

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

ISABEL CRISTINA MORAES

ANÁLISE DA DINÂMICA DO USO DA TERRA
E SUA INTERFERÊNCIA EM INUNDAÇÕES
NA CIDADE DE RIO CLARO (SP)

Dissertação de mestrado apresentada ao
Instituto de Geociências e Ciências
Exatas - Câmpus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista Júlio de
Mesquita Filho, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Mestre em
Geologia Regional.

Rio Claro - SP

2011

ISABEL CRISTINA MORAES

ANÁLISE DA DINÂMICA DO USO DA TERRA
E SUA INTERFERÊNCIA EM INUNDAÇÕES
NA CIDADE DE RIO CLARO (SP)

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Instituto de Geociências e Ciências
Exatas - Câmpus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista Júlio de
Mesquita Filho, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Mestre
Geologia Regional.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Fabiano Tomazini da Conceição

Prof. Dr^a Regina Célia de Oliveira

Prof. Dr. Sérgio dos Anjos Ferreira Pinto

Rio Claro, ____ de _____ de _____.

627.54 Moraes, Isabel Cristina
M827a Análise da dinâmica do uso da terra e sua interferência
em inundações na cidade de Rio Claro (SP) / Isabel Cristina
Moraes. - Rio Claro : [s.n.], 2011
114 f. : il., figs., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientador: Fabiano Tomazini da Conceição
Co-Orientador: Rodrigo Braga Moruzzi

1. Drenagem. 2. Drenagem urbana. 3. Uso e ocupação da
terra. 4. Escoamento superficial. 5. Simulação hidráulica e
hidrológica. I. Título.

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI - Biblioteca da UNESP
Campus de Rio Claro/SP

*Dedico este trabalho à minha família,
minha mãe Angela, meu pai Antonio e
minhas irmãs de coração Roberta e Isabela.*

Agradeço:

À Capes, pela bolsa concedida.

Ao CNPq, pelo apoio e fomento à pesquisa, que contribuiu de forma significativa para a realização da mesma.

Ao orientador, prof. Fabiano, por confiar no meu trabalho, pelo apoio, orientação e amizade.

Ao prof. Rodrigo Moruzzi, pela disponibilidade de ajudar e esclarecer dúvidas.

À prof. Cenira, pela disponibilidade de participar deste trabalho, desde o início, e pelas eventuais orientações que contribuíram para a realização da pesquisa.

Ao prof. Sérgio dos Anjos pelos ensinamentos.

Ao Dener e ao Luiz Henrique por todos os auxílios técnicos e amizade.

À Sueli, que me ajudou nos trabalhos em laboratório.

À Rosangela, pelo auxílio.

Aos estagiários Helena e Marcelo, que me auxiliaram nos trabalhos de campo e nos softwares, e que participaram no desenvolvimento da pesquisa.

Ao Alexandre (Madalena) e ao Edvaldo (Tim), pelo auxílio nos trabalhos de campo, e pela amizade e carinho.

À Michele Barbosa pelo apoio, paciência, incentivo e correções realizadas.

À Edvania pelo incentivo e grande amizade, que me auxiliaram fortemente neste trabalho e em todos os outros que fizemos juntas.

À minha amiga Pâmela, que acompanhou o desenvolvimento do trabalho, pelo grande carinho e amizade, que contribuiu para minha formação.

Aos meus primos e parceiros Jocasta e Cláudio pelo apoio e companheirismo.

Aos meus amigos Raquel, Bruno (Perigoso), Itú, Glaucia, Lindyce, Chéu, Aninha, Eder, Letícia e Tamara.

À minha casa, Mayra, Raquel e Isabela.

Aos amigos do Madalena, PC, Ellen, Mirian, Marta, Marcela, Guarú e Jussara.

Ao Ricardo, pelo apoio, incentivo e companheirismo para desenvolver meus trabalhos.

À minha família, pai, mãe, Isa e Rô, e meus avós, a quem dedico todas as minhas conquistas.

Resumo

Nos estudos sobre o impacto das atividades antrópicas sobre o ambiente, têm-se a urbanização como uma das formas mais intensas de interferência na cobertura de superfície e alteração da dinâmica do escoamento superficial. No processo de uso e ocupação da terra, que contextualiza a formação das cidades, as populações comumente se fixavam às margens dos rios, e com o crescimento destes centros urbanos e o acréscimo de áreas impermeabilizadas houve a supressão das áreas de várzea, ocasionando situações de inundação. Em ambiente natural, as enchentes sempre fizeram parte da dinâmica natural do ciclo hidrológico. A impermeabilização da superfície, intensificada no Brasil principalmente a partir do crescimento das cidades na década de 70, gerou ao mesmo tempo a diminuição da capacidade de infiltração, o aumento do volume e da velocidade do escoamento superficial e a antecipação dos picos de cheias, provocando inundações mesmo em áreas que, em condições naturais, não apresentavam predisposição a tais eventos. À luz da Teoria dos Sistemas, parte-se da premissa de que a ocupação antrópica, sobretudo sob a forma de urbanização, interfere nas condições naturais do comportamento de uma bacia hidrográfica. Este trabalho objetivou caracterizar e avaliar as condições de drenagem na cidade de Rio Claro (SP), em diferentes cenários de ocupação urbana, considerando a bacia hidrográfica do Córrego da Servidão como unidade de análise. Por meio dos métodos do SCS (1986) – Soil Conservation Service foram avaliados os efeitos criados pela ocupação urbana no escoamento superficial em cenários de pré-canalização do córrego (1958), quando o córrego foi canalizado (1972), e no cenário atual (2006). As simulações hidráulicas e hidrológicas, implementadas no software IPHS1, foram utilizadas para compreender as variáveis relacionadas a situações de inundação considerando os diferentes eventos de chuva. A avaliação do comportamento da drenagem sob a perspectiva da evolução da ocupação urbana foi realizada com o objetivo de gerar reflexões sobre o planejamento do município de Rio Claro dando ao mesmo tempo um alicerce às futuras ações.

Palavras-chave: Drenagem Urbana. Uso e ocupação da terra. Escoamento superficial. Simulação hidrológica.

Abstract

In the studies about the impact of human activities in the natural environment, urbanization is one of the most intense forms of interference in the surface coverage and changes in runoff. Concerning the use of land, which contextualizes the cities formation, the populations were fixed next to the rivers, and the increase of impermeable areas caused the suppression of floodplain, changing the river's dynamics and therefore causing flooding situations. In natural environments, floods have always been part of the natural dynamics of the hydrological cycle. The surface sealing, intensified in Brazil mainly through the growth of cities in the 70's, led to a reduced infiltration capacity, an increased volume and velocity of runoff, and an anticipation of floods, causing flooding even in areas that, in natural conditions, had no predisposition to such events. From the premise that human occupation interferes in the natural conditions of watersheds, this work aimed at characterizing and evaluating the drainage conditions in the city of Rio Claro (SP) in different sceneries of urbanization, considering the watershed of the stream of Servidão as the unit of analysis. The SCS method (1986) - Soil Conservation Service was used to evaluate the effects created by the urban occupation in the scenery before the channeling of the stream (1958), in a scenery where the stream was channeled (1972), and the current one (2006). The hydrological simulations, implemented in the software IPHS1 according to the different rainfall events, were used as a way to understand the variables related to flood situations. From the perspective of the evolution of urban occupation, the evaluation of the drainage behavior was held to sum reflections and subsidy actions which contribute to the planning of the municipality of Rio Claro, SP.

Keywords: Urban Drainage. Use of land. Runoff. Hydrologic simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da Bacia do Córrego da Servidão, inserida na área urbana de Rio Claro (SP).	32
Figura 2: Mapa de declividade da Bacia do Córrego da Servidão.	36
Figura 3: Série histórica de dados pluviométricos de Rio Claro (SP).	40
Figura 4: Setor de confluência do Córrego do Wenzel com o Córrego da Servidão (próximo a Rodoviária).	45
Figura 5: Setor canalizado, no bairro Inocoop, com atenuação das enchentes pelas obras em andamento.	45
Figura 6: Tradagens de amostras de solo e observação dos perfis até a profundidade de 1,50 m .	49
Figura 7: Mosaico da Bacia Hidrográfica do Córrego da Servidão na cidade de Rio Claro nos anos de 1958, 1972 e 2006.	53
Figura 8: Ábaco para a determinação da CN para área impermeável conectada.	57
Figura 9: Ábaco para a determinação da CN para área impermeável conectada e total da área impermeável menor que 30%.	58
Figura 10 - Pontos de coleta de solo e indicação dos grupos hidrológicos (SCS, 2004).	66
Figura 11: Mapa de uso e ocupação da terra no cenário de 1958.	68
Figura 12: Mapa de uso da terra no cenário de 1972.	69
Figura 13: Mapa de uso da terra no cenário de 2006.	70
Figura 14: Mapa síntese da evolução da área urbana de Rio Claro entre os anos de 1958 a 2006.	71
Figura 15: Área das classes de uso e ocupação da terra em 1958, 1972 e 2006.	73
Figura 16 - Parâmetros de entrada para o mapeamento das áreas preferenciais de escoamento superficial.	75
Figura 17: Áreas preferenciais de escoamento superficial.	76
Figura 18: Definição das sub-bacias e grupos hidrológicos de solo.	78

Figura 19: Valores de CN calculados para situação intermediária de escoamento nos cenários de 1958, 1972 e 2006 para cada sub-bacia.	82
Figura 20: Hidrogramas das sub-bacias para uma TR de 5 anos.	85
Figura 21: Hidrogramas das sub-bacias para uma TR de 10 anos.	86
Figura 22: Hidrogramas das sub-bacias para uma TR de 20 anos.	87
Figura 23: Hidrogramas das sub-bacias para uma TR de 50 anos.	88
Figura 24: Hidrograma do reservatório Lago Azul em 1972.	92
Figura 25: Hidrograma do reservatório Lago Azul em 2006.	93
Figura 26: Mapa de extravasamento na rua 1972.	95
Figura 27: Mapa de extravasamento na rua em 2006.	96
Figura 28: Organização do módulo bacia.	109
Figura 29: Organização do módulo trecho para 1958 (a), 1972 (b) e 2006 (c).	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Alturas mensais de precipitação para o período de 1936 a 2010.	40
Tabela 2: Crescimento demográfico de Rio Claro (Dados do SEADE).	43
Tabela 3: Definição de padrões de reconhecimento de alvos de cobertura vegetal e intra-urbanos por meio de imagens aerofotogramétricas.	54
Tabela 4: Valores de CN para diferentes uso e ocupação da terra (SCS, 2004)	58
Tabela 5: Resultado dos ensaios granulométricos e grupo hidrológico associado.	64
Tabela 6: Área, grupo hidrológico e declividade média d canal de cada sub-bacia	77
Tabela 7: Porcentagem de área de acordo com o uso e ocupação de cada sub-bacia para o cenário de 1958.	79
Tabela 8: Porcentagem de área de acordo com o uso e ocupação de cada sub-bacia para o cenário de 1972.	79
Tabela 9: Porcentagem de área de acordo com o uso e ocupação de cada sub-bacia para o cenário de 2006.	80
Tabela 10: Adaptação das classes de uso e ocupação para as classes SCS.	80
Tabela 11: Valores de CN encontrados para os três cenários de estudo nas três diferentes situações propostas pelo IPHS1 para cada sub-bacia.	81
Tabela 12: Dados de entrada para o módulo bacia	109
Tabela 13: Parâmetros de entrada do vertedor	110
Tabela 14: Parâmetros de entrada do orifício	110
Tabela 15: Parâmetros de entrada do valor da cota	110
Tabela 16: Estimativa de n de Manning para o revestimento das superfícies das margens, sugeridos por Crow (1973) e Walesh (1989)	111
Tabela 17: Estimativa de n de Manning para as superfícies dos canais, sugeridas por Chow (1973), French (1985), Macaferri (2002) e Mays (2001)	111
Tabela 18: Parâmetros de entrada para canais canalizados	111
Tabela 19: Parâmetros de entrada para canais naturais	111
Tabela 20: Dados de entrada para o módulo rio no cenário de 1958	112

Tabela 21: Dados de entrada para o módulo rio no cenário de 1972	112
Tabela 22: Dados de entrada para o módulo rio no cenário de 2006	113

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1. Bacia hidrográfica e os impactos da urbanização	16
2.2. O uso de geotecnologias no mapeamento da ocupação de terras urbanas	22
2.3. Modelagem hidrológica e planejamento urbano	26
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	31
3.1. Localização e aspectos gerais	31
3.2. A área de estudo	33
3.3. Breve histórico de ocupação da cidade de Rio Claro	41
4. MATERIAIS E MÉTODOS	46
4.1. Materiais	46
4.2. O método do SCS – Soil Conservation Service	46
4.3. Caracterização hidrológica dos solos aplicada ao Método SCS	47
4.4. Processamento digitais de imagens e mapeamento de uso e ocupação da terra	50
4.5. Estimativa da Curva-Número (CN)	57
4.6. Discretização da bacia hidrográfica	59
4.7. Modelagem hidrológica para verificação de inundações	61
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
5.1. Caracterização dos grupos hidrológicos de solos	64
5.2. Caracterização do uso e ocupação da terra	67
5.3. Discretização da Bacia do Córrego da Servidão	74
5.4. Cálculo da Curva Número	79
5.5. Modelagem hidrológica	83
5.6. Comportamento hidrológico do reservatório de retenção “Lago Azul”	92
5.7. Caracterização dos trechos de inundação	94
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	99
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
APÊNDICE 1 – MÓDULO BACIA	109

APÊNDICE 2 – MÓDULO RESERVATÓRIO	110
APÊNDICE 3 – MÓDULO TRECHO	111

1. INTRODUÇÃO

Historicamente, diversas cidades se desenvolveram à margem dos rios, o que ocorre devido à disponibilidade de água e alimentos para a sobrevivência. Com as cidades brasileiras não foi diferente. Em ambientes tropicais, como o observado na maior parte do território brasileiro, as características climáticas, juntamente com a abundância de água, propiciam condições de drenagem superficial e sub-superficial que culminam com uma alta frequência espacial de cursos de água.

A cidade é uma das ações mais intensas do homem sobre o ambiente, e seu crescimento desordenado pode desencadear diversos impactos ambientais e sociais. Com o passar do tempo, houve crescimento das áreas urbanas, ocasionando a impermeabilização das vertentes pelo adensamento de edificações e arruamentos, contribuindo para aumentar o número de casos de enchentes e inundações.

De acordo com o banco de dados Emergency Database - EM-DAT (OFDA/CRED, 2011), que realiza uma compilação de dados e informações sobre a ocorrência de desastres obtidos por diversas fontes como a agências das Nações Unidas, organizações não governamentais, institutos de pesquisa e agências de notícias, o Brasil é um dos países do mundo mais afetados por inundações, tendo sido registradas desde 1960 mais de 18 milhões de pessoas afetadas pelas inundações. Nos municípios brasileiros, do ano de 2000 aos dias

atuais, as inundações provocaram 2.126 mortes, e prejuízos calculados em aproximadamente US\$ 3 bilhões (EM-DAT/CRED, 2011).

A intensificação da urbanização a partir da década de 1970 degradou a qualidade de vida em muitos centros urbanos brasileiros, principalmente devido à ineficiência dos instrumentos de planejamento, especialmente nas grandes cidades brasileiras. Atualmente, as cidades médias apresentam grande crescimento populacional e reproduzem os problemas das grandes metrópoles.

O interior de São Paulo, um dos mais desenvolvidos economicamente do território brasileiro, recebeu principalmente entre as décadas de 70 e 90 uma série de estabelecimentos industriais, vindos da metrópole de São Paulo, devido a políticas de desconcentração das atividades industriais e a procura de melhores condições de operação. Isso provocou um rápido aumento populacional destes municípios, mas que não foi acompanhado de diretrizes de planejamento urbano inseridas no contexto da proteção aos recursos hídricos. Infelizmente, no plano diretor municipal de quase todos os municípios brasileiros não existia nenhuma restrição quanto ao loteamento de áreas de risco de inundação. A lei atual prevê que se deve preservar 30 m além das margens dos rios com até 10 m de largura para conservação da mata ciliar, o que desconsidera o leito maior, que geralmente é superior a esta distância legal.

Neste caso, o ideal seria a devolução da planície de inundação e do leito maior de rios, como tem ocorrido em países europeus. Mas como isto não é possível em todos os casos, é necessário que se tomem medidas adequadas para o controle das inundações, visando à minimização dos impactos à população. Algumas delas são obras civis, como diques marginais, barragens de contenção e canalização, e aprofundamento do leito do rio, e para aplicá-las é preciso um estudo prévio para que não agravem os impactos nos diferentes ecossistemas existentes nestas áreas. Outras são aumentos das áreas permeáveis na cidade para diminuição do escoamento, como parques, estímulo da prefeitura (descontos no IPTU) por calçadas permeáveis, áreas permeáveis nos quintais, plantio de árvores, etc.

À luz da Teoria dos Sistemas, parte-se da premissa de que a ocupação antrópica e, sobretudo, o processo de urbanização, interfere nas condições naturais do comportamento hidráulico e hidrológico de uma bacia hidrográfica. Desta maneira, o objetivo deste trabalho foi caracterizar e avaliar as condições de drenagem e de escoamento superficial na cidade de Rio Claro (SP), considerando a bacia hidrográfica do Córrego da Servidão como unidade de análise. Foram realizados mapeamentos de uso da terra visando compreender a dinâmica da ocupação urbana e o processo de impermeabilização das vertentes para diferentes cenários,

onde foram analisados os cenários de pré-canalização do córrego (1958), aquele em que o córrego foi canalizado (1972), e 2006 como cenário atual.

Buscou-se caracterizar e analisar a configuração da rede de drenagem nos diferentes cenários para abranger os processos envolvidos no comportamento do escoamento superficial e os efeitos da urbanização devido a retificação e canalização dos cursos d'água. Considerou-se também variáveis como a intensidade, a duração e a frequência em que pode ocorrer um evento chuvoso. Assim, avaliou-se as variações da vazão dos canais em função dos diferentes tempos de retorno de precipitação, buscando identificar e caracterizar situações de inundação. A avaliação do comportamento da drenagem sob a perspectiva da evolução da ocupação urbana foi realizada no intuito de somar reflexões e subsidiar ações que visem uma melhor abordagem no planejamento do município de Rio Claro, SP.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Bacia hidrográfica e os impactos da urbanização

Muito antes que os homens construíssem as primeiras casas e se estabelecessem em cidades, os rios inundavam suas margens durante a época das chuvas. Enchentes naturais de grande proporção são inundações provocadas por eventos chuvosos de grandes magnitudes e baixas frequências, nos quais os rios ocupam o seu leito maior e inundam suas planícies, um processo natural do ciclo hidrológico. No entanto, o aumento da intensidade e da frequência das enchentes e inundações compõe os efeitos causados por atividades antrópicas.

Ao longo da história humana sempre houve relação entre surgimento das cidades e a presença dos cursos d'água, o que foi determinante para a sedentarização das populações. Desde as primeiras aglomerações, a disponibilidade de água supria o consumo e higiene das comunidades, e constituía em importante insumo para as atividades agrícolas, e de comunicação e comércio, quando da possibilidade de navegação. Nas Idades Antiga e Média, o desenvolvimento das cidades próximo aos cursos d'água tinha também papel militar e favorecia a defesa do sítio urbano aliado à garantia de sobrevivência da população (BAPTISTA, NASCIMENTO, BARRAUD, 2005).

A necessidade das populações em se estabelecerem próximas aos corpos d'água gerou o aumento das áreas urbanizadas a partir das zonas mais baixas, ou seja, nas áreas de várzeas de córregos e rios. Com o crescimento das cidades, as várzeas dos rios também passaram a ser incorporadas ao sistema viário. Com isso, inúmeros córregos foram retificados e canalizados a

céu aberto ou encerrados em galerias (CANHOLI, 2005). A supressão das áreas de várzea, sazonalmente sujeitas a alagamentos, resultou em situações de inundação.

Os cenários de inundações freqüentes são registrados a partir da década de 60, onde as enchentes passaram a ocorrer em situações produzidas pela drenagem urbana ou devido à urbanização. Estes cenários são recentes devido às obras de canalização produzida pelo tipo de desenvolvimento urbano ocorrido depois dos anos 60 na maioria dos países desenvolvidos, que na década de 70 já puderam identificar que este tipo de política era economicamente insustentável, alterando a forma de gerenciar a drenagem para controle não-estrutural e medidas de controle de volume por meio de detenções urbanas (TUCCI, BERTONI, 2003).

No Brasil, principalmente no final de 1960, a intensificação do processo de urbanização provocou um aumento no uso dos recursos naturais para a expansão das cidades. Este processo envolve a alteração da cobertura de superfície, a começar pela retirada da cobertura vegetal e interfere nos componentes do ciclo hidrológico natural. De acordo com Tavares e Silva (2008) este modelo de urbanização, onde ocorre a ocupação das planícies de inundação e impermeabilização das vertentes, o uso do espaço afronta a natureza, e, mesmo em cidades de topografia relativamente plana, onde, teoricamente, a infiltração seria favorecida, os resultados são catastróficos.

Neste contexto, é válido ressaltar os conceitos e especificidades entre os termos enchentes e inundações, que são muitas vezes utilizados como sinônimos, mas que referem-se a diferentes significados. O termo enchente, que deriva da palavra “encher”, segundo o dicionário “Aurélio”, significa “*ocupar o vão, a capacidade ou a superfície de; tornar cheio ou repleto*”. O termo inundação significa “*cobrir de água; submergir; alagar; encher-se de água ou de outra substância líquida; [...]; transbordar, extravasar*” (FERREIRA, 1998 apud CANDIDO, 2007). Conforme o Ministério das Cidades/IPT (BRASIL, 2007) as enchentes ou cheias são caracterizadas pela elevação do nível da água de um canal de drenagem pelo aumento da vazão, sem haver extravasamento, enquanto que as inundações representam o transbordamento das águas de um canal, sendo este último o termo que confere as características as quais se referem este estudo.

Nos estudos que envolvem os recursos hídricos ganha relevância a bacia hidrográfica como unidade espacial de análise geográfica, onde esta se torna um elemento essencial na compreensão do ciclo hidrológico. Desta forma, cabe algumas definições no que se refere a bacia hidrográfica como unidade de análise. Christofolletti (1980) considera a bacia hidrográfica como um sistema não-isolado, devido às relações mantidas com os demais

sistemas do universo; e um sistema aberto, porque nela ocorrem constantes trocas de energia e matéria (inputs e outputs), tanto recebendo como perdendo. Este autor elucida que:

“A drenagem fluvial é composta por um conjunto de canais de escoamento inter-relacionados que forma a bacia de drenagem. Definida como a área drenada por um determinado rio ou por um sistema fluvial. A quantidade de água que atinge os cursos fluviais está na dependência do tamanho da área ocupada pela bacia, pela precipitação total e de seu regime, e das perdas devidas à evapotranspiração e à infiltração” (CHRISTOFOLETTI, 1980, p. 102).

Neste sentido, se torna necessária a compreensão do ciclo hidrológico como forma de avaliar a disponibilidade de água na superfície terrestre. Nesse tipo de estudo, a bacia hidrográfica é a unidade geográfica utilizada, um sistema físico com entradas e saídas de matéria e energia, que permite relacionar diversos condicionantes como evapotranspiração, precipitação, interceptação, infiltração e escoamento superficial para quantificar o ciclo da água (KARMANN, 2001).

Segundo Silveira et al. (2009), a bacia hidrográfica pode ser considerada um sistema físico onde a entrada é o volume de água precipitado e a saída é o volume de água escoado pelo exutório. Este sistema hidrológico possui o papel de transformar chuva em vazão, ou seja, transformar o volume de água concentrada no tempo (precipitação) em saída de água (escoamento) distribuída no tempo, sendo entradas representadas por hietogramas e saídas representadas por hidrogramas (SILVEIRA et al., 2009).

A bacia hidrográfica constitui-se, pois, em uma unidade natural básica e funcional para o desenvolvimento de estudos que visam compreender e analisar sua dinâmica fluvial. Como afirma Andreozzi (2005), uma bacia hidrográfica é considerada uma unidade de paisagem capaz de integrar componentes atmosfera, vegetação natural, solos, substrato rochoso e corpos d'água, sendo, portanto, um sistema que reflete os impactos das atividades antrópicas.

A ocorrência de inundações está diretamente associada a eventos de chuva extraordinários, ou seja, é a precipitação crítica (intensa) que leva aos picos de vazão máximo. Segundo Tucci (2009), a precipitação máxima é entendida como a ocorrência extrema, com duração, distribuição temporal e espacial crítica para uma bacia hidrográfica. Além da variação espaço-temporal da ocorrência das precipitações em uma bacia hidrográfica, a chuva excedente (ou precipitação efetiva), que caracteriza o processo de escoamento superficial é determinada por diversos fatores que abrangem situações de inundação.

O escoamento superficial é um segmento do ciclo hidrológico, com origem nas precipitações, e consiste no movimento da água sobre o solo (saturado de umidade ou impermeável), formando fluxos laminares e lineares, enxurrada, canais fluviais e lagos. Do volume de chuva que atinge a superfície do solo, parte é retida em depressões do terreno, parte infiltra, com o restante escoando pela superfície na medida em que a intensidade da precipitação supera a capacidade de retenção das superfícies deprimidas e de infiltração no solo.

A capacidade de infiltração de água no solo depende das características intrínsecas dos constituintes do solo, como a estrutura do perfil, permeabilidade, porosidade e condições do substrato rochoso. Soma-se a esses fatores o grau de umidade do solo para se estabelecer a capacidade e velocidade de infiltração da água. De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (1990), em solos arenosos, com grande porosidade, espera-se maior velocidade de infiltração da água que nos argilosos. Esta velocidade pode diminuir dependendo da variação textural do perfil, como a presença de material pouco permeável de argila, pois as camadas arenosas se saturam mais facilmente.

Assim, durante um evento chuvoso, ao saturar-se a capacidade de infiltração de água no solo, ou quando a capacidade de infiltração é excedida, o fluxo escoa pela superfície, e é denominado *runoff* (GUERRA, 2009, p.170). Quando a intensidade de precipitação se torna maior do que a de infiltração, ou quando a capacidade de acumulação no solo é excedida, tem início o empoçamento e o *runoff* (PRUSKI, 2006). De acordo com Tucci e Bertoni (2003, p.45), em situações como esta, grande parte do volume escoa para o sistema de drenagem, superando sua capacidade natural de escoamento. O excesso do volume que não consegue ser drenado ocupa a várzea, inundando de acordo com a topografia das áreas próximas aos rios.

A declividade é um dos fatores preponderantes para determinar a infiltração, o escoamento superficial, e a velocidade com que se dão tais processos. Poesen (1984 apud GUERRA, 2009, p.163) afirma que a declividade das encostas tem efeito positivo nas taxas de infiltração (índice que mede a velocidade). Seus estudos apontaram que áreas de maior declividade aumentam a porosidade do solo, porém a intensidade e distribuição temporal de um evento chuvoso, como curtos períodos de precipitação intensa, favorecem o escoamento em superfície. Guerra (2009, p.164) aponta que vários autores constataram que o *runoff* aumenta em velocidade e quantidade conforme o comprimento da encosta aumenta. A partir das considerações de Beven et al (1995 apud COLLISCHONN, p.25) conclui-se que áreas de maior declividade contribuem mais para a velocidade e volume do escoamento superficial, e

áreas que apresentam declividades menores possuem menor “predisposição” para gerar escoamento em superfície e inundações.

Outro fator importante que influi no escoamento superficial é a cobertura vegetal. Entre os seus efeitos, destacam-se: a proteção contra o impacto direto das gotas da chuva, dispersão e quebra de energia do escoamento, aumento da infiltração devido aos poros por ação das raízes, e retenção de água devido à estruturação do solo pelo enriquecimento de matéria orgânica. Como afirma Guerra (2009), em uma área com alta densidade de cobertura vegetal o escoamento superficial ocorre em taxas baixas, especialmente se houver cobertura como serrapilheira na superfície do solo, que intercepta as gotas de chuva que caem dos galhos e folhas. Já em áreas parcialmente cobertas, como pastagens e cultivos agrícolas, os solos apresentam menos de 70% de cobertura vegetal, e o escoamento pode aumentar rapidamente.

Outro efeito associado à impermeabilização do solo é o da alteração no balanço de radiação e o aumento da temperatura ambiente. As áreas construídas absorvem parte da energia solar, produzindo ilhas de calor na parte central das áreas urbanas, onde predomina o concreto e o asfalto. O aumento da absorção de radiação solar aumenta a emissão de radiação térmica de volta para o ambiente, gerando calor. O aumento de temperatura também cria condições de movimento de ar ascendente que pode gerar processos de precipitação mais intensos (TUCCI, BERTONI, 2003).

À medida que ocorre a ocupação de uma parte da área da bacia hidrográfica por estruturas urbanas, ocorre uma diminuição da capacidade de infiltração por retirada da cobertura vegetal, impermeabilização da superfície e condução de fluxos por condutos e canais. De acordo com Tucci e Mendes (2006), “com a urbanização, a cobertura [da superfície] da bacia é em grande parte impermeabilizada com edificações e pavimentos e são introduzidos condutos para escoamento pluvial”.

Tais premissas permitem prevêem a redução da infiltração da água no solo, sendo o volume não infiltrado transferido para a superfície, aumentando o escoamento superficial e diminuindo o tempo de deslocamento dos fluxos d’água, aumentando vazões máximas e antecipando os picos de cheias. A manutenção de recursos naturais fica comprometida, pois são reduzidas significativamente as taxas de evapotranspiração, o escoamento subterrâneo e o nível do lençol freático (TUCCI, MENDES, 2006).

Tucci e Bertoni (2003) elucidam que:

“Na medida que a população impermeabiliza o solo e acelera o escoamento através de condutos e canais a quantidade de água que chega ao mesmo tempo no sistema de drenagem aumenta produzindo inundações mais freqüentes do que as que existiam quando a superfície era permeável e o escoamento se dava pelo ravinamento natural. Esta inundação é devido a urbanização ou na drenagem urbana” (TUCCI, BERTONI, 2003, p.45).

As enchentes provocadas pela urbanização devem-se ao excessivo parcelamento do solo e conseqüente impermeabilização das grandes superfícies, à ocupação de áreas ribeirinhas tais como várzeas, áreas de inundação freqüente e zonas alagadiças, à obstrução de canalizações por detritos e sedimentos e também às obras de drenagem inadequadas (POMPÊO, 2000).

Dentre os efeitos mais graves da impermeabilização da superfície pelo processo de urbanização e conseqüentes inundações, Tucci (2009, p.807) destaca: maiores picos de vazão e maiores volumes, maiores picos a jusante, assoreamento de canais e galerias, entupimento de bueiros, degradação da qualidade da água, doenças de veiculação hídrica, maiores custos de utilidades públicas, e perdas e prejuízos às populações que sofrem com as inundações.

Em Porto et al. (2009), verifica-se que os problemas resultantes deste processo referem-se principalmente ao aproveitamento dos recursos hídricos, controle de poluição e inundações. Este autor expõe as possibilidades técnicas para esta problemática a qual exige o disciplinamento da ocupação urbana através de uma densificação compatível com os riscos de inundação. No planejamento do espaço, existem várias medidas de controle antes que o espaço seja ocupado, sendo algumas delas “o uso de pequenos reservatórios em parques e o controle sobre a impermeabilização dos lotes, ruas e passeios”. Para o autor (op.cit.) “as soluções estruturais como ampliação da calha dos rios, através do seu aprofundamento ou alargamento, construção de reservatórios e diques, entre outros, são soluções que podem ser evitadas com o planejamento da ocupação urbana”. Neste sentido, as constantes alterações do sistema de drenagem de uma bacia hidrográfica, bem como a necessidade de re-organização do espaço urbano, são abordadas nos estudos de drenagem urbana.

Durante muito tempo o conceito de drenagem urbana foi fundamentado em medidas estruturais executadas em obras de engenharia, sob a perspectiva de remover os excessos de águas pluviais de forma eficiente para evitar transtornos e danos causados pelas inundações. Devido à supressão de cursos d'água pela urbanização, os projetos de engenharia proporcionavam a retificação dos canais. Com a diminuição das sinuosidades naturais e da

rugosidade do leito, a velocidade dos fluxos aumenta, livrando a área de montante de volumes de água, que por sua vez, inundam o setor jusante do canal (CANHOLI, 2005). A urbanização desenvolve-se junto a estes sistemas de drenagem, o que impossibilita na maioria das vezes a reversão deste cenário. Cenários como este demonstram a importância do planejamento integrado e abrangente dos sistemas de drenagem e expõe os conflitos que o planejador encontra ao buscar respostas apropriadas.

Atualmente a questão dos sistemas de drenagem é entendida em seu sentido mais amplo, que entende o ambiente urbano de forma integrada com os elementos que o compõem, como os aspectos legais, sociais e políticos. Neste contexto diversos autores, como Collischonn (2001), Tucci (2009), Porto (2009) e Canholi (2005), destacam as medidas não convencionais como soluções diferentes do conceito tradicional de drenagem urbana. Associadas a adequação e otimização do sistema de drenagem, estas medidas buscam incrementar o processo de infiltração, reter o escoamento em reservatórios, retardar o fluxo dos rios e reduzir os picos de vazão. Dentre as diversas possibilidades destacam-se a geração de superfícies de infiltração pela implantação de jardins em edifícios, calçadas e quintais e a construção de pavimentos porosos e valetas de infiltração complementada por trincheiras de percolação em canteiros de ruas e estacionamentos.

Desta forma, as áreas urbanas constituem importantes elementos da paisagem antropizada e representam grande dinamismo no tempo e no espaço em termos de alterações de ocupação de superfície. Assim, Porto et al. (2009) complementa a temática drenagem urbana, sendo esta um conjunto de medidas que objetiva minimizar os riscos a que as populações estão sujeitas, diminuindo os prejuízos causados por inundações, e possibilita o desenvolvimento urbano de forma harmônica, articulada e sustentável.

2.2. O uso de geotecnologias no mapeamento do uso e ocupação de terras urbanas

As técnicas de Sensoriamento Remoto (SR) e os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) constituem importantes ferramentas para a aquisição, armazenamento, manipulação, análise e integração de dados de interesse temático, e ferramentas para a análise da ocupação da terra e processos de inundação.

Nos estudos acerca do uso e ocupação da terra e suas alterações, o IGBP -International Geosphere-Biosphere Programme (1994) trata os impactos das atividades humanas no ambiente por meio da compreensão das alterações espaciais que ocorrem na superfície terrestre. Fundamenta-se, pois, na premissa de que a alteração da cobertura de uma superfície

pode causar impactos diretos à degradação do solo e aos sistemas ambientais, que dão suporte às necessidades humanas. Assim, os estudos sobre a temática *uso da terra* têm como definição de seus objetivos: compreender a dinâmica humana no que se refere à alteração do uso da terra e seus impactos e desenvolver modelos para avaliar o uso e ocupação da terra e suas alterações como subsídio a projetos de arranjos de ocupação territorial (IGBP, 1994).

Casimiro (2000) complementa que “Os estudos de uso do solo e da sua evolução aparecem, pois, como uma peça fundamental de análise e mitigação (...) [e] é, de facto, o ponto de intersecção mais importante entre as atividades humanas e o meio”. Segundo este autor, o estudo, análise e compreensão do uso da terra é importante para desenvolver métodos e técnicas com tendência a integrar interdisciplinarmente, e são suficientemente quantitativos para permitir classificações, comparações e generalizações em diferentes escalas.

É válido ressaltar os diferentes aspectos conceituais no que se refere aos termos *uso do solo* e *uso da terra*. O emprego da palavra *solo*, segundo Guerra & Guerra possui seu significado voltado para a pedologia, caracterizando-se como a “camada superficial da terra arável, possuidora de vida microbiana” (GUERRA & GUERRA, 1999, P. 583). Por sua vez, o *uso da terra*, abrange a estrutura das organizações espaciais, frente à dinâmica dos sistemas ambiental e socioeconômica (OLIVEIRA, 2000; DAINESE, 2001; SIMON, 2005; RODRIGUES; LUCHIARI, 2005 apud SIMON, 2007, p.23). Desta maneira, essa pesquisa é sobre o *uso da terra*, por considerar-se esse termo mais apropriado para descrever as interações tanto ambientais como socioeconômicas ocorridas na superfície terrestre.

A transição do estado de uso da terra indica mudanças na dinâmica da paisagem geográfica, ou seja, a identificação de padrões de uso e sua variação no tempo e no espaço permitem compreender as funções de uma paisagem e os impactos gerados devido a atividades sócio-econômicas e às ocupações humanas. Neste contexto, a aquisição de produtos de SR e o mapeamento de uso e ocupação da terra apresentam-se como importante instrumento no estudo do espaço geográfico, e o sensoriamento combinado ao SIG permitem a sistematização e análise dos padrões de uso da terra de forma ágil e com alto índice de confiança dos dados gerados.

De acordo com Câmara e Monteiro (2003) a tecnologia de SIG evoluiu de maneira muito rápida a partir da década de 70. Como este desenvolvimento foi motivado desde o início por forte interesse comercial, não foi acompanhado por um correspondente avanço nas bases conceituais da geoinformação. A ciência da geoinformação, por sua natureza interdisciplinar, é usada no desenvolvimento de outras áreas, como informática, geografia,

planejamento urbano, engenharia, estatística e ciências do ambiente, possibilitando a compreensão do espaço geográfico por meio de ambientes de SIGs.

Sanchez e Gerardi (1983) destacam o processo de análise interpretativa de imagens aerofotogramétricas como o tipo mais antigo de SR, e também o mais utilizado face ao nível de resolução espacial que se pode oferecer sem utilização de um oneroso e sofisticado processo de interpretação. Por meio de fotointerpretação, estes autores avaliaram as transformações espaciais no uso da terra detectadas por mapeamento em diferentes períodos (1962, 1972 e 1978) para o município de Rio Claro. Os recursos de SR permitiram verificar que a distribuição espacial das transformações de uso da terra está associada aos estudos em planejamento e elaboração de diagnósticos e prognósticos. Os diferentes períodos de análise possibilitaram identificar a tendência, em termos de direção e área, de expansão e/ou recuo das classes de uso, como aumento de pastagens e cana-de-açúcar em áreas de várzea do Rio Corumbataí.

Em estudos sobre a expansão urbana de Rio Claro (SP), Garcia, Garcia e Gerardi (1983) avaliaram quantitativamente o crescimento da cidade no período de 1962 a 1978, a partir de fotografias aéreas verticais para os cenários 1962, 1972 e 1978, com a obtenção de diferentes níveis de ocupação do solo. Com o objetivo de analisar a tendência e probabilidade global e setorial de expansão da cidade, por meio de fotointerpretação realizaram uma projeção da expansão urbana futura. A análise temporal da ocupação do solo foi realizada através do processo estocástico da cadeia de Markov (ou simplesmente modelo markoviano), considerando duas variáveis, que correspondem respectivamente ao uso urbano e agrícola/suburbano. Os resultados apontaram o ano de 1972 como o de início da expansão urbana, com elevada probabilidade de manutenção deste ritmo de crescimento.

Luchiarri (2001) utilizou produtos de SR e de SIG na identificação de cobertura vegetal na bacia do Ribeirão das Pedras, área urbana de Campinas. Nos mapeamentos de uso e ocupação do solo objetivou-se associar a densidade da cobertura vegetal e a renda familiar, sendo as áreas de classe média a alta as com maiores superfícies destinadas à vegetação. Os produtos obtidos por técnicas de SR e os SIGs consistem em tecnologias que auxiliam estudos de uso do solo. O ambiente de SIG possibilitou o tratamento de dados cartográficos e orbitais de forma rápida e com certo grau de precisão.

Fundamentados no suporte das geotecnologias, Valério Filho et al. (2003) realizaram a caracterização de bacias hidrográficas impermeabilizadas pela urbanização no município de São José dos Campos (SP). Devido à necessidade de monitoramento do comportamento de bacias hidrográficas, os autores corroboram:

“ser de grande valia para estudos relacionados aos processos de crescimento urbano e suas conseqüências na impermeabilização dos terrenos, proporcionando assim, a espacialização dos perímetros urbanos de maior criticidade e desta forma oferecem indicações importantes para as ações mitigadoras. (...) o uso das geotecnologias se oferecem como ferramentas eficientes para armazenamento, tratamento, cruzamentos e espacialização de informações da superfície terrestre, as quais proporcionam subsídios relevantes para o planejamento urbano” (VALÉRIO FILHO, et al. 2003, p.1983)

Costa, Rossi e Coelho (2005) mapearam de forma multitemporal uma bacia urbanizada no município de Campinas para verificar e quantificar o adensamento populacional. As classes de mapeamento por SR foram estabelecidas a partir da porcentagem de impermeabilização das áreas construídas, possibilitando a compreensão da tendência de expansão urbana. Neste trabalho compararam-se ainda os produtos gerados por imagens orbitais e por fotografias aéreas, tendo as últimas apresentado melhores resultados no processo de classificação de uso do solo devido à escala de detalhe necessária para a interpretação dos elementos urbanos.

Kuck (2010) realizou análise da impermeabilização de uma bacia hidrográfica na área urbana de Manaus (AM). Os produtos orbitais implementados em SIGs permitiram a verificação dos impactos da urbanização em 1987 e 2006. Esses impactos estão correlacionados à dinâmica de expansão urbana. Os resultados indicaram ser possível, através das componentes vegetação, superfícies impermeáveis e solo obtidas a partir de imagens multitemporais, identificar mudanças na cobertura do solo urbano, em especial através da componente superfícies impermeáveis, a qual dá um indicativo de quais áreas estão sendo ocupadas e da taxa de adensamento das mesmas.

Leite e Brito (2011) estudaram a aplicação de produtos de SR e dos SIGs ao mapeamento de uso do solo urbano no município de Montes Claros (MG). A metodologia aplicada a produtos orbitais teve dois níveis de hierarquia de análise. O primeiro nível apontou a disponibilidade de espaço para expansão urbana no interior do perímetro da cidade, e o segundo revelou a ocupação do espaço para moradia em sua distribuição setorial. O mapeamento do uso do solo resultou no entendimento das constantes transformações condicionadas pelas atividades socioeconômicas. O uso residencial mostrou-se uma classificação complexa que pode e deve ser explorada em nível de detalhe para abordar de maneira ampla o processo de urbanização.

Belisário e Valério Filho (2011) realizaram estudos acerca da contribuição das geotecnologias para o mapeamento das áreas impermeabilizadas por urbanização na bacia do Córrego Pararangaba, em São José dos Campos-SP. A partir do uso de fotografias aéreas em ambiente de SIG foram gerados Modelos Numéricos do Terreno (MNTs) e zoneamento urbano por meio da classificação de uso e ocupação do solo. Com a utilização das geotecnologias, eles visualizaram e analisaram a dinâmica histórica da impermeabilização do solo à luz da lei de zoneamento vigente em 2008, concluindo que a política de planejamento deve ser concebida dentro da realidade local, descartando-se modelos prontos, para alcançar a perspectiva da heterogeneidade de intervenções a partir de princípios que englobem a dinâmica da cidade em seu contexto social econômico, cultural, ambiental, estrutural e elementos estruturantes do espaço.

2.3. Modelagem hidrológica e planejamento urbano

O modelo hidrológico é definido como uma ferramenta utilizada para representar os processos que ocorrem na bacia hidrográfica, e permite, através da equacionalização dos processos, representar, entender e simular o comportamento de uma bacia hidrográfica (TUCCI, 1998).

A priori, as pesquisas para o desenvolvimento dos modelos hidrológicos eram focadas em componentes do ciclo hidrológico de forma separada, como a teoria de infiltração de água no solo de Horton (1933) e da evaporação de Penman (1948), e conceitos de hidrograma unitário de Sherman em 1932. Os primeiros modelos hidrológicos (modelos chuva X vazão) foram desenvolvidos para resolver questões práticas de engenharia. Eles tratam a bacia de forma concentrada, e através de conceitos empíricos estes modelos tinham como objetivo gerar hidrogramas no exutório a partir de hietogramas. Com os avanços tecnológicos, os modelos concentrados tornaram-se distribuídos no espaço, onde as relações físicas passaram a representar matematicamente processos intermediários entre a precipitação e a vazão no exutório, chamados modelos hidrológicos de base física (PAIVA, 2009).

Este tipo de simulação hidrológica passou a ser aplicado nos estudos do impacto das mudanças climáticas ou das alterações nos padrões de uso do solo sobre os recursos hídricos, poluição e processos de sedimentação em bacia hidrográfica, advindo a perspectiva da modelagem aplicada ao planejamento. Dentre diversos modelos destacam-se: o hidrograma do Soil Conservation Service – SCS (1986), SHE (ABBOTT et al. 1986), o modelo Sacramento, modelo Tank Model, Stanford, TOPMODEL (Beven, 1997), SWAT (SANTHI et al., 2006),

DHSVM (WIGMOSTA et al., 2002) entre outros; e modelos nacionais: SMAP (Lopes et al., 1981), Cabc (FCTH, 1998) e IPH-II (Tucci, 2005) (PAIVA, 2009, p.6).

A elaboração de tais modelos quantitativos (chuva x vazão) foi conduzida sob pontos de vistas como:

- a escala de representação: modelos para grandes bacias (grandes magnitudes) e modelos de pequenas bacias (maior precisão);
- a classificação quanto à espacialidade: modelo concentrado - quando não leva em consideração a variabilidade espacial da bacia - e modelo distribuído - quando suas variáveis e parâmetros dependem do espaço e/ou do tempo.

Com base nas características da bacia em estudo, de pequena área, e a necessidade de distribuição espacial (sub-bacias) e temporal (precipitação em blocos alternados), e aplicação de métodos de separação do escoamento (CN), optou-se pelo uso do IPHS 1, um software nacional livre desenvolvido pela IPH - UFRGS/ALM/FEA/IMF (2003). De acordo com Tucci et al. (1989) o IPHS 1 é um sistema computacional modulado, onde determina-se hidrogramas pela combinação de diferentes algoritmos existentes nos estudos em hidrologia, sendo os módulos uma plataforma de manipulação da escolha dos algoritmos considerando-se as melhores representações para situações reais da bacia. Este modelo permite a abordagem de hidrogramas de projeto em bacia urbanizada para situações de tormenta, visando o reconhecimento de vazões máximas de enchentes, incluindo-se também a identificação dos picos das ondas de cheias para diferentes cenários de ocupação.

Segundo Ohnuma Júnior (2005), a configuração do IPHS 1 baseia-se nos modelos de: precipitação (seqüencial fornecida pelo usuário ou acumulada de projeto obtida através de relações I-D-F), precipitação efetiva (método SCS, algoritmo de Horton, exponencial e outros) e escoamento superficial (método de Clark, hidrograma unitário fornecido, hidrograma triangular do SCS e método de Nash). Os trechos que apresentam a drenagem são modelados por: escoamento em rios (método de Muskingum, Muskingum-Cunge linear ou não-linear, Muskingum-Cunge não-linear com planície de inundação e Muskingum-Cunge não-linear adaptado especificamente para condutos fechados), escoamento em reservatórios (método de Puls) e derivação de vazões (algoritmo para separação de fluxo ou divergência produzida por um canal de derivação sem estrutura de controle).

Uma das principais vantagens do IPHS 1 é a combinação de diversos algoritmos, ou seja, este software apresenta alternativas para a entrada de dados sob diferentes abordagens, contribuindo na elaboração da modelagem de acordo com a disponibilidade dos dados e as dificuldades de aquisição dos mesmos. Porém, na aplicação das modelagens de maneira geral

é, segundo Renoó e Soares (2000), inviável traduzir todas as relações existentes nos diferentes componentes de uma bacia hidrográfica em termos matemáticos, uma vez que estas relações são complexas e nem todos os processos envolvidos são conhecidos ou mesmo contemplados por formulações matemáticas.

A modelagem hidrológica torna-se, pois, apenas uma representação aproximada da realidade que se propõe estudar. No entanto, estudos recentes apontam a necessidade de disponibilidade de informações para o desenvolvimento de projetos em drenagem urbana, e tem a aplicação de modelagens hidrológicas como ferramenta importante no subsídio ao planejamento da ocupação urbana e na elaboração de Planos Diretores. Verificam-se as contribuições na literatura das pesquisas realizadas por Tucci e pelo IPH - Instituto de Pesquisas Hidráulicas (UFRGS), que partem do diagnóstico do comportamento da drenagem com a bacia hidrográfica como unidade de análise para propor medidas de controle do escoamento objetivando a minimização dos efeitos causados pela ocupação urbana (CRUZ e TUCCI, 2008).

Nesta perspectiva, Vendrame e Lopes (2005) estudaram os efeitos do crescimento urbano na dinâmica do escoamento superficial em bacia do Pararangaba, município de São José dos Campos/SP. No projeto foram utilizados o método do SCS, e cálculo do CN, e empregou-se o IPHS 1, que permitiu a análise da variação dos hidrogramas de projeto relativos ao exutório das sub-bacias, em função do crescimento populacional e consequentemente da impermeabilização do solo. Com o auxílio de um SIG, foram analisados cenários de pré-urbanização, de adensamento urbano atual, e conforme a lei de zoneamento municipal foi possível simular condições de impermeabilização em ocupação futura. O prognóstico demonstrou a necessidade de um controle do incremento do volume do escoamento superficial, principalmente para evitar danos sociais e ambientais, sendo a modelagem uma ferramenta para adoção de medidas preventivas de enchentes e para o planejamento da ocupação do espaço urbano.

No mesmo município, Lopes (2005) realizou estudos sobre a ocupação urbana e a tendência de impermeabilização de bacias para a prospecção de cenários futuros. O IPHS 1 foi aplicado sob a abordagem dos impactos da urbanização com danos ambientais por processos hidrológicos de erosão e deposição nas bacias. Este estudo evidenciou a possibilidade de aplicação deste modelo nos estudos hidrológicos como subsídio às propostas de medidas preventivas no planejamento da ocupação urbana sustentável.

Ohnuma Júnior (2005) utilizou o IPHS1 em estudos realizados no município de São Carlos/SP. Com a aplicação do método de separação e propagação do escoamento, o modelo

foi empregado para a simulação de cenários de ocupação atual e futura, com base em planos diretores municipais, sob a abordagem do reuso de águas pluviais como situação de projeto e geração de hidrogramas para o comportamento da drenagem em diferentes Tempos de Retorno (TR). A avaliação das incertezas nos parâmetros da modelagem apresentou a necessidade de monitoramento hidrológico de bacias urbanizadas a partir de modelos de comportamento distribuído, sendo a implementação de SIGs para o processo de classificação uma ferramenta para a redução de incertezas e prospecção para Planos Diretores.

Na elaboração dos Planos Diretores de Drenagem Urbana das cidades de Porto Alegre e Caxias do Sul, foi utilizado o conceito de minimização de impacto a jusante sob um enfoque integrado, viés que contrapõe as práticas tradicionais de condução de vazão excedente à jusante, soluções pontuais e inviáveis economicamente. Para contemplar o projeto foi utilizado o modelo IPHS1 para a simulação de propagação de cheias em cenário de ocupação atual e futura. A elaboração de um arcabouço teórico/computacional ligado ao planejamento constitui-se importante ferramenta de estudo integrado da bacia, proporcionando soluções em situações complexas. O modelo empregado permitiu a análise integral da bacia para a determinação das verdadeiras causas dos problemas de drenagem urbana, suprimindo a necessidade de verificar sistematicamente os efeitos da ocupação urbana sob a abordagem do planejamento (VILLANUEVA, TASSI, ALLASIA, 2001).

O IPHS1 foi utilizado por Cruz e Tucci (2007) para a identificação de alagamento e para tentativas de otimização econômica da implantação de obras de drenagem. Aplicando o sistema realizaram-se estudos alternativos para a determinação do sistema de macrodrenagem e avaliação das condições de projeto. O modelo permitiu a verificação da propagação em canais (capacidade condutora) do sistema, que puderam identificar locais de insuficiência e o grau da gravidade dos alagamentos distribuídos em bacia. Os resultados finais apontaram ao planejamento da drenagem urbana como instrumento de gestão das inundações das cidades.

Nos estudos do sistema hídrico urbano que contemplam o comportamento da drenagem e as áreas de inundação de bacias, medidas de controle de enchentes possibilitam a minimização de seus prejuízos. Principalmente devido à complexidade das obras e altos custos de medidas de controle estruturais, que modificam o sistema fluvial, o enfoque é direcionado a medidas não-estruturais, que apresentam custos mais baixos e visam à redução dos danos pela melhor convivência da população com as enchentes. As medidas não-estruturais podem partir da previsão e alerta das cheias, através da aquisição de dados de previsão de chuvas aplicada aos modelos matemáticos, e associada a Planos de Defesa Civil, e

regulamentação de uso da terra, onde são estabelecidas áreas de risco de inundação por zoneamento (TUCCI, 2009, p.624-630)

O recurso da simulação computacional e a modelagem hidrológica oferecem subsídios importantes à gestão integrada dos riscos de inundação a partir de uma análise global para a implementação de medidas compensatórias locais (BAPTISTA, 2005). No entanto, as simulações envolvidas nos modelos hidrológicos não garantem perfeitamente as reais condições do sistema de drenagem, uma vez que há incertezas quanto à quantificação dos resultados, principalmente decorrente dos possíveis erros no momento da aquisição dos dados de entrada, na estimativa de parâmetros e na própria estrutura do modelo (OHNUMA JR., p.31).

Neste sentido, ao abordar a questão das incertezas ao quantificar as variáveis de entrada Tucci (1988) afirma que nestas estão envolvidas a variabilidade natural e os próprios erros de medição, além da ausência de dados em quantidade suficiente, pois nem sempre os poucos dados disponibilizados representam a realidade de uma bacia como um todo. A maior parte dos modelos hidrológicos geralmente adota, segundo o autor, a homogeneidade do tempo e do espaço. As incertezas quanto aos resultados pode ocorrer principalmente devido às próprias características interiores ou formulações dos modelos, o que exige estudos constantes acerca de equações e conceitos estatísticos das variáveis e parâmetros.

Como exemplo, Allasia (2002 apud. ONHUMA, 2005, p.31), analisou diversos parâmetros de entrada da simulação computacional, sendo que um deles trata do método de “Curva-Número” (CN) usado para determinação da chuva efetiva, sendo que seus resultados apontaram para variações em torno de 8 a 10% na vazão para um incremento de uma unidade no valor de CN. No entanto, Germano e Tucci (1995 apud. OHNUMA, 2005, p.31) analisaram valores de CN para mais de 24 bacias urbanizadas no Brasil, concluindo que os valores encontrados para este parâmetro estavam relativamente próximos daqueles que eram estimados pelas tabelas encontradas na literatura.

A modelagem hidrológica torna-se, dessa forma, uma representação das condições de drenagem. As fórmulas matemáticas e os algoritmos aplicados não garantem perfeitamente o comportamento do sistema, uma vez que não conseguem abarcar a dinâmica natural dos canais, fatores como a distribuição irregular de chuvas e, por conseguinte, podem haver incertezas na precipitação efetiva no tempo e no espaço. Mesmo assim, as simulações hidráulicas e hidrológicas são importante instrumento aplicado ao planejamento no âmbito da drenagem urbana, e tratam da realização de estudos e preparo de documentos que visam orientar e adequar a intervenção humana nos recursos hídricos.

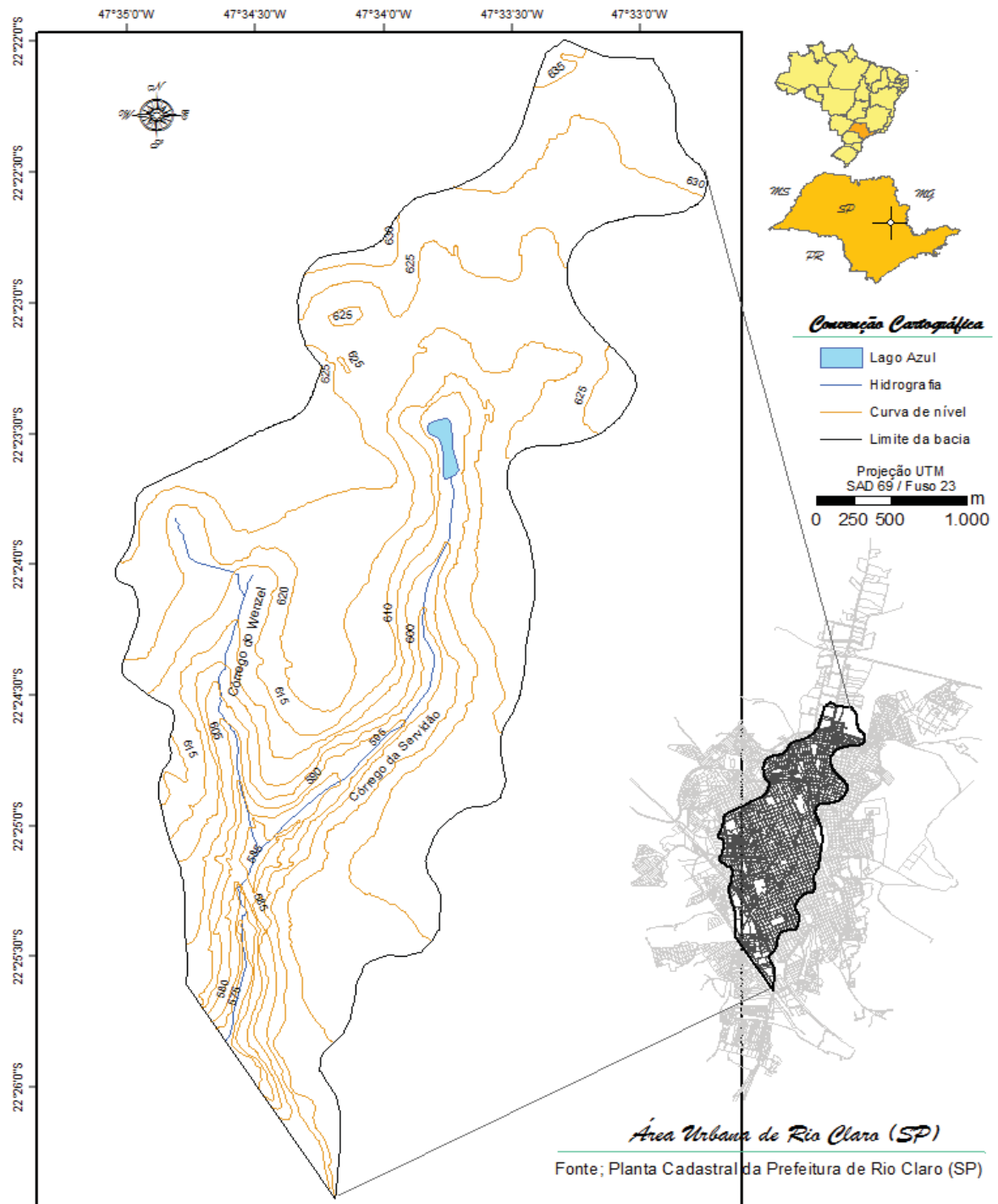
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1. Localização e aspectos gerais

A pesquisa foi realizada no município de Rio Claro, cujas coordenadas geográficas são 22° 05' e 22° 40' S de latitude e 47° 30' e 47° 55' W de longitude, e situado na porção centro-leste do estado de São Paulo a 173 km da capital. A área de estudo refere-se mais especificamente à bacia hidrográfica do Córrego da Servidão, afluente do Rio Corumbataí, onde se instalou a maior parte do sítio urbano da cidade de Rio Claro (Figura 1). Sua rede de drenagem compõe-se de um território com área aproximada de 13,650 km², com o eixo principal de fluxo na direção e sentido norte-sul. A área de estudo foi definida à montante da ferrovia, o que dá ao córrego da Servidão o comprimento de 4,625 km de extensão. Com a nascente do córrego da Servidão situada no Lago Azul, de 424 m², o Córrego da Servidão tem como afluente o Córrego do Wenzel, de 2,10 km de extensão que, desta forma, integra a área de estudo.

O canal do Córrego da Servidão possui duas mudanças de direção, no médio curso e baixo curso, próximo à sua foz, ambas com orientação NE/SW, sugerindo controle geológico estrutural. Estabelecendo-se a relação entre o comprimento das drenagens e a área da bacia, constata-se que a referida bacia caracteriza-se por baixa densidade de drenagem, o que implica em boa permeabilidade do terreno. O índice de circularidade, calculado de acordo com a proposta de Christofolletti (1980), da bacia do Córrego da Servidão é de apenas 0,21, o que significa menor probabilidade de concentração do escoamento da água da chuva (MORUZZI, et al, 2007).

Figura 1 – Localização da Bacia do Córrego da Servidão, inserida na área urbana de Rio Claro (SP).



Fonte: Cartas do IGC (1:10.000).

3.2. A área de estudo

A área de estudo localiza-se geologicamente no setor paulista da Bacia Sedimentar do Paraná (ZAINE, 1994). O substrato geológico é constituído por sedimentos paleozóicos da Formação Corumbataí do Grupo Passa-Dois, e sotaposto pelos depósitos cenozóicos da Formação Rio Claro.

A Formação Corumbataí, unidade superior do Grupo Passa-Dois, teve esta designação proposta por Pacheco (1927 apud SCHNEIDER et al., 1974). Outra designação para esta formação é Formação Estrada Nova, proposta por Landim (1970). Do ponto de vista litológico, constitui-se de argilitos, siltitos e folhelhos arrocheados e marrom-avermelhados, às vezes esverdeados, com intercalações de arenitos, leitos carbonáticos e coquinas (ZAINE, 1994). Na região de Rio Claro, admite-se uma espessura máxima de 130 m (LANDIM, 1970 apud ZAINE 1994).

Segundo Zaine (1994), a Formação Rio Claro “constitui-se no registro mais significativo e, provavelmente, o mais antigo do Cenozóico, dentro da Depressão Periférica Paulista”. Bjornberg e Landim (1966) “propõem para os depósitos sedimentares encontrados na Bacia do Rio Piracicaba (...) a designação estratigráfica de Formação Rio Claro (Neocenozóica) com a secção tipo em Rio Claro (SP)”. Penteado (1976) refere-se à distribuição dos depósitos cenozóicos, que estão “em topos de interflúvios amplos e aplainados, correspondendo, em termos de superfície de aplainamento, à ‘Superfície Neogênica’ de De Martonne”. Para Penteado-Orellana (1981) estes depósitos “modernos” parecem constituir uma superfície geral de aplainamento que nivelou os divisores regionais entre 600 e 650 m. Esta autora refere-se à área de ocorrência da Formação Rio Claro como uma área que mostra ser um compartimento de relevo dentro de uma grande província geomorfológica do estado, denominado Bacia de Sedimentação de Rio Claro (PENTEADO, 1969 apud PENTEADO-ORELLANA, 1981).

O ambiente de deposição da Formação Rio Claro é discutido por vários autores, estabelecendo-se basicamente em duas hipóteses. A primeira delas é corroborada por Penteado (1968) em seu trabalho sobre a tectônica regional e a atividade tectônica pós-terciária, sendo verificado um sistema de falhas, confirmado pelas características da drenagem regional, segundo padrões nas direções NW e SE. Nesta mesma vertente Bjornberg (1965 apud PENTEADO, 1968) trata das implicações tectônicas no processo de formação dos depósitos modernos: “os diastrofismos tem importante papel no controle da sedimentação (...)

cada deslocamento do nível de base por levantamento, permite rejuvenescimento do relevo, acompanhado de retomada de erosão”.

Aliado a este fator, estes autores atribuem a influência climática como fator preponderante no processo de formação e deposição destes sedimentos modernos. Bjornberg e Landim (1966) ao tratarem deste tipo de deposição em calha fluvial, sugerem este processo em condições de ambiente semi-árido, com a elaboração de pedimentos a partir de depósitos torrenciais. Da mesma forma, a partir de observações relativas à evolução morfológica do Quaternário, Penteado (1969) relaciona fases ou oscilações climáticas aos níveis de agradiação e degradação, ou seja, fases de entalhe e aplainamento da bacia de Rio Claro.

A segunda hipótese é apresentada por Fúlfaro et al. (1968 apud ZAINE, 1994), que associam a Formação Rio Claro a depósitos sedimentares originados em ambiente fluvial (...), e correspondente a um paleocanal, disposto paralelamente ao traçado atual do Rio Corumbataí. Fúlfaro et al. (1968 apud CAMPOS, 1979) afirmam que “trata-se de um paleocanal, descartando qualquer influência climática na formação dos depósitos. (...) Assim, estes autores atribuem a fenômenos tectônicos a origem da Formação Rio Claro”.

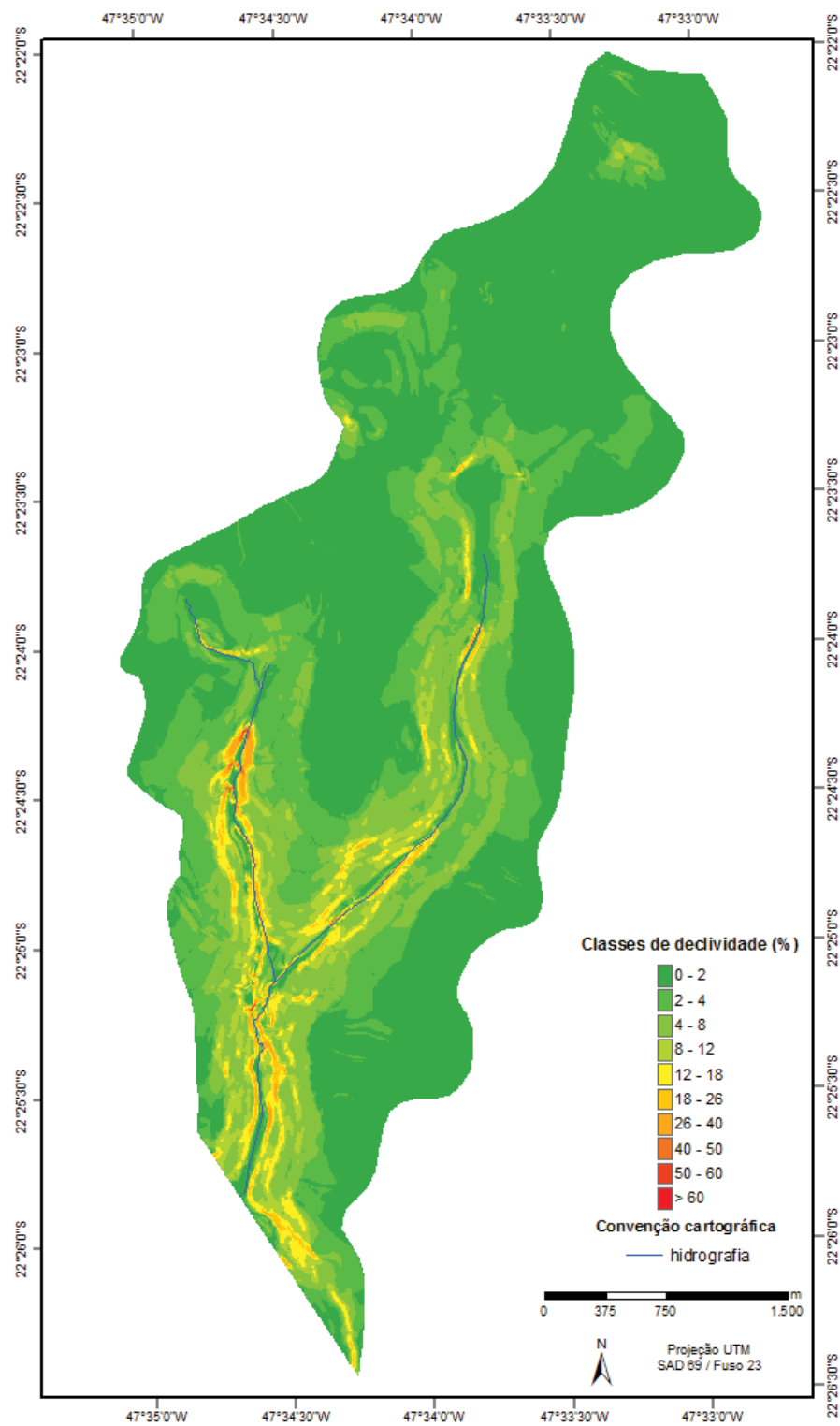
No que tange à constituição dos depósitos da Formação Rio Claro, Bjornberg e Landim (1966) ao estudar o tamanho das partículas, verifica que os sedimentos apresentam boa seleção, o tamanho das partículas não corresponde à baixa capacidade de transporte do canal e pouca abrasão. Estes autores sugerem que os clásticos provêm de um sedimento previamente bem selecionado, “sendo o Arenito Botucatu, como tudo indica, o principal fornecedor para a sedimentação da Formação Rio Claro”. Cottas (1983) caracteriza os sedimentos neo-cenozóicos da Formação Rio Claro sendo constituída por arenitos inconsolidados finos a médios, de coloração amarela que apresenta intercalações de leitos de argilitos isolados com espessuras variáveis, e no topo apresenta depósitos coluvionares de cor marrom.

Assim, os sedimentos da Formação Rio Claro são predominantemente arenosos, esbranquiçados, amarelados e róseos, mal consolidados. Esta formação apresenta como características marcantes: fraca litificação e profunda alteração pedogenética, espesso solo arenoso e domínio de litotipos arenosos, esbranquiçados amarelados e avermelhados, variando de areia fina a grossa, com intercalação de camadas de conglomerados e de sedimentos argilosos. A espessura máxima é da ordem de 40 m, predominando valores entre 25 e 30 m (ZAINE, 1994).

O município de Rio Claro está inserido na Província Geomorfológica denominada Depressão Periférica, descrita como faixa erosiva deprimida entre escarpas mais avançadas da

zona de cuestras, que delimitam a borda oriental dos derrames basálticos e o Planalto Cristalino (PENTEADO, 1976). De acordo com Troppmair (1978), o município apresenta ao norte vários níveis altimétricos, e em direção à Depressão Periférica possui topografia monótona, com interflúvios subtabulares de vertentes convexas no alto e côncavas no sopé, inclinadas fracamente de 3^0 a 5^0 (figura 2). Os interflúvios são separados por vales, onde o perfil transversal alcança de 3 a 5 km, e os fundos de vale são geralmente chatos e entulhados por sedimentos aluviais.

Figura 2: Mapa de declividade da Bacia do Córrego da Servidão.



Fonte: elaborado pelo autor.

A bacia possui topografia suave visto que se encontra sobre os terrenos arenosos vinculados à Formação Rio Claro, a qual capeia os topos subtabulares, atualmente densamente edificadas, compondo boa parte do interflúvio entre o Rio Corumbataí, do qual o Córrego da Servidão é afluente, e o Ribeirão Claro. As condições topográficas, decorrentes da morfogênese, do sítio urbano de Rio Claro, favoreceram o desenvolvimento da planta urbana em forma de tabuleiro de xadrez (PENTEADO-ORELLANA, 1981). Na área de estudo são predominantes declividades baixas, principalmente entre as classes de 0 a 2%, e de 2 a 4%. Maiores declividades variam entre 18 e 26%, são áreas pouco expressivas e situam-se principalmente nos vales do médio curso do Córrego do Wenzel e a jusante do Córrego da Servidão.

A área apresenta um desnível altimétrico de cerca de 110 m entre seu divisor de cabeceira principal e a foz do canal do Córrego, com respectivamente 645 m e 535 m de altitude. A calha do canal do Córrego da Servidão é altimetricamente sobrelevada em relação às calhas do rio Corumbataí e do Ribeirão Claro, que drenam ligeiramente paralelas entre si, a primeira situada à oeste e a segunda à leste do Córrego. Isto é indicativo que o canal do córrego da Servidão está em nível topográfico mais elevado que seus dois canais vizinhos, conferindo a esta bacia, pelo menos teoricamente, um maior potencial erosivo (MORUZZI et al, 2007).

De acordo com Zaine (2000), as características de um solo profundo podem ser atribuídas ao fato de os depósitos da Formação Rio Claro serem arenosos e de fraca litificação, favorecendo processos pedogenéticos intensos e sob grande influência climática nessa evolução. Admite-se duas seqüências para esta unidade, uma superior, formada por depósitos coluvionares e uma inferior, representando depósitos aluviais.

A área de estudo é constituída dominantemente por Latossolo Vermelho-Amarelo. Os Latossolos caracterizam-se por serem solos com perfis bem desenvolvidos e com fraca gradiência textural. Os perfis deste solo são bastante homogêneos, com a transição entre os horizontes de forma gradual ou difusa. As argilas predominantes são do tipo caulinita, cujas partículas são revestidas por óxidos de ferro, responsáveis pelas cores avermelhadas dos solos, e o intenso intemperismo ao qual são submetidos torna-os pobres em nutrientes (LEPSCH, 2002, p.87-90).

Os Latossolos Vermelho-Amarelo correspondem às unidades Coqueiro e Laranja Azeda. A unidade Coqueiro caracteriza-se por textura média ao longo do perfil, sendo que os teores de areia são responsáveis pela sua alta friabilidade e pequena plasticidade. Já o Latossolo Vermelho-Amarelo – unidade Laranja Azeda, apesar de ainda manter o caráter de

textura média ao longo do perfil, apresenta grau de argila levemente superior ao da unidade Coqueiro (OLIVEIRA, PRADO, 1984)

O canal do córrego, que apresenta direção geral norte-sul, possui duas mudanças de direção, no médio curso e baixo curso, ambas com orientação NE/SW, sugerindo controle geológico estrutural. Esta contextualização geológica e geomorfológica da bacia confere a ela uma forma alongada fora dos padrões convencionais. Do ponto de vista hidrológico esta forma induz a um menor tempo de concentração das águas pluviais que escoam diretamente na superfície, favorecendo a ocorrência de pontos de inundação (MORUZZI et al., 2009).

As características dos solos, a topografia plana com baixa energia de escoamento que favorece a desconcentração do escoamento superficial, e as diferenças altimétricas que remetem ao maior potencial erosivo do leito do córrego, são indicadores de condições não propensas a enchentes em cenário pré-ocupação. Desta forma, o cenário atual de densa atividade urbana imbricado à impermeabilização dos solos, à retificação da rede de drenagem, à retificação das ruas, são fatores que contribuem de forma significativa no aumento do volume da vazão ao longo da calha do córrego. Aliados ao aumento da energia de escoamento, que toma maior velocidade, propiciam a ocorrência de enchentes.

No contexto climático da área de estudo, a partir dos estudos desenvolvidos por José Setzer, Ab'Saber (1956) reconhece um tipo climático *Cwa* de Köppen (clima tropical úmido) para a área central da Depressão Periférica (CASTRO, 1995, p.13). Monteiro (1973) caracteriza o clima regional como de moderada precipitação, sendo controlado por três grandes correntes da circulação regional (tropical atlântica, tropicais continentais e polares atlânticas).

Penteado (1966 apud GRILO, 1992) caracteriza três correntes de circulação regional, denominadas “ondas de noroeste”, ligadas à massa Equatorial Continental e Tropical Continental, responsáveis pelo aumento das precipitações frequentes no verão; “correntes de leste ou de nordeste” que estão relacionadas à atuação da massa Tropical Atlântica, responsáveis por tempos chuvosos, devido à instabilidade basal, no verão e tempo seco nas estações de outono e inverno por condições de resfriamento basal; e “correntes do sul” que são apontadas como responsáveis por mecanismos frontais oriundos do choque de massas intertropicais e polares – Frente Polar, responsável pelas ondas de frio e a ocorrência de precipitações principalmente no inverno.

Monteiro (1976) ao caracterizar o clima do estado de São Paulo destaca a influência de correntes extratropicais do sul, onde os mecanismos frontais altamente instabilizadores do tempo e produtores de pluviosidade, e as penetrações anticiclônicas polares (50 a 25%)

alternam-se com as correntes tropicais marítimas (50 a 25%). Os mecanismos estabilizadores do tempo e responsáveis por períodos e anos secos, e a atuação intercalante, menor (10 a 5%) mas não menos significativas, das correntes de oeste e noroeste associados a centros depressionários dinâmicos. Associadas às correntes frontais, estas características respondem pelos aquecimentos pré-frontais altamente instabilizadores e agravantes da descarga pluvial.

Rio Claro situa-se em área onde ocorre alternância sistemática de avanços e recuos de massas de ar polares e tropicais são aspectos de transição do município de Rio Claro, onde Troppmair (1978) verificou o domínio de massas polares durante 25% do ano (em média), enquanto as massas tropicais vão além dos 50% de domínio atmosférico. As perturbações entre os sistemas tropicais e equatoriais, associadas às descontinuidades frontais, caracteriza a ocorrência de períodos chuvosos, principalmente nas estações de primavera e verão.

Em estudos realizados na Bacia do Corumbataí, na qual está inserida a área de estudo, Brino (1973) elucida que a variação pluviométrica enquadra-se às características de regiões tropicais, com períodos chuvosos de outubro a março, com mais de 80% da precipitação anual, e um período seco de abril a setembro. Como afirmam Brino & Tavares (1982 apud. CASTRO, 1995, p.13) o período mais chuvoso de Rio Claro compreende as estações de primavera e verão. Os meses mais chuvosos são dezembro e janeiro, que apresentam ocorrência de chuva em metade dos dias e sequências mais prolongadas de dias chuvosos. Nos períodos mais secos destacam-se os meses de maio a agosto.

De acordo com trabalhos realizados por Castro (1995) para precipitações entre 1993 e 1994, o autor pode caracterizar a tendência climática das precipitações como em torno de 60% para precipitações frontais, entre 30 e 40% de convectivas, sendo 2/3 de origem extratropical. Das precipitações frontais, mais de 80% foram identificadas com origem em frentes frias, e o restante, por frentes quentes. A distribuição espacial das precipitações sofre influência de fatores topográficos, da direção dos ventos e da própria urbanização, e suas maiores intensidades predominam na área central e a NE, sendo menos intensas em setores a sul da cidade.

Quanto à distribuição anual de chuvas de Rio Claro, de abril a setembro ocorre o período seco com índices pluviométricos médios de 30 a 90 mm por mês e, de outubro a março, período úmido, há índices pluviométricos médios de 120 a 260 mm por mês. As alturas médias mensais de chuva fornecem uma quantidade de 1505 mm de chuva por ano (CONCEIÇÃO, BONOTTO, 2003).

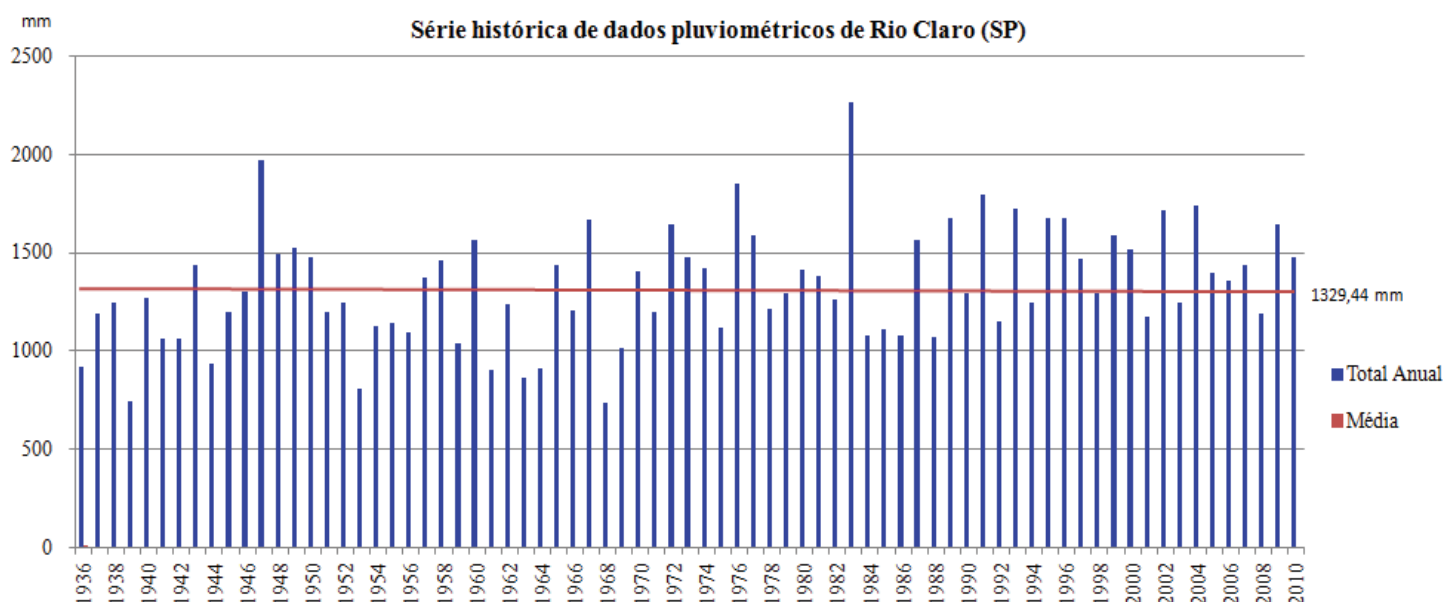
Com base nos dados fornecidos pelo posto pluviométrico DAEE/SP D4-012, localizado na bacia do Ribeirão Claro (Horto), foram obtidos os dados de 1936 a 1992, de

1993 a 2010 foram obtidos dados fornecidos pelo posto DAEE/SP D4-112, da estação meteorológica do CEAPLA – Centro de Análise e Planejamento Ambiental. As alturas mensais de chuva (Tabela 1) e a precipitação média mensal (figura 3) caracterizam a distribuição das chuvas no município de Rio Claro.

Tabela 1: Alturas mensais de precipitação (mm) para o período de 1936 a 2010.

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
241,3	200,2	147,7	62,2	58,7	37,9	29,7	28,7	63,8	121,2	142,7	213,9

Figura 3: Série histórica de dados pluviométricos de Rio Claro (SP).



Fonte: Posto DAEE/SP D4 012 (Horto) – de 1936 a 1992, e posto DAEE/SP D4 112 (CEAPLA/UNESP) – de 1993 a 2010.

Ressalta-se que, considerando-se as alturas médias mensais de precipitação da série histórica de 1936 a 2010, o município de Rio Claro apresenta os meses mais chuvosos de dezembro e janeiro, com alturas acima de 210 mm, e portanto, os mais críticos em termos de probabilidade de ocorrência de situações de risco a inundação. Aliado a isso, verifica-se a tendência a anos mais chuvos a partir do ano de 1989, onde há o aumento do volume total das precipitações por ano, as chuvas se distribuem mais uniformemente, com totais anuais acima de 1200 mm.

3.3. Breve histórico de ocupação da cidade de Rio Claro

A cultura cafeeira foi introduzida no Brasil no começo do século XVIII no estado do Pará. No entanto, o clima quente e úmido não foi favorável à fixação das plantações, que foram retomadas no início do século XIX, no Rio de Janeiro. Na Serra do Mar, a Mata Atlântica foi derrubada, porém, os altos índices pluviométricos e as vertentes íngremes resultavam em erosão e lixiviação dos solos, tornando o cultivo inviável. As plantações necessitavam de novas terras, e o café teve sua expansão pelo Vale do Paraíba, alcançando São Paulo e o interior entre 1800 e 1820 (TROPPMAIR, 1998).

Ao longo do percurso de expansão do café, os tropeiros, que adentravam os sertões do interior de São Paulo através do relevo suave da Depressão Periférica, faziam pousos-, que resultaram no surgimento das cidades da região, como Rio Claro. As caravanas que seguiam em direção aos sertões de Araraquara, faziam das margens do Córrego da Servidão seu local de descanso e pernoite. Pouso de tropas a beira da estrada nasce Rio Claro, e nas margens do Córrego da Servidão (hoje Espaço Livre) surgem em 1825 as primeiras casas, e o novo bairro conta com 800 pessoas. O aglomerado foi estabelecido em tabuleiro de xadrez, as ruas em ângulo reto e quase paralelas aos pontos cardeais, semelhante às plantas de Piracicaba e Limeira (TROPPMAIR, 1998).

O povoado é nomeado cidade em 1857. Isso se deve principalmente a fatores econômicos que contribuíram para o desenvolvimento da cidade. Entre as décadas de 1830 a 1870, perdurando até 1900, o café invadiu as terras do município, e passou a fazer parte do cenário agrícola, caracterizado pelo cultivo (em menor escala) da cana-de-açúcar, milho, algodão e arroz. Neste período, Rio Claro contou com mais de 3.300 escravos, e, após a abolição, a adaptação da mão-de-obra se prolongou por anos, e teve o auxílio principalmente de colonos alemães, suíços e italianos. Estes trabalhadores juntamente aos fazendeiros iniciaram o povoamento da cidade (TROPPMAIR, 1998).

O progresso de Rio Claro foi marcado pela vinda do trem de ferro que conectava as cidades da Depressão Periférica Paulista à capital, São Paulo. Construída pela Cia Paulista, a estrada de ferro que ligava Santos a São Paulo e Jundiaí a Campinas se estendeu a Rio Claro, em 1881, e garantiu o escoamento da produção de café das grandes fazendas. A construção da estrada férrea bem como a movimentação econômica trazida por ela, associada à implantação do sistema de iluminação elétrica neste mesmo período, alavancou outras atividades econômicas, como o comércio e a indústria. De 1900 a 1950, a agricultura e a pecuária tiveram um decréscimo acentuado, o que provocou a divisão das grandes fazendas e originou

sítios e bairros da cidade. Após este período aos dias atuais a cana-de-açúcar retorna às plantações e passa a ser predominante no uso do solo, somado ainda as pastagens. No entanto, a contribuição econômica das atividades relacionadas ao cultivo do café e da cana foi substituída pela atividade industrial, que atualmente contribui com mais de 50% da economia do município (TROPPMAIR, 1998).

Sobre o processo de ocupação pela urbanização, estudos realizados por Garcia et al. (1983) sobre a expansão urbana de Rio Claro permitiram identificar a aceleração do crescimento das áreas ocupadas a partir de 1972, em eixo longitudinal, sendo de maior probabilidade de expansão nos setores da zona norte da cidade, e mais especificamente no setor NW. A estabilidade da expansão no quadrante SE desta década, e a tendência de estagnação deste setor, é devido à área além da linha férrea estar limitada pelo Horto (Floresta Edmundo Navarro de Andrade). A área aquém da ferrovia concentra bairros de classe média alta, com lotes de preços elevados.

O uso do solo para fins residenciais teve início na área central da cidade, principalmente entre as ruas 1 e 6. Na década de 1950 as casas se distribuíam no médio curso do Córrego da Servidão, e ocupavam as vertentes de seu vale de forma quase simétrica, somando uma área de uso urbano com mais de 5 km². Este processo de expansão ocasionou a supressão dos mananciais destas áreas, tornando necessária a intervenção de obras de engenharia.

De acordo com Almeida (2002, p.92), em 1970 a nascente do Córrego da Servidão foi represada, dando surgimento ao “Lago Azul”. “As águas vindas das ruas dos bairros situados a montante dessa área traziam muitos sedimentos (terra, lixo, entulho) e acabaram assoreando o lago (...) o Córrego da Servidão foi canalizado e segue debaixo da Avenida Visconde de Rio Claro”. A autora destaca que mesmo depois da canalização há ocorrência de inundações, infiltrações, erosão e contaminação das águas por esgoto em diferentes pontos do córrego e também do lago. Na década de 80 foram realizadas obras de recuperação e desassoreamento do Lago Azul, com arborização e instalação de equipamentos de lazer, estabelecendo-se nesta área o Parque Municipal.

Neste contexto Troppmair (2008) aborda o aspecto demográfico do município (Tabela 2), contribuindo na compreensão do aumento da população associado ao crescimento da área urbana, principalmente da década de 1970 em diante.

Tabela 2: Crescimento demográfico de Rio Claro.

Ano	População Total (habitantes)
1827	800
1871	8.000
1901	12.000
1920	50.400
1950	48.000
1970	75.000
1985	121.700
2000	167.000
2003	178.000
2006	190.000
2011	188.006

Fonte: Dados do SEADE.

Segundo dados do IBGE, em 2006 a população total chegou a 190.000. No entanto, em 2004 e 2005 os habitantes eram em torno de 185.000, e entre 2007 e 2010 a população total foi registrada em torno de 186.000. O crescente aumento populacional seguido de decréscimo, mesmo que pequeno, é destacado por Troppmair (2008): em um século o índice de natalidade caiu de 37% para 12,8%, e o índice de mortalidade caiu de 22% para 6,7%.

Segundo dados do SEADE, o município de Rio Claro, que abrange também os distritos de Assistência e Ajapi, apresenta atualmente população total de 188.006 habitantes, sendo os habitantes predominantemente residentes da área urbana, menos de 3% da população vive em áreas rurais. A densidade demográfica de Rio Claro é de 377,51 hab./km², sendo 67% da população com idade entre 16 e 59 anos, em torno de 20% de jovens até 15 anos, e 13% com idade acima de 60 anos. Considerando as atividades de campo e a planta cadastral, identificaram-se os principais tipos de uso da terra, havendo um predomínio do uso urbano residencial (79%) e industrial (21%).

Segundo o Departamento Autônomo de Água e Esgoto (DAAE), Rio Claro conta com 2 estações de tratamento de água e 36 reservatórios, que são responsáveis pelo abastecimento de 100% dos moradores da área urbana que possuem água encanada e tratada. O esgoto de 99,4% da população é coletado, e 40% deste é tratado. A coleta de lixo é realizada em 100% da área urbana de acordo com Departamento de Resíduos Sólidos Municipal.

No contexto do crescimento demográfico, Rossetti (2007) aborda a relação entre a expansão urbana de Rio Claro e as características de uso e ocupação da terra a partir da análise multitemporal de aerofotografias entre os anos de 1962 a 2006. Esta autora destaca que a cobertura vegetal das áreas públicas (algumas praças e jardins) tornou-se mais densa,

possivelmente devido a implantação de equipamentos urbanos sob a perspectiva de áreas verdes para fins de qualidade ambiental, cênico e lazer, e clubes sociais/esportivos.

Na área onde encontra-se o “Lago Azul”, até a década de 60 esta área constituía a nascente do Córrego da Servidão, com a presença de cobertura vegetal nativa de várzea. A partir de 1972, teve início o processo de urbanização da área, com a retirada da cobertura vegetal e implantação de edificações que compuseram o Centro Cultural Roberto Palmari. Houve ainda a implantação de gramíneas e herbáceas/arbustivas ornamentais visando fins de recreação e lazer. O Córrego da Servidão, sobre o qual localiza-se a Avenida Visconde de Rio Claro, uma das principais vias de circulação da cidade, o canal encontrava-se exposto e suas várzeas apresentavam cobertura vegetal nativa na década de 1960. A partir de 1972 houve a canalização de seu leito fluvial e a remoção da vegetação de várzea, exceto em setores a jusante do córrego, próximo à Rodovia Washington Luis (ROSSETTI, 2007).

Desta forma, o processo de evolução do uso da terra e as características de expansão da cidade proporcionaram a atual configuração da malha urbana e, por conseguinte, agravaram as situações de inundação. Sobre a ocorrência de enchentes e inundações em Rio Claro destaca-se os estudos realizados por Grilo (1992) sobre precipitação pluvial associada ao escoamento superficial de Rio Claro. Esta autora realizou um levantamento de matérias que noticiaram situações de enchentes, formando um acervo detalhado para os anos de 1980 a 1991. Este trabalho aborda a questão do escoamento superficial sob a perspectiva da urbanização, e o crescimento populacional em ritmos maiores que o planejamento dos recursos hídricos.

Grilo (1992, p.17) realizou um mapeamento da rede de galerias pluviais e constatou a implantação inadequada desse equipamento urbano. No período de estudo foram identificados 50,65 km lineares de galerias pluviais, porém a maior densidade encontra-se em áreas de vertente, e há uma situação de carência de galerias pluviais em áreas centrais e bairros próximos. Além do estado de conservação de alguns bueiros (bocas de lobo), que encontravam-se entupidos por lixo e mato, a autora elucida a questão das águas pluviais “que são atiradas na rede de esgoto e nos bueiros situados na área mais baixa, próximo ao Córrego da Servidão, (...) esses bueiros possuem capacidade de vazão inferior ao volume de escoamento durante as grandes chuvas”.

Durante a chuva ocorrida em 09 de junho de 2011, por exemplo, foram registrados pontos de alagamentos, localizados entre a Avenida Visconde de Rio Claro e o Pontilhão da Rodovia Washington Luiz, nas redondezas da Rodoviária e da Vila Stecca. Neste trecho, as

águas do Córrego do Wenzel confluem para o Córrego da Servidão, e ocorre alagamento das ruas como numa planície de inundação (figura 4).

Em contrato com a Empresa Foz do Brasil, o município busca a separação do escoamento das águas pluviais e de esgoto, com a construção de galerias pluviais paralelas ao Córrego da Servidão. Em meio às obras até então em andamento, verificou-se o volume deste córrego à jusante, no bairro Inocoop, em 9 de junho de 2011 (figura 5). Neste trecho canalizado, as obras funcionaram como um reservatório provisório.

Figura 4: Setor de confluência do Córrego da Servidão e Córrego do Wenzel (próximo a Rodoviária).



Fonte: Isabel C. Moraes (09 de jun.2011).

Figura 5: Setor canalizado, no bairro Inocoop, com atenuação das cheias.



Fonte: Isabel C. Moraes (09 de jun.2011).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho, adotou-se a abordagem descrita a seguir:

4.1. Materiais:

- Softwares: Arcgis 9.3, o ArcView GIS 3.2, Spring 4.3.3IPHS1
- Sistema de Posicionamento Global – GPS
- Cartas topográficas de Rio Claro – 1:10.000 (IGC/SP).
- Imagens aerofotogramétricas - aerolevantamentos de 1958 e 1972, em escala de 1:25.000, e 2006, em escala de 1:30.000

4.2. O método do SCS – Soil Conservation Service

O Soil Conservation Service, atualmente NRCS – National Resource Conservation Service, do United States Department of Agriculture, sugeriu em 1972 um modelo empírico para estimar a chuva excedente com base no potencial de absorção de umidade do solo. Por meio da análise de mais de 3 mil tipos de solo e coberturas de vegetação e plantações, foi estabelecida uma relação empírica que correlaciona a capacidade de armazenamento das precipitações na bacia a um índice denominado curva número ou número de curva – CN (CANHOLI, 2005, p.89).

A estimativa da CN baseia-se em características do tipo de solo, uso e ocupação da terra e do grau inicial de saturação, que é a condição de umidade antecedente. A correlação

entre o armazenamento máximo (S) e o CN (quando CN é igual a 100 o armazenamento é nulo) é expressa pela equação (em milímetros):

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

A princípio, os valores de CN podem variar de 0 a 100, porém, na prática o USDA (1986) proporciona valores para coberturas permeáveis de 30 (superfícies em boas condições em solos tipo A) até 94 (para solos tipo D expostos). Sob as mesmas condições de precipitação, baixos valores de CN significam que a superfície tem um alto potencial de retenção de água. Valores de CN mais altos significam potencial de retenção mais baixo (SCHAFFER, NOGUEIRA, SLUTER, 2011). Para superfícies impermeáveis, inicialmente foi atribuído um CN = 100 (SCS, 1972), que foi em seguida substituído por um CN = 98. Para áreas permeáveis os CN são estimados em função dos grupos hidrológicos de solo (A, B, C ou D) e pelo mapeamento de uso e ocupação do solo.

4.3. Caracterização hidrológica dos solos aplicada ao Método SCS

A partir do método do SCS (1986), são atribuídos aos solos grupos hidrológicos que com base nas medições de dados de chuva, escoamento superficial e infiltração. A atribuição dos solos aos grupos é feita com base na comparação entre perfis de solos não classificados com perfis de solos já classificados nos grupos hidrológicos. Parte-se da premissa de que solos encontrados dentro de uma mesma região climática são semelhantes na profundidade de seus horizontes ou do lençol freático, ou seja, há similaridades nas taxas de transmissão de água, textura, estrutura e saturação, que apresentaram respostas semelhantes de escoamento superficial (SCS, 2007).

O método do SCS (1986) classifica os grupos hidrológicos em A, B, C e D, a partir das propriedades do solo, como saturação hidráulica, condutividade hidráulica, profundidade das camadas impermeáveis e do lençol freático. No presente estudo, a textura dos perfis de solo foi o parâmetro utilizado para a classificação dos grupos hidrológicos. Com base em SCS (2007), os parâmetros de classificação segundo a textura são:

Grupo A – Solos com teor de argila menor que 10% e mais que 90% de areia. Possuem baixo potencial de escoamento superficial quando completamente úmidos e a água

transita no perfil livremente. Não há rocha nem camadas argilosas e nem mesmo densificadas até a profundidade de 1,5 m;

Grupo B – Solos com teor de argila entre 10 e 20% e de 50 a 90% de areia. Possuem de baixo a moderado potencial de escoamento superficial quando completamente úmidos e não há impedimento de água nas camadas do solo. Não pode haver pedras e nem camadas argilosas até 1,5 m, mas é quase sempre presente camada mais densificada que a camada superficial;

Grupo C – Solos com teor de argila entre 20 e 40% e menos que 50% de areia. Possuem de moderado a alto potencial de escoamento superficial quando completamente úmidos e a percolação da água no perfil é restrita. Nota-se a cerca de 60 cm de profundidade camada mais densificada que no Grupo B, mas ainda longe das condições de impermeabilidade;

Grupo D – Solos com teor de argila maior que 40% e menos que 50% de areia. Possuem alto potencial de escoamento superficial e a transição da água no perfil é restrita ou muito restrita. Camada densificada a uns 50 cm de profundidade ou solos arenosos como B, mas com camada argilosa quase impermeável ou horizonte de seixos rolados.

Para o planejamento da coleta de amostras de solo, optou-se por uma análise prévia da aerofotografia referente a 2006 para verificar a existência de terrenos não ocupados que permitissem a coleta em seqüências de pontos de tradagem. Assim, as tradagens foram realizadas por topossequências, onde se considera a declividade do terreno associadas à pedogênese, permitindo associar outros perfis não analisados comparando-se características de declividade do terreno. Foram realizadas tradagens em 22 pontos, organizados em 5 topossequências, até a profundidade de 1,50 m (Figura 5).

Figura 6 – Tradagens de amostras de solos e observação dos perfis até a profundidade de 1,50 m.



Fonte: Registrada pelo autor.

As análises granulométricas foram realizadas no LAGEA – Laboratório de Geoquímica Ambiental do Departamento de Planejamento Territorial e Geoprocessamento (DEPLAN) – UNESP de Rio Claro. Foi utilizado o método do densímetro (BOUYOUCOS, 1927), modificado pelo IAC e descrito por Camargo et al. (2009), cujo princípio refere-se à desagregação mecânica da amostra, dispersão e avaliação da proporção relativa das partículas primárias por sedimentação em meio aquoso. Este método não apresenta dados tão exatos como o método da pipeta, por exemplo, o que torna o processo de aferição mais ágil. No entanto, este método apresenta resultados que satisfazem os parâmetros texturais proposto pelo SCS.

Os materiais utilizados foram: mesa agitadora; balão volumétrico de 1000 mL; proveta de 1000 mL; densímetro; êmbolo; cronômetro; e balança de precisão. Para o preparo do dispersante químico são utilizados 4g de hidróxido de sódio e 10g de hexametáfosfato de sódio diluídos em água destilada até atingir o volume de 1000 mL. As amostras, previamente secas no ambiente, foram destorroadas, peneiradas em malha de 2 mm e homogeneizadas para a separação da amostra e pesagem. Para a análise granulométrica de cada amostra, foram pesadas 50 g e adicionados 250 mL do dispersante químico. Em recipiente fechado, esta

solução permanece em mesa agitadora orbital por 17 horas, com rotação de 170 rpm. Após agitação, a solução é transferida para uma proveta de 1000 mL e seu volume foi completado com água destilada. Durante 1 minuto esta solução é agitada com êmbolo para que seja homogeneizada. O densímetro é inserido na solução e após 35 segundos é efetuada a primeira leitura, sendo a segunda leitura realizada após duas horas.

Previamente aferida, a leitura de amostra branca foi definida com valor 3, o fator F – umidade presente na amostra - foi estabelecido como valor 1, uma vez que foram secas em ambiente, e as frações granulométricas foram calculadas a partir das equações:

$$\% \text{ argila} = [(2^{\text{a}} \text{ leitura} - \text{leitura branca}) / (50 * F)] * 100$$

$$\% \text{ silte} = \{[(1^{\text{a}} \text{ leitura} - \text{leitura branca}) - (2^{\text{a}} \text{ leitura} - \text{leitura branca})] / (50 * F)\} * 100$$

$$\% \text{ areia} = [(50 * F) - (1^{\text{a}} \text{ leitura} - \text{leitura branca}) / (50 * F)] * 100$$

4.4. Processamento de imagens digitais e mapeamento do uso e ocupação da terra

As bacias hidrográficas urbanas são compostas por uma variedade de feições, ou seja, existem diversas classes de uso e ocupação do solo, e que apresentam características hidrológicas diferentes. Assim, a elaboração de material cartográfico permitiu a análise da evolução do uso e ocupação do solo, nos anos de 1958, 1972 e 2006, e das alterações nas condições hidrológicas provenientes principalmente da urbanização e da retinilização do canal. Os mapas temáticos de uso e ocupação são gerados a partir da análise interpretativa de aerofotografias. A separação dos objetos referentes às coberturas vegetais e demais feições intra-urbanas exigem o processamento de imagens digitais, que foi dividido em duas etapas: a 1ª etapa corresponde ao pré-processamento, onde houve o preparo das imagens a serem classificadas; e a 2ª etapa é o processamento propriamente dito, onde foram aplicadas as funções de classificação da imagem.

As imagens aerofotogramétricas analógicas dos cenários de 1958 e 1972, em escala de 1:25.000, e 2006, na escala de 1: 30.000 já em meio digital, foram transpostas para o meio digital e submetidas a procedimentos de pré-processamento. Foram desenvolvidos procedimentos de georreferenciamento das imagens e de redução das distorções radiométricas e geométricas. Os erros geométricos são produzidos pelas variações de altitude e direção do apontamento da plataforma e sistema sensor, pela distorção panorâmica, curvatura da Terra e processo de refração da radiação pela atmosfera (transparência óptica da atmosfera). Os erros radiométricos são decorrentes de efeitos produzidos pelos instrumentos do sensor e também

pelas condições atmosféricas. A minimização das distorções das imagens foi realizada através da aplicação de ortorretificação de imagens, equalização de seus níveis de cinza e a mosaicagem (ROSSETTI, 2007).

A ortorretificação das imagens foi realizada com a utilização do software ENVI, com a finalidade de corrigir as distorções radiais devido à geometria de apontamento do sistema sensor no momento do imageamento. A equalização dos níveis de cinza nas imagens aerofotogramétricas varia em função das características da área imageada, do momento do imageamento (geometria de cena) e do processo de geração das imagens (processamentos em laboratório fotográfico especializado). Desta forma, as imagens monocromáticas - pancromáticas sequenciais não apresentam o mesmo intervalo de níveis de cinza, mesmo para iguais condições de geometria de cena.

Com a finalidade de homogeneizar a qualidade de contraste tonal entre as imagens, Rossetti (2007) utilizou o software *SPRING*, aplicou-se a função de “análise estatística de amostras”, com o objetivo de calcular e apresentar à média e a variância dos valores de níveis de cinza das amostras de cada foto e, por fim executar cálculos de ganhos para se igualar médias e variâncias das imagens. Como a área da bacia hidrográfica em estudo abrange número variado de fotos aéreas para cada cenário, foi necessária “acoplar” as fotos por processo de mosaicagem para compreender a área da bacia. Os procedimentos de mosaicagem foram realizados no software *SPRING*, através da importação das ortofotos (imagens) em formato *geotif*, geradas no *ENVI* (figura 7).

A partir dos resultados das correções na fase de pré-processamento, as aerofotografias permitiram a extração de informações por meio do reconhecimento de padrões e objetos homogêneos. Este processo de classificação da imagem permitiu a identificação de classes de uso e ocupação do solo e sua representação em mapas de pixels classificados.

Como o objeto de estudo era caracterizar cada cenário de uso e ocupação do solo sob a perspectiva da ocupação urbana, as diferentes fases de plantio e cultivos agrícolas, principalmente relacionados à sazonalidade, não foram consideradas. Desta maneira, os elementos de fotointerpretação com predomínio de solo exposto, mas que permitiram identificar o início de plantações a partir de feições regulares, como reflorestamento e cana-de-açúcar, foram classificados conforme seu uso e ocupação e não apenas conforme as cores e texturas, identificadas automaticamente, e que foram elementos essenciais no processo de classificação.

A identificação das feições das classes de interesse foi fundamentada na análise interpretativa das imagens aerofotogramétricas, identificando e reconhecendo os padrões dos

alvos pertencentes à cobertura vegetal e os demais alvos intra-urbanos. Os elementos cor, tamanho, forma, textura e localização foram utilizados para o reconhecimento dos padrões de elementos de fotointerpretação (tabela 3). Com base em parâmetros de infiltração, as classes de uso e ocupação do solo foram relacionadas a características de escoamento superficial semelhantes, definidas em:

- a. arbórea: que inclui áreas de reflorestamento, citrus, café e vegetação arbórea;
- b. campo gramínea: que inclui áreas com o cultivo de cana-de-açúcar;
- c. campo gramínea com solo exposto;
- d. solo exposto;
- e. arruamento com asfalto;
- f. arruamento com solo exposto;
- g. área edificada.

Figura 7 – Mosaico da Bacia do Córrego da Servidão na cidade de Rio Claro nos anos de 1958, 1972 e 2006.

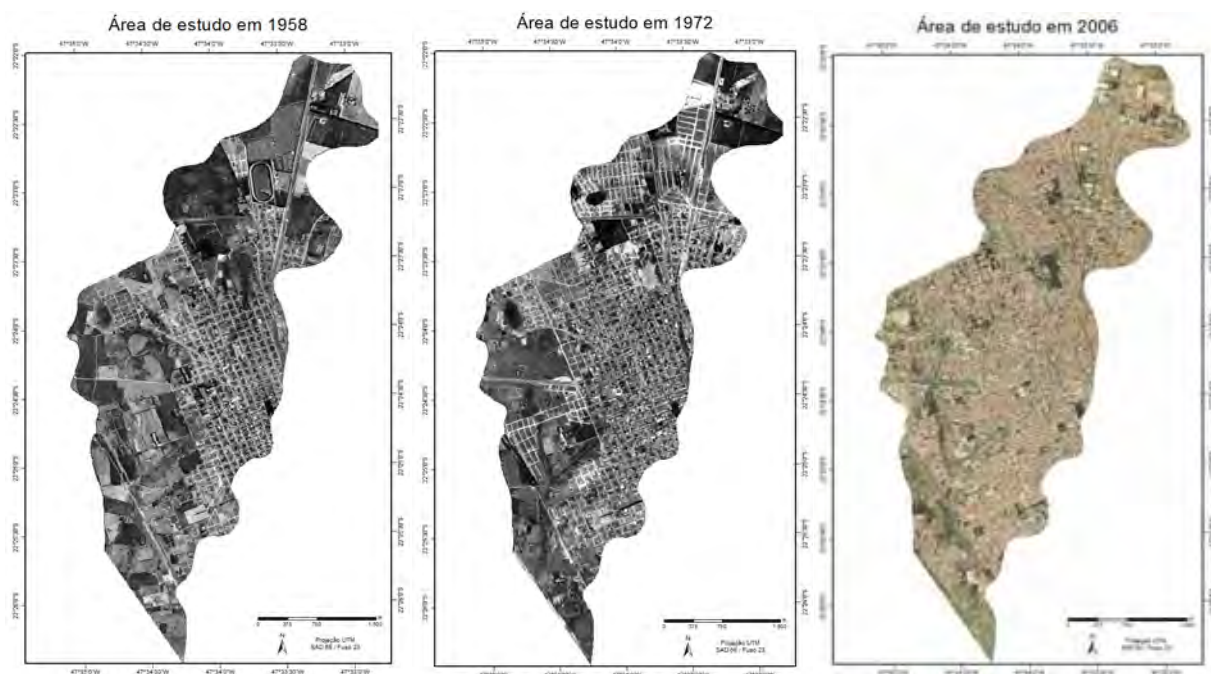
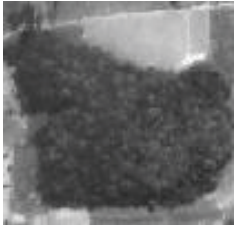
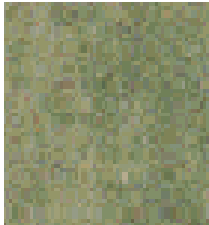
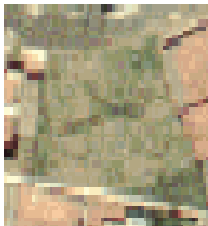
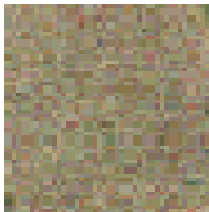
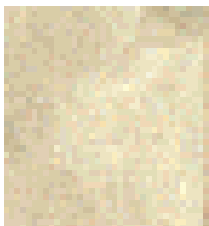
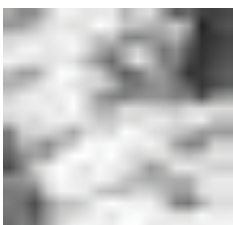
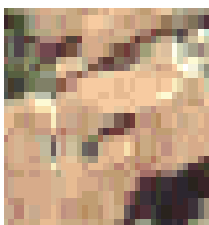
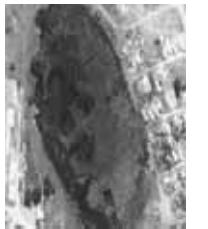


Tabela 3: Definição de padrões de reconhecimento de alvos de cobertura vegetal e intra-urbanos por meio de imagens aerofotogramétricas.

Classes	Escala de 1:25.00		Escala de 1:30.000	
Arbórea				
Gramínea				
Gramínea com solo exposto				
Solo Exposto				
Edificação				

Arruamento com asfalto				
Arruamento com solo exposto				
Lago				

Os procedimentos de geração dos mapas temáticos foram realizados a partir de etapas de segmentação e classificação. A segmentação consiste em um processo em que a imagem é dividida em regiões que correspondem à área de interesse, sendo as regiões um conjunto de pixels contíguos e que apresentam uniformidade. A segmentação multiresolução aplicada à abordagem de crescimento de regiões, que consiste em uma técnica de agrupamento de dados, na qual regiões adjacentes são agrupadas segundo um critério de similaridade, estabelecido pelo algoritmo utilizado. No processo de segmentação são estabelecidos parâmetros que definem o nível de detalhe segundo as classes de interesse. Os parâmetros são:

- limiar de similaridade = valor mínimo do qual duas classes são consideradas similares e agrupadas em uma única região;
- limiar de área = é o menor valor da área (em pixels) para que uma região seja separada de outra;
- suavização de arcos = permite a suavização das bordas das regiões a serem geradas.

Esta etapa de geração de regiões na imagem é o que permite a identificação das classes de uso e ocupação do solo e interfere diretamente no produto cartográfico final. Assim, optou-se pela segmentação com parâmetros diferentes para as áreas rurais e as áreas urbanas, uma vez que alvos como edificações e terrenos baldios, inseridos em quarteirões, exigem maior nível de detalhe para a classificação dos alvos. A definição das áreas a serem segmentadas, diferenciadas pela variação de coberturas vegetais (área rural) e alvos intra-urbanos, foi definida pelo “desenho” do *retângulo envolvente*. A segmentação das aerofotografias foi realizada a partir do software SPRING 4.3.3. Os parâmetros de similaridade e de área (em pixels) para as áreas rurais foram, respectivamente: 25-30 para o cenário de 1958; 12-28, para o cenário de 1972; e 12-15 para 2006. Para todos os cenários, as áreas urbanas foram segmentadas com parâmetros 12-15, onde se obteve regiões que contemplaram as classes de interesse.

Para a classificação das áreas urbanas, devido às feições de maior detalhe e a variação do nível de cinza, que é maior em função do tamanho reduzido dos alvos, optou-se pela classificação manual. O mapeamento por procedimentos convencionais de análise e interpretação de imagens foi feito a partir da utilização da ferramenta de *edição vetorial* de dados, que permitiu associar polígonos (regiões) a classes de uso.

Para as áreas rurais optou-se pela classificação por regiões de forma não-supervisionada, através do classificador Isoseg. Este classificador é um algoritmo de agrupamento de dados não-supervisionado que se utiliza dos atributos estatísticos das regiões: a matriz de covariância e o vetor de média, para estimar o valor central de cada classe. Nesta etapa definiu-se um limiar de aceitação com valor de 95%. Este limiar define a distância de Mahalanobis, onde o algoritmo detecta o maior número de classes quanto maior o valor do limiar. Para a detecção das classes ordenam-se as regiões de forma decrescente de área e inicia-se o procedimento para agrupá-las em classes que são associadas a todas as regiões cuja distância de Mahalanobis for inferior a distância definida pelo limiar de aceitação. A primeira classe teve como parâmetros estatísticos as regiões de maior área, e assim, o algoritmo repete a associação de classes em regiões menores (ordem decrescente) até que todas as regiões sejam detectadas.

O material cartográfico, produto da classificação das áreas urbanas e rurais, foi gerado em formato vetorial. A representação em vetor busca representar o mais fiel possível as entidades geográficas, tanto em sua posição, comprimento e dimensão. Devido à similaridade das características dos alvos, principalmente de elementos como cor e textura, um polígono

pode conter mais de uma feição, que deveria estar associada a mais de uma classe. Porém, o formato vetorial não permite ajustes que interfiram na área ou forma do polígono, sendo necessária a transformação dos dados para o formato matricial. Neste processo de conversão pode haver perdas, uma vez que as bordas dos polígonos que antes eram contínuas são discretizadas de acordo com a resolução da foto.

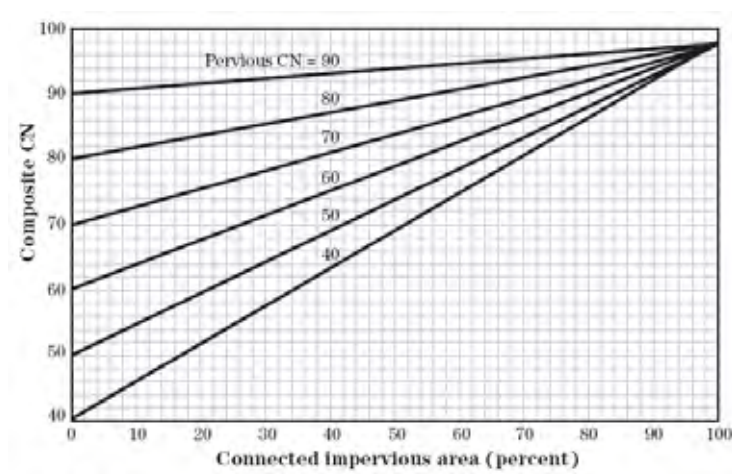
4.5. Estimativa da Curva-Número (CN)

Para a elaboração dos cálculos da CN de áreas urbanas, diversos fatores foram considerados, como a porcentagem das áreas impermeáveis e o percurso do escoamento superficial destas áreas para o sistema de drenagem. Os valores de CN foram estimados partindo-se do pressuposto de que áreas permeáveis urbanas são equivalentes a pastagens em boas condições hidrológicas; áreas impermeáveis apresentam valores de CN de 98 e são diretamente conectadas ao sistema de drenagem; e os tipos de ocupação a serem tratados assumem porcentagem de área impermeável (SCS, 2004).

Desta forma, o SCS considera dois tipos de áreas impermeáveis, as totalmente conectadas e as parcialmente conectadas a áreas permeáveis. Significando que, as partes permeáveis também podem receber os deflúvios provenientes das áreas impermeáveis a elas direcionada (CANHOLI, 2005, p.90-91).

Caso toda a área impermeável esteja diretamente conectada ao sistema de drenagem, o CN é representado por (figura 8):

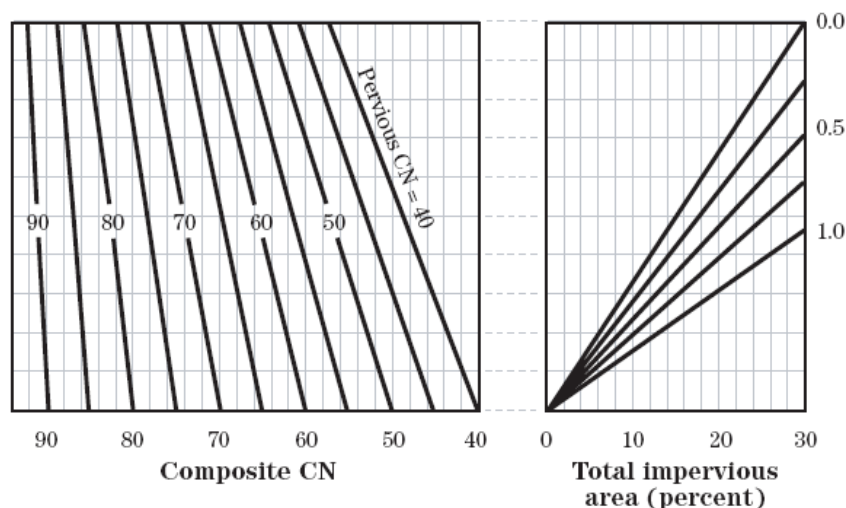
Figura 8: Ábaco para a determinação da CN para área impermeável conectada.



Fonte: (SCS, 2004).

Caso o escoamento das áreas impermeáveis percorra áreas permeáveis antes de alcançar o sistema de drenagem, o CN é representado por (figura 9):

Figura 9: Ábaco para a determinação da CN para área impermeável conectada e total da área impermeável menor que 30%.



Fonte: (SCS, 2004).

A estimativa do CN para áreas urbanas é apresentada na tabela 4, considerando-se os parâmetros já vistos, como a porcentagem de área impermeável e o grupo hidrológico dos solos.

Tabela 4 – Valores de CN para diferentes uso e ocupação do solo (SCS, 2004).

Descrição do tipo de solo/ocupação e condição hidrológica	Área impermeável (%)	Tipo de solo			
		A	B	C	D
Áreas livres					
Condições ruins (gramado <50%)		68	79	86	89
Condições normais (gramados de 50% a 75%)		49	69	79	84
Condições excelentes (gramados >75%)		39	61	74	80
Áreas impermeáveis					
Estacionamentos pavimentados, telhados, viadutos, etc.		98	98	98	98
Ruas e estradas					
Pavimentadas com guias e drenagem		98	98	98	98
Pavimentos com valas abertas / Paralelepípedos		76	85	89	91
Terra		72	82	87	89
Áreas comerciais	85	89	92	94	95
Distritos industriais	72	81	88	91	93

Áreas residências em função da área impermeável (%)					
Tipo 1 (lotes <500 m ² , em média 65% impermeável)	65	77	85	90	92
Tipo 2 (lotes de 1000 m ² , em média 38% impermeável)	38	61	75	83	87
Tipo 3 (lotes de 1300 m ² , em média 30% impermeável)	25	54	70	80	85
Tipo 4 (lotes de 2000 m ² , em média 25% impermeável)	20	51	68	79	84
Tipo 5 (lotes de 4000 m ² , em média 20% impermeável)	12	45	65	77	82

No cálculo do valor da CN de uma área, realiza-se a média ponderada dos valores de CN conforme as respectivas áreas. O tamanho da área (em porcentagem) de cada classe de uso e ocupação do solo terá uma ponderação diferente para cada CN. Da mesma forma, os grupos hidrológicos de solo também são parâmetro importante no desenvolvimento dos modelos hidrológicos. Tendo em vista compreender a dinâmica do escoamento superficial na bacia, no contexto de seus variados usos e da identificação dos pontos mais críticos de alagamentos, tornou-se preponderante neste estudo, a divisão da bacia em setores.

4.6. Discretização da bacia hidrográfica

A necessidade de resposta em diferentes pontos da bacia, a heterogeneidade dos processos físicos, a disponibilidade de informações sobre a superfície terrestre e o avanço da informática são variáveis essenciais no desenvolvimento da modelagem hidrológica. Como seriam identificados pontos de inundação em caso de concentração da precipitação distante de seu exutório? Contornam-se problemas como este pela subdivisão das bacias em sub-bacias menores, e a aplicação dos modelos conceituais concentrados em cada uma delas, mas as possibilidades da consideração da heterogeneidade espacial aumentaram com a disponibilidade de dados de sensoriamento remoto e auxílio dos SIGs (COLLISCHONN, 2001).

Assim, a discretização da bacia teve como objetivo realizar uma modelagem de maior detalhe, com base nas especificidades hidrogeomorfológicas de cada setor da bacia, aliada aos tipos de solo e aos cálculos de CN mais próximo possível das condições reais de escoamento superficial. Realizou-se uma análise do comportamento do escoamento superficial e da concentração dos fluxos para a definição de sub-bacias que compreendessem características semelhantes quanto ao sistema de drenagem.

Para delimitar as sub-bacias a partir de similaridades quanto ao comportamento do escoamento superficial, foi realizado o mapeamento do percurso preferencial dos fluxos como uma ferramenta orientadora na identificação de áreas de forte contribuição na propagação das

ondas de cheias. O método do Fluxo Múltiplo ou Fluxo Distribuído permite a espacialização de áreas que correspondem à tendência do percurso, sendo a declividade uma das principais variáveis-controle para a determinação deste percurso, inclui-se ainda a verificação dos fluxos mesmo frente a barreiras artificiais, como é o caso das estruturas urbanas da bacia. Os procedimentos adotados encontram-se descritos em Schäuble (2004) e Fontes (2009).

Segundo Fontes (2009), este método utiliza a matriz do terreno de interesse, a partir da qual é determinado o mapa da área de contribuição, calculando o valor da bacia de drenagem (em m² ou km²) de cada célula da matriz. Para cada célula também é atribuído o valor da declividade em sua área. Como em condições naturais o escoamento do fluxo tende a seguir diferentes orientações, o método do fluxo múltiplo calcula a área de contribuição considerando a distribuição proporcional do escoamento do fluxo entre todas as células a jusante de uma célula central. A opção pelo método *multiple flow* visou à minimização de erros derivados de métodos simplificados (*single flow*) onde numa matriz de terreno, apenas a célula que corresponde à direção de declive mais íngreme (maior valor) é predominante para orientação do fluxo à jusante, não executando distribuição ponderada entre as células do entorno (à jusante) à matriz principal.

Primeiramente, foi necessária a geração de uma superfície contínua da bacia, com dados vinculados a uma superfície real de terreno, para indicar formas de relevo (convexidades e concavidades) e associá-las ao escoamento dos fluxos d'água (dispersão e concentração/acumulação) ao longo da bacia de interesse. O MDE – modelo digital de elevação é uma representação matemática (formato matricial) da distribuição espacial de uma determinada característica geográfica do terreno.

Considerando o objetivo da modelagem numérica a identificação de áreas que tendem a concentração de fluxos secundários, não apenas o fluxo do canal principal, foi criado um arquivo *drenagem* para representar as principais ruas que concentram o escoamento (enxurradas) e que contribuem em termos de volume de água, como ‘tributários’ que drenam para o canal principal. Para a geração do MDE foi utilizada a ferramenta *topo to raster*, do software ArcGis 9.3, e os dados de entrada (*shapefile*): curvas de nível com equidistância de 5m e pontos cotados (a partir da base cartográfica em escala de 1:10000 – IGC/SP), lago, drenagem, entre outros. Estes dados interpolados geraram o *grid* (de grade retangular) com células de 5x5 m, tamanho estipulado devido a obtenção de resultado maior detalhe possível, considerando o processamento computacional e a necessidade da abordagem da pesquisa.

Para o mapeamento através do *multiple flow*, foi utilizado o software ArcView Gis 3.2. e ferramentas da extensão Hydrotools. Com a ferramenta *preparation* o MNT foi gerado utilizando como dado de entrada para gerar o mapa de *direção do fluxo*. O mapa de direção resultante e o MNT foram interpolados para o processo de correção matemática. Em seguida, com a ferramenta *Hydrology*, o mapa de *fluxo acumulado* é calculado a partir do mapa gerado pela correção com o ajuste do parâmetro MD – *multiple flow*. O parâmetro MDD8, que representa a ferramenta combinada entre *fluxo simple* e *múltiplo* apresentaram percursos preferenciais do fluxo menos marcantes, e por isso não contribuiu como o MD para a definição das sub-bacias.

4.7. Modelagem hidrológica para verificação de inundações

Em alguns casos, as bacias hidrográficas sem predisposição a enchentes e inundações tornam-se propensas a tal fenômeno devido a eventos chuvosos intensos e a intensidade das alterações de uso e ocupação do solo e de obras de drenagem desintegradas da dinâmica da água pluvial. Em muitos casos, a implantação de obras civis, com enfoque puramente na engenharia hidráulica, promove a aceleração do escoamento, acarretando na transferência dos problemas de enchentes para setores localizados a jusante das intervenções. Neste sentido, torna-se premente a avaliação da dinâmica do escoamento no contexto da área urbana da bacia hidrográfica do Córrego da Servidão em condições de pré e pós-ocupação e seus respectivos hidrogramas de cheia.

Para isso, foram utilizados modelos hidráulicos e hidrológicos, combinados com base na Metodologia de Modelagem Orientada a Objetos aplicada a Sistemas de Recursos Hídricos, apresentada por Viegas Filho (1999), empregando o programa computacional denominado IPHS1, apresentado em Tucci et. al. (1989), o qual utiliza os modelos do Soil Conservation Service (SCS, 2004), para conversão de chuva-vazão e para a propagação da chuva excedente, Muskingum-Cunge não linear, adaptado especificamente para condutos fechados para propagação das cheias em canais, e Pulz, para propagação em reservatórios, sendo este último necessário devido à presença de um reservatório na área urbana da bacia do Córrego da Servidão, ou seja, o Lago Azul.

As equações abaixo apresentam o algoritmo a serem empregado para obtenção da precipitação efetiva (a), da curva-número (b) e a relação chuva x vazão – hidrograma unitário

triangular (c) de acordo com Soil Conservation Service (SCS, 2004), para 6 intervalos de tempo de 600 s cada.

$$P_{ef} = \frac{(P - 0.2.S)^2}{(P + 0.8.S)} \quad (a)$$

Onde:

P = precipitação;

S = potencial máximo de armazenamento do solo para perda inicial correspondente a 20% da capacidade de armazenamento.

$$S = \frac{25,400}{CN} - 254 \quad (b)$$

Onde:

CN varia entre 0, para condutividade hidráulica infinita, e 100, para uma bacia totalmente impermeável.

$$Q = \frac{0,208 \times A}{t_a} \quad (c)$$

Onde:

Q = vazão (m^3/s), para $P_{ef} = 1_{mm}$;

A = área da bacia (Km^2);

t_a = tempo de ascensão (horas).

O escoamento de excesso que será propagado na rua será modelado usando-se a versão do modelo de Muskingum-Cunge não linear adaptado especificamente para condutos fechados, que admite contribuição lateral distribuída:

$$\frac{dS}{dt} = I - O; S = K[X.I + (1 - X).O]$$

Onde:

I_i = vazões de entrada;

O_i = vazões de saída;

S_i = acumulação;

K e X são denominados parâmetros de ajuste do canal, representativos do tempo de deslocamento e da influência das vazões de entrada e saída do trecho nas funções de armazenamento.

A Equação abaixo apresenta o modelo de Pulz para propagação em reservatório. Este modelo considera a variação de armazenamento no tempo em função das vazões de entrada e saída do reservatório. O termo da esquerda contempla as incógnitas do problema que se constituem pelo armazenamento e pela saída do reservatório no tempo t_2 .

$$\frac{S_2}{\Delta t} + 0.5.O_2 = \frac{.S_1}{\Delta t} - 0.5.O_1 + 0.5.(I_1 + I_2)$$

Onde:

I_i = vazões de entrada;

O_i = vazões de saída;

S_i = acumulação para $t_1 \leq i \leq t_2$.

Como existem duas incógnitas, a equação abaixo é aplicada para obtenção da vazão de saída para cada intervalo. A estimativa pode ser obtida por meio da relação cota versus volume para um dado reservatório e pela relação vazão versus cota, que depende do tipo de extravasor.

$$O_2 = f\left(\frac{S}{\Delta t} + 0.5.O_2\right)$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Caracterização dos grupos hidrológicos de solo

A análise granulométrica das amostras em superfície e em profundidade permitiu a identificação dos grupos hidrológicos de solo segundo o método do SCS, que trabalha com parâmetros de infiltração relacionados à textura, especificamente a densificação de camadas argilosas em sub-superfície. A identificação das amostras é apresentada na tabela 5 e sua distribuição espacial, com respectivos grupos hidrológicos, é ilustrada na figura 10.

As verificações da distribuição das classes hidrológicas confirmaram as observações obtidas em campo, principalmente na margem esquerda do Córrego do Wenzel, como área de provável aterramento do terreno. Os pontos 12 e 13, situados na média vertente, apresentaram teores elevados de argila em profundidade de 1,5 m, enquanto na baixa vertente os pontos e coleta 14 e 15 apresentaram altos valores de concentração de argila em superfície. Estes dados indicam uma linha de características texturais semelhantes devido ao acréscimo de material, que provém geralmente de entulhos de construções e, possivelmente, elevaram os teores de argila das amostras.

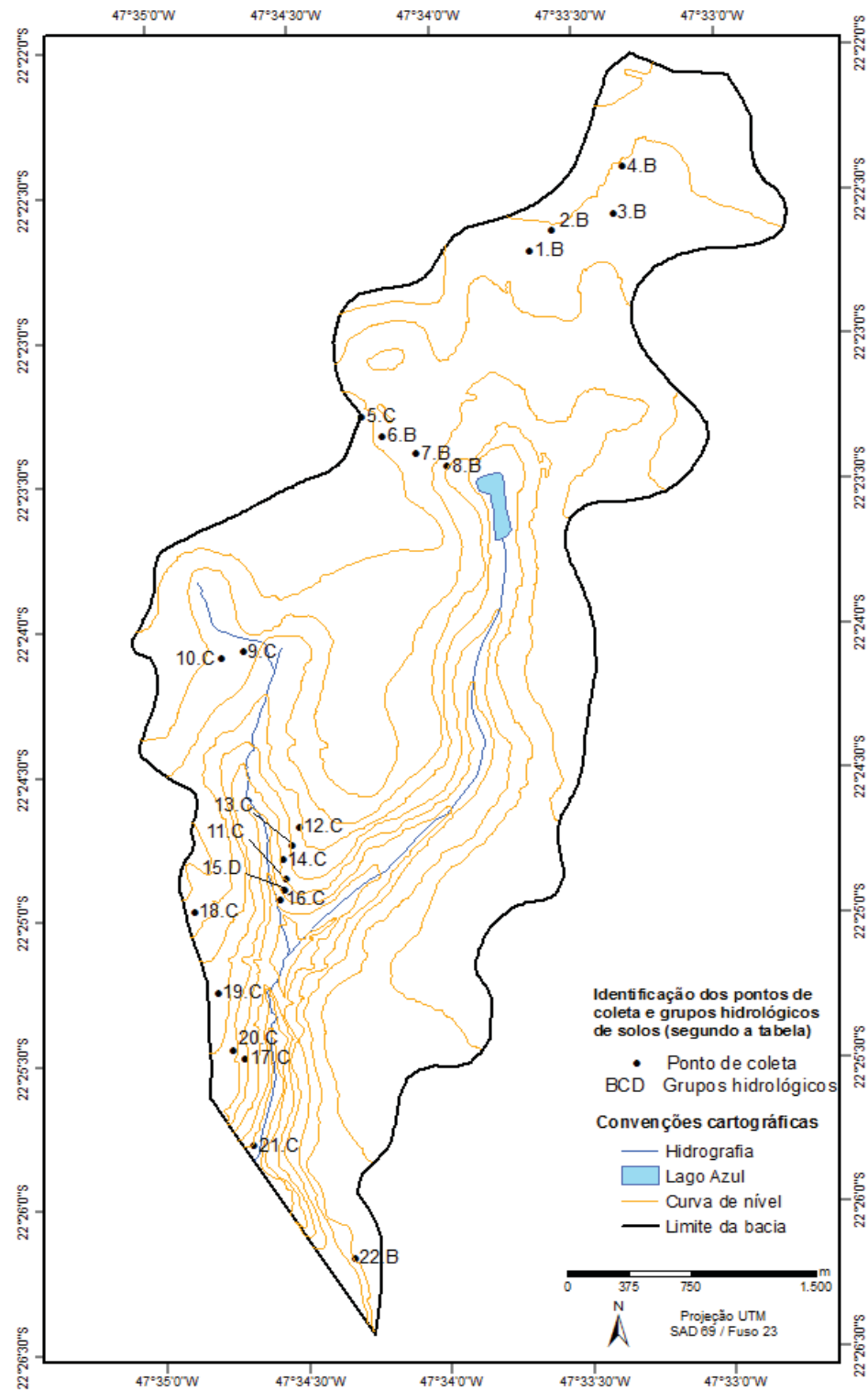
Tabela 5 – Resultados dos ensaios granulométricos e grupo hidrológico associado.

Amostra	Profundidade	Argila %	Silte %	Areia %	Grupo hidrológico
1	Superfície	16	2	82	B

	1,50 m	22	6	72	
2	Superfície	16	2	82	B
	1,50 m	20	2	78	
3	Superfície	16	8	76	B
	1,50 m	18	0	82	
4	Superfície	19	12	69	B
	1,00 m	18	2	80	
5	Superfície	24	3	73	C
	1,30 m	25	3	72	
6	Superfície	19	1	80	B
	1,50 m	26	1	73	
7	Superfície	18	2	80	B
	1,50 m	20	1	79	
8	Superfície	12	3	85	B
	1,20 m	19	3	78	
9	Superfície	24	2	74	C
	1,20 m	27	7	66	
10	Superfície	30	6	64	C
	0,80 m	36	4	60	
11	Superfície	42	0	58	C
	1,15 m	39	4	57	
12	Superfície	38	0	62	C
	1,50 m	64	5	31	
13	Superfície	27	11	62	C
	1,50 m	57	4	39	
14	Superfície	52	2	46	C
	1,50 m	34	2	64	
15	Superfície	47	10	43	C
	1,50 m	32	4	64	
16	Superfície	20	9	71	C
	1,50 m	34	2	64	
17	Superfície	28	1	71	C
	1,50 m	32	4	64	
18	Superfície	37	2	61	C
	1,20 m	44	1	55	
19	Superfície	36	4	60	C
	0,70-0,80 m	44	2	54	
20	Superfície	23	6	71	C
	0,80 m	24	4	72	
21	Superfície	22	4	74	C
	0,60 m	25	5	70	
22	Superfície	18	12	70	B
	1,00 m	18	4	78	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 10 - Pontos de coleta de solo e indicação dos grupos hidrológicos (SCS, 2004).



Fonte: Elaborada pelo autor.

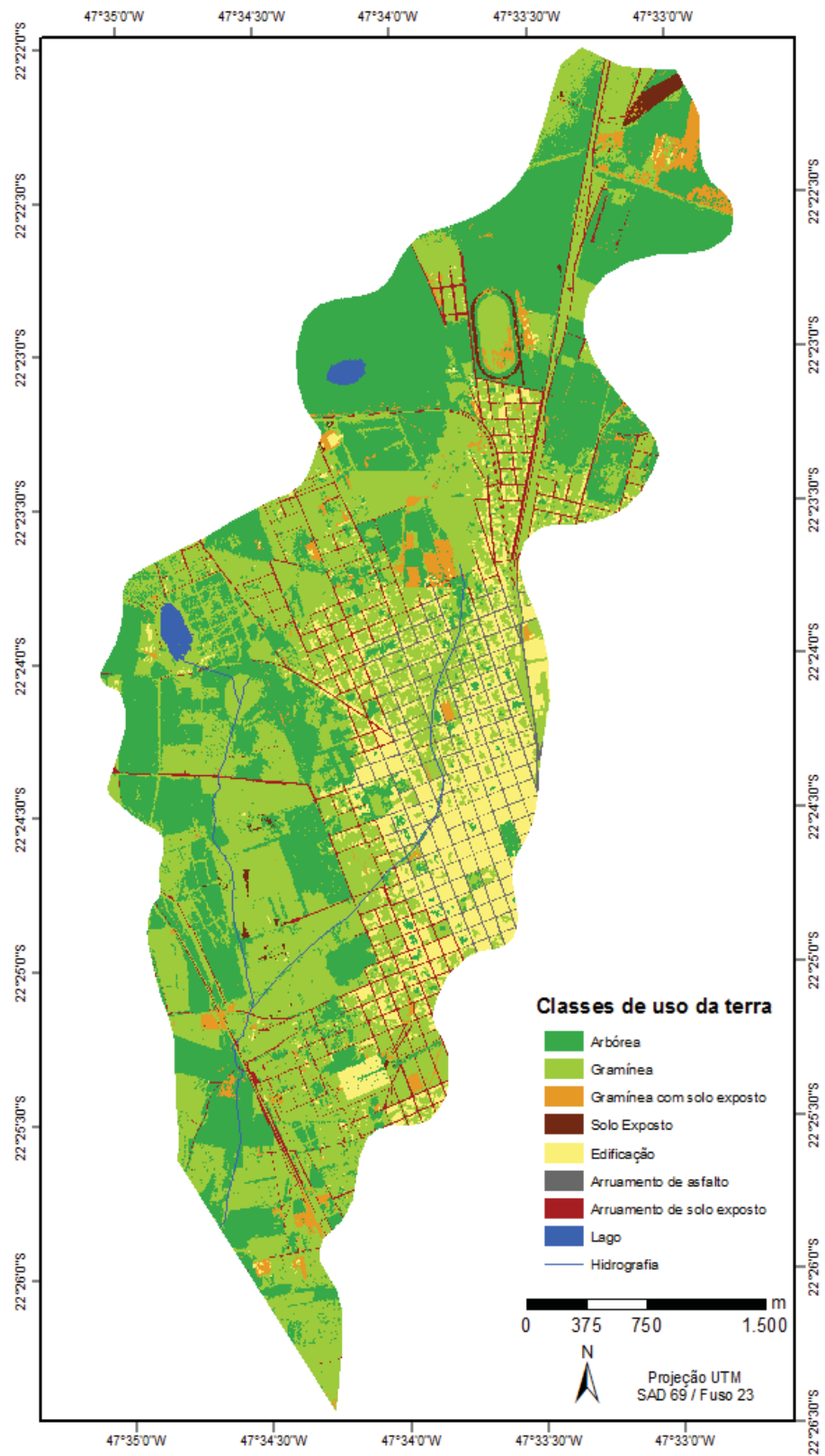
Para a determinação nos grupos hidrológicos o parâmetro utilizado foi o percentual de argila em superfície. Ao norte da bacia os resultados apontaram a predominância do grupo hidrológico do tipo B e nos demais pontos somente o grupo hidrológico C. As dificuldades encontradas para a coleta de solos, principalmente no médio curso do Córrego da Servidão, devido à impermeabilização de extensas áreas, optou-se por relacionar os resultados apresentados para áreas de elevação semelhante. Desta maneira, toda área ao sul do Lago Azul foi considerada como grupo hidrológico C. A verificação da distribuição das classes hidrológicas confirmaram as observações obtidas em campo, principalmente na margem esquerda do Córrego do Wenzel, como área de provável aterramento do terreno.

5.2. Caracterização do uso e ocupação da terra

O processamento das fotografias aéreas resultou na classificação do uso e ocupação do solo em situações de pré-impermeabilização da área (figura 11), no contexto de canalização do canal principal em período mediano de urbanização (figura 12) e na situação atual de impermeabilização intensa (figura 13). O mapeamento temático possibilitou quantificar a área ocupada para cada classe de uso, ou seja, arbórea, gramínea, gramínea com solo exposto, solo exposto, edificação, arruamento de asfalto e de solo exposto. A figura 14 ilustra um mapa síntese, a qual colaborou na compreensão da evolução urbana do município de Rio Claro nos três cenários propostos (1958, 1972 e 2006).

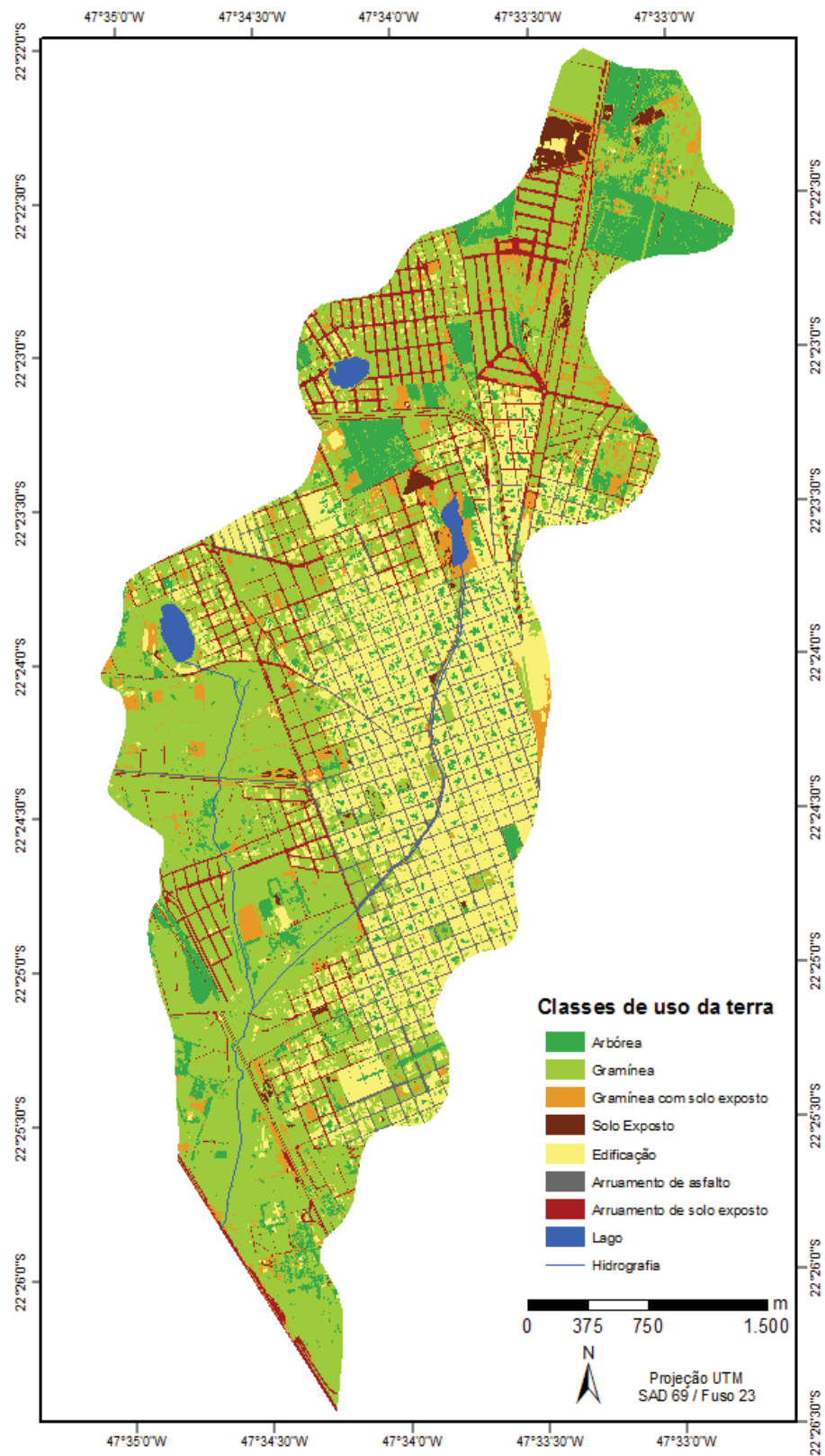
Pela análise da década de 1950 pode-se confirmar a configuração do espaço urbano no início do estabelecimento das populações, às margens do Córrego da Servidão, distribuindo-se de maneira quase simétrica entre as margens direita e esquerda do canal. Em 1958 a nascente do Córrego da Servidão ainda não havia sido impermeabilizada ou mesmo ocupada por quaisquer elementos urbanos como arruamento e loteamentos. Porém, desde esta data é possível verificar a definição do próprio Córrego da Servidão como via de acesso principal da cidade, a Av. Visconde de Rio Claro.

Figura 11 – Mapa de uso e ocupação do solo no cenário de 1958.



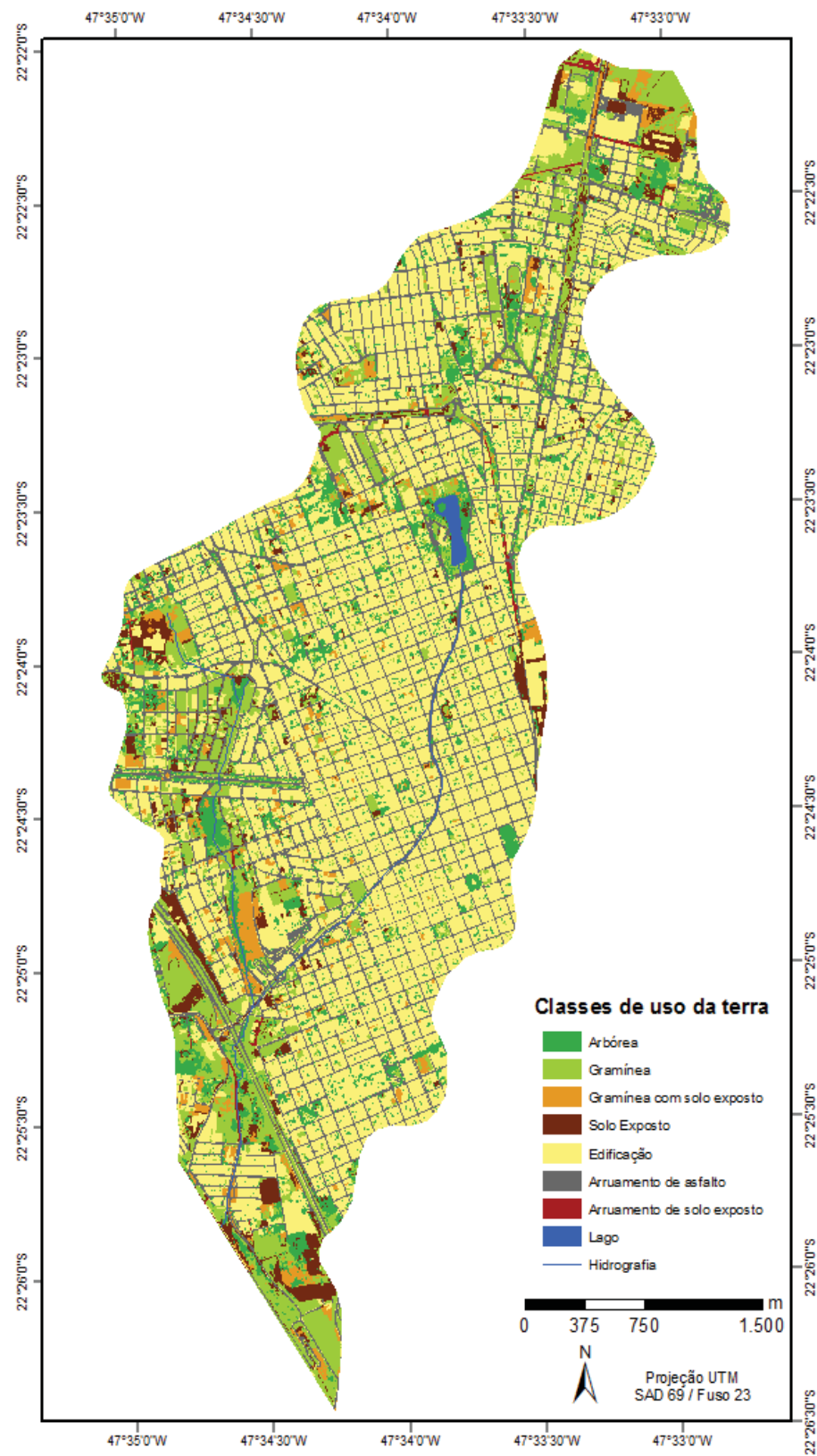
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 12 – Mapa de uso e ocupação do solo no cenário de 1972.



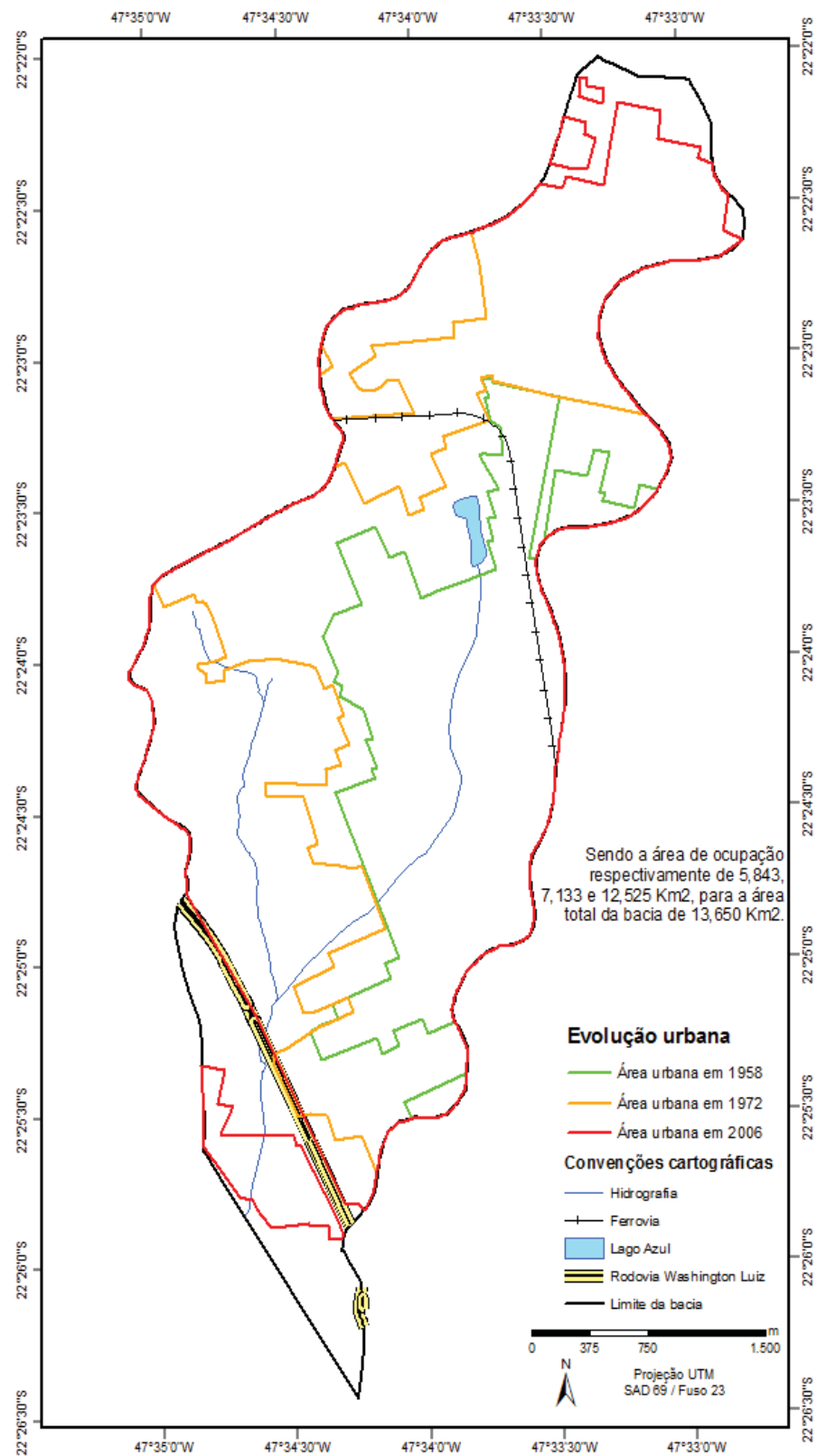
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 13 – Mapa de uso e ocupação do solo no cenário de 2006.



Fonte: Elaborado por Silvia Polizel e Tatiana Pilachevsky.

Figura 14 – Mapa síntese da evolução da área urbana de Rio Claro entre os anos de 1958 a 2006.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em 1958 a área ocupada pela urbanização da bacia era de 5,843 km², em 1972 era de 7,133 km², e no cenário atual, que corresponde a ocupação da terra em 2006, é de 12,525 km², sendo a área total de 13,650 km². São abrangidos 14 anos de 1958 a 1972, período esse em que se verificou uma expansão urbana com crescimento de aproximadamente 20% em área. No período de 1972 a 2006, que corresponde a 34 anos de intervalo de análise, a expansão em área atingiu um crescimento maior que 75%. Assim, considerando a questão dos anos abrangidos entre os cenários propostos, é possível averiguar a intensidade do processo de impermeabilização da superfície da bacia, bem como o ritmo acelerado a partir da década de 70 pelo acréscimo de áreas destinadas a fins residenciais.

Neste cenário, o centro urbano correspondia ao setor de médio curso do Córrego da Servidão. O setor oeste, onde se verifica vertentes mais longas, e os setores norte e sul da área de estudo possuem suas áreas predominantemente ocupadas por cobertura vegetal arbórea e gramínea. No perímetro urbano deste cenário, a planície de inundação do Córrego da Servidão ainda registra superfícies ocupadas por gramíneas e, em menor densidade, por cobertura arbórea.

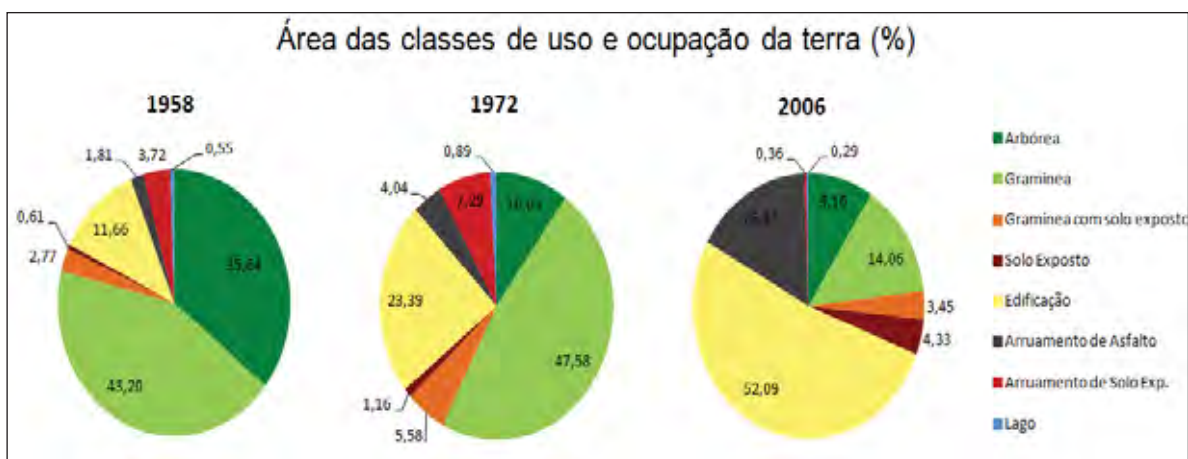
A evolução da ocupação urbana em 1972 apresenta características semelhantes ao cenário de 1958. O Córrego do Wenzel ainda mantém suas margem não tomadas por edificações e asfalto, sendo as principais diferenças verificadas neste setor: a diminuição da densidade da vegetação, que antes contava com a presença de cobertura arbórea e, em 1972, há o predomínio de vegetações baixas e rasteiras da classe gramínea; o início de loteamentos de áreas destinadas à construção de casas na área de nascente e médio curso do Wenzel, verificada pelo arruamento de solo exposto que já configura uma pré-etapa de ocupação urbana pela formação dos quarteirões. O setor noroeste é o único que apresenta expansão considerável em relação à configuração de uso da terra do cenário de 1958.

Na análise da transição dos cenários de 1972 para 2006 verificou-se que o quadrante sudoeste, onde se localiza o Córrego do Wenzel, e o setor sul da bacia apresentam significativo aumento da densidade de ocupação para este período. Segundo a Planta Cadastral da Prefeitura, os bairros situados nestes setores datam a década de 1990 em diante. Porém, a ocupação mais recente não implicou em atividades voltadas ao planejamento, uma vez que a nascente e a planície de inundação do Córrego do Wenzel foram suprimidas por canalização e construção de residências. Ainda em 2006 a ocupação estende-se a todo o setor norte e parte do setor sul.

Considerando o cenário de 2006 como a situação de uso e ocupação atual, verificou-se a presença de elementos da cobertura vegetal arbórea, porém, suas áreas são pouco expressivas principalmente por estarem inseridos em praças e jardins no perímetro urbano. As poucas áreas permeáveis encontradas neste cenário concentram-se no extremo norte e no extremo sul da bacia, e no entorno de alguns setores do Córrego do Wenzel e da Rod. Washington Luiz.

Atualmente, a bacia do Córrego da Servidão está quase totalmente impermeabilizada por arruamentos de asfalto e edificações. Se em 1958 e 1972 eram facilmente encontradas quadras com áreas permeáveis nas calçadas de grama e nos quintais de terra, grama e árvores, em 2006, até mesmo calçadas e quintais estão completamente impermeabilizados. As praças e jardins se enquadram na classificação de áreas verdes, que do ponto de vista urbanístico permitem a geração de sombra e concentração de umidade para minimizar o desconforto térmico comum dos centros urbanos (devido às altas temperaturas e retenção de calor pelo concreto). Porém, sob do ponto de vista da infiltração estes locais continuam com superfícies impermeabilizadas pelo chão comumente recoberto por pedras e cimento. A figura 15 apresenta a proporção das áreas destinada às coberturas vegetais e aos elementos intra-urbanos nos diferentes cenários.

Figura 15: Área das classes de uso e ocupação da terra em 1958, 1972 e 2006.

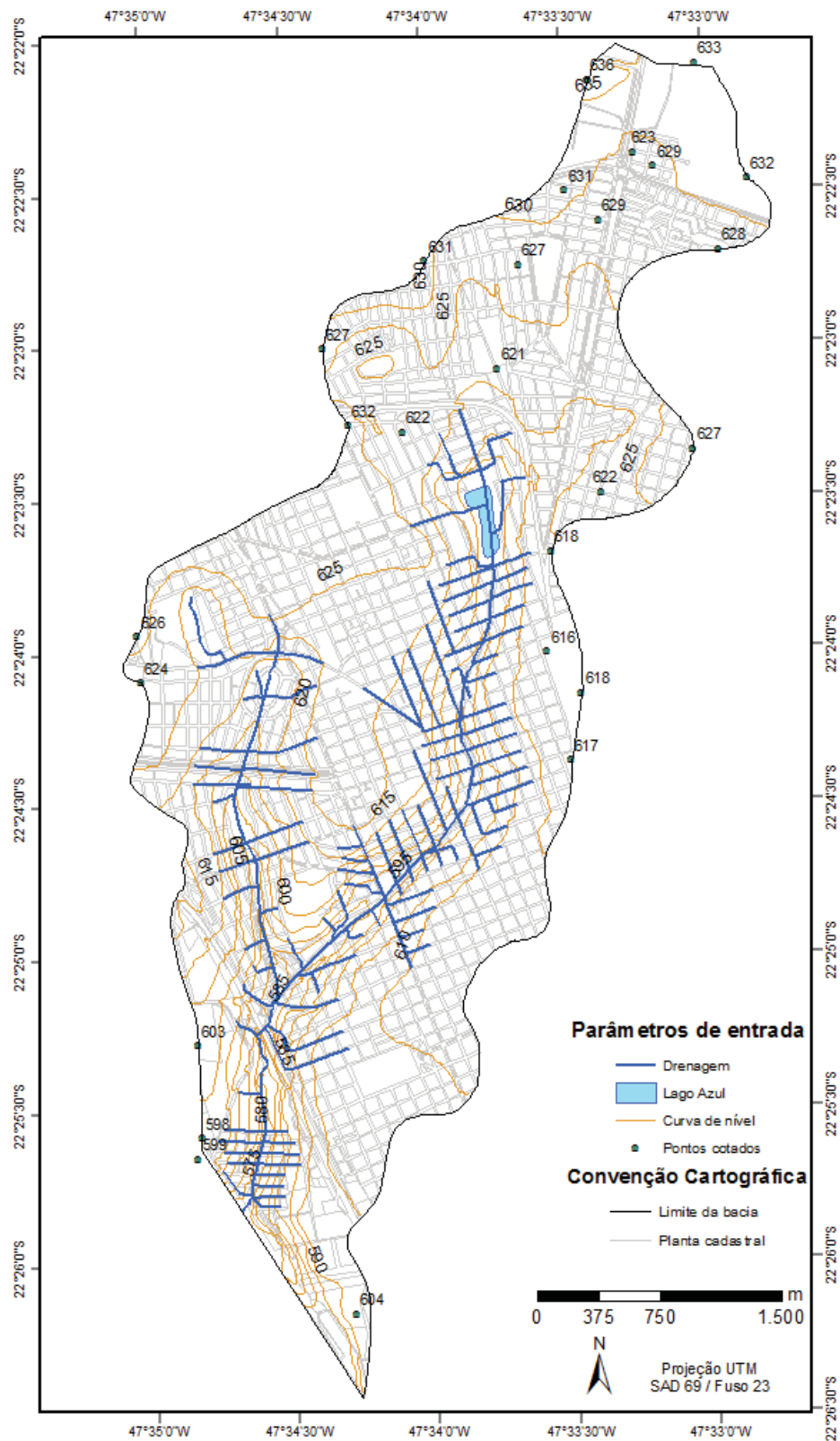


Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3. Discretização da bacia do Córrego da Servidão

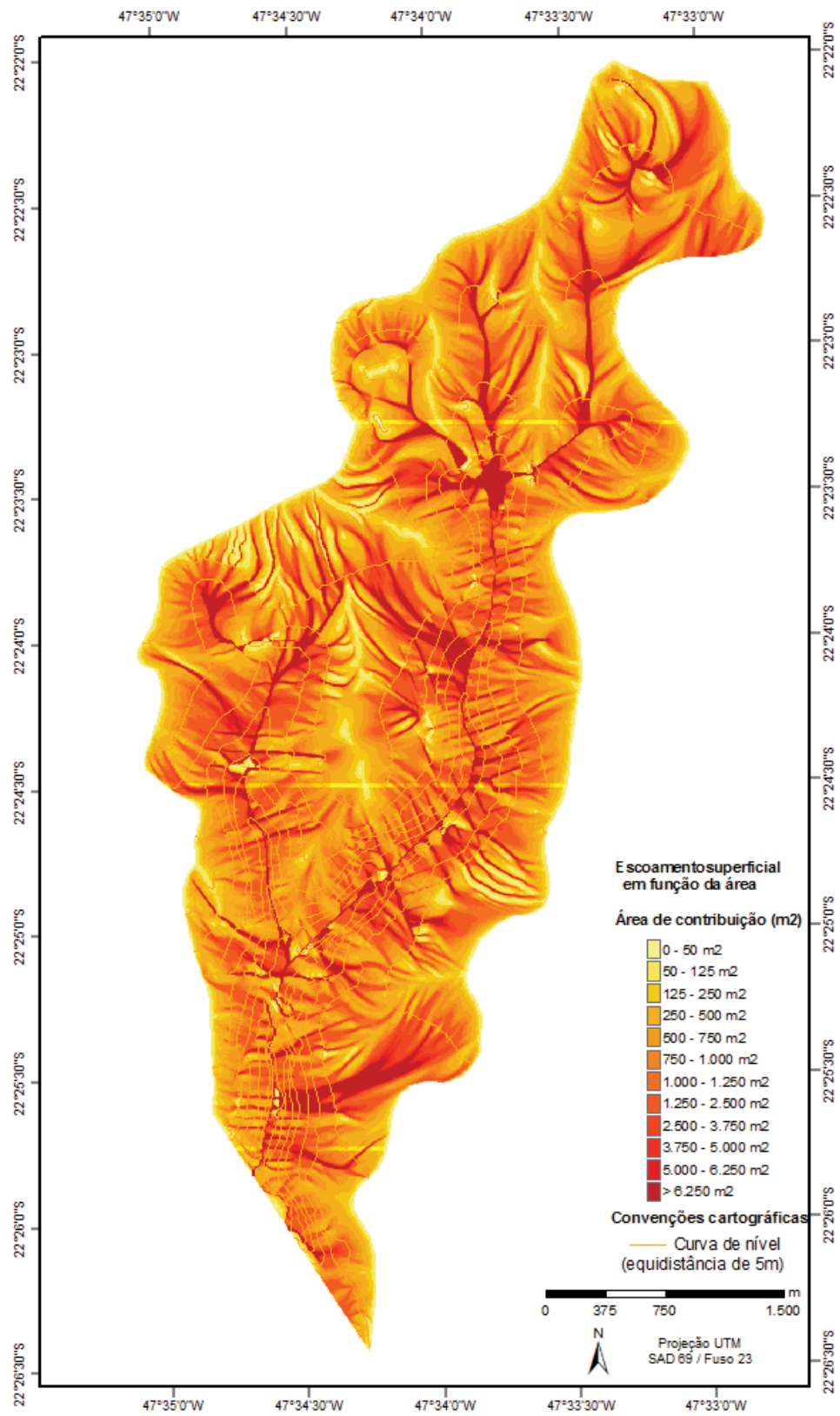
Para a discretização da bacia analisou-se o comportamento do escoamento superficial e da concentração dos fluxos para a definição de sub-bacias que compreendessem características semelhantes quanto ao sistema de drenagem. Tendo como parâmetro de entrada os dados apresentados na figura 13, foi realizado o mapeamento do percurso preferencial dos fluxos, com base no método proposto de Fluxo Distribuído, o que permitiu a espacialização de áreas que correspondem à tendência do percurso, apresentada na figura 14.

Figura 16 - Parâmetros de entrada para o mapeamento das áreas preferenciais de escoamento superficial.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 17 - Áreas preferenciais de escoamento superficial.



Fonte: Elaborado pelo autor.

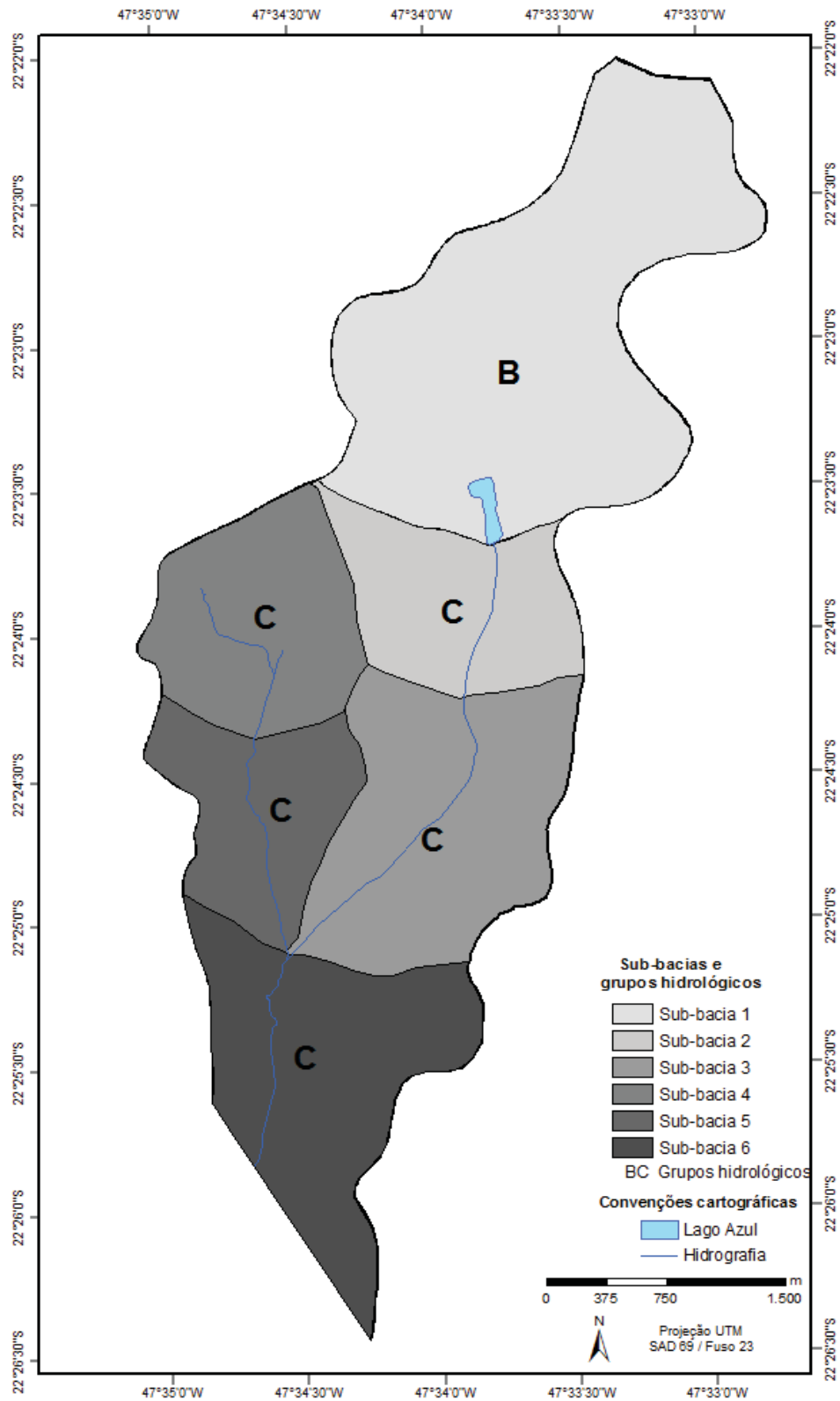
A interpretação do material cartográfico gerado permitiu identificar os principais setores de acumulação do fluxo superficial. As cores mais claras referem-se a contribuição de pequenas áreas para a geração do escoamento em superfície e, portanto, não tendem a acumular grandes volumes de água, enquanto que as cores mais escuras tendem a concentrar maiores alturas de lâmina d'água uma vez que é recebe a contribuição de fluxos de grandes áreas. Com a análise destes setores delimitou-se sub-bacias que contemplam dados específicos destas áreas, ou seja, os valores de CN são mais acurados, e, portanto não se generalizou apenas um valor de CN para a área total da bacia.

A subdivisão da área, apresentada pela Figura 15, possibilitou a geração de hidrogramas dos diversos trechos do Córrego da Servidão e do Córrego do Wenzel, não apenas do exutório. Assim, estes hidrogramas contemplam o comportamento hidrológico da bacia em setores, detalhando as zonas de maior risco de inundações, sob uma perspectiva integrada. A Tabela 6 apresenta os resultados de área, grupo hidrológico e declividade média de cada sub-bacia.

Tabela 6 - Área, grupo hidrológico e declividade média do canal de cada sub-bacia.

Sub-bacia	1	2	3	4	5	6
Total da área (km²)	4,526	1,492	2,404	1,613	1,291	2,303
Grupo hidrológico	B	C	C	C	C	C
Declividade média (%)	1,108	0,981	0,449	1,346	1,383	1,019

Figura 18: Definição das sub-bacias e grupos hidrológicos de solo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4. Cálculo da Curva Número

O modelo IPHS foi utilizado para o cálculo da Curva Número, algoritmo estimado com base na média ponderada da porcentagem de área ocupada para cada classe de uso e ocupação do solo. A relação de impermeabilização do solo com base no cálculo da CN teve os seguintes dados de entrada apresentados nas Tabelas 7, 8 e 9.

Tabela 7 – Porcentagem de área de acordo com uso e ocupação de cada sub-bacia para o cenário de 1958.

Uso e ocupação	1	2	3	4	5	6
Arbórea	55,43	10,05	13,77	42,16	44,03	26,92
Gramínea	31,49	49,73	35,46	50,22	52,87	59,79
Gramínea com solo exposto	4,55	4,62	0,21	0,56	0,16	3,78
Solo Exposto	1,48	0,00	0,08	0,00	0,93	0,13
Edificação	2,41	25,34	40,24	1,74	0,23	4,52
Arruamento de Asfalto	0,00	6,17	6,45	0,00	0,00	0,00
Arruamento Solo Exposto	4,00	4,09	3,79	2,48	1,78	4,86
Lago	0,64	0,00	0,00	2,85	0,00	0,00
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Tabela 8 – Porcentagem de área de acordo com uso e ocupação de cada sub-bacia para o cenário de 1972.

Uso e ocupação	1	2	3	4	5	6
Arbórea	17,81	7,44	5,53	3,22	6,28	8,04
Gramínea	45,66	16,49	25,79	65,65	73,33	67,25
Gramínea com solo exposto	9,02	3,22	2,00	6,01	5,35	3,95
Solo Exposto	2,70	0,40	0,46	0,12	0,62	0,39
Edificação	11,14	58,71	52,58	12,83	4,26	12,25
Arruamento de Asfalto	0,57	9,92	11,90	0,93	1,47	2,48
Arruamento Solo Exposto	11,91	2,82	1,75	8,00	8,68	5,65
Lago	1,22	1,01	0,00	3,22	0,00	0,00
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Tabela 9 – Porcentagem de área de acordo com uso e ocupação de cada sub-bacia para o cenário de 2006.

Uso e ocupação	1	2	3	4	5	6
Arbórea	9,50	8,38	5,95	9,86	11,55	10,16
Gramínea	15,69	3,35	4,70	17,11	15,19	24,79
Gramínea com solo exposto	2,94	1,54	1,12	3,66	9,15	4,82
Solo Exposto	3,93	2,35	1,12	5,52	6,28	7,86
Edificação	49,54	67,36	69,80	46,10	40,62	39,30
Arruamento de Asfalto	17,26	15,48	17,30	17,54	17,05	12,72
Arruamento Solo Exposto	0,60	0,54	0,00	0,19	0,23	0,35
Lago	0,55	1,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

As classes de uso e ocupação do solo foram ajustadas às classes de CN descritas no método do SCS (1986) e implementadas no software IPHS1 (tabela 10). O cálculo do CN é realizado segundo as condições de umidade dos solos, sendo disponibilizada pelo IPHS1 três situações:

- em que os solos estão secos, sendo a precipitação acumulada dos cinco dias anteriores menor que 36 mm, e em outro período é menor que 13 mm;
- em que os solos correspondem à umidade de capacidade de campo, onde não há alteração do CN médio;
- em que ocorreram chuvas consideráveis nos cinco dias anteriores e há a saturação do solo, as precipitações acumuladas nos cinco dias anteriores são maiores que 53 mm, ou no outro maior que 28 mm.

Tabela 10 – Adaptação das classes de uso e ocupação do solo para as classes SCS.

Classes de uso e ocupação	Classes SCS
Arbórea	Bosques ou zonas florestais em condições de cobertura boa
Gramínea	Prado em boas condições
Gramínea com solo exposto	Baldios em boas condições
Solo exposto	Pastagens ou terrenos em más condições
Edificação	Zonas residências com lotes <500m ² (em média 65% impermeável)
Arruamento de asfalto	Arruamentos e estradas, com superfície de asfaltada e com drenagem de água pluvial

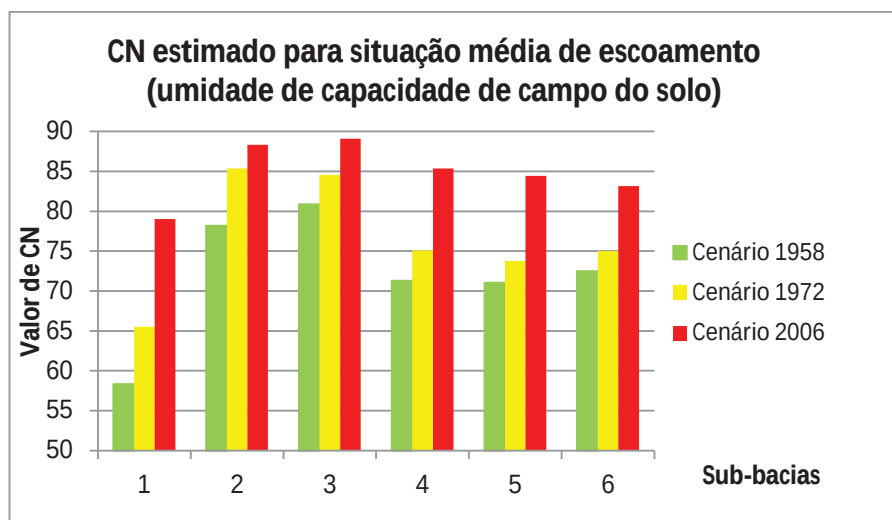
Arruamento com solo exposto	Arruamentos e estradas, com superfície de terra
Lago	Área considerada como arbórea, adaptando ao modelo a classe mais próxima do pondo de vista hidrológico

Os resultados de CN encontrados pra os três cenários de estudo nas três diferentes situações propostas pelo IPHS 1 para cada sub-bacia estão apresentados na tabela 11. Para este estudo foram utilizados os valores da CN para a segunda situação de umidade, ou seja, em uma situação considerada moderada, com picos de chuva em 50% e umidade média de solo. A figura 16 ilustra os valores de CN nos três diferentes cenários analisados para cada sub-bacia, permitindo associar o uso e ocupação do solo ao aumento do escoamento superficial.

Tabela 11 – Valores de CN encontrados pra os três cenários de estudo nas três diferentes situações propostas pelo IPHS 1 para cada sub-bacia.

Cenário	Situação	1	2	3	4	5	6
1958	1	38,9	61,6	66,6	54,2	53,9	55,1
	2	58,3	78,2	80,9	71,3	71,0	72,5
	3	75,9	88,9	89,4	83,6	83,3	85,0
1972	1	47,7	73,9	69,6	59,1	56,1	57,0
	2	65,5	85,4	84,6	75,1	73,8	75,0
	3	79,6	91,0	93,5	85,4	86,5	88,0
2006	1	62,2	76,6	77,2	73,9	69,5	68,5
	2	79,0	88,3	89,1	85,4	84,5	83,2
	3	89,9	94,2	95,0	91,0	93,4	91,9

Figura 19 – Valores de CN calculados para a situação intermediária de escoamento nos cenários de 1958, 1972 e 2006 para cada sub-bacia.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise da CN permite uma relação direta com o acréscimo de áreas impermeabilizadas para cada sub-bacia. Verifica-se que as sub-bacias 2 e 3 são as mais impermeabilizadas ao longo dos períodos analisados, e portanto apresentam CN maior que o restante da bacia em todas as situações de umidade do solo. Desde a década de 50, estes dois setores analisados já apresentavam valores da CN elevados, sendo que de 1958 a 2006 as áreas impermeabilizadas expandiram-se em pequenas proporções.

Devido a área da sub-bacia 1 ser a mais extensa, é o setor que apresenta menor porcentagem de uso e ocupação da terra. De 1958 a 1972, constatou-se um acréscimo expressivo de áreas impermeabilizadas, confirmando a tendência de ocupação para o cenário de 2006. A sub-bacia em questão foi o setor que sofreu maior impacto pelo processo de urbanização entre 1958 e 2006, visto que o valor da CN em situação média de umidade passou de 58 para 79. Atualmente, a presença de algumas áreas destinadas a gramíneas no extremo norte da bacia contribuiu para os valores da CN não se elevarem a valores semelhantes aos das demais sub-bacias. Constatou-se ainda que, entre os anos de 1958 e 1972, as sub-bacias 4, 5 e 6 não tiveram aumento expressivo de áreas impermeabilizadas. No entanto, verifica-se o acréscimo significativo de áreas impermeabilizadas para estas sub-bacias do cenário de 1972 para o de 2006.

5.5. Modelagem hidrológica

Em alguns casos, as bacias hidrográficas sem predisposição a inundações tornam-se propensas a tal fenômeno devido à intensidade das alterações de uso e ocupação do solo e de obras de drenagem desintegradas da dinâmica da água pluvial. Em muitos casos, a implantação de obras civis, com enfoque puramente na engenharia hidráulica, promove a aceleração do escoamento, acarretando na transferência dos problemas de enchentes para setores localizados a jusante das intervenções.

A ocorrência de enchentes está diretamente associada a eventos de chuvas extraordinárias, ou seja, é a precipitação crítica (intensa) que leva aos picos de vazão máximo. Segundo Tucci (2009), a precipitação máxima é entendida como a ocorrência extrema, com duração, distribuição temporal e espacial crítica para uma bacia hidrográfica. A disponibilidade de longas séries de precipitação é muito mais freqüente que a de vazão, e o estudo das precipitações máximas torna-se o caminho para se conhecer a vazão de cheias.

Para o caso específico da bacia do Córrego da Servidão, a partir das séries históricas de 1936 a 2004, Moruzzi e Oliveira (2009) obtiveram a equação de chuvas intensas para Rio Claro, conforme a equação abaixo:

$$I = \frac{560,9.T^{0,141}}{(7,4 + d)^{0,65}}$$

Onde:

I = intensidade da chuva (mm/h);

T = período de retorno (anos);

D = duração da chuva (minutos).

A partir da implementação desta equação no programa computacional IPHS1, foram obtidas as curvas de intensidade-duração-frequência, que são os dados de entrada de precipitação (hietogramas) e definem a chuva de projeto. Os hietogramas gerados foram definidos em 6 intervalos de 600s, a partir da altura da lâmina desagregada. A simulação da cheia de projeto está associada a um tempo de retorno (TR), ou seja, a probabilidade de

ocorrência do evento ou o tempo médio em anos em que o evento é igualado ou superado. Assim, foram utilizados os TR de 5, 10, 20 e 50 anos.

Considera-se ainda que esta precipitação de 1 h não se distribuiu no tempo de maneira homogênea, sendo o Método dos Blocos Alternados utilizado para suprir a variação da intensidade das chuvas no período de interesse. No Método dos Blocos Alternados pode-se verificar que o somatório do volume de chuvas, na medida em que são acrescentados os blocos, coincide com o valor definido pelas curvas i-d-f para cada duração parcial. A colocação dos blocos no hietograma é arbitrária e pode conduzir a diversas configurações. Regras empíricas conduzem a picos de chuva mais elevados, como definir a parcela mais intensa de chuva entre $1/3$ e $1/2$ de sua duração total (CANHOLI, 2005, p.77). Neste estudo, os picos de intensidade das chuvas foram concentrados em 50% do tempo para uma situação padrão, ou seja, os picos são definidos entre os 30 e 40 minutos do período de chuva. Para determinar uma situação crítica de chuva, optou-se pela concentração dos picos de chuva em 25% do período chuvoso, ou seja, maiores intensidade nos primeiros 20 minutos do evento.

Em diferentes cenários de uso e ocupação da terra foram realizadas simulações hidráulicas e hidrológicas para verificação do comportamento da rede de drenagem por setores para a situação intermediária, ou seja, em que os solos correspondem à umidade de capacidade de campo, onde não há alteração do CN médio. No ponto onde o curso d'água atinge o limite de cada sub-bacia são gerados hidrogramas que representam a vazão de saída de cada setor, bem como representam a vazão de entrada para o trecho seguinte (Figuras 17, 18, 19 e 20). A organização dos hidrogramas evidencia a transladação dos fluxos d'água ao longo da bacia, sendo os hidrogramas da sub-bacia 6 a representação da vazão do exutório para a área de estudo em questão.

Figura 20 - Hidrogramas das sub-bacias para uma TR de 5 anos.

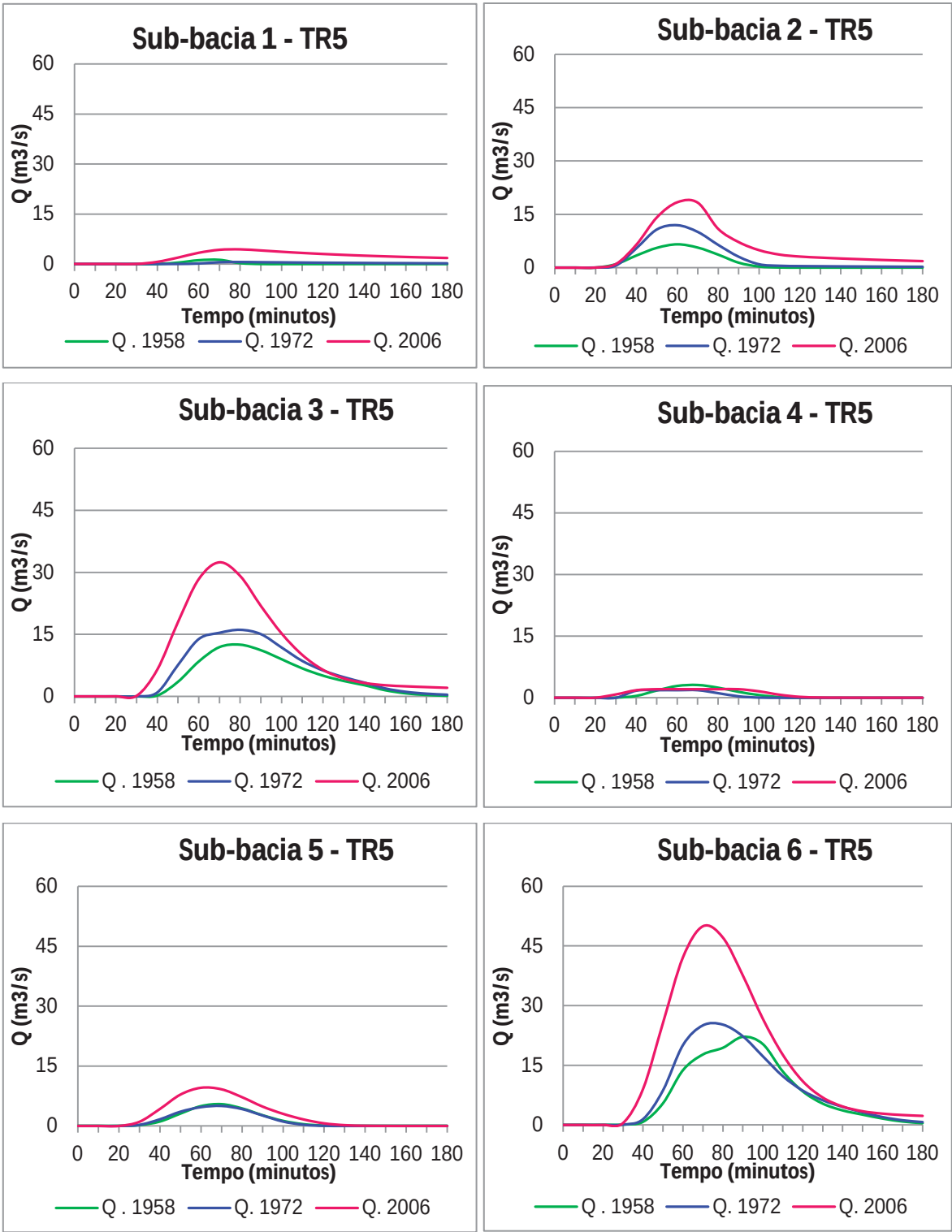


Figura 21 - Hidrogramas das sub-bacias para uma TR de 10 anos.

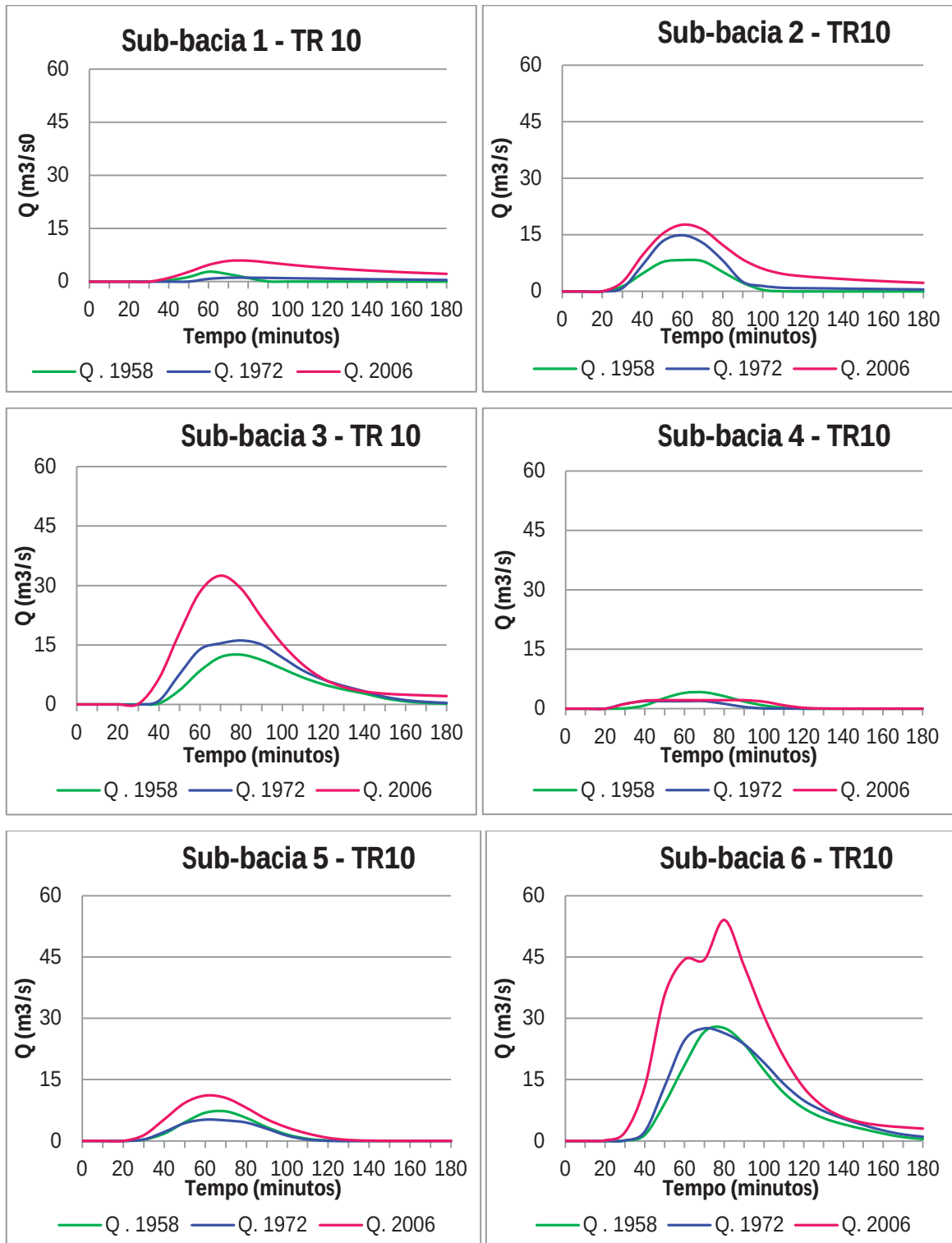


Figura 22 - Hidrogramas das sub-bacias para uma TR de 20 anos.

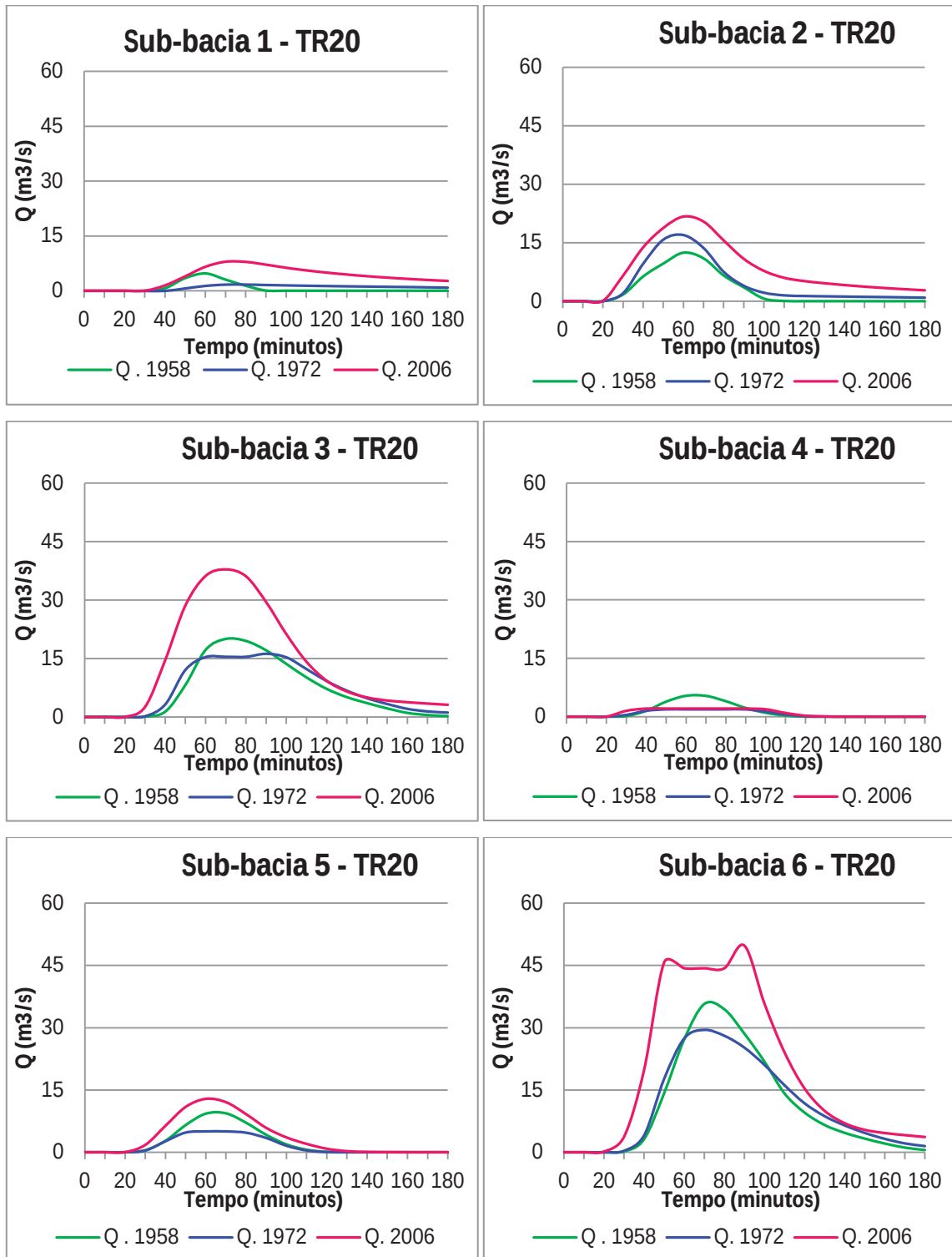
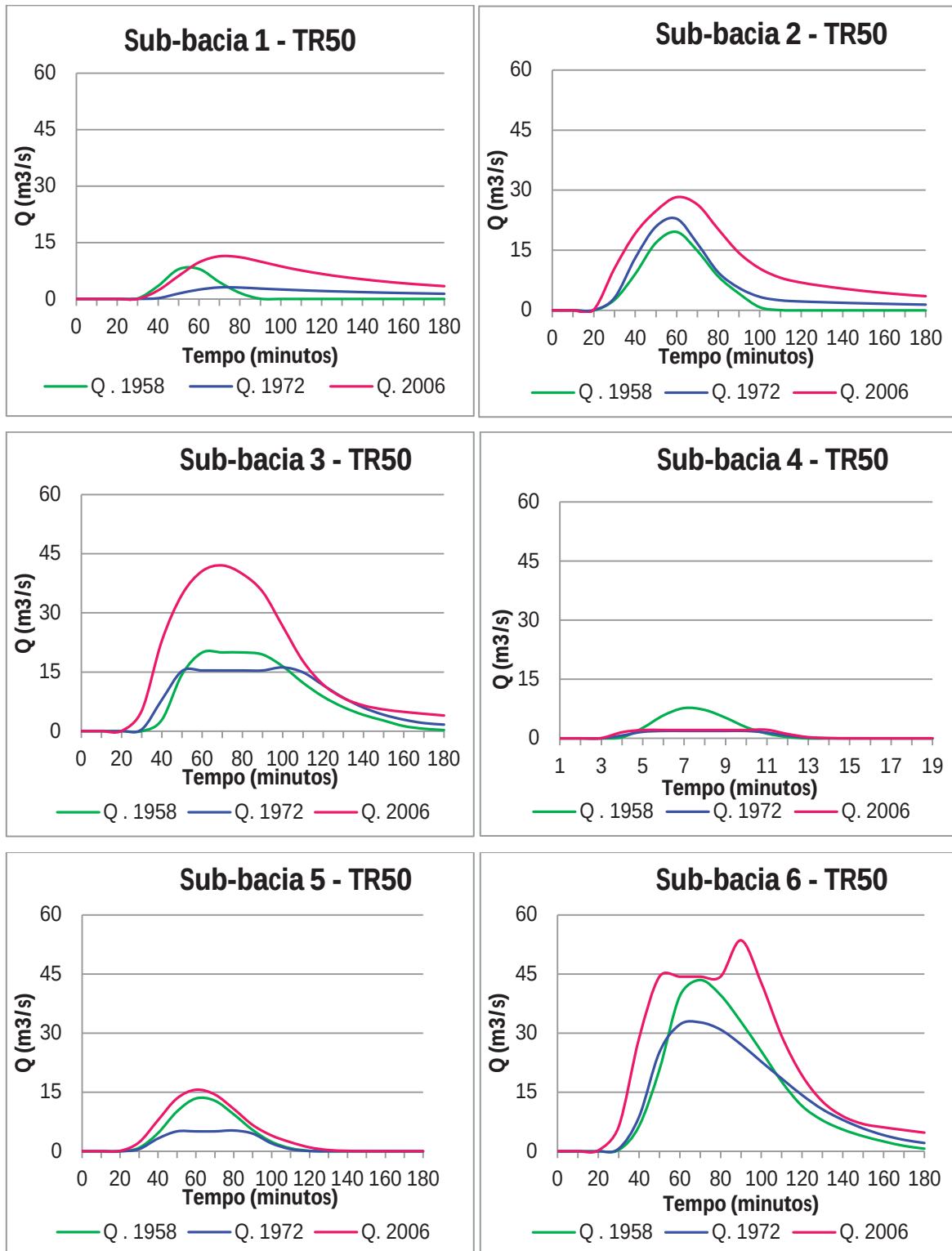


Figura 23 - Hidrogramas das sub-bacias para uma TR de 50 anos.



Na sub-bacia 1, o cenário de 1958 apresenta vazão máxima de $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ em uma TR de 5 anos, 70 minutos após o início da precipitação, enquanto em 1972 a vazão máxima se estabelece neste mesmo intervalo de tempo, porém em $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$, com o caimento da vazão distribuída em um período maior que o cenário antigo. Isso ocorre por causa do reservatório de retenção, que a partir de 1972 localiza-se na nascente do Córrego da Servidão, e apresenta efeito de amortecimento pelo retardamento do pico de vazão e redução do volume da mesma. Em 2006, a sub-bacia 1 apresenta picos de vazão em cerca de $4,3 \text{ m}^3/\text{s}$ no intervalo de tempo de 80 minutos, 10 minutos a mais para atingir seu pico, sendo um provável efeito do amortecimento do Lago Azul, discutido posteriormente. Para os outros valores de TR, as figuras apresentam o mesmo comportamento, só aumentando a vazão com o aumento dos TR, sendo as vazões máximas obtidas para TR de 50 anos de 8, 3 e $12 \text{ m}^3/\text{s}$ em 1958, 1972 e 2006, respectivamente.

A sub-bacia 2 apresentou comportamento dos fluxos d'água semelhante para os três cenários de análise no que tange ao intervalo de tempo das vazões máximas, verificando-se a variação dos volumes em função das características físicas dos canais e do aumento da impermeabilização da área, evidenciado pelo volume máximo dos fluxos em 1958, que dobram em 1972 e triplicam de 1958 a 2006, em condições de TR igual a 5 anos. Em 1958 o Córrego da Servidão caracterizava-se como canal aberto, e a partir de 1972 o canal passa a correr em conduto fechado de 2,5 m de diâmetro e 1.007 m de comprimento na sub-bacia 2. As vazões máximas obtidas para os três cenários analisados concentram-se no intervalo de tempo que corresponde a 60 minutos após o início da chuva. Analogamente a sub-bacia 1, com o aumento da TR, os valores da vazão também aumentam, atingindo os valores máximos de $20 \text{ m}^3/\text{s}$ para 1958, $23 \text{ m}^3/\text{s}$ para 1972 e $28 \text{ m}^3/\text{s}$ para 2006.

A sub-bacia 3 caracteriza a vazão no setor que antecede a confluência com o Córrego do Wenzel. Nesta sub-bacia o Córrego da Servidão era, em 1958, predominantemente um canal aberto, apenas com 111 m de canal linear e 334 m de canal fechado. Em 1972 a extensão da canalização do córrego passa a ser de 1.312 m. Quando se encerra a seção fechada, na intersecção do córrego com a Avenida 14, inicia-se o percurso do fluxo em canal aberto e com planície de inundação. Tal fato tem efeito de retardamento da velocidade no escoamento devido a interferência das maiores rugosidades das coberturas de superfície como gramíneas e gramas esparsas. Aliado a este fator, no setor onde está inserido o Mercado Municipal é notória a sinuosidade do canal com desvio de direções de fluxo de N-S para NE-

SO, que contribui para a diminuição da velocidade dos fluxos e o volume d'água se acumula gerando situação de inundação.

Assim, em 1972 para um TR de 5 anos verificou-se ocorrência de extravasamento no setor do Mercado Municipal. Para este evento chuvoso não foram obtidas situações de inundação deste setor em 2006. Isso se deve ao fato de que as características dos trechos foram alteradas de 1972 a 2006, que ao final da canalização de 1.312 m, foram implementados dois condutos retangulares que correm em paralelo. As dimensões de 2,3 m X 3,15 m cada e rugosidade baixa da parede interna de concreto liso possibilitam o rápido escoamento da água. Os volumes de água que em 1972 foram registrados como propagação de excesso na superfície, em 2006 foram transferidos para setores a jusante da bacia, e apesar disso, não foram identificadas situação de inundação na sub-bacia 6 para o parâmetro de chuva em questão. O setor do Mercado Municipal apresentou situação de extravasamento apenas para a chuva com TR de 50 anos.

Na sub-bacia 3, em todos os TR do cenário de 2006, constatarem-se vazões acima de $30 \text{ m}^3/\text{s}$ e picos de cheia antecipados se comparados aos picos dos cenários anteriores, com o valor máximo sendo obtido para um TR de 50 anos, de aproximadamente $42 \text{ m}^3/\text{s}$. Constatou-se que chuvas com TR de 10 anos anteciparam a onda de cheia e o pico da vazão, com volume de saída de escoamento de aproximadamente $32 \text{ m}^3/\text{s}$.

A sub-bacia 4 situa-se no setor a montante do Córrego do Wenzel, onde obteve-se vazão maior em 1958 que nos demais cenários para todos os TR, com a vazão aumentando de aproximadamente 3 a $8 \text{ m}^3/\text{s}$ para TR de 5 e 50 anos, respectivamente. Para os outros cenários, a vazão manteve-se constante, aproximadamente $2 \text{ m}^3/\text{s}$ para todos os TR. Apesar de condições de impermeabilização semelhantes entre 1958 e 1972, tal fato justifica-se pela canalização da nascente do canal, sendo o trecho canalizado de 200 m em 1972 e 300 m em 2006. Esta seção tem sua vazão limitada a $2 \text{ m}^3/\text{s}$, e pode ser visualizada nas características retilíneas das curvas de vazão em 1972 e 2006. Assim, em eventos chuvosos com TR de 5 anos ou maiores, constata-se o extravasamento da água para a rua. Com o aumento do volume e intensidade das chuvas há o aumento dos volumes de água que se propagam em superfície, bem como o acréscimo temporal para o caimento das curvas de vazão.

A sub-bacia 5 corresponde ao médio e baixo curso do Córrego do Wenzel, e devido às poucas alterações de ocupação da terra no período de 1958 a 1972, os valores de vazão obtidos mantiveram-se semelhantes para os dois cenários com TR de 5 anos. Em contraposição, com elevadas taxas de impermeabilização do solo e CN para o cenário de

2006, os valores de vazão quase dobraram, e o pico máximo das cheias mostra uma antecipação de 10 minutos. Em relação aos cenários de 1958 e 1972 para os demais TR, percebe-se que os maiores valores de vazão acontecem no ano de 1958, devido ao fato da canalização deste trecho entre estes anos, mantendo a vazão máxima para o cenário de 1972 em aproximadamente $5 \text{ m}^3/\text{s}$ para este trecho nos intervalos entre 40 e 80 minutos após o início da chuva. Este fato corresponde a volumes de água não suportados para as características da seção e o fator CN da sub-bacia, evidenciando situação de inundação. Além disso, o comportamento do escoamento em 2006 para os demais TR caracterizou-se pelo aumento significativo da vazão máxima, com valor obtido de aproximadamente $16 \text{ m}^3/\text{s}$ para uma TR de 50 anos. Porém, não se pode afirmar que há inundação nesta sub-bacia no cenário de 2006 devido, principalmente, a obras contra inundações realizadas pela Prefeitura Municipal de Rio Claro no exutório desta sub-bacia após o ano de 1972.

Na sub-bacia 6, os hidrogramas resultantes expressam o comportamento da bacia do Córrego da Servidão como um todo. Constatou-se que em 1958, para um TR de 5 anos, a transladação do córrego, o percurso da água em função do espaço e do tempo, ocorre em maior tempo, com picos aos 100 minutos após o início da chuva. Isso caracteriza escoamentos em áreas em condições próximas às naturais. Nas situações de uso da terra de 1972 e 2006, os picos de vazão se anteciparam para 70 minutos, sendo a diferença de impermeabilização entre este período expressa pelo aumento dos valores de vazão de 25 para $50 \text{ m}^3/\text{s}$.

Para os demais TR, os anos de 1958 e 1972 não apresentam inundações, somente um aumento da vazão com o aumento do TR, chegando a um valor máximo de aproximadamente $42 \text{ m}^3/\text{s}$ para um TR de 50 anos (em 1972). Porém, após 1972, houve um aumento significativo na área impermeabilizada em Rio Claro, fato que reflete um aumento na vazão do Córrego da Servidão para qualquer TR em relação aos anos anteriores. Um aspecto interessante que deve ser relatado é que após 1972 houve uma obra da prefeitura transformando um canal aberto em uma seção fechada a jusante deste córrego, limitando sua vazão em aproximadamente $45 \text{ m}^3/\text{s}$. Para TR com valor acima de 10 anos, verifica-se que há um extravasamento no setor de confluência do Córrego da Servidão e do Wenzel, e para TR acima de 20 anos, há extravasamento no Bairro Jardim Inocoop.

5.6. Comportamento hidrológico do reservatório de retenção “Lago Azul”

O reservatório de retenção denominado Lago Azul corresponde à nascente do Córrego da Servidão a partir de 1971, por isso a modelagem de seu comportamento hidrológico no cenário de 1958. A análise das características do Lago Azul conforme os parâmetros propostos possibilitaram compreender o comportamento hidrológico da sub-bacia 1 para os cenários de 1972 e 2006 e, principalmente, identificaram verificar os efeitos do reservatório associados às demais sub-bacias. A análise da simulação hidráulica e hidrológica a partir dos hidrogramas referentes ao Lago Azul mostra-se imprescindível, uma vez que se encontra a montante da bacia e interfere diretamente no amortecimento das ondas de cheia a jusante. O reservatório apresenta como estruturas de saída um orifício e um vertedouro, ambos com área de 1 m^2 . Considerou-se o vertedouro localizado 0,5 m acima da cota máxima de água do reservatório e o orifício situado na cota zero deste mesmo reservatório. Assim para os diferentes TRs das precipitações, foram obtidos os seguintes hidrogramas apresentados nas figuras 24 e 25.

Figura 24 - Hidrograma do reservatório Lago Azul em 1972.

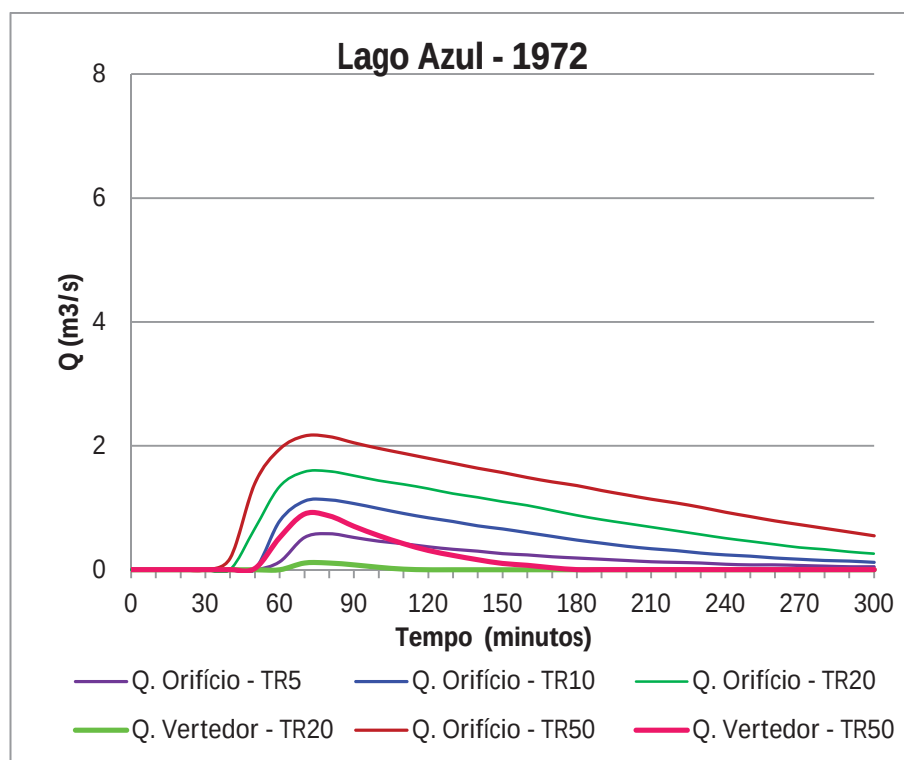
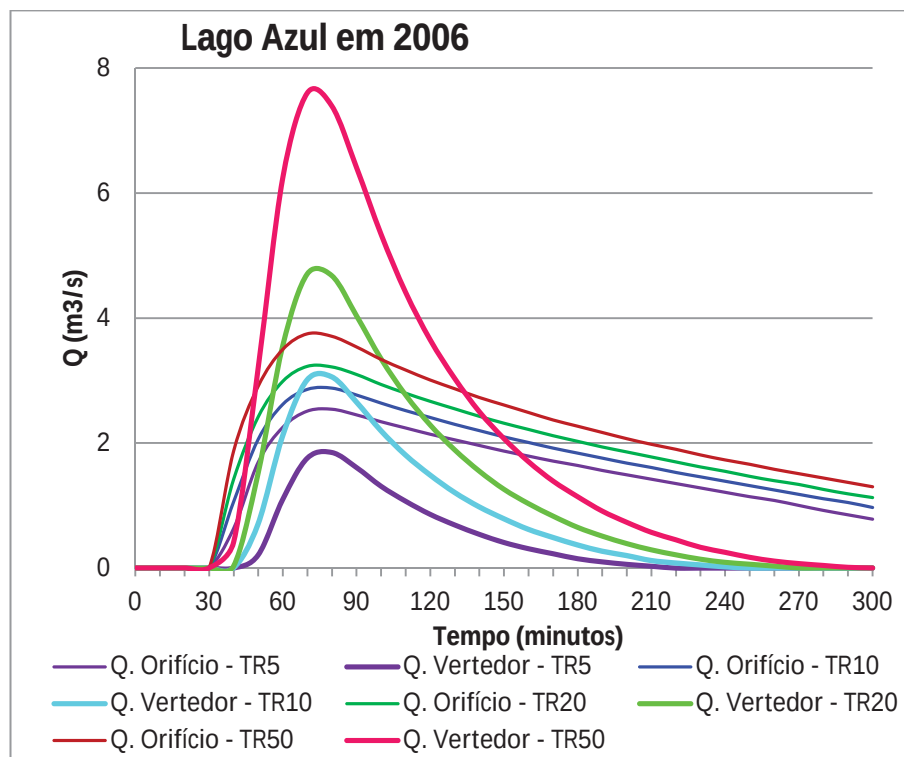


Figura 25 - Hidrograma do reservatório Lago Azul em 2006.

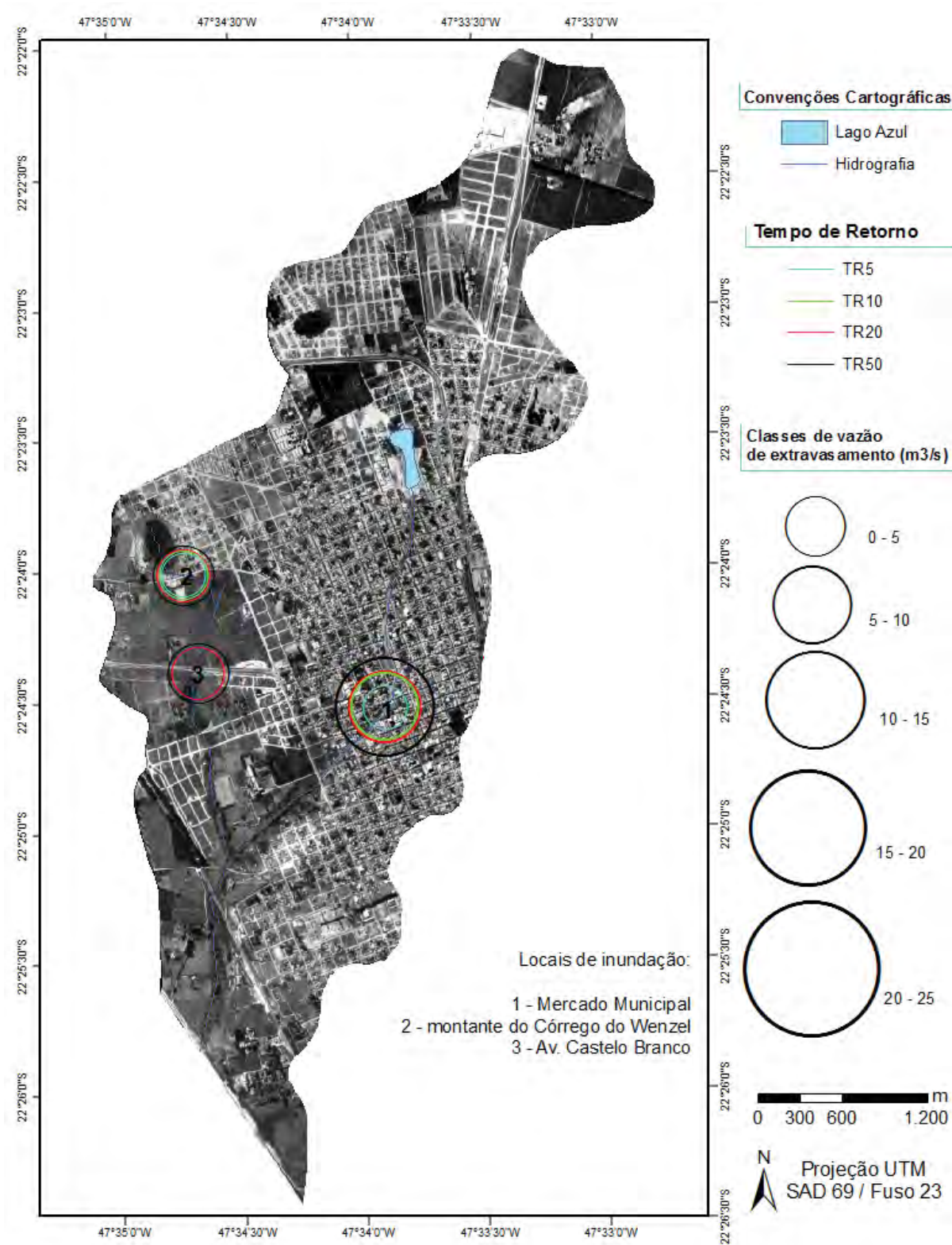


No cenário de 1972 constatou-se que o nível máximo da água não foi atingido em chuvas com TR de 5 e 10 anos, com a necessidade de utilização apenas do orifício como estrutura de saída. A partir de vazões com picos que atingem aproximadamente $1,6 \text{ m}^3/\text{s}$ no orifício (TR 20 anos) houve vazão de $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ no vertedor, incluído como sistema de saída. Da mesma forma, a vazão em situação de TR de 50 anos, de aproximadamente $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$, obteve valores de vazão máxima em torno de $0,09 \text{ m}^3/\text{s}$ no vertedor. O cenário de 1972 evidencia que a baixa impermeabilização da sub-bacia 1, em relação ao mesmo setor em 2006, permitiu que no primeiro cenário fossem obtidas baixas vazões no vertedouro para qualquer evento chuvoso. Para o cenário de 2006, observa-se uma vazão de saída do orifício em torno de $4 \text{ m}^3/\text{s}$ para um TR de 50 anos. Porém, para este cenário, já há uma situação de extravasamento para TR superiores a 5 anos devido ao aumento da área impermeabilizada na sub-bacia 1. A distribuição da onda de cheia em intervalos de tempo superiores a 3 horas evidencia a questão do amortecimento da vazão nos setores a jusante. Além disso, como o vertedouro localiza-se 0,5 m acima da cota máxima do reservatório, pode-se concluir que há apenas uma inundação da área adjacente ao mesmo, sem que haja extravasamento de água para as ruas.

5.7. Caracterização dos trechos de inundação

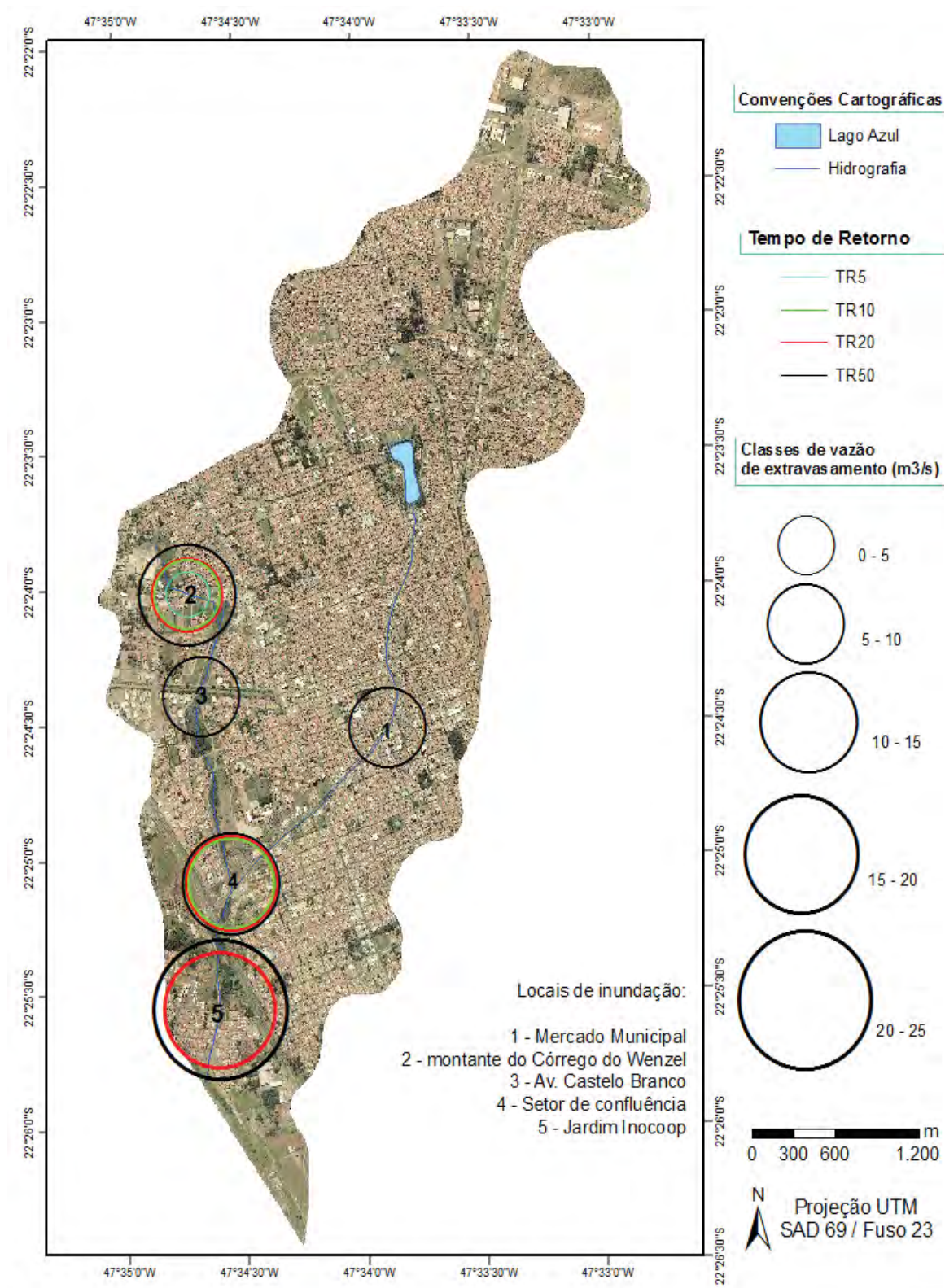
As simulações hidráulicas e hidrológicas, implementadas pelo sistema computacional IPHS1, se basearam nos parâmetros de entrada dos canais por meio do módulo trecho. Cada trecho representa a configuração de uma determinada seção do canal, sendo que em uma mesma sub-bacia pode-se inserir mais de um trecho. Por exemplo, a sub-bacia 4, que apresentou extravasamento apenas no trecho em que houve a canalização do Córrego do Wenzel, setor a montante do canal. Assim, os hidrogramas foram identificados por sub-bacia e, de maneira mais pontual por setores. Não foram caracterizados pontos de inundação para o cenário de 1958. As figuras 23 e 24 identificam os setores correlatos aos trechos de interesse da bacia do Córrego da Servidão para os anos de 1972 e 2006, respectivamente, as quais indicam três pontos de inundação no cenário de 1972 (P1 = Mercado Municipal, P2 = Montante Córrego Wenzel e P3 = Avenida Castelo Branco) e cinco pontos de inundação no cenário de 2006 (P1 = Mercado Municipal, P2 = Montante Córrego Wenzel, P3 = Avenida Castelo Branco, P4 = Confluência dos córregos Wenzel e Servidão e P5 = Bairro Inocoop).

Figura 26 - Mapa de extravasamento na rua em 1972.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27 - Mapa de extravasamento na rua em 2006.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As características de uso e ocupação do solo e da rede de drenagem no cenário de 1958 não configuraram situação de inundação para nenhuma dos eventos chuvosos propostos. Isso se deve ao predomínio de canais naturais ao longo do sistema de drenagem, uma vez que em 1958 não havia qualquer efeito de amortecimento da onda de cheia por reservatório. O escoamento em conduto fechado era de pouco mais que 300 m na sub-bacia 3 e de 30 m na intersecção da Rodovia Washington Luiz com o Córrego da Servidão. A baixa impermeabilização da cobertura de superfície e, por conseguinte, menores volumes de água no cenário de 1958 favoreceram o escoamento dos fluxos d'água sem riscos de alagamento.

Em 1972, os resultados das simulações hidráulicas e hidrológicas possibilitaram inferir que as inundações de alguns setores são devido às condições de impermeabilização da cobertura de superfície, que provocam o aumento do volume de água escoado em superfície em um curto espaço de tempo. Soma-se a este fator a propagação dos fluxos em condutos fechados. O limite das vazões na seção fechada foi determinante para a propagação da vazão extravasante em superfície. O setor do Mercado Municipal configura local de inundação por dois fatores: a mudança de direção do canal, que caracteriza diminuição da capacidade de escoamento e redução da velocidade, e o encerramento da seção fechada na Rua 14. Após o encerramento da canalização as características do leito provocaram o espraçamento da água, e as rugosidades mais altas que as seções antecedentes reduziram a velocidade do fluxo no sentido de jusante a montante. No cenário de 1972, os setores de alto curso do Córrego do Wenzel e a Avenida Castelo Branco obtiveram dados que comprovam situação de inundação decorrente do estrangulamento do canal por condutos fechados.

O cenário de 2006 caracterizou-se pelo incremento de canalizações em setores a jusante dos córregos, implementando maiores extensões aos condutos fechados registrados em 1972. Desta maneira, o escoamento do alto e médio curso do Córrego da Servidão corre abaixo da Avenida Visconde de Rio Claro até a confluência com o Córrego do Wenzel. As características desta seção do canal provocaram o escoamento de grandes volumes em pequenos espaços de tempo, diminuindo a incidência de inundações no setor do Mercado Municipal em relação ao cenário anterior. No setor montante do Córrego do Wenzel, os volumes de água que inundavam o setor em 1972 são menores que os volumes em 2006. Acredita-se que os alagamentos só ocorram em TR de 50 anos devido a estruturas de engenharia improvisadas implantadas na intersecção do Córrego do Wenzel com a Avenida Castelo Branco. No entanto, os volumes de água foram transferidos para setores a jusante, onde atualmente é notória a ocorrência de inundações na confluência dos canais, setor da

Avenida Visconde de Rio Claro (próximo à Rodoviária e Rodovia Washington Luis) e no Bairro Jardim Inocoop.

Os resultados obtidos pelas simulações hidráulicas e hidrológicas são coerentes com o mapeamento das áreas preferenciais de escoamento superficial. A identificação das áreas de contribuição para o escoamento superficial possibilitou verificar os principais pontos de risco a inundação. Mesmo em áreas onde não foram registradas ocorrências de inundação, por meio das simulações computacionais, constata-se que a análise da tendência quanto ao acúmulo dos fluxos d'água permite inferir a possibilidade de novos pontos de alagamento, na medida em que se intensificam os processos de impermeabilização das vertentes por equipamentos urbanos.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método do SCS, o qual se embasou a pesquisa, proporcionou a integração de variáveis essenciais nos estudos acerca de bacias hidrográficas urbanizadas. Os critérios de avaliação da dinâmica do escoamento superficial integraram as características pedológicas para as áreas permeáveis e o estado de uso e ocupação do solo para as áreas impermeáveis. A identificação de camadas de argila como parâmetro de restrição e impedimento da infiltração da água no perfil do solo visou fundamentar o estudo com condições o mais próximas possível das condições reais.

O mapeamento do uso da terra indicou as alterações da ocupação urbana na bacia do Córrego da Servidão. As classes de uso definidas entre elementos de cobertura vegetal e intra-urbanos contribuíram para quantificar a relação entre as áreas permeáveis e impermeáveis. Da mesma maneira, a análise multitemporal por meio do mapeamento de diferentes cenários é importante para estudos que envolvem a evolução da expansão urbana e os impactos da urbanização no comportamento hidrológico de bacias hidrográficas.

O software Spring mostrou-se adequado tanto para o pré-processamento quanto para o processo de classificação das imagens. As técnicas de geoprocessamento e a interface dos SIGs são uma ferramenta essencial para caracterizar os diferentes cenários de uso e ocupação da terra. Neste sentido, a fotointerpretação apresentou grande contribuição na estimação de parâmetros relacionados aos cursos d'água, como dimensões e características de rugosidade das superfícies. As geotecnologias aplicadas a bacias urbanas são um instrumento de grande

valia na medida em que permitem a análise do processo de urbanização, bem como as tendências de ocupação de áreas futuras ou inadequadas do ponto de vista ambiental.

A verificação do percurso preferencial do escoamento superficial apresentou dados coerentes com aqueles conhecidos em campo e obtidos nas simulações computacionais. Os resultados obtidos fundamentaram a discretização da bacia, favorecida principalmente pela identificação criteriosa dos setores mais críticos quanto à tendência ao acúmulo dos fluxos. A definição das sub-bacias estimou valores da CN de maneira menos generalizada e os hidrogramas gerados para cada uma contemplaram maior nível de detalhe na escala local e integram os estudos da bacia em escala global.

As simulações hidráulicas e hidrológicas permitiram caracterizar e avaliar a dinâmica das inundações na cidade de Rio Claro. O sistema computacional IPHS1 permitiu a integração de parâmetros de diferentes algoritmos abarcados na proposta deste estudo. Algumas dificuldades foram encontradas para compilação de situações mais complexas, como o nível de detalhe dos parâmetros de entrada e a densidade de informação, o que demandou procedimentos mais demorados para a conversão chuva x vazão. Mesmo assim, trata-se de um software livre e de fácil manipulação de dados, e acredita-se na sua aplicabilidade em trabalhos não apenas no ramo das engenharias, mas sua utilização como uma ferramenta viável nos estudos em planejamento urbano.

Os dados obtidos por meio da geração dos hidrogramas de cheias mostraram-se uma ferramenta importante para estudos aplicados ao planejamento urbano sob a perspectiva da gestão dos recursos hídricos. A modelagem hidrológica dá indicações bastante relevantes em trabalhos que visem à organização espacial da sociedade em função das características do meio natural. Neste viés, esta pesquisa apresenta-se como um caminho a questões de planejamento urbano, sob a perspectiva da regularização de padrões de uso da terra de maneira coerente com as condições hidrológica da área de interesse.

Assim, evidenciou-se que o aumento da impermeabilização do solo pelo crescimento da cidade de Rio Claro foi o responsável pelos primeiros eventos de inundação do município. Posteriormente, a Prefeitura Municipal de Rio Claro realizou algumas obras de engenharia e transferiu grande parte dos problemas relacionados com as inundações para áreas a jusante, onde hoje as inundações ocorrem de fato. Infelizmente, a implantação de obras de drenagem descontextualizadas da dinâmica hidráulica e hidrológica da bacia do Córrego da Servidão pode ser responsável pelo agravamento da ocorrência de inundações mais a jusante de Bairro Inocoop, atingindo os bairros mais periférico de Rio Claro, como o Jardim Novo 1.

Dentre as soluções que envolvem incrementar o processo de infiltração e reduzir os picos de vazão, visando minimizar os riscos de inundação, há adequação e otimização do sistema de drenagem pela substituição de cobertura de superfícies impermeabilizadas por superfícies de infiltração. Por exemplo, a implantação de jardins, coberturas vegetais rasteiras e/ou pavimentos porosos em áreas como parques públicos, calçadas e quintais, e a construção de valetas de infiltração em canteiros de ruas e estacionamentos.

Este trabalho é um dos exemplos dentre as diversas possibilidades das metodologias empregadas. Os resultados alcançados visaram à geração de documentos e materiais cartográficos como subsídio ao planejamento urbano de Rio Claro e à formulação de medidas mitigadoras quanto à ocorrência de inundações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLASIA, D. G.. **Impacto das incertezas no custo de uma rede de macrodrenagem**. 2002. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2002.

ALMEIDA, R.D. de (Coord). **Atlas Municipal Escolar de Rio Claro - SP**: geográfico, histórico e ambiental. Rio Claro: Cruzeiro Editora e Artes Gráficas, 2002. 113 p.

ANDREOZZI, S. L. **Planejamento e Gestão de Bacias Hidrográficas**: uma abordagem pelos caminhos da sustentabilidade sistêmica. 2005. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas: Rio Claro, 2005.

BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana**. ABRH, Porto Alegre, 2005. 266 p.

BELISÁRIO, P.R.; VALÉRIO FILHO, M. Contribuição das geotecnologias para o mapeamento das áreas impermeabilizadas consoante a legislação de zoneamento urbano na sub bacia do Córrego Pararangaba, São José dos Campos-SP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 15, 2011, Curitiba, PR. **Anais...** Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.6850-6857.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 3. ed. São Paulo: Editora Ícone, 1990. 355 p.

BJORNBERG, A.J.S.; LANDIM, P.M.B. Contribuição ao estudo da Formação Rio Claro (Neoceno-zóico). **Boletim Sociedade Brasileira Geologia**, v. 15, n. 4, p. 43-67, 1966.

BRASIL. Ministério das Cidades/IPT. **Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios**. Brasília: Ministério das Cidades, Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 2007. 176 p.

BRINO, W.C. **Contribuição à definição climática da Bacia do Corumbataí e adjacências (S), dando ênfase à caracterização dos tipos de tempo**. 1973. Tese (Doutorado em Geografia). Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro-SP, 1973.

CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.M.; MEDEIROS, J.S. Representações Computacionais do Espaço: Fundamentos Epistemológicos da Ciência da Geoinformação. **Revista Geografia (UNESP)**, v. 28, n. 1, p. 83-96, jan/abril 2003.

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005, 302 p.

CAMARGO, O.A. et al. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do IAC. **Boletim Técnico do Instituto Agronômico de Campinas** (Edição revista e atualizada), Campinas, n. 106, p. 61-77, 2009.. Disponível em: <http://www.iac.sp.gov.br/Publicacoes/Publica/Boletim%20T%C3%A9cnico%20106_Completo_edi%C3%A7%C3%A3o%20rev.%20atual.%202009.pdf>. Acesso em: 08 jul.2011.

CAMPOS, J.O. Formação Rio Claro – Aspectos Geotécnicos. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 2. 1979, Rio Claro. **Atlas...** Rio Claro, SGB, 1979, p.35-49.

CANDIDO, D. H. **Inundações no município de Santa Bárbara d'Oeste, SP:** condicionantes e impactos. 2007. 235 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, UNICAMP, Campinas-SP, 2007.

CASIMIRO, P.C. Uso do Solo – Ecologia da Paisagem: Perspectivas de uma Nova Abordagem do Estudo da Paisagem em Geografia, **Revista GeoInova** – Revista do Departamento de Geografia e Planejamento Regional, Lisboa, n.2, F.C.S.H. – U.N.L., p. 45-66. 2000.

CASTRO, A.W.S. **Clima urbano:** as precipitações pluviais em Rio Claro-SP. 1995. 196 f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro-SP, 1995.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Ed. Blucher, 1980. 188 p.

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. 2001. 194 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre (SP), 2001.

CONCEIÇÃO, F. T., BONOTTO, D. M. Use of U-isotopes disequilibrium to evaluate the weathering rates and fertilizer-derived uranium at São Paulo State, Brazil. **Environmental Geology**, v. 44, n.4, p. 408-418, 2003.

COSTA, H.B.; ROSSI, M.; COELHO, R.M. Mapa de impermeabilização do solo da bacia do Ribeirão das Anhumas, Campinas-SP. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 11, São Paulo. **Anais...** São Paulo: USP, 2005, p. 2674-2677.

COTTAS, L.R. **Estudos Geológico-Geotécnicos Aplicados ao Planejamento Urbano de Rio Claro**. 1983. Tese (Doutorado em Geologia Geral e de Aplicação) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1983.

CRUZ, M.A.S; TUCCI, C.E.M. Otimização das obras de controle de cheias em uma bacia urbana. **RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 2, p.63-80, 2007.

CRUZ, M.A.S; TUCCI, C.E.M. Avaliação dos cenários de planejamento na drenagem urbana: Porto Alegre. **RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 3, p.59-71, 2008.

EM-DAT/CRED - Emergency Events Database/ Centre for Research on the Epidemiology of Disasters . 2011. Disponível em: < <http://www.emdat.be/>>. Acesso em: 02 jan. 2012.

FONTES, N. **Proposta metodológica para o planejamento de sistemas de espaços livres: Ribeirão Preto – SP**. 2009. 193 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro-SP, 2009.

GARCIA, G.J.; GARCIA, L.B.R.; GERARDI, L.H.O. A expansão urbana de Rio Claro-SP: uma aproximação quantitativa. **Geografia**, Rio Claro, SP, v.8, n.15-16, p.175-180, 1983.

GRILO, R.C. **A precipitação pluvial e o escoamento superficial na cidade de Rio Claro (SP)**. 1992. 92 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro-SP, 1992.

GUERRA, A. T.; GUERRA, A. J. T. **Novo Dicionário Geológico-Geomorfológico**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. 653 p.

GUERRA, A.T. Processos erosivos nas encostas. In: GUERRA, A. J, T.; CUNHA. S.B. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. Rio de Janeiro: Ed. Bertrand Brasil, 2009. 9ª Ed. p.149-210.

IGBP - International Geosphere-Biosphere Programme. 1994. Disponível em: <<http://www.igbp.net/page.php?pid=250>> Acesso em:22 ago.2011.

KARMANN, I. Ciclo da água, água subterrânea e sua ação geológica. In: TEIXEIRA,W. et al. (org.). **Decifrando a Terra**. São Paulo: USP e Oficina de Textos, 2002, p. 624.

KUCK, T. N. **Análise da impermeabilização da área urbana de Manaus (1987-2006) com o uso do modelo de mistura espectral Mesma**. 2010. 74 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). INPE - Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

LEITE, M.E.; BRITO, J.L.S. Sensoriamento Remoto e SIG aplicados ao mapeamento do uso do solo urbano de Montes Claros/MG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, 2011, Curitiba, PR. **Anais...** - SBSR, Curitiba, PR, 2011, INPE, p. 0933.

LEPSCH, I.F. **Formação e conservação dos solos**. São Paulo: Ed. Oficina de Textos, 2002. 173 p.

LOPES, W.A.B. **Análise comparativa de impactos hidrológicos causadas pelo adensamento urbano nas bacias hidrográficas do Rio Pararangaba e do Ribeirão Vidoca em São José dos Campos (SP)**. 2005. 167 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). INPE - Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 2005.

LUCHIARI, A. Identificação da cobertura vegetal em áreas urbanas por meio de produtos de sensoriamento remoto e de um sistema de informação geográfica. **Revista do Departamento de Geografia**, n.14, p.47-58, 2001.

MONTEIRO, C.A.F. O clima e a organização do espaço no estado de São Paulo: problemas e perspectivas. **IGEOP-USP**, São Paulo, p.54, 1976. (Série Teses e Monografias, 28).

MONTEIRO, C.A.F. A dinâmica e as chuvas no Estado de São Paulo – estudos geográficos sob a forma de atlas. **IGEOP-USP**: São Paulo, 1973.

MORUZZI, R. B. et al. Contribuição metodológica para a caracterização de áreas potenciais de inundação em uma bacia hidrográfica urbanizada, com o suporte de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento: apresentação de dois cenários em um módulo piloto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17, 2007, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2007.

MORUZZI, R. B. et al. Efeito da ocupação urbana e de obras de drenagem sobre o hidrograma de uma bacia urbanizada: o caso da bacia do Córrego da Servidão em Rio Claro, SP. In: ENCONTRO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA DOS CAMPOS GERAIS, 5, 2009, Campos gerais. **Anais...** Campos Gerais, 2009.

OHNUMA JÚNIOR, A.A. **Cenários de reuso de água pluvial e controle da drenagem visando a recuperação ambiental da micro-bacia do alto Tijuco Preto**. 2005. 192 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental). Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2005.

OLIVEIRA, H.B.; PRADO, H. **Levantamento Pedológico Semidetalhado do Estado de São Paulo**: quadrícula de São Carlos. II Memorial Descritivo. Instituto Agrônomo de Campinas, 138 p. 1984

PAIVA, R.C.D. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias. Estudo de caso**: Bacia do Rio Solimões. 2009. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre (RS), 2009.

PENTEADO, M.M. Implicações tectônicas na gênese das cuestas da Bacia de Rio Claro (SP). **Notícia Geomorfológica**, Campinas, v.8, n.15, p. 19-41, 1968.

PENTEADO, M.M. **Geomorfologia do Setor Centro-Occidental da Depressão Periférica Paulista**. 1976. f. Tese (Doutorado em Geociências). Instituto de Geografia USP. (Série Teses e Monografias, 22).

PENTEADO-ORELLANA, M.M. Estudo geomorfológico do Sítio Urbano de Rio Claro (SP). **Notícia Geomorfológica**, Campinas, v.21, n.42, p. 23-56, 1981.

POMPÊO, C.A. Drenagem urbana sustentável. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, v. 5, n. 1, p. 15-24, 2000.

PORTO, R. L. et al. Drenagem Urbana. In: TUCCI, C. E. M. (org.) **Hidrologia: Ciência e aplicação**, 4ª ed. Porto Alegre: Ed. UFRGS/ ABRH, 2009. p. 805-847.

PRUSKI, F. F. **Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2006. 240 p.

RENOÓ, C.D.; SOARES, J.V. Modelos hidrológicos para gestão ambiental. **Relatório Técnico Parcial** (Dez.2000). Ministério da Ciência e Tecnologia: Instituto de Pesquisas Espaciais.

ROSSETTI, L.A.F.G. **Geotecnologias aplicadas à caracterização e mapeamento das alterações da cobertura vegetal intra-urbana e da expansão urbana da cidade de Rio Claro (SP)**. 2007. 115 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro-SP, 2007.

SANCHEZ, M.C.; GERARDI, L.H.O. Fotointerpretação e quantificação para avaliação de transformações no uso da terra. **Geografia**, Rio Claro, SP, v.8, n.15-16, p.143-150, 1983.

SCHNEIDER, R.L. et al. Revisão Estratigráfica da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28, 1974, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, SBG, v.1, 1974, p.41-65.

SCHWAB, G.O. et al. **Water Soil and Water Conservation Engineering**. New York: John-Wiley & Sons, 1966, 683 p.

SCS - Soil Conservation Service. National Engineering Handbook, Chapter 9. **Hydrologic Soil-Cover Complexes**. U.S. Department of Agriculture, Washington, DC. July, 2004.

SCS - Soil Conservation Service. National Engineering Handbook, Chapter 7. **Hydrologic Soil Groups**. U.S. Department of Agriculture, Washington, DC. May, 2007.

SHAFER, A.G.; NOGUEIRA, R.E.; SLUTER, C.R. Desenvolvimento de um banco de dados geográfico para a estimativa do potencial de retenção em áreas de drenagem. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, 2011, Curitiba, PR. **Anais...** - SBSR, Curitiba, PR, INPE, 2011, p.8709.

SILVEIRA, A. L. L. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M. (org.) **Hidrologia: Ciência e aplicação**; 4ª ed. Porto Alegre: Ed. UFRGS/ ABRH, 2009. p. 35-51.

SIMON, A.L.H. **A dinâmica do uso da terra e sua interferência na morfohidrografia da Bacia do Arroio Santa Bárbara – Pelotas (RS)**. 2007. 185 f. Dissertação (mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro (SP), 2007. Disponível em: <<http://www.athena.biblioteca.unesp.br/>>. Acesso em: 14 jun.2011.

TAVARES, A.C; SILVA, A.C.F. 2008. Urbanização, chuvas de verão e inundações: uma análise episódica. *Climatologia e Estudos da Paisagem*. Rio Claro. v. 3, n.1, 2008.

TROPPEMAIR, H. Aspectos Geográficos: o quadro natural. In: MACHADO, I. L. (Coord.). **Rio Claro Sesquicentenária**. Rio Claro: Museu Histórico Pedagógico Amador Bueno da Veiga, 1978. p.75-87.

TROPPEMAIR, H. **Rio Claro: ontem e hoje**. Rio Claro: Secretaria Municipal de Educação, 2008. 105 p.

TUCCI, C. E. M.; ZAMANILLO, E. A. & PASINATO H. D. **Sistema de simulação precipitação vazão IPHS1**. IPH-UFRGS. Porto Alegre. 66 p. 1989.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: Ed. Universidade /UFRGS/ Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998, 668 p.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. **Inundações urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003, 150 p.

TUCCI, C. E. M., MENDES, C. A. **Avaliação ambiental integrada de bacia hidrográfica**. Ministério do Meio Ambiente. Brasília: MMA, 2006, 302 p.

TUCCI, C.E.M. Escoamento Superficial. In: ____ (org). **Hidrologia: Ciência e aplicação**; 4ª ed. Porto Alegre: Ed. UFRGS/ ABRH, 2009. p. 391-442.

TUCCI, C.E.M. Controle de enchentes. In: ____ (org.). **Hidrologia: Ciência e aplicação**; 4ª ed. Porto Alegre: ed. UFRGS/ ABRH, 2009. p. 621-652.

VALÉRIO FILHO, M. et al. Caracterização de bacias hidrográficas impermeabilizadas pelo processo de urbanização com o suporte de geotecnologias. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11, 2003, Belo Horizonte. **Anais...** - SBSR, São José dos Campos: INPE, 2003, p. 1977–1983. Disponível em: <<http://www.ltid.inpe.br/sbsr2005/biblioteca/>>. Acesso em: 23 ago. 2011.

VENDRAME, I.F.; LOPES, W.A.B. Análise do crescimento urbano e seus efeitos na mudança da dinâmica de escoamento superficial da bacia do Pararangaba. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, 2005, Goiânia. **Anais ...** Goiânia, 2005, INPE, p. 2555-2562.

VIEGAS FILHO, J.; LANNA, A.E.L.; MACHADO, A.A. A Modelagem Orientada a Objetos Aplicada a Sistemas de Apoio à Decisão em Recursos Hídricos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 12, 1999, Belo Horizonte. **Anais...** CD e Livro de Resumos. Belo Horizonte: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1999. v. LR. p. 60.

VILLANUEVA, A.O.N.; TASSI, R; ALLASIA, D.G. Manejo integrado de bacias urbanas e planos diretores de drenagem urbana: os casos d Porto Alegre e Caxias do Sul - RS - Brasil. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE MANEJO INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS, 2001, Rosário. **Anais...**, Rosário - Santa Fé – Argentina, 2001

ZAINE, J. E. **Geologia da Formação Rio Claro na Folha Rio Claro (SP)**. 1994. 98 f. Dissertação (Mestrado em Geociências), Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Unesp, Rio Claro, 1994.

ZAINE, J. E. **Mapeamento geológico-geotécnico por meio do método do detalhamento progressivo**: ensaio de aplicação na área urbana do município de Rio Claro (SP). 2000. 149 f. Tese (Doutorado em Geociências), Instituto de Geociências e Ciências Exatas. UNESP, Rio Claro, 2000.

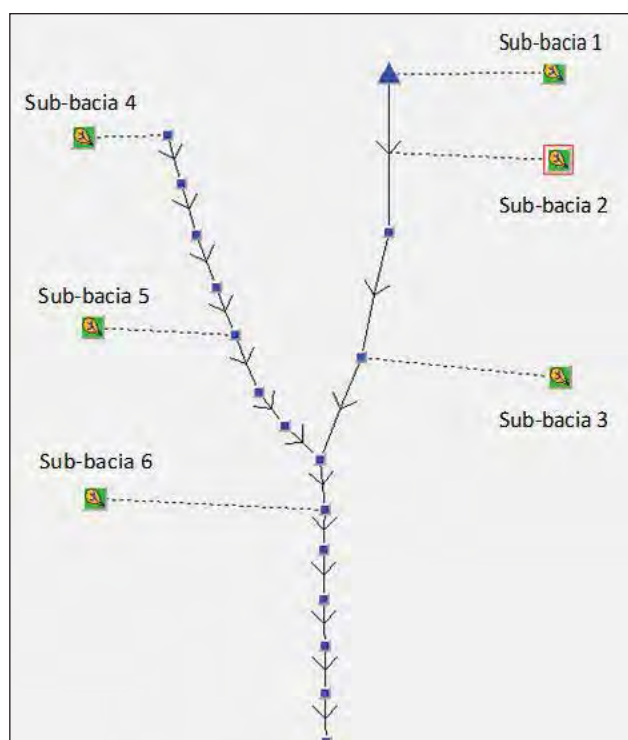
APÊNDICE 1 – MÓDULO BACIA

Tabela 12: Dados de entrada para o módulo bacia.

Sub-bacias	Tc – 1958	Tc – 1972	Tc – 2006	Área (m ²)	Desnível	Grupos Hidrológicos
1	11,0372	10,64512325	15,40996	4,535	20	B
2	24,14189	24,00579197	23,67957	1,493	10	C
3	60,14559	59,40750741	56,55914	2,409	10	C
4	24,37407	24,37406555	24,37407	1,613	18	C
5	30,11649	32,71641433	27,59282	1,288	17	C
6	38,74208	36,96329917	31,0613	2,309	15	C

* tc = tempo de concentração calculado pelo Método de Kirpich.

Figura 28: Organização do módulo bacia.



APÊNDICE 2 – MÓDULO RESERVATÓRIO

Tabela 13: Parâmetros de entrada do vertedor.

Vertedor:	
Coeficiente de descarga – C	1,84
Largura (m) - B	2
Cota de crista (m)	0,5

Tabela14:Parâmetros de entrada do orifício.

Orifício:	
Coeficiente de descarga – C	0,61
Área (m2) – A	1
Altura do eixo (m) - h	0,25

Tabela 15: Parâmetros de entrada do valor da cota.

Cota máxima do reservatório	1,8
Número de cotas	18
0,1	3,2
0,2	6,4
0,3	9,6
0,4	12,8
0,5	16
0,6	19,2
0,7	22,4
0,8	25,6
0,9	28,8
1	32
1,1	35,2
1,2	38,4
1,3	41,6
1,4	44,8
1,5	48
1,6	51,2
1,7	54,4
1,8	57,6

APÊNDICE 3 – MÓDULO TRECHO

Tabela 16: Estimativa de n de Manning para o revestimento das superfícies das margens, sugeridos por Crow (1973) e Walesh (1989), e adaptadas por Canholi (2005).

Fonte: Canholi, (2005 , p.95-97). Organizado por: Isabel Cristina Moraes

Tipo de revestimentos das margens	
Asfalto liso	0,011
Concreto liso/rugoso	0,012
Gramados esparsos	0,015
Gramados esparsos	0,02
Plantações rasteiras	0,013

Tabela 17: Estimativa de n de Manning para as superfícies dos canais, sugeridas por Chow (1973), French (1985), Macaferri (2002) e Mays (2001), adaptados por Canholi (2005).Fonte: Canholi, (2005 , p.95-97). Organizado por: Isabel Cristina Moraes

Tipos de revestimentos dos canais	
Concreto liso	0,012
Concreto rugoso	0,017
Solo com cascalho	0,027
Gabião	0,025
Solo não uniforme com grama curta (mínimo)	0,022
Cascalho	0,03
Vegetação arbustiva esparsa	0,05

Tabela 18: Parâmetros de entrada para canais canalizados:

C	comprimento dos canais
CM	a cota de fundo a montante
CJ	cota de fundo a jusante

Tabela 19: Parâmetros de entrada para canais naturais:

H	altura
B	largura
R	rugosidade do canal principal
H1	altura da planície de inundação
B1	largura da planície de inundação
R1	rugosidade da planície de inundação

Tabela 20: Dados de entrada para o módulo rio no cenário de 1958:

Características dos dados de entrada para o módulo rio: Cenário de 1958											
1958	T	Método de propagação	C	CM	CJ	H	B	R	H1	B1	R1
Sub 1	T1	Muskingun-Cunge com Planície de inundação	520	620	610	0,2	1	0,024	1,5	20	0,022
Sub 2	T2	Muskingun-Cunge com Planície de inundação	800	610	603	0,5	1	0,024	1,5	12	0,05
Sub 2	T3	Muskingun-Cunge com Planície de inundação	224	603	600	0,5	1	0,024	1	10	0,022
Sub 3	T4	Muskingun-Cunge com Planície de inundação	316	600	599	0,5	1	0,024	1	10	0,011
Sub 3	T5	Muskingun-Cunge Linear	111	599	598	2	2	0,017			0,011
Sub 3	T6	Muskingun-Cunge Não Linear p/ Condutos Fechados	334	598	595	2,5		0,017	Prop. superfície		0,011
Sub 3	T7	Muskingun-Cunge com Planície de inundação	1496	595	590	0,8	1	0,024	1,8	12	0,022
Sub 4	T8	Muskingun-Cunge com Planície de inundação	1256	620	607	1	2	0,024	1	2	0,022
Sub 5	T9	Muskingun-Cunge com Planície de inundação	1480	607	590	1,5	3,5	0,024	1	4	0,022
Sub 6	T10	Muskingun-Cunge com Planície de inundação	221	590	585	1	5	0,024	2	10	0,022
Sub 6	T11	Muskingun-Cunge Não Linear p/ Condutos Fechados	31	585	584	Circular	2,7	0,017	Prop. superfície		0,011
Sub 6	T12	Muskingun-Cunge com Planície de inundação	1340	584	575	1	5	0,024	2	10	0,022

Tabela 21: Dados de entrada para o módulo rio no cenário de 1972:

Características dos dados de entrada para o módulo rio: Cenário de 1972											
1972	T		C	CM	CJ	H	B	R	H1	B1	R1
Sub 1		Lago Azul – módulo reservatório									
Sub 2	T1	Muskingun-Cunge Não Linear para Condutos Fechados	1007	620	600	Circ.	2,5	0,017	Prop. superfície		0,011
Sub 3	T2	Muskingun-Cunge Não Linear para Condutos Fechados	1312	600	593	Circ.	2,5	0,017	Prop. superfície		0,011
Sub 3	T3	Muskingun-Cunge com Planície de inundação	921	593	590	1	1,2	0,024	1,8	14	0,022
Sub 4	T4	Muskingun-Cunge com Planície de inundação	344	620	619	1	1	0,024	1	10	0,022
Sub 4	T5	Muskingun-Cunge Não Linear para Condutos Fechados	194	619	617	Circ.	1	0,017	Prop. superfície		0,011
Sub 4	T6	Muskingun-Cunge com Planície de inundação	718	917	607	1	2	0,024	1	2	0,022
Sub 5	T7	Muskingun-Cunge Não Linear para Condutos Fechados	53	607	603	Circ.	1	0,017	Prop. superfície		0,022
Sub 5	T8	Muskingun-Cunge com Planície de inundação	1537	603	590	1,5	3,5	0,024	1,5	4	0,022
Sub 6	T9	Muskingun-Cunge com Planície de inundação	292	590	585	4	5	0,03	2	6	0,022
Sub 6	T10	Muskingun-Cunge Não Linear para Condutos Fechados	20	585	584	Circ.	3,8	0,017	Prop. superfície		0,011
Sub 6	T11	Muskingun-Cunge com Planície de inundação	1343	584	576	1,5	1,5	0,024	2	6	0,022
Sub 6	T12	Muskingun-Cunge Não Linear para Condutos Fechados	40	576	575	Circ.	3,8	0,017	Prop. superfície		0,022

Tabela 22: Dados de entrada para o módulo rio no cenário de 2006:

Características dos dados de entrada para o módulo rio: Cenário de 2006											
2006			C	CM	CJ	H	B	R	H1	B1	R1
Sub 1		Lago Azul módulo reservatório									
Sub 2	T1	Muskingun-Cunge Não Linear para Condutos Fechados	1007	620	600	Circ.	2,5	0,012	Prop. Superf.		0,011
Sub 3	T2	Muskingun-Cunge Não Linear para Condutos Fechados	1312	600	595	Circ.	2,5	0,012	Prop. Superf.		0,011
			849	595	590						
			Sub-trecho 1			2,3	3,15	0,017	Prop. Superf.		0,011
Sub 3	T3	Muskingun-Cunge Não Linear para Condutos Fechados	Sub-trecho 2			2,3	3,15	0,017	Prop. Superf.		0,011
Sub 4	T4	Muskingun-Cunge com Planície de inundação	340	620	619	0,6	1	0,024	1	15	0,022
Sub 4	T5	Muskingun-Cunge Não Linear para Condutos Fechados	305	619	615	Circ.	1	0,017	Prop. Superf.		0,011
Sub 4	T6	Muskingun-Cunge com Planície de inundação	611	615	607	1	2	0,03	1	2	0,03
									Prop. Superf.		
Sub 5	T7	Muskingun-Cunge Não Linear para Condutos Fechados	80	607	604	Circ.	1	0,017			0,011
Sub 5	T8	Muskingun-Cunge com Planície de inundação	1241	604	592	3	10	0,03	4	10	0,022
									Prop. Superf.		
Sub 5	T9	Muskingun-Cunge Não Linear para Condutos Fechados	15	592	591	Retang. 3	2,2	0,017			0,011
Sub 5	T10	Muskingun-Cunge Linear	36	591	590	1,2	6,8	0,27			
			107	590	588						
			Sub-trecho 1 - retangular			2,3	3,15	0,017	Prop superf.		0,011
Sub 6	T11	Muskingun-Cunge Não Linear para Condutos Fechados	Sub-trecho 2 - retangular			2,3	3,15	0,017	Prop. Superf.		0,011
			Sub-trecho 3 - circular			1,25		0,017	Prop. Superf.		0,011
Sub 6	T12	Muskingun-Cunge com Planície de inundação	137	588	585	3	10	0,03	1	16	0,011
									Prop. Superf.		
Sub 6	T13	Muskingun-Cunge Não Linear para Condutos Fechados	54	585	584	Circ.	3,8	0,012			0,011
Sub 6	T14	Muskingun-Cunge com Planície de inundação	249	584	579	1	8	0,05	0,05	10	0,05
									Prop. Superf.		
Sub 6	T16	Muskingun-Cunge com Planície de inundação	538	577	575	2,7	5	0,017			0,011

Figura 29: Organização do módulo trecho para 1958 (a), 1972 (b) e 2006 (c)

