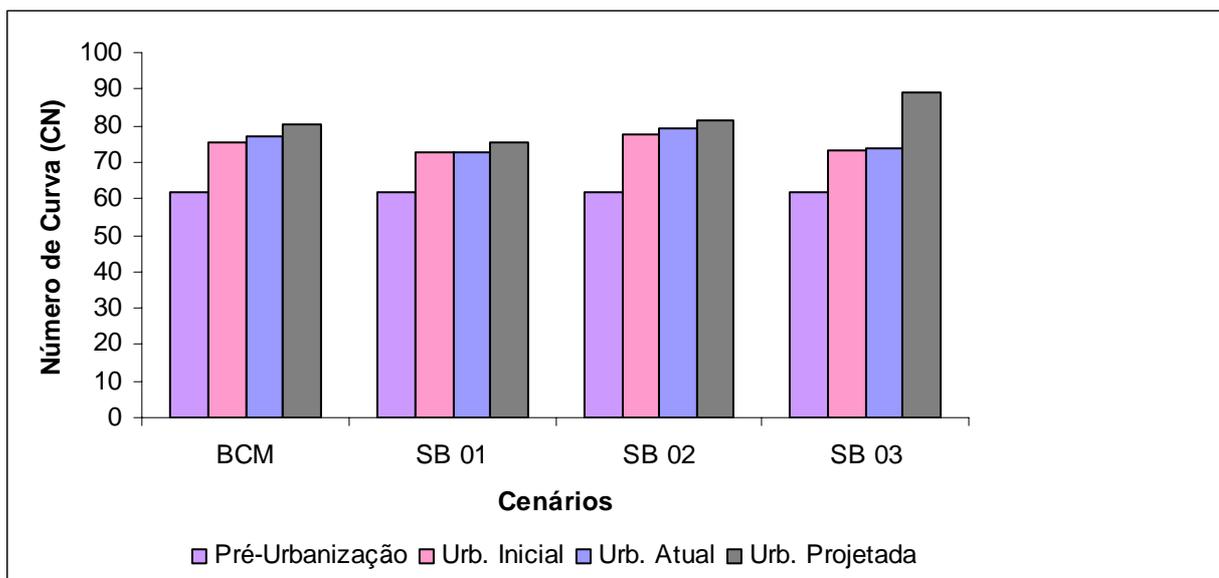


Figura 30: Valores de CN para cada cenário.

A Equação 21 possibilitou a quantificação do coeficiente de armazenamento superficial por infiltração (coeficiente “S”) para cada grupo de áreas de características distintas, determinadas em função da cobertura superficial do terreno, grupo hidrológico do solo e condição de umidade antecedente. Dos valores encontrados para a capacidade máxima da camada superficial do solo, pode-se dizer que, a partir do instante em que são alcançados ou ultrapassados os valores do coeficiente de armazenamento superficial, esgota-se a capacidade de infiltração do solo, ou seja, a capacidade de armazenamento do terreno, e inicia-se o escoamento superficial. As áreas com maiores percentagens de impermeabilização apresentam menores capacidades de armazenamento e, conseqüentemente, menores coeficientes “S” e antecipação do início do escoamento superficial excedente, conforme apresentado na Tabela 23.

Tabela 23: Coeficiente “S” e início da chuva excedente para cada cenário.

Cenário		Coeficiente “S”	Início da chuva excedente (min.) Tr = 50anos
Bacia do Córrego dos Monos	Pré-urbanização	155,68	15
	Urbanização inicial	83,32	10
	Urbanização atual	76,36	5
	Urbanização projetada (PDU)	61,70	5
Sub- bacia 01	Pré-urbanização	155,68	15
	Urbanização inicial	95,75	10
	Urbanização atual	94,91	10
	Urbanização projetada (PDU)	82,73	5
Sub- bacia 02	Pré-urbanização	155,68	15
	Urbanização inicial	73,77	5
	Urbanização atual	66,13	5
	Urbanização projetada (PDU)	57,06	5
Sub- -bacia 03	Pré-urbanização	155,68	15
	Urbanização inicial	92,91	10
	Urbanização atual	89,31	10
	Urbanização projetada (PDU)	31,33	5

4.4.4 Coeficiente de escoamento - C:

Assim como o CN, o fator C foi obtido por meio de uma composição ponderada por área, considerando os valores apresentados na Tabela 24. Como o C tem por objetivo retratar a relação entre o volume total escoado superficialmente e o volume total precipitado, é um índice variável e que compacta em um só valor características da chuva, da precipitação antecedente, da umidade do solo no início da precipitação, do tipo do solo, da ocupação da terra, da rede de drenagem, do efeito do armazenamento e da retenção superficial (Genovez, 2001), os resultados encontrados encontram-se na Tabela 25.

Tabela 24: Valores de C atribuídos a cada uso do solo presente nas áreas de estudo.

Uso e ocupação do solo	C
Associação de floresta natural secundária em estágio inicial de crescimento com áreas de agricultura perene	0,15
Associação de pastagem, áreas agrícolas (em pousio e de subsistência) e muçununga	0,12
Culturas agrícolas	0,12
Floresta natural primária ou secundária em estágio avançado ou médio de crescimento	0,12
Núcleos urbanos	0,65
Solo exposto e afloramento Rochoso	0,3
Área de sombra possível de ser associação de pastagem, áreas agrícolas e muçununga	0,12
Área de sombra possível de ser floresta primária ou secundária em estágio avançado ou médio de crescimento	0,12

Fonte: Mays (2001), apud Canholi (2005).

Tabela 25: Valores ponderados de C para cada cenário de estudo.

	Cenário	C
Bacia do Córrego dos Monos	Pré-urbanização	0,120
	Urbanização inicial	0,256
	Urbanização atual	0,302
	Urbanização projetada (PDU)	0,396
Sub-bacia 01	Pré-urbanização	0,120
	Urbanização inicial	0,207
	Urbanização atual	0,212
	Urbanização projetada (PDU)	0,279
Sub-bacia 02	Pré-urbanização	0,120
	Urbanização inicial	0,312
	Urbanização atual	0,359
	Urbanização projetada (PDU)	0,422
Sub-bacia 03	Pré-urbanização	0,120
	Urbanização inicial	0,215
	Urbanização atual	0,236
	Urbanização projetada (PDU)	0,620

4.4.5 Vazões de pico:

A escolha dos métodos utilizados para a avaliação do incremento das vazões de pico em função da expansão urbana teve como premissa o uso de critérios que possibilitassem a análise temporal de cada cenário. As metodologias aplicadas foram as do Hidrograma Unitário do SCS, de Snyder de acordo com Porto et al (1995) e Tucci (2004) e dos Métodos Racional e Racional Modificado.

Os valores da Tabela 26, relativos à simulação das vazões de pico na área de estudo, demonstram o aumento desta variável hidrológica a partir do incremento da urbanização, observada em todos os cenários e, conseqüentemente, aumento da impermeabilização do solo ao longo dos cenários avaliados. As Figuras 31 a 34 ilustram esses valores.

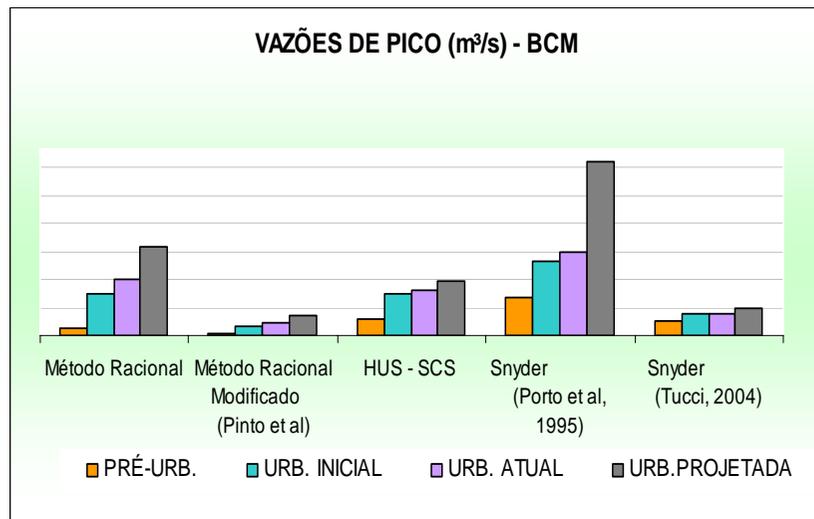
A partir dos valores apresentados, pode-se observar que os resultados simulados através dos métodos Racional e Racional Modificado, cujo cálculo das vazões de pico foi elaborado a partir da inclusão dos valores médios do coeficiente de escoamento superficial para cada parcela de área homogênea da bacia, apesar dos diferentes valores obtidos para as vazões de pico, apresentaram semelhantes percentagens de incrementos dessas vazões quando compara-se um cenário ao cenário anterior, conforme Figuras 31 a 34.

Tabela 26: Vazões de pico simuladas na área de estudo e os respectivos incrementos de vazão em relação ao cenário anterior.

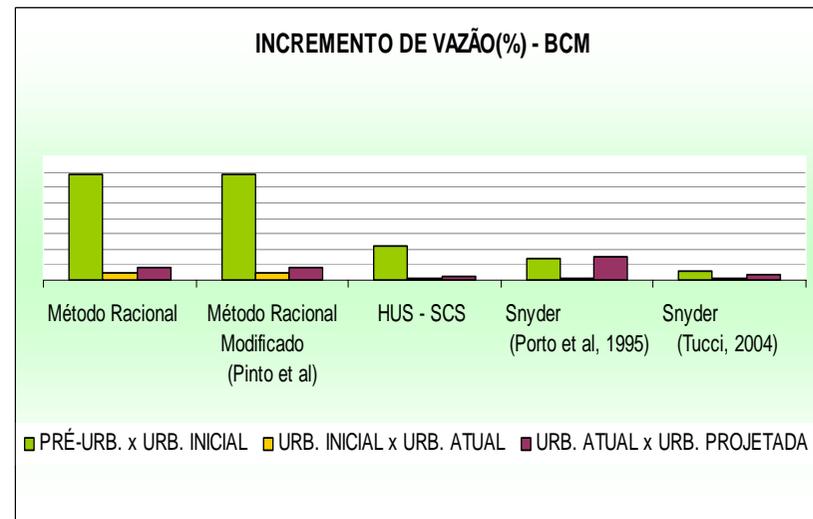
Cenários		MÉTODOS									
		Racional		Racional Modificado		SCS		Snyder (Porto et al, 1995)		Snyder (Tucci, 2004)	
		Q _p (m ³ /s)	Incremento (%)	Q _p (m ³ /s)	Incremento (%)	Q _p (m ³ /s)	Incremento (%)	Q _p (m ³ /s)	Incremento (%)	Q _p (m ³ /s)	Incremento (%)
BCM	1	38,76		8,42		89,19		200,26		81,20	
	2	222,81	474,80%	48,38	474,80%	225,24	152,54%	400,97	100,23%	112,31	38,31%
	3	302,29	35,67%	65,63	35,67%	245,21	8,87%	449,19	12,03%	119,02	5,97%
	4	480,24	58,87%	104,27	58,87%	293,64	19,75%	927,32	106,44%	149,39	25,52%
SB 01	1	88,42		6,41		22,80		35,51		13,46	
	2	56,42	151,65%	16,13	151,70%	46,13	102,32%	62,21	75,21%	18,45	37,03%
	3	59,06	4,68%	16,88	4,68%	47,22	2,34%	64,42	3,54%	18,66	1,13%
	4	92,98	57,43%	26,58	57,44%	61,22	29,65%	72,05	11,86%	19,79	6,08%
SB 02	1	28,39		7,93		26,13		40,22		14,00	
	2	126,49	345,54%	35,35	345,50%	88,51	238,79%	104,34	159,42%	23,39	67,04%
	3	151,79	20,00%	42,42	20,00%	99,36	12,25%	155,82	49,34%	27,22	16,39%
	4	185,26	22,05%	51,77	22,05%	115,54	16,29%	268,55	72,34%	33,19	21,91%
SB 03	1	4,03		1,38		7,84		11,61		6,93	
	2	16,03	297,77%	5,48	297,94%	14,45	84,22%	19,31	66,24%	8,77	26,55%
	3	19,03	18,71%	6,51	18,71%	15,24	5,48%	19,56	1,29%	3,10	3,77%
	4	83,07	336,52%	28,42	336,48%	44,91	194,67%	140,43	618,05%	20,02	119,91%

Cenários:

- 1 = Pré-urbanização
- 2 = Urbanização inicial
- 3 = Urbanização atual
- 4 = Urbanização projetada (PDU)

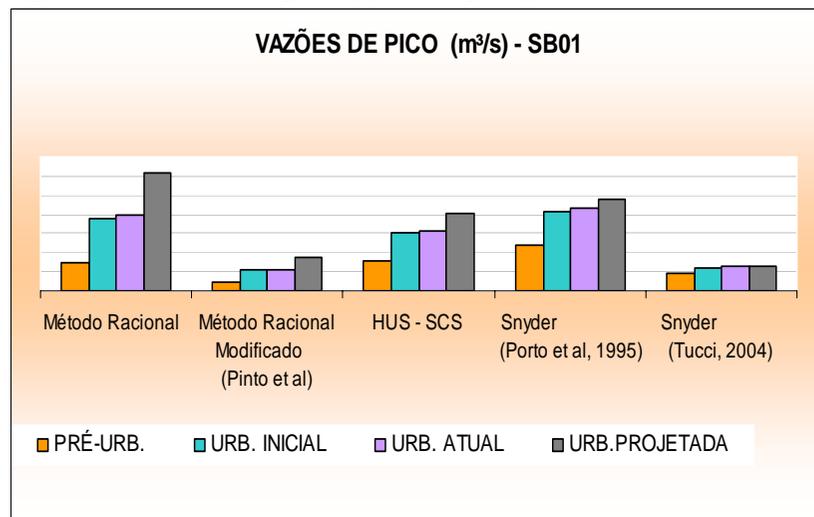


(a)

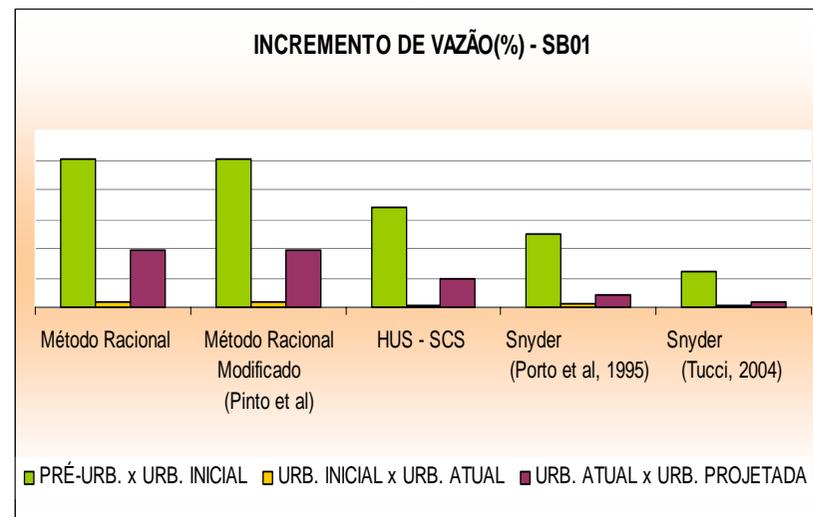


(c)

Figura 31: Vazões de pico (a) e comparação de incremento de vazão (b) entre cenários da bacia do Córrego dos Monos (BCM).

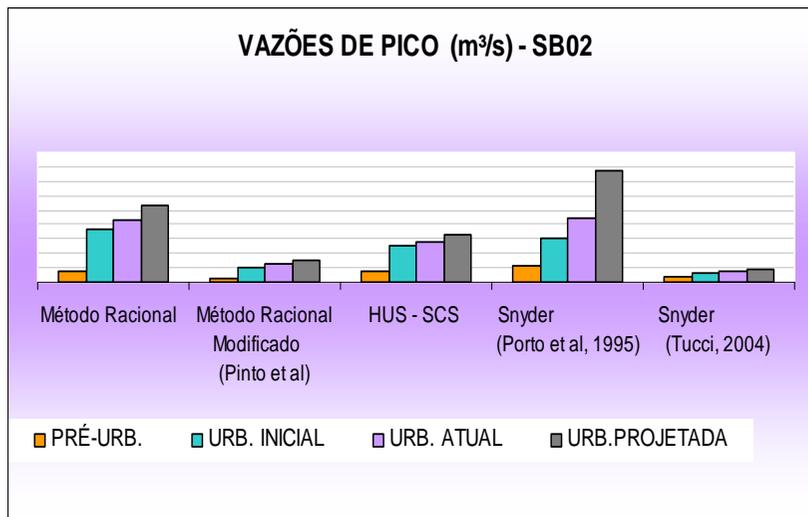


(b)

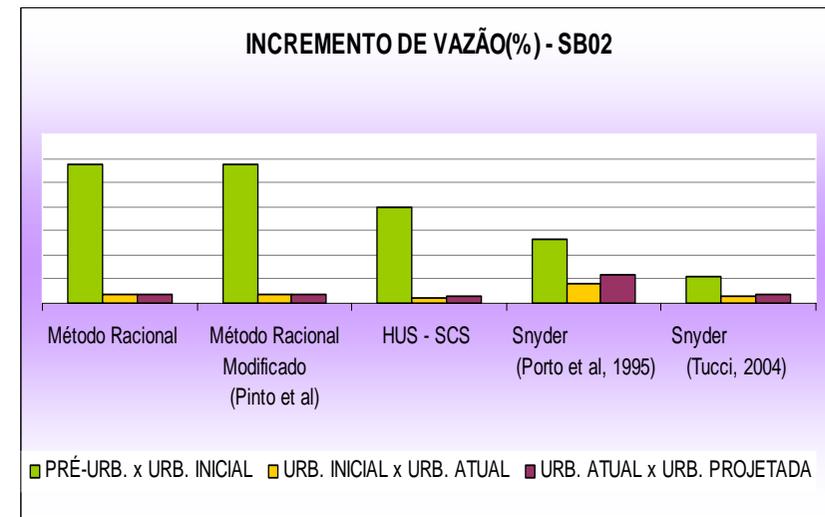


(d)

Figura 32: Vazões de pico (a) e comparação de incremento de vazão (b) entre cenários da sub-bacia 01 (SB01).

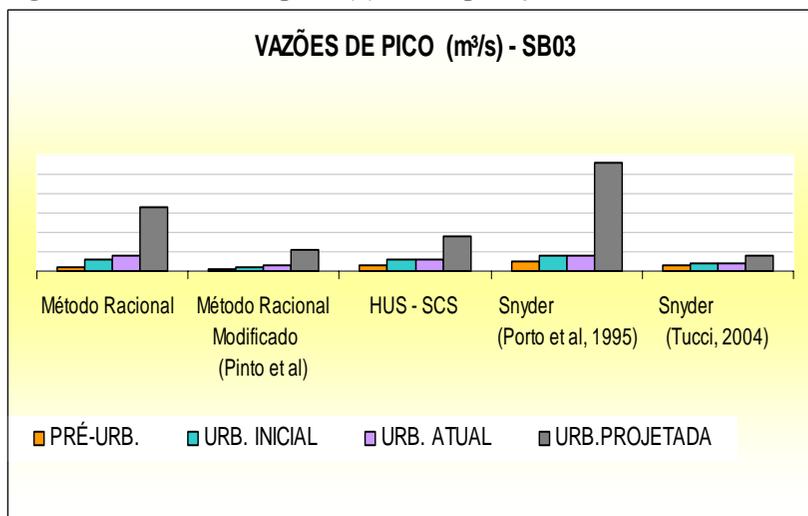


(a)

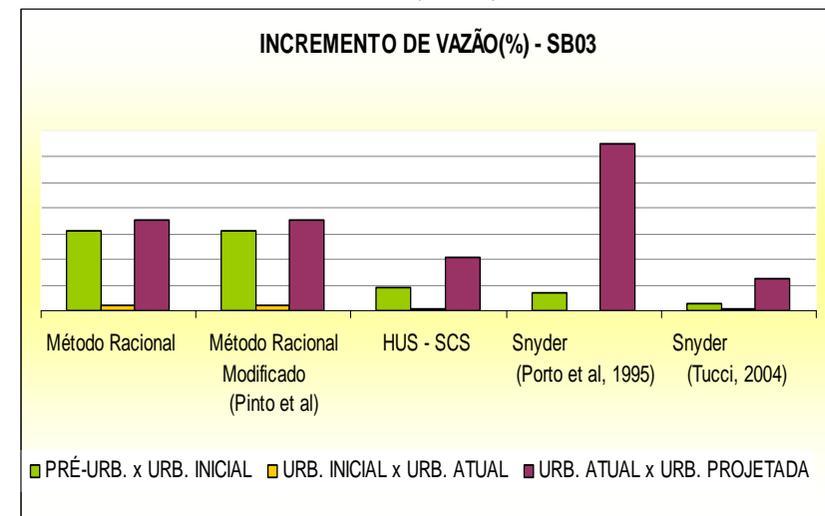


(c)

Figura 33: Vazões de pico (a) e comparação de incremento de vazão (b) entre cenários da sub-bacia 02 (SB02).



(b)



(d)

Figura 34: Vazões de pico (a) e comparação de incremento de vazão (b) entre cenários da Sub-bacia 03 (SB03).

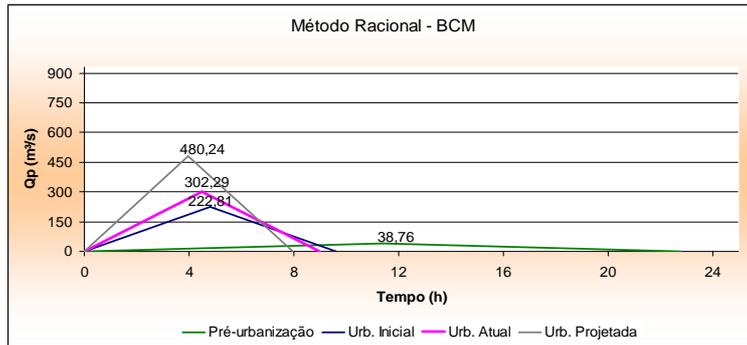
Observa-se que, apesar dos métodos Racional e Racional Modificado apresentarem consideráveis diferenças nos resultados obtidos nas vazões de picos, conforme apresentado na Tabela 26, os incrementos de vazão, ou seja, a percentagem do aumento de vazão observado entre os cenários, permaneceu o mesmo. Citamos, por exemplo, a BCM que, pelo Método Racional, obteve vazão de pico de 38,76 m³/s e 222,81 m³/s, e pelo Método Racional Modificado 8,42 m³/s e 48,38 m³/s nos cenários de pré-urbanização e urbanização inicial, respectivamente. Entretanto, apesar de o Método Racional Modificado sempre apresentar vazões de pico menores do que as do Racional, a percentagem do acréscimo de vazão entre os dois cenários é praticamente a mesma, como no caso do exemplo citado, 474,80%, conforme ilustrado nas Figura 30 a 34.

O superdimensionamento dos resultados obtidos pelo Método Racional em relação aos métodos do SCS e Snyder (Tucci, 2004), foram da ordem de 95% e 125% respectivamente, já quando comparados com Snyder (Porto et al, 1995), os resultados foram significativamente inferiores, uma diferença da ordem de 300%.

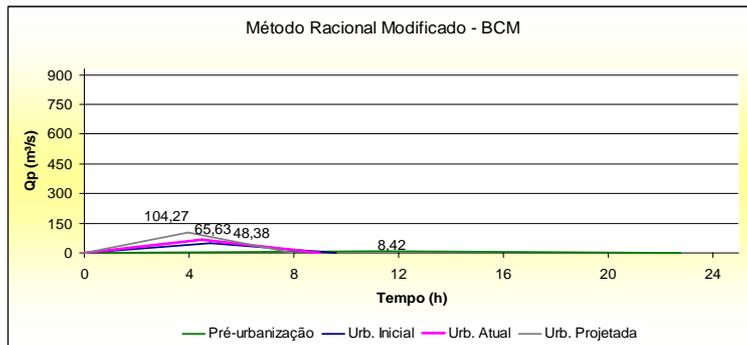
Nunes (2007) verificou que, na bacia hidrográfica do Rio Ataiuba, Paraná, as vazões calculadas pelo Método Racional Modificado foram, em geral, muito próximas aos volumes monitorados pela estação. Nesse estudo os resultados do Método Racional Modificado apresentaram valores próximos do Método de Snyder (Tucci, 2004), seguido do SCS. Pode-se concluir, por exemplo, que na SB03, a mais afetada pelo processo de urbanização, quando considerado o cenário projetado, para uma chuva com Tr de 50 anos, a vazão de pico passa de 7,84 m³/s para 44,91 m³/s, devido à impermeabilização de 93,32% do solo, que proporciona uma elevação de cerca de 475% da vazões de pico nesse período, considerando o Método do SCS.

O empirismo do Método de Snyder deixa explícito que, devido à deficiência no que tange aos esclarecimentos do autor relativo às equações, deve ser encarado com reservas (Pinto et al, 1976), característica essa que é ratificada na simulação do estudo de caso, cuja diferença entre as vazões de pico quando calculadas pelos diferentes coeficientes citados por Tucci (2004) e Porto et al (1995), apresentam resultados díspares, da ordem de 200%.

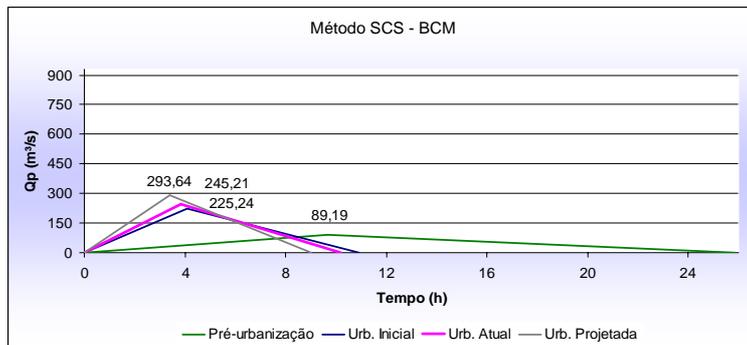
Nas Figuras 35, 36, 37 e 38 são apresentados os hidrogramas das áreas de estudos de acordo com os cinco métodos empregados, onde se observam os picos de vazões, as antecipações desses picos em relação à evolução do processo de urbanização e as diferenças de comportamento entre os métodos.



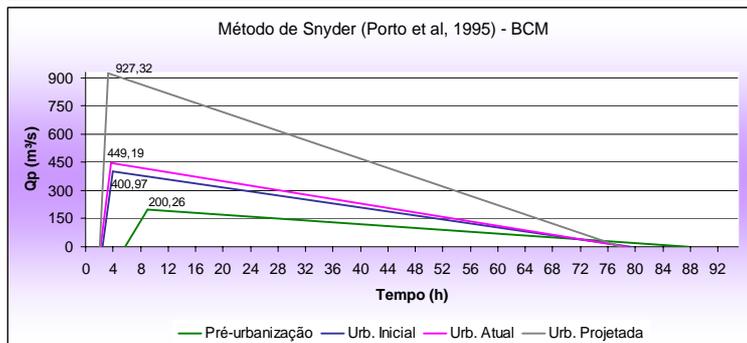
(a)



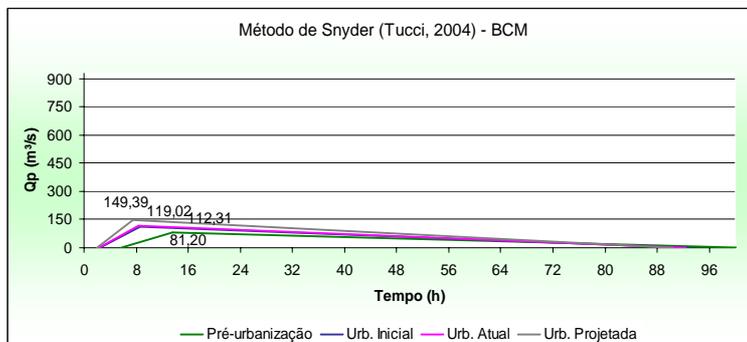
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 35: Hidrogramas para a BCM de acordo com os métodos (a) Racional, (b) Racional Modificado, (c) SCS, (d) Snyder (Porto et al, 1995) e (e) Snyder (Tucci, 2004).

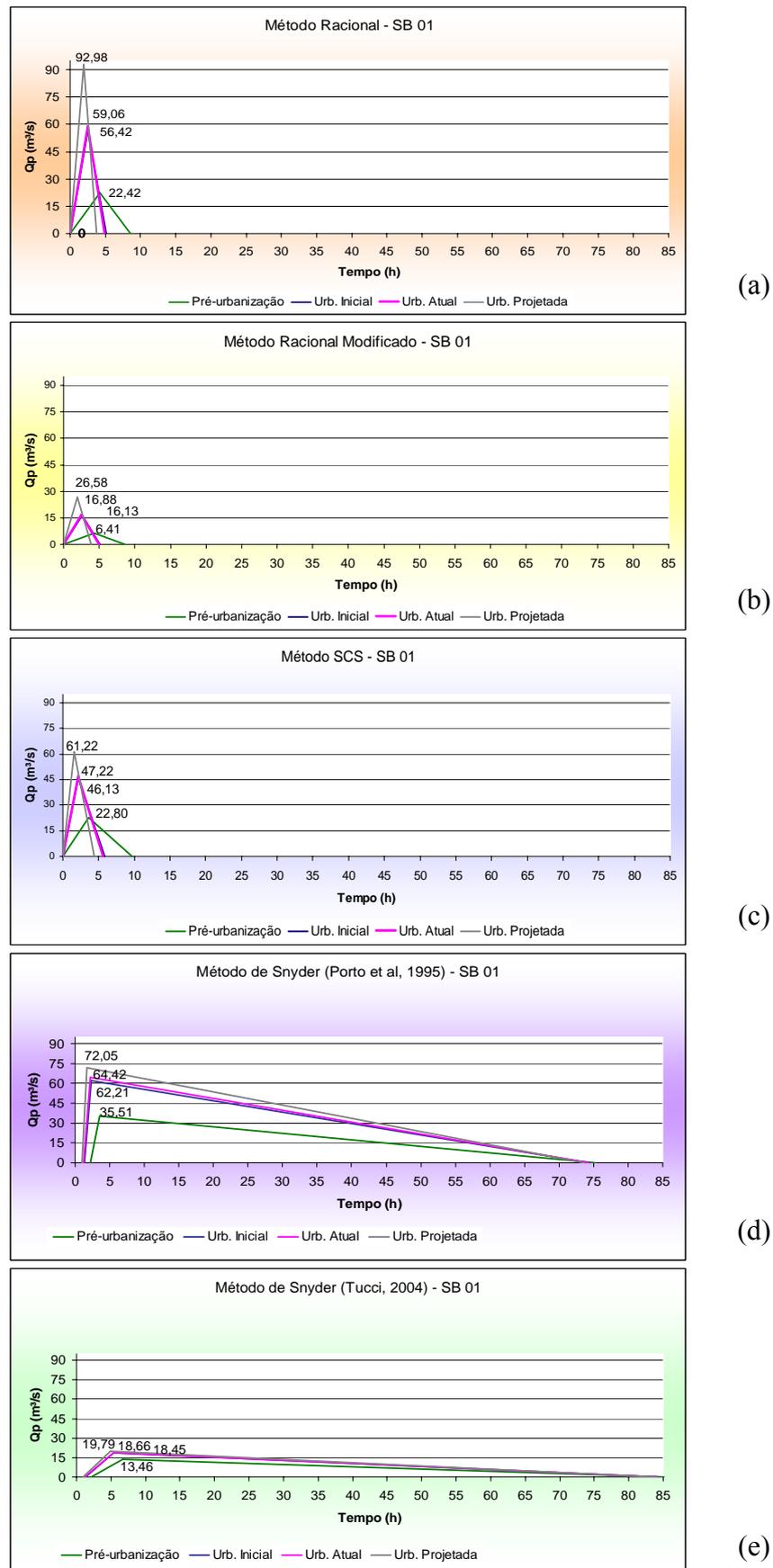


Figura 36: Hidrogramas para a SB01 de acordo com os métodos (a) Racional, (b) Racional Modificado, (c) SCS, (d) Snyder (Porto et al, 1995) e (e) Snyder (Tucci, 2004).

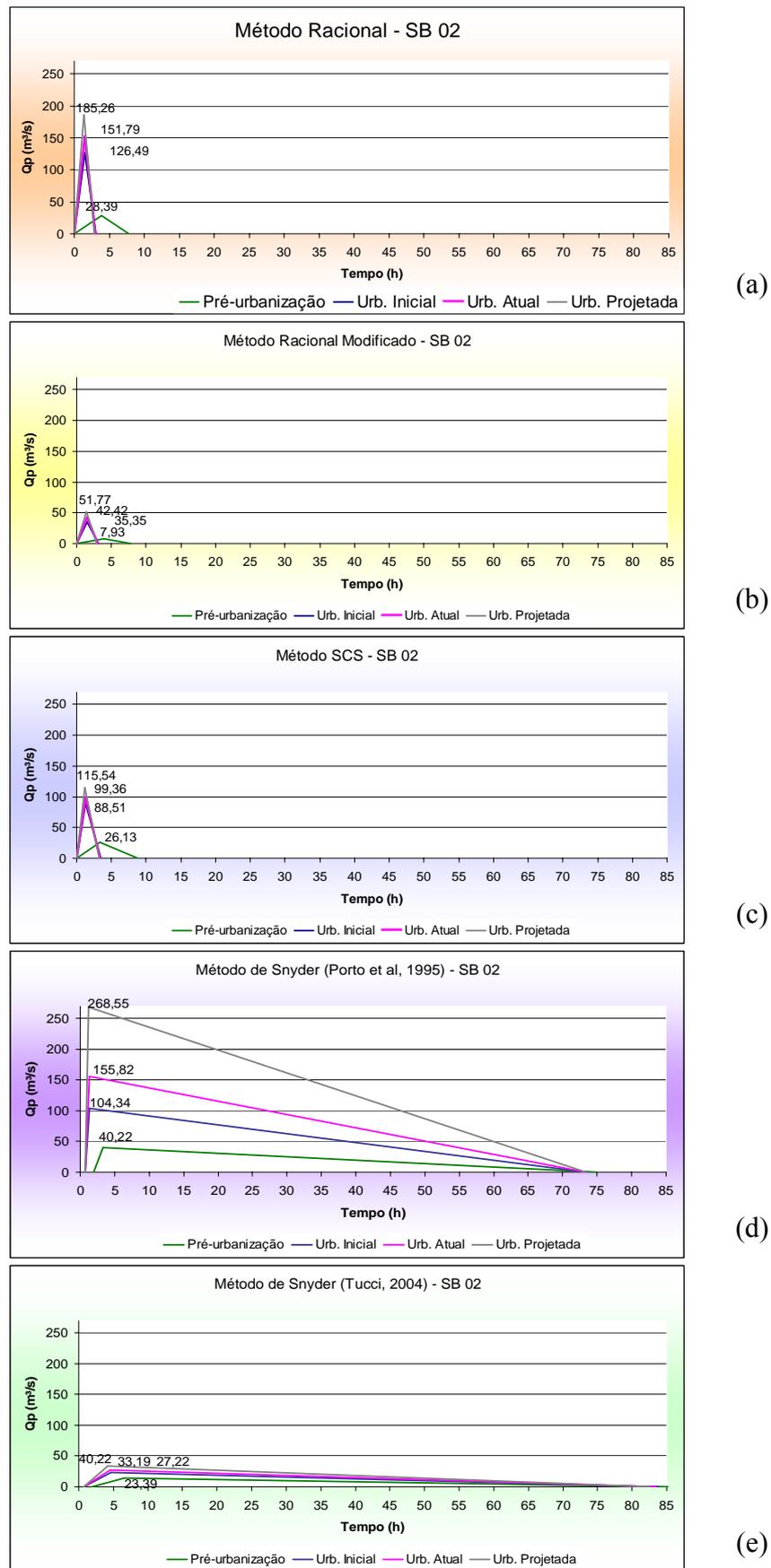


Figura 37: Hidrogramas para a SB02 de acordo com os métodos (a) Racional, (b) Racional Modificado, (c) SCS, (d) Snyder (Porto et al, 1995) e (e) Snyder (Tucci, 2004).

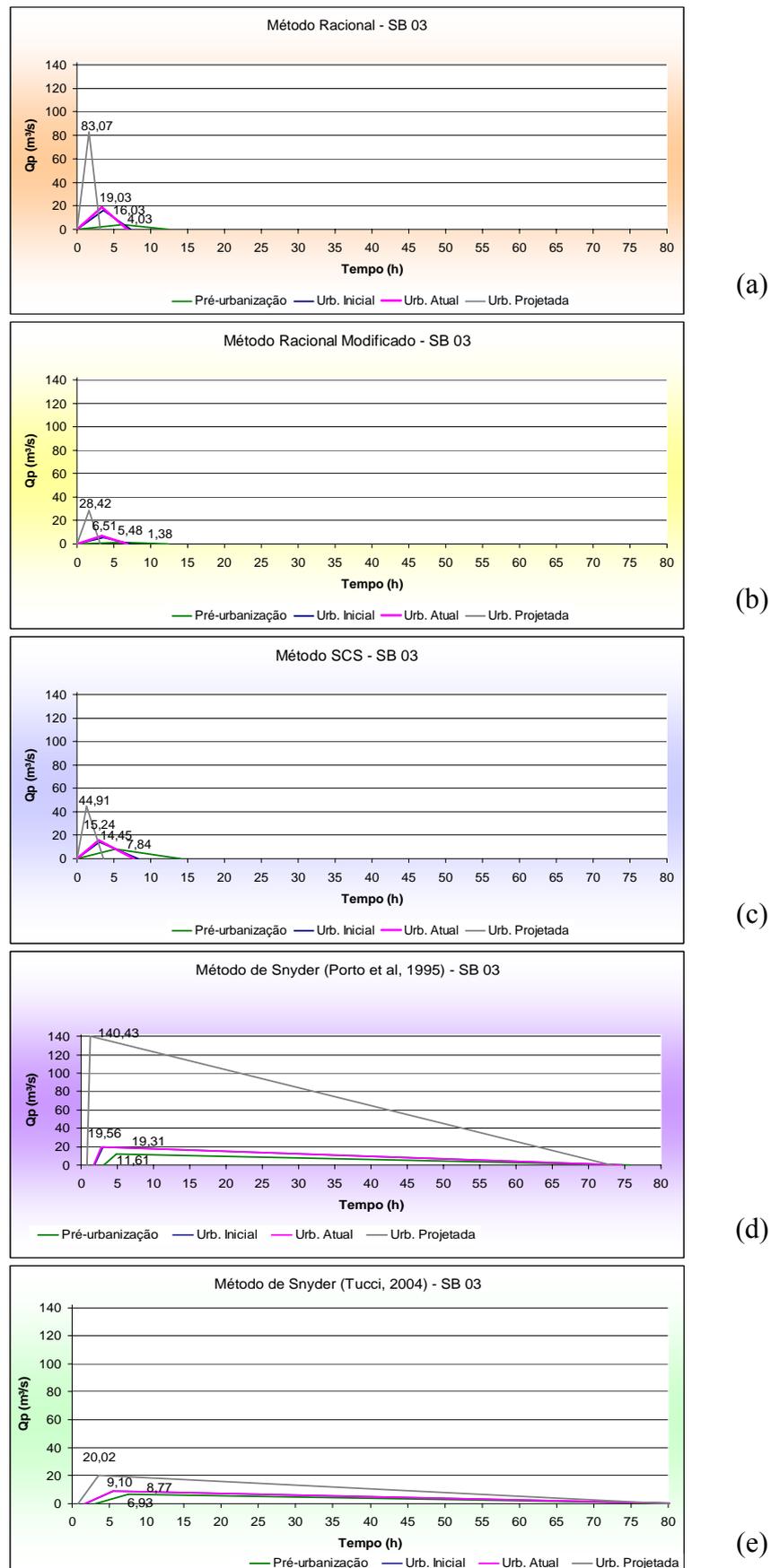


Figura 38: Hidrogramas para a SB03 de acordo com os Métodos (a) Racional, (b) Racional Modificado, (c) SCS, (d) Snyder (Porto et al, 1995) e (e) Snyder (Tucci, 2004).

CAPÍTULO 05 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A literatura especializada registra uma grande variedade de técnicas para a determinação de vazões de pico. As maiores diferenças das vazões máximas estudadas por estes métodos estão relacionadas com a qualidade das informações de entrada dos modelos e à definição de importantes parâmetros, em especial, o tempo de concentração e os coeficientes relacionados com as perdas por infiltração, detenção e armazenamento de água.

Em geral, a eficácia dos métodos é verificada apenas na saída de dados, ou seja, através da análise das vazões de pico simuladas. Sendo assim, a escolha dos parâmetros hidrológicos utilizados, a sua determinação e as interações internas entre eles torna-se complexa na medida em que o mal ajuste de parâmetros pode distorcer valores gerados, ocasionando grande incerteza.

No que tange a projetos de drenagem, a inexistência de normas técnicas possibilita que, para uma mesma bacia, haja soluções de projeto tecnicamente incompatíveis. A definição da área de abrangência do sistema deve ser cautelosamente analisada para que, considerando os vínculos hidráulicos dos canais intermunicipais que drenam a bacia hidrográfica, sem que haja a transferência do volume de água excedente à jusante, o controle de cheias em áreas que contemplam vários municípios se dê integradamente,

Observa-se que, em geral, no âmbito da prevenção às inundações, as municipalidades não apresentam quadro legislativo regulador e mitigador eficiente às inundações, assim como ações corretivas nas bacias hidrográficas. Não são observadas ações que, de maneira clara, objetiva e eficiente, melhorem, principalmente, as condições de escoamento das áreas ribeirinhas, tais como limpeza e desobstrução, alargamento e aprofundamento dos leitos menores, correção de estrangulamentos e pontos críticos assim como a elaboração de propostas de proteção marginal, tais como os parques lineares.

Em um contexto mais amplo, em nível nacional, nota-se que os responsáveis pela aplicação da lei, têm pouco ou nenhum conhecimento da lógica que orientou a formulação dos antigos instrumentos. A legislação, que se torna obsoleta com o passar do tempo, perde legitimidade e passa a ser modificada de forma pontual, caso a caso, muitas vezes sob pressões políticas ou econômicas. As mudanças recorrentes de partes específicas da legislação acabam criando uma superposição de normas, o que dificulta enormemente a sua aplicação e compreensão pelos “não iniciados”. Perde-se a eficácia e a legitimidade e cria-se um aparato normativo confuso e inconsistente, que pode ser

aplicado de forma discricionária, fortalecendo a irregularidade “legítima”, pela ineficácia da lei. Sendo assim, ratifica-se a necessidade de consideração dos efeitos da urbanização sobre enchentes na definição de medidas de planejamento de uso e ocupação do solo, como o PDU.

São consideráveis os avanços percebidos na gestão dos recursos hídricos. Entretanto, mesmo as legislações mais recentes, tal como as políticas nacional e estadual de recursos hídricos, não apresentam textos legais que definam com clareza a relação entre a gestão das águas e o planejamento do território, cuja competência e responsabilidade é, sobretudo, do governo municipal. Seja pela ausência formal, ou real, de alguns instrumentos, são patentes as indefinições quanto ao papel central do município como formulador, implementador e fiscalizador de políticas urbanas de impacto nos recursos hídricos, quer através de determinações contidas em planos diretores, leis de uso e ocupação do solo, zoneamentos, códigos de obras, parcelamentos do solo ou políticas de regularização fundiária urbana.

Aos gestores deve-se implementar a idéia de que o enfretamento das questões relacionadas à degradação dos recursos hídricos em áreas densamente urbanizadas não será resolvido, apenas, com o aporte de novas e eficientes tecnologias. A efetiva utilização de técnicas tradicionais de engenharia sanitária e ambiental articuladas com iniciativas integradas de planejamento do uso do solo e gestão de recursos hídricos poderia representar enormes avanços na conservação e proteção de mananciais e no controle de inundações urbanas.

CAPÍTULO 06 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir dos resultados fornecidos pela análise multitemporal da cobertura superficial do solo, realizada através da quantificação das áreas permeáveis e impermeáveis do terreno, pode-se concluir que o avanço do processo de urbanização na bacia hidrográfica do Córrego dos Monos tem significativo efeito sobre o sistema hidrológico da região. Os resultados gerados, através da aplicação dos modelos para simulação de vazões de pico revelam que a influência do processo de adensamento urbano sobre o incremento dessas vazões é muito expressivo.

A apresentação da caracterização do solo de bacias hidrográficas, em termo dos coeficientes C e CN permitem um acompanhamento quantitativo e qualitativo em termos de uso e ocupação do solo. Conclui-se que a determinação ponderada desses parâmetros, facilitada por operações apoiadas pelo geoprocessamento, diminui a insegurança dos modelos em função da grande sensibilidade dos Métodos Racional, Racional Modificado e do SCS a esses parâmetros.

A diferença entre os hidrogramas obtidos pelos diferentes métodos e as incertezas quanto à escolha da metodologia a ser aplicada, demonstra demanda por implantação e operação de bacias experimentais assim como melhoria da qualidade de dados pluviométricos em áreas urbanas, possibilitando verificação e calibração de modelos que embasem estudos de hidrologia urbana.

Pela análise do parâmetro “tempo de concentração” para as áreas de estudo pode-se verificar sua grande importância e sensibilidade na estimativa de vazões de pico. As fórmulas existentes, assim como a larga utilização no meio técnico, resultam em valores que podem apresentar grandes diferenças. Sendo assim, deve-se seguir o critério de aplicá-las em condições semelhantes para as quais foram determinadas.

Quanto ao SIG, as técnicas de geoprocessamento utilizadas apresentaram-se como boas alternativas para minimização das dificuldades de espacialização dos elementos hidrológicos e de uso e ocupação do solo. A integração do software do tipo SIG com os processos de avaliação dos recursos hídricos possibilitou, de forma eficiente, representar a variabilidade espacial e temporal dos elementos envolvidos. Entretanto, a aplicação dos procedimentos propostos demonstrou deficiência tanto de dados geográficos digitais quanto em suas atualizações.

O desenvolvimento do estudo demonstrou o grande potencial apresentado por técnicas de geoprocessamento para o gerenciamento das interfaces entre recursos hídricos e o

planejamento urbano. Cabe observar que este potencial não tem sido utilizado na definição de instrumentos de planejamento territorial.

De forma clara, nota-se que a proposta do PDU do município de Cachoeiro de Itapemirim para o uso e ocupação do solo deixa à margem da primazia questões relacionadas com preservação dos recursos hídricos e inundações. As alterações do uso do solo propostas pela legislação, não pautando-se em critérios hidrológicos, incrementam a vulnerabilidade da população aos eventos extremos da natureza. Percebe-se postura absorta em relação à urbanização ilegal que, precedida pela destruição da cobertura vegetal e movimentações de terra, com conseqüente incremento da erosão, desvio ou mesmo supressão de cursos d'água, concorrem para o desequilíbrio do ciclo hidrológico.

No estudo de caso do presente estudo adotou-se bacia hidrográfica cuja área de drenagem inscreve-se no perímetro do Município de Cachoeiro de Itapemirim, entretanto ressalta-se que, no que tange à gestão da água, o território de referência, em geral, não coincide com os limites do município, podendo a bacia hidrográfica ser formada por contribuições territoriais municipais distintas. De acordo com a Constituição Federal de 1988 o recurso hídrico é de domínio da União, dos Estados e do Distrito Federal e os municípios não possuem atribuições para tratar da gestão das águas. Entretanto, se legislar o território é competência do município, a municipalidade intervém na quantidade e qualidade da água através do ordenamento territorial. Sendo assim, recomenda-se que estudos futuros avaliem bacias hidrográficas intermunicipais, analisando como ações de uso e ocupação do solo interferem nos recursos hídricos de municípios vizinhos, principalmente os localizados à jusante.

Outrossim, recomenda-se que pesquisas futuras busquem a melhor compreensão da participação dos municípios na gestão dos corpos hídricos à medida em que se dá através dos Conselhos e Comitês de Bacias Hidrográficas mas que a legislação não concede garantia da representatividade de todos os municípios nesses órgãos.

Observando o desencontro entre as posturas que envolvem o gerenciamento de uso e ocupação do solo e as legislações que envolvem os recursos hídricos, recomenda-se que trabalhos futuros proponham critérios legislativos relativos aos efluentes da drenagem urbana lançada nos rios e à ordenação das áreas de risco, tal como a outorga do uso da água e zoneamentos que contemplem objetivamente a água urbana.

CAPÍTULO 07 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHNERT, F. **Estudo de inundações devido a enchentes**: uma abordagem de planejamento utilizando sistemas de informação geográfica. 2000. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo.

BARROS, M. T. L.de. Drenagem urbana: bases conceituais e planejamento. In: PHILLIPI JÚNIOR, A. (Org) **Saneamento, saúde e ambiente: fundamentos para um desenvolvimento sustentável**. 2 ed. Barueri, SP: Editora Manoele Ltda., 2005. Cap.7, p.179-185.

BONDUKI, N. G. A guisa de conclusão: das experiências concretas para a construção de um novo ideário em políticas urbanas. In: _____ (Org.) **Habitat: As práticas bem-sucedidas em habitação, meio ambiente e gestão urbana nas cidades brasileiras**. São Paulo: Studio Nobel, 1996, cap. 07, p.261-267.

BRASIL. Câmara dos Deputados. **Estatuto da Cidade**: guia para implementação pelos municípios e cidadãos. Realização: Instituto Pólis/Laboratório de Desenvolvimento Local. Brasília: Câmara dos Deputados, Coordenação de Publicações, 2001. 274 p.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília, 1997.

BRASIL. Senado Federal. **Constituição Federal da República Federativa do Brasil**. 1998.

CARNEIRO, P. R. F. ; CARDOSO, A. L. ; AZEVEDO, J. P. S. **Gestão de Recursos Hídricos Integrada ao Planejamento Urbano**. In: III Encontro da ANPPAS (Associação Nacional de Pós-graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade), 2006, Brasília - DF. Anais do III Encontro da ANPPAS. Disponível em <http://www.anppas.org.br/encontro_anual/encontro3/GT13.html>. Acesso em: 03 Abril 2008.

CAMPANA, N. A.; EID, N. J.. Monitoramento de Uso do solo. In: FINEP. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2001. 628 p.

CANHOLI, C.P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. 1. ed., São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

CARDOSO NETO, A. **Sistemas urbanos de drenagem**. Florianópolis, Laboratório de Drenagem do Departamento de Engenharia Sanitária da Universidade Federal de Santa Catarina, 1998. 19 p. Disponível em: <www.ana.gov.br/.../CDOC/ProducaoAcademica/Antonio%20Cardoso%20Neto/Introducao_a_drenagem_urbana.pdf>. Acesso em: 12 Maio 2008.

CETESB. 1979. **Drenagem urbana: manual de projeto**. São Paulo. 468p.

CHAFFUN, N. Dinâmica global e desafio urbano. In: BONDUKI, N. (Org.) **Habitat: As práticas bem-sucedidas em habitação, meio ambiente e gestão urbana nas cidades brasileiras**. São Paulo: Studio Nobel, 1996, cap. 01, p. 18–37.

CHOW, V. T.; MAIDNENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied hidrology**. New York: McGraw-Hill, 1988. 572p.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2. ed. - Sao Paulo: Edgard Blucher, 1974.

COLLARES, E. G. **Avaliação de alterações em redes de drenagem de microbacias como subsídio ao zoneamento geoambiental de bacias hidrográficas**: aplicação na bacia hidrográfica do rio Capivari – SP. 2000. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

CRISTELO, V. P. **Aplicações de sistemas de informações geográficas na estimativa de vazões máximas de projeto**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo.

DNIT - Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Manual de Hidrologia Básica Para Estruturas de Drenagem. 2 ed. Rio de Janeiro, 2005.

ELESBON, A. A. A. **Utilização de sistemas de informação geográfica na regionalização de vazões : estudo de caso**: bacias dos rios Mucuri, Itaúnas e São Mateus. 2004. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Súmula da 10ª reunião técnica de levantamento de solos**. Rio de Janeiro, 1979. 83p. (EMPRAPA-SNLCS.Miscelânea, 1)

FERNANDES, C. **Microdrenagem – um estudo inicial**. DEC/CCT/UFPB, Campinas Grande, 2002, 196p.

FRANCO, E.J. **Dimensionamento de bacias de detenção das água pluviais com base no Método Racional**. 2004. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná.

FREITAS, V. A. L. ; RIBEIRO, M. G. ; CENTENO, J. A. S. **Análise Temporal e Quantitativa da Impermeabilização dos Solos Através de Imagens LANDSAT e CBERS na cidade de Curitiba/PR**. In: COBRAC, 2006, Florianópolis. 7^o Congresso de Cadastro Técnico Multifinalitário e Gestão Territorial, 2006.

GARCEZ, L. N. **Hidrologia**. Sao Paulo: Edgard Blucher, 1974.

GENOVEZ, A. M.. Vazões Máximas. In: FINEP. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2001. 628 p.

GUIMARÃES, P.G. Ecopolíticas em áreas urbanas: a dimensão política dos indicadores de qualidade ambiental. In: SOUZA, A. (Org.). **Debates urbanos 7 – Qualidade da vida urbana**. Rio de Janeiro: Zahar Editores S. A., 1984. p.21-53.

IBGE – Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB), 2000. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br>> Acesso em: 26 abril 2007.

ICE, G. (2004). “**History of innovative best management practice development and its role in addressing water quality limited waterbodies.**” In: *Journal of Environmental Engineering*, 130(6), 684-689.

JUAN, C. B. ; TUCCI, C. E. M. Precipitação. In: Tucci C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. v3. ed. - Porto Alegre: Editora da UFRS: ABRH, 2004. cap. 5, p. 177-242. (Coleção ABRH de recursos hídricos ; v.4).

JUSTINO, E. A. **Estudo do controle do escoamento superficial com o uso de reservatório de retenção na bacia do Córrego Lagoinha, Município de Uberlândia – MG**. 2004. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia.

LEE, J. B., et all. **First flush analysis of urban storm runoff**. (2002) *The Science of the Total Environment*, 293 (1-3), pp. 163-175.

MACIEL JR., P. **Zonamento das águas: um instrumento de gestão dos recursos hídricos**. 1ª ed. RC Editora Gráfica Ltda: Belo Horizonte, 2000.

MISHRA S.K, SINGH V.P. (1999) **Another look at the SCS-CN method**. J Hydrol Eng, ASCE 4(3):257–264

MISHRA S.K, JAIN M., BHUNYA P., SINGH V.P. (2005). **Field applicability of the SCS-CN based Mishra Singh general model and its variants**. *Water Resources Management*, PP. 37-62(26).

MISHRA S.K, SINGH V.P. (2002) **SCS-CN method: part-I: derivation of SCS-CN based models**. *Acta Geophys Pol* 50(3):457–477.

MISHRA S.K, SINGH V.P. (2003) **Soil conservation service curve number methodology**. Vol 43. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3. ed. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2005. 320 p.

McCuen, R. H. **A guide to hydrologic analysis using SCS methods**. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1982.176p.

MOTA, S. **Introdução à engenharia ambiental**. 4. ed., Rio de Janeiro: ABES, 2006.

_____. **Preservação e conservação de recursos hídricos**. 2. ed. rev e atualizada, Rio de Janeiro: ABES, 1985.

_____. **Urbanização e meio ambiente**. 3. ed., Rio de Janeiro: ABES, 2003.

NASCIMENTO, N.:O. ; BARBOSA, R.L.A ; COSTA, O.V ; BAPTISTA, M. B. . Relações entre o planejamento urbano e o planejamento dos sistemas de drenagem: Estudo de caso do Ribeirão Areias em Betim, MG. In: XXVII Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitaria y Ambiental, 2000, Porto Alegre. *Anais do XXVII Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitaria y Ambianta, 2000. não foi usado mas vou deixar*

NUNES, F. G. **A influência do uso e ocupação do solo nas vazões de pico na bacia hidrográfica do Rio Atuba**. 2007. Tese (doutorado). Programa de pós graduação em geologia, Universidade Federal do Paraná.

PATIL, J.P.; SARANGI, A. ; SINGH, O. P.; SINGH, A. K.; AHMAD, T. **Development of a GIS Interface for Estimation of Runoff from Watersheds**. (2007). *Water Resources Management*, 22 (9), pp. 1221-1239.

PATIL, J.P.; SARANGI, A. ; SINGH, O. P.; SINGH, A. K.; AHMAD, T. **Evaluation of modified CN methods for watershed runoff estimation using a GIS-based interface.** (2008). Byosystems Engineering, 100, pp. 137-46.

PHILLIPI JÚNIOR, A.; MALHEIROS, T.F.; AGUIAR, A. de O. e. Indicadores de desenvolvimento sustentável. In: _____ (Org). **Saneamento, saúde e ambiente: fundamentos para um desenvolvimento sustentável.** 2 ed. Barueri, SP: Editora Manoele Ltda., 2005. cap.22, p.761-808.

PINTO, N. L. S.; HOLTZ, A.C.T.; MARTINS, J.A.; GOMIDE, F.L.S. **Hidrologia Básica.** São Paulo: E. Blucher, 1976. 278p.

POMPÊO, A.C. **Drenagem urbana sustentável.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 5, nº. 1, pag. 15-23, Porto Alegre, RS, 2000.

PORTO, R. L. ; ZAHED, K. ; TUCCI, C. ; BIDONE, F. Drenagem Urbana. In: Tucci C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação.** v3. ed. - Porto Alegre: Editora da UFRS: ABRH, 2004. cap. 21, p. 805-848. (Coleção ABRH de recursos hídricos ; v.4).

PORTO, R. L. Escoamento Superficial Direto. In: Tucci C. E. M. et al. **Drenagem Urbana.** v5. Porto Alegre: ABRH/Editora da Universidade - UFRGS, 1995. cap. 4, p. 107-166.

PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V. S.; SILVA, D. D. (2004) **Escoamento Superficial.** 2ª ed. Ed. Viçosa – UFV.

RAMOS, C.L. et al. **Diretrizes básicas para projetos de drenagem urbana no município de São Paulo.** São Paulo: FCTH (reedição eletrônica), 1999.

RIBEIRO, P. R. (2002) **Avaliação das alterações na rede de drenagem de sub-bacias hidrográficas da porção média da bacia do Rio Capibari (SP):** escala 1:25.000 – Subsídio para o planejamento integrado. Dissertação (mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos/Departamento de Geotecnia – Universidade de São Paulo, 206p.

ROGERS, R. **Cidades para um pequeno planeta.** 1 ed., Londres: Fabers and Fabers, 1997.

SANTOS, A. R. dos. **ArcGis 9.1 total: aplicações para dados espaciais.** Vitória, ES: Fundagres, 2007.

SARMENTO, R.. **Altura, duração, frequência das chuvas intensas no Estado do Espírito Santo.** -. Vitória, 1985.

SILVA, G. B. L. (2006). **Avaliação Experimental Sobre a Eficiência de Superfícies Permeáveis com Vistas ao Controle do Escoamento Superficial em Áreas Urbanas.** Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 180p.

SILVA, R. T.; PORTO, M. F. A. **Gestão urbana e gestão das águas: caminhos da integração.** Estudos Avançados 17 (47), 2003.

SILVA, S. F. (2000). **Avaliação das alterações ambientais na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão do Piçarrão, Campinas-SP.** Dissertação de mestrado em Geotecnia. Escola de Engenharia de São Carlos, SP.

SILVEIRA, A. L. L. (2002) “**Drenagem Urbana: aspectos de gestão**IPH/UFRGS, Fundo Setorial de Recursos Hídricos/CNPq. Porto Alegre. 70p. Disponível em: <www.iph.ufrgs.br/grd/disciplinas/dhh/iph01014/APOSTILADRENAGEMGESTORES2002.pdf> Acesso em: 16 Maio 2008.

STEFFEN, J. L.; RONDON, M.A.C.**Determinação da vazão de projeto em bacias urbanas.** XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000, Fortaleza. Anais do XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000 v. III.

TUCCI, C.E.M. Águas urbanas: interfaces do gerenciamento. In: PHILLIPI JÚNIOR, A. (Org.) **Saneamento, saúde e ambiente: fundamentos para um desenvolvimento sustentável.** 2. ed., Barueri, SP: Editora Manoele Ltda., 2005. cap.10, p.375-414.

_____. Drenagem urbana. **Ciência e Cultura.** São Paulo, v. 55, n. 4, 2003 . Disponível em: <http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252003000400020&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 07 Fev. 2008.

_____. Escoamento superficial. In: Tucci C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação.** 3. ed. - Porto Alegre: Editora da UFRS: ABRH, 2004. cap. 11, p. 391-441 (Coleção ABRH de recursos hídricos ; v.4)

_____. **Inundações Urbanas.** 1. ed. – Porto Alegre: ABRH/RHAMA, 2007. 393p. (Coleção ABRH de recursos hídricos ; v.11)

_____. **Modelos Hidrológicos**. 2. ed. - Porto Alegre: Editora da UFRS: ABRH, 2005. 678 p.

_____. Vazão máxima e hidrograma de projeto. In: Tucci C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3. ed. - Porto Alegre: Editora da UFRS: 004. cap. 14, p. 527-572 (Coleção ABRH de recursos hídricos ; v.4)ABRH, 2.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. Sao Paulo: McGraw-Hill, 1975.

WILKEN, Paulo Sampaio. **Engenharia de drenagem superficial**. Sao Paulo: Companhia Tecnologia de Saneamento Ambiental, 1978.