



www.ugb.org.br  
ISSN 2236-5664

## Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 13, n° 2 (2012)



# INTERFERÊNCIA DO USO DA TERRA NAS INUNDAÇÕES DA ÁREA URBANA DO CÓRREGO DA SERVIDÃO, RIO CLARO (SP)

## INTERFERENCE OF THE LAND USE ON FLOODING IN THE URBAN AREA OF SERVIDÃO STREAM, RIO CLARO (SP)

**Isabel Cristina Moraes**

Avenida 24-A, n° 1515 - Bela Vista - Rio Claro - São Paulo - Brasil - CEP 13506-900 - E-mail: bel.moraes.geo@gmail.com

**Fabiano Tomazini da Conceição**

Avenida 24-A, n° 1515 - Bela Vista - Rio Claro - São Paulo - Brasil - CEP 13506-900 - e-mail: ftomazini@rc.unesp.br

**Cenira Maria Lupinacci da Cunha**

Avenida 24-A, n° 1515 - Bela Vista - Rio Claro - São Paulo - Brasil - CEP 13506-900 - e-mail: cenira@rc.unesp.br

**Rodrigo Braga Moruzzi**

Avenida 24-A, n° 1515 - Bela Vista - Rio Claro - São Paulo - Brasil - CEP 13506-900 - e-mail: rmoruzzi@rc.unesp.br

### Informações sobre o Artigo

Data de Recebimento:  
24/01/2012

Data de Aprovação:  
06/07/2012

### Palavras-chave:

Bacia hidrográfica; Drenagem urbana; Uso da terra; Inundações.

### Keywords:

Watershed; Urban drainage; Land use; Flooding.

### Resumo

As primeiras populações se estabeleceram próximas aos rios e com o seu crescimento, houve o aumento das áreas impermeabilizadas e a supressão das áreas de várzea. Tais fatos contribuem para a alteração das características hidrológicas e hidráulicas dos rios de planície, e consequente para o aumento das inundações. Assim, este trabalho tem como objetivo verificar a interferência do uso da terra nas inundações na área urbana da bacia hidrográfica do Córrego da Servidão, Rio Claro (SP), em diferentes cenários, ou seja, sem canalização deste córrego (1958), em cenário em que o córrego foi canalizado (1972) e no cenário atual (2006). Os resultados indicaram que o aumento da impermeabilização, pelo crescimento da cidade de Rio Claro, foi o responsável pelos primeiros eventos de inundação do município. O poder público vem realizando algumas obras de engenharia e transferindo grande parte dos problemas relacionados com as inundações para áreas a jusante, onde hoje as inundações ocorrem.

### Abstract

The first populations have settled near the rivers and as they have expanded there was an increase of impervious areas, and the suppression of floodplain areas. This fact contributes to changes in river hydrology and hydraulics and to the increased floods. Thus, this work aims to verify the interference of land use on floods in the urban area of the Servidão stream watershed, Rio Claro (SP), in different scenarios, i.e., no channel of this stream (1958), in scenario where the stream was channeled (1972) and current one (2006). The results indicated that increasing the waterproofing, for the growth of the Rio Claro city, was responsible for the first event of flooding of the city. The government has been doing some engineering work and transferring most of the problems with flooding to downstream areas, where today the floods occur.

## Introdução

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 à 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.

De acordo com o banco de dados Emergency Database - EM-DAT, que realiza uma compilação de dados e informações sobre a ocorrência de desastres naturais obtidos por diversas fontes como as 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 mesmas. Nos municípios brasileiros, entre o ano de 2000 aos dias atuais, as inundações provocaram 2.126 mortes, e prejuízos calculados em aproximadamente US\$ 3 bilhões (EM-DAT/CRED, 2011). 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 1970 e 1990 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.

Neste sentido, a transição do estado de uso da terra indica mudanças na dinâmica da paisagem geográfica, e a identificação de padrões de ocupação em caráter multitemporal permitem compreender os impactos gerados devido à ocupação humana e atividades sócio-econômicas.

Nos estudos que envolvem os recursos hídricos, ganha relevância a bacia hidrográfica como unidade espacial de análise geográfica, uma vez que esta representa um sistema aberto em constantes trocas de energia e matéria (inputs e outputs) com a região em que se encontra inserida. A quantidade de água que atinge os cursos d'água "está na dependência do

tamanho da era ocupada pela bacia, pela precipitação total e de seu regime, e das perdas devidas à evapotranspiração e à infiltração (Christofoletti, 1980).

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 distribuída no tempo (escoamento), sendo entradas e saídas representadas por hietogramas e hidrogramas, respectivamente.

No contexto da formação das cidades, é notório os estabelecimentos de muitas populações próximas aos rios, e com o crescimento destes centros urbanos houve a supressão das áreas de várzea e a alteração da dinâmica dos cursos d'água, aumentando a frequência e a intensidade das inundações. Em ambiente natural, as enchentes sempre fizeram parte das características hidrológicas das bacias hidrográficas. No entanto, com a urbanização, a cobertura [da superfície] da bacia hidrográfica é em grande parte impermeabilizada com edificações e pavimentos e são introduzidos condutos para escoamento pluvial. Tais premissas permitem prever 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 (Tucci e Mendes, 2006). A inundação e a antecipação dos picos de cheias, provocadas pela impermeabilização da superfície, passaram a ocorrer mesmo em áreas que, em condições naturais, não apresentavam potencial para tais eventos.

Dentre os efeitos mais graves da impermeabilização da superfície destacam-se: 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 (Tucci, 2009).

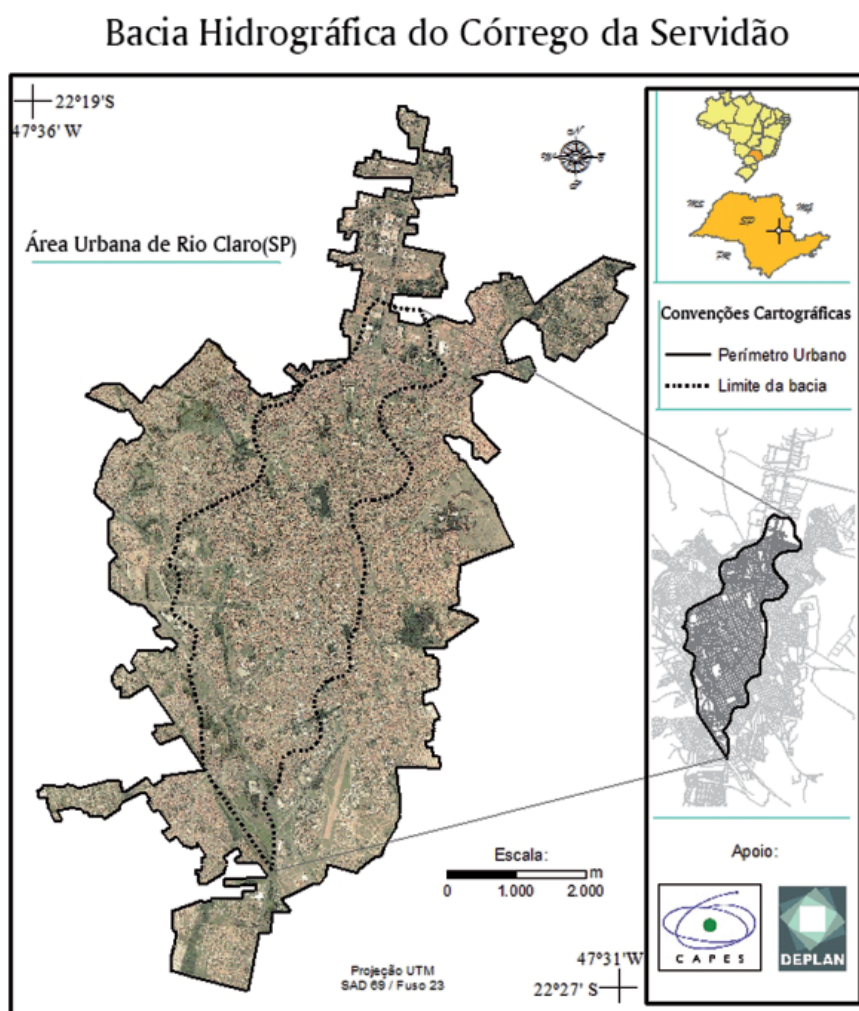
Durante muito tempo o conceito de drenagem urbana foi fundamentado em medidas estruturais executadas em obras de engenharia, sob a perspectiva de remover os excessos de águas pluviais de forma eficiente para evitar transtornos e danos causados pelas inundações. Devido à supressão de cursos d'água pela 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 os setores a jusante do canal (Canholi, 2005).

A partir de tais premissas, este artigo fundamentou-se na avaliação do comportamento da drenagem da bacia hidrográfica do Córrego da Servidão sob a perspectiva da evolução da ocupação urbana nos cenários de 1958, 1972 e 2006. Realizou-se a análise do processo de expansão da cidade e sua interferência em inundações no intuito de somar reflexões e contribuir em novas abordagens aplicadas ao planejamento do município de Rio Claro, interior do estado de São Paulo.

### **Caracterização da Área de Estudo**

A área de estudo é a bacia hidrográfica do Córrego da Servidão, afluente do Rio Corumbataí, onde se instalou a maior parte do sítio urbano da cidade de Rio Claro. O município de Rio Claro (190.000 habitantes) situa-se entre

as coordenadas geográficas 22° 05' e 22° 40' S de latitude e 47° 30' e 47° 55' W de longitude, localizando-se na porção centro-leste do estado de São Paulo. Troppmair (2008) registra que durante a expansão da cultura do café no Estado de São Paulo, os tropeiros faziam das margens do Córrego da Servidão seu local de descanso e pernoite, dando origem a cidade de Rio Claro. Desta forma, a expansão da cidade apresentou como principal tendência a ocupação das áreas de várzea do Córrego da Servidão. A região de interesse deste estudo, foi portanto definida como a área urbana da bacia, o que confere a este córrego o comprimento de 4,6 km de extensão. A nascente do Córrego da Servidão, a partir de 1971, está situada em um reservatório artificial de 424 m<sup>2</sup>. Configura ainda a área de estudo o Córrego do Wenzel, de 2,1km de extensão, tributário do Córrego da Servidão (Figura 1).



*Figura 1 – Localização da área urbana da bacia hidrográfica do Córrego da Servidão no município de Rio Claro.*

A Formação Rio Claro (de idade Cenozóica) recobre a bacia do Córrego da Servidão e é constituída de arenitos arcoseanos mal consolidados e mal classificados, arenitos conglomeráticos e argilitos dispostos em níveis topográficos entalhados por superfícies de erosão (IPT, 1981). Distinguem-se duas sequências principais: sucessão de estratos arenosos com intercalações de leitos argilosos; sucessão mais argilosa com brechas intraformacionais e lentes arenosas nas margens do paleocanal em posição superior aos depósitos de calha. A Formação Rio Claro é interpretada como tendo sido depositada em condições continentais fluviais em clima semi-árido. 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.

Estas características litológicas estão amplamente refletidas na densidade de drenagem da bacia do Córrego da Servidão, ou seja, 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. Da mesma forma, o índice de circularidade, calculado de

acordo com a proposta de Christofletti (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 (Schwab et al., 1966). A vazão média anual na sua foz é de aproximadamente 0,21m<sup>3</sup>/s.

O clima da área é do tipo Cwa (classificação de Köppen), ou seja, clima tropical chuvoso, com chuvas no verão e inverno seco e a temperatura média mensal em quase todos os meses do ano superior a 18°C, sendo que o mês mais quente ultrapassa os 22°C, enquanto que a precipitação do mês mais chuvoso é dez vezes superior a do mês mais seco (Conceição e Bonotto, 2003 e 2004). A área é controlada por massas tropicais e equatoriais que predominam em mais de 50% do ano, com os ventos dominantes provenientes dos quadrantes S e SE. Quanto à distribuição anual de chuvas (Figura 2), o regime é tropical com duas estações bem definidas: de abril a setembro, ocorre o período seco com índices pluviométricos médios de 30 a 90mm por mês e, de outubro a março, ocorre o período úmido, com índices pluviométricos médios de 120 a 260mm por mês. As alturas médias mensais de chuva fornecem uma quantidade de 1330mm de chuva por ano (Figura 2).

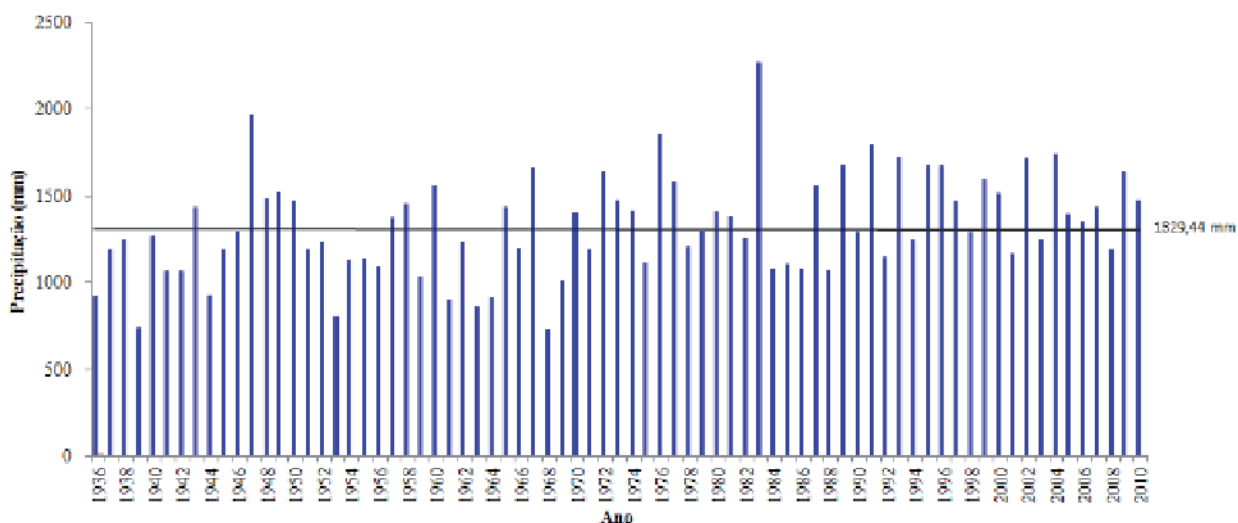


Figura 2 – Precipitação total anual da série histórica de dados pluviométricos de Rio Claro (SP).

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

A precipitação elevada combinada ao substrato geológico presente geram solos bastante desenvolvidos. Dessa maneira, os solos que ocorrem na bacia do Córrego da Servidão compõem-se de Latossolos Vermelho-Amarelo correspondentes às unidades Coqueiro e Laranja Azeda (Oliveira e Prado, 1984). O Latossolo Vermelho-Amarelo – 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.

Atualmente, 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%). Estas características de uso da terra geraram um padrão de arruamento típico do sistema de



colonização portuguesa, conhecido como tabuleiro de xadrez, permitindo constatar que, em muitos trechos da bacia, o sistema de quadras e o arruamento seguem a direção do declive, o que, em ambientes tropicais, potencializa a velocidade dos fluxos pluviais. Com isso, apesar das características dos solos e da topografia possibilitar alto grau de infiltração da água das chuvas, o uso da terra e a atual configuração do espaço urbano, foi o agente definidor dos processos de inundações que se registraram nos últimos anos.

## Materiais e Métodos

### Mapeamento do uso da terra

As bacias hidrográficas urbanas são compostas por uma variedade de feições, ou seja, existem diversas classes de uso da terra, referente às coberturas vegetais e elementos intra-urbanas. A elaboração de material cartográfico permitiu a análise da evolução da expansão urbana das alterações nas condições hidrológicas provenientes, principalmente, da urbanização e da retificação do canal. Por meio do SIG SPRING 4.3.3, foram gerados mapas temáticos de uso da terra a partir da análise de fotografias aéreas pancromáticas obtidas na escala nominal de 1:25.000, para os cenários de 1958 e 1972, e de 1:30.000 (em meio digital) no cenário de 2006. As imagens aerofotogramétricas de 1958 e 1972 foram transpostas para o meio digital e submetidas a procedimentos de processamento.

O processamento de imagens digitais foi dividido em duas etapas: a primeira etapa corresponde ao pré-processamento, onde houve o georreferenciamento e redução das distorções radiométricas e geométricas. Esta etapa está inserida em estudos realizados por Rossetti (2007), onde obteve-se ainda a equalização dos níveis de cinza das imagens. A equalização visou minimizar a variação dos níveis de cinza em função das características da área imageada, o momento do imageamento e o próprio processo de geração das imagens em laboratório especializado. Assim, imagens pancromáticas – monocromáticas sequenciais acabam não apresentando o mesmo intervalo de níveis de cinza. 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*.

A segunda etapa é o processamento propriamente dito, onde foram aplicadas as funções de segmentação e classificação da imagem. 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 aplicada à abordagem de crescimento de regiões 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: a. limiar de similaridade = valor mínimo do qual duas classes são consideradas similares e agrupadas em uma única região; b. limiar de área = é o menor valor da área (em pixels) para que uma região seja separada de outra; c. 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 dos alvos de interesse para o estabelecimento das classes de uso e ocupação da terra e interfere diretamente no produto cartográfico final. Assim, as áreas a serem segmentadas foram diferenciadas em função da variação de coberturas vegetais (área rural) e alvos intra-urbanos. A segmentação das aerofotografias foi realizada a partir do software *SPRING* 4.3.3. Os parâmetros ‘similaridade’ e ‘área (em pixels)’ para as áreas rurais foram, respectivamente de: 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 de similaridade 12 e área 15.

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. Neste procedimento é definido o limiar de aceitação em função da 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. Neste estudo, para a implementação da classificação não-supervisionada optou-se pelo limiar de aceitação de 95%.

Desta forma, para a classificação dos polígonos segmentados 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.

Os elementos cor, tamanho, forma, textura e localização foram utilizados para o reconhecimento dos padrões de elementos de fotointerpretação. Este processo permitiu a identificação de classes de uso da terra e sua representação em mapas de pixels classificados. As classes de uso da terra foram definidas em:

- arbórea;
- campo gramínea;
- solo exposto;
- arruamento com asfalto;
- edificação.

### O Método do Soil Conservation Service (1986) e a estimativa da Curva Número

O Soil Conservation Service - SCS, 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 três mil tipos de solo e coberturas de vegetação e plantações, foi estabelecida uma relação empírica que relaciona a capacidade de armazenamento das precipitações na bacia a um índice denominado Curva Número ou Número de Curva – CN (Canholi, 2005).

A estimativa da CN baseia-se em características do tipo de solo, uso da terra e grau inicial de saturação do solo. Sob as mesmas condições de precipitação, baixos valores de CN indicam que a superfície tem um alto potencial de retenção de água, enquanto valores de CN mais altos indicam potencial de retenção mais baixo (Schafer et al., 2011). O algoritmo para o cálculo da precipitação efetiva é dado por:

$$P_{ef} = \frac{(P - 0,2S)^2}{(P + 0,8S)} \quad \text{para } P > 0,2S \quad (1)$$

senão:

$$P_{ef} = 0$$

Em que:

$P$  = precipitação acumulada;

$S$  = potencial máximo de armazenamento do solo.

Para a obtenção dos valores da curva-número foi empregado o algoritmo dado por:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2)$$

Em que:

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

Conforme a metodologia proposta pelo Soil Conservation Service (SCS, 2004), a vazão de pico do hidrograma unitário triangular é dado por:

$$q = \frac{0,208 \times A}{t_a} \quad (3)$$

Em que:

$q$  = vazão de pico unitária ( $m^3/s.mm$ ), para  $P_{ef} = 1_{mm}$ ;

$A$  = área da bacia ( $Km^2$ );

$t_a$  = tempo de ascensão (horas).

O valor de CN é a variável utilizada para determinação da capacidade máxima de armazenamento do solo ( $S$ ) e pode ser obtido por meio da classificação, de acordo com o tipo de solo (Tabela 1) e seu uso (Tabela 2). Os valores constantes nestas tabelas referem-se às condições médias de umidade, correspondente a capacidade de campo dos solos. Para outras condições devem-se aplicar correções (SCS, 2004.). Para o cálculo da CN, realiza-se a média ponderada dos valores de CN correspondente a classe de interesse e a área (em porcentagem) de cada classe de uso da terra.

Aliado aos valores obtidos da curva-número, foi realizada a caracterização do canal por meio de interpretação das fotografias aéreas e excursões a campo. Foram estimados os valores do comprimento do canal, dimensões do canal quando retilíneo ou fechado, largura e altura do canal e da planície de inundação em condições de canal aberto/natural. A rugosidade de cada seção do

canal e da planície teve como base o coeficiente de rugosidade de Manning adaptadas por Canholi (2005, p.95-97). Os parâmetros apresentados tornam-se importantes para a definição de dados de entrada e para compreensão da dinâmica do escoamento superficial na bacia. Por meio do software livre IPHS1, houve a implementação dos dados de entrada conforme os algoritmos de propagação em

canal Muskingun-Cunge com planície de inundações para seções abertas e Muskingun-Cunge Não Linear para as seções fechadas, e propagação em reservatório por meio do modelo de Pulz. O desenvolvimento da modelagem hidrológica como forma de identificação e análise dos setores de inundações.

**Tabela 1 - Descrição dos grupos hidrológicos de solos proposta pelo SCS (2007).**

Grupo	Descrição
<b>A</b>	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 1,5m;
<b>B</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 1,5m, mas é quase sempre presente camada mais densificada que a camada superficial;
<b>C</b>	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 60cm de profundidade camada mais densificada que no Grupo B, mas ainda longe das condições de impermeabilidade;
<b>D</b>	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 50cm de profundidade ou solos arenosos como B, mas com camada argilosa quase impermeável ou horizonte de seixos rolados.

**Tabela 2 – Valores de CN para diferente uso da terra (SCS, 2004).**

Descrição do tipo de uso da terra e condição hidrológica	Área impermeável (%)	Tipo de solo			
		A	B	C	D
<b>Áreas livres</b>					
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
<b>Áreas impermeáveis</b>					
Estacionamentos pavimentados, telhados, viadutos, etc.		98	98	98	98
<b>Ruas e estradas</b>					
Pavimentadas com guias e drenagem		98	98	98	98
Pavimentos com valas abertas / Paralelepípedos		76	85	89	91
Terra		72	82	87	89
<b>Áreas comerciais</b>	85	89	92	94	95
<b>Distritos industriais</b>	72	81	88	91	93
<b>Áreas residências em função da área impermeável (%)</b>					
Tipo 1 (lotes <500m <sup>2</sup> , em média 65% impermeável)	65	77	85	90	92
Tipo 2 (lotes de 1000m <sup>2</sup> , em média 38% impermeável)	38	61	75	83	87
Tipo 3 (lotes de 1300m <sup>2</sup> , em média 30% impermeável)	25	54	70	80	85
Tipo 4 (lotes de 2000m <sup>2</sup> , em média 25% impermeável)	20	51	68	79	84
Tipo 5 (lotes de 4000m <sup>2</sup> , em média 20% impermeável)	12	45	65	77	82

A partir das séries históricas de 1936 a 2004, Moruzzi e Oliveira (2009) determinaram a equação de chuvas intensas, caracterizada pela relação entre a intensidade, duração e frequência das máximas precipitações (IDF) para Rio Claro, conforme a equação:

$$I = \frac{560,9 \cdot T^{0,141}}{(7,4 + d)^{0,6}} \quad (4)$$

onde,

I = intensidade da chuva (mm/h);

T = período de retorno (anos);

D = duração da chuva (minutos).

Por meio da implementação desta equação no programa computacional IPHS1, foram geradas as curvas IDF de projeto. Os hietogramas de projeto foram obtidos a partir da IDF de Rio Claro para chuvas de 1 hora de duração, a qual representa a mesma ordem de grandeza do tempo de concentração da bacia hidrográfica estudada. Foram definidos em 6 intervalos de 600s, a partir da altura da lâmina desagregada, correspondentes a intervalos de 1/10 da duração total da chuva conforme recomendado por Tucci (1998) e Canholi (2005). 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 valores de TR de 5, 10, 20 e 50 anos, correspondentes a probabilidades anuais de 0,20, 0,10, 0,05 e 0,02, respectivamente.

O Método dos Blocos Alternados foi empregado para distribuição espacial da tormenta de projeto, considerando o posicionamento do pico no centro de massa da tormenta, ou seja, os picos são definidos entre os 30 e 40 minutos do período de chuva.

## Resultados e Discussões

### Mapeamento do uso da terra em diferentes cenários

O processamento das fotografias aéreas resultou na geração de mapas temáticos onde se verificou a classificação de uso da terra em situações de parcial impermeabilização da área (1958), canalização do canal principal em período mediano de urbanização (1972) e atual impermeabilização (2006). O mapeamento temático possibilitou quantificar a área ocupada para cada classe de uso: arbórea, campo gramínea, solo exposto, arruamento de asfalto e edificação. A Figura 3 representa o mapa síntese, a qual colaborou na compreensão da evolução urbana da cidade de Rio Claro, e a Figura 4 apresenta os dados da evolução do uso da terra obtidos o mapeamento nos três cenários sugeridos para a área urbana da bacia hidrográfica do Córrego da Servidão.

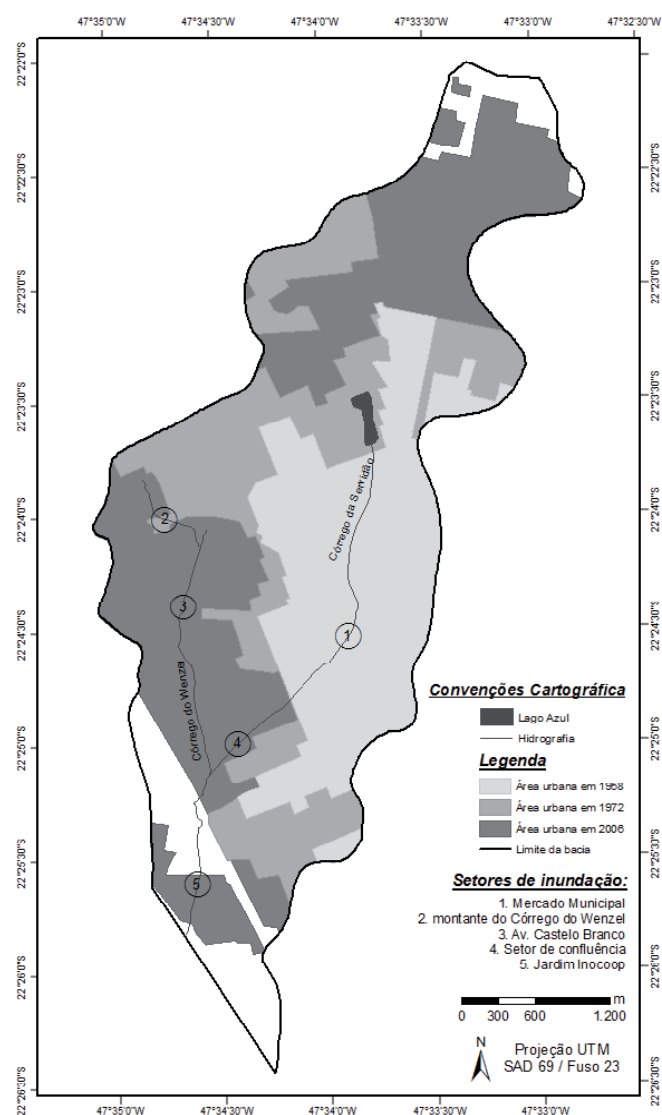


Figura 3 - Mapa síntese da evolução da área urbana de Rio Claro entre os anos de 1958 a 2006.

Pela análise da década de 50, 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. As imagens aerofotogramétricas dos três períodos analisados (1958, 1972 e 2006) permitiram identificar a supressão dos corpos d'água pela expansão das áreas ocupadas para fins residenciais. A análise destes recortes (Figuras 5 a 8), originados de produtos de sensoriamento remoto, mostraram-se bastante relevantes na medida em que se caracterizaram elementos de cobertura vegetal e intra-urbanos sob a perspectiva multitemporal da evolução urbana (Tabela 3).



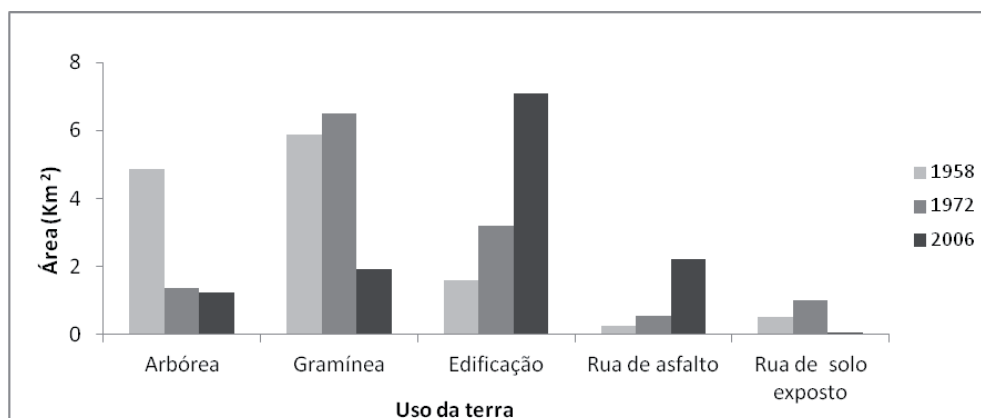


Figura 4 - Evolução do uso da terra entre os três cenários mapeados neste trabalho para a área urbana do Córrego da Servidão.



Figura 5 - Reservatório "Lago Azul" em 1958, 1972 e 2006, respectivamente.



Figura 6 - Nascente do Córrego do Wenzel em 1958, 1972 e 2006, respectivamente.



Figura 7 - Setor de confluência do Córrego da Servidão e do Wenzel em 1958, 1972 e 2006, respectivamente.



Figura 8 - Baixo curso do Córrego da Servidão – Bairro Jardim Inocoop em 1958, 1972 e 2006, respectivamente.

**Tabela 3 - Área ocupada para os diferentes cenários de uso da terra.**

Cenários	Área ocupada (m <sup>2</sup> )
1958	5,8
1972	7,1
2006	12,5

\*Sendo a área total de 13,6km<sup>2</sup>

De 1958 a 1972, verificou-se uma expansão urbana com crescimento de aproximadamente 20% em área, sendo que no período de 1972 a 2006 a expansão em área atingiu um crescimento maior que 75%. Assim, é possível averiguar a intensidade do processo de impermeabilização da superfície da bacia, bem como o ritmo acelerado a partir da década de 1970 pelo acréscimo de áreas destinadas a fins residenciais.

De 1958 a 1972, a cobertura vegetal arbórea teve sua

área retraída em 25%, ocupação esta que cedeu espaço para o aumento das áreas destinadas à edificação, em torno de 12%, ao arruamento de solo exposto e à gramínea, de aproximadamente 4% de área cada, e demais classes de uso da terra, como gramíneas com solo exposto e as vias asfaltadas. Neste período, as áreas impermeabilizadas por residências e ruas de asfalto passaram de 13,5% para 27,5%, ou seja, mais que dobrou. Destaca-se a diminuição da densidade da vegetação, que se torna mais esparsa e rasteira, até a exposição total da superfície. Neste processo houve a perda de proteção da cobertura superficial, diminuição da capacidade de infiltração e aumento do volume e da velocidade dos fluxos superficiais. O setor da nascente do Córrego da Servidão apresentou em 1958 áreas ocupadas por vegetação arbórea na mesma proporção das áreas ocupadas por edificações e asfaltamento em 2006. Desta forma, confirma-se o processo de expansão urbana, a começar pela retirada da cobertura vegetal e o início do

parcelamento do solo até o estabelecimento de residências e da malha viária.

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 urbanização para este período. Segundo a Planta Cadastral da Prefeitura, os bairros situados nestes setores datam a década de 1990 em diante. Porém, a urbanização 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. Em 2006, a urbanização estende-se a todo o setor norte e parte do setor sul. Assim, em 2006, quase 70% da área total da bacia encontra-se impermeabilizada e cerca de 8% apresenta pouca ou nenhuma proteção por cobertura vegetal, indicando fortes indicadores de prejuízos ao sistema de drenagem, à alimentação do lençol freático e à degradação da qualidade dos recursos hídricos. A área ocupada por arbóreas e gramíneas tornam-se ainda menos significativas se analisadas sob o ponto de vista da distribuição espacial destas feições.

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. O planejamento da cidade de Rio Claro não apresentou preocupações no que tange a implantação de loteamentos com parcelas de áreas destinadas à manutenção da infiltração da água. Apesar da presença de cobertura vegetal arbórea no cenário atual, suas áreas são pouco expressivas, principalmente por estarem inseridos em praças e jardins no perímetro urbano. As praças e jardins enquadram-se 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. Porém, no que se refere às taxas de infiltração, estes locais continuam com superfícies impermeabilizadas pelo chão comumente recoberto por calçadas e cimento, e não contribuem significativamente na mitigação das cheias.

### **Modelagem hidrológica e histórico de inundações**

Considerando-se a bacia hidrográfica um sistema físico, onde a entrada é o volume de água precipitado e a saída é o volume de água escoado pelo exutório, a modelagem hidrológica permitiu a transformação de chuva em vazão (representada por  $Q$ ), ou seja, o volume de água precipitado, representado por hietogramas, e em saída de água (escoamento) distribuída no tempo, representado por hidrogramas (Figura 9). Para isso, foi utilizado o software livre IPHS1.

Os hidrogramas apresentam o comportamento da drenagem da bacia hidrográfica do Córrego da Servidão. A partir da estimativa da CN, foram calculadas as perdas das precipitações em função da capacidade de infiltração da área, e a precipitação denominada efetiva ou excedente, gerou o escoamento de fluxo em superfície. Aliado a tais fatores, as características físicas das seções, como comprimento, largura e rugosidade, foram aplicadas para a geração dos resultados. Os hietogramas gerados permitiram identificar a relação entre o intervalo de tempo para os picos da chuva e os intervalos para os picos da onda de cheia, verificada nos hidrogramas. Enquanto que para os cenários de 1958 e 1972 a onda de cheia teve duração de 120 minutos (para TR de 5 e 10 anos) e 130 minutos (para TR de 20 e 50 anos), em 2006 a translação do percurso d'água foi de 130 minutos (para TR de 5 e 10 anos) e de 140 minutos (para TR de 20 e 50 anos).

Em 1958, houve variações de vazão pouco significativa nos diferentes TR de 5 e 10 anos, com vazão de aproximadamente de  $25\text{m}^3/\text{s}$ , sendo está mesma vazão obtida para todos os TR no cenário de 1972. Já para TR de 20 e 50 anos no cenário de 1958, a vazão do Córrego da Servidão aumentou para 38 e  $43\text{m}^3/\text{s}$ , respectivamente. Assim, constata-se que a vazão em 1972 é menor que a registrada em 1958, para TR maiores que 20 anos. Isso se deve a presença do reservatório de retenção "Lago Azul", que possibilita o efeito de atenuação da onda de cheia, a partir da diminuição dos picos de cheia e maiores volumes de água distribuídos nos intervalos de tempo. A intensa atividade urbana, abordada no cenário de 2006, pode ser verificada pelo aumento significativo das vazões máximas, onde foram obtidos valores entre 50 e  $55\text{m}^3/\text{s}$  para os TR de 5 a 50 anos. Apesar da atenuação da onda de cheia devido ao efeito do reservatório, verificou-se situação de extravasamento, uma vez que algumas seções do Córrego do Wenzel e Córrego da Servidão percorrem condutos fechados, o que torna a vazão restrita e causa diversos pontos de alagamento.

As características de uso da terra e da modelagem proposta no cenário de 1958 não configuraram situação de inundação para nenhuma dos eventos chuvosos propostos, fato histórico que realmente não foi registrado. 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 1958, a nascente do Córrego da Servidão apresentava cobertura vegetal de várzea e condições naturais da calha do canal. Este setor ainda não havia sido impermeabilizado ou mesmo ocupado por quaisquer elementos intra-urbanos como arruamento e início de loteamentos. Além disso, na área de nascente do Córrego do Wenzel são identificadas coberturas vegetais arbórea e campo gramínea, e a presença de elementos intra-urbanos é evidenciada apenas pela presença de poucas casas.



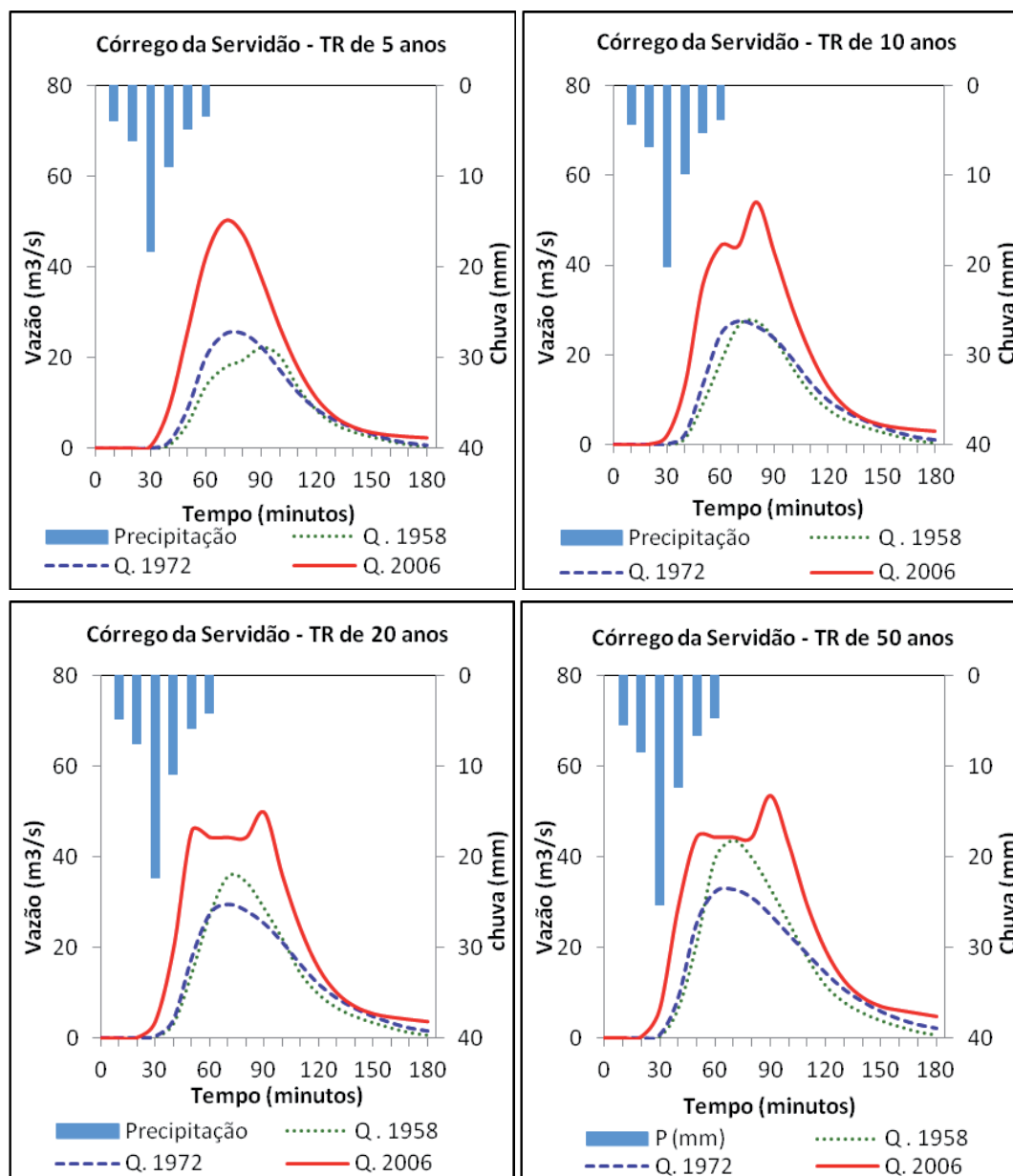


Figura 9 – Hietogramas e hidrogramas da bacia do Córrego da Servidão para TR de 5, 10, 20 e 50 anos.

A partir de 1972 é possível verificar a definição do próprio Córrego da Servidão como via de acesso principal da cidade, hoje designada Avenida Visconde de Rio Claro. Houve implantação do reservatório “Lago Azul”, inserido na nascente, e as seções a montante do córrego tornaram-se canalizadas. Estes fatos fazem a vazão modelada ser constante para todos os TR, indicando a possibilidade de inundações em uma ou mais regiões da bacia do Córrego da Servidão. Registros históricos já relatavam inundações em 1972 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 (ver ponto 1 na Figura 3) configurava 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 espriamento da água, e as rugosidades mais altas que as seções anteceden-

tes 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 (ver pontos 2 e 3 na Figura 3, respectivamente) também foram registradas situações de inundação decorrente do estrangulamento do canal por condutos fechados.

De acordo com os resultados de vazão obtidos para o cenário de 2006, observa-se um aumento ainda maior na vazão do Córrego da Servidão. O cenário de 2006 caracterizou-se pelo incremento de canalizações em setores a jusante dos córregos, implementando maiores extensões aos condutos fechados que os 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. O cenário atual confirmou a tendência apresentada pelas obras de engenharia tradicionais, onde se aumenta a velocidade de escoamento e as inundações são transferidas 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 (Figura 10) e no Bairro Jardim Inocoop (Figura 11) (ver localização dos pontos 4 e 5 na Figura 3, respectivamente).



*Figura 10 - Ruas inundadas no setor de confluência do Córrego do Wenzel com o Córrego da Servidão, próximo a Rodoviária e a Rod. Washington Luis. Fonte: Isabel C. Moraes (09/06/11).*



*Figura 11 - Córrego da Servidão no setor canalizado no Bairro Jardim Inocoop, com atenuação das cheias pelas obras de duplicação de galerias pluviais, as quais encontram-se em andamento. Fonte: Isabel C. Moraes (09/06/11).*



## Considerações Finais

O método do SCS utilizado para a análise da dinâmica de escoamento pluvial, acoplado as ferramentas de geoprocessamento, proporcionou à integração de variáveis essenciais nos estudos de bacias hidrográficas urbanizadas, no caso a área urbana da bacia do Córrego da Servidão, localizada no município de Rio Claro. O mapeamento do uso da terra mostrou-se como uma metodologia adequada no processo de aquisição de informações referentes à cobertura de superfície. 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 hidráulico e hidrológico de bacias hidrográficas. Além disso, o software SPRING mostrou-se adequado tanto para o pré-processamento quanto para o processo de classificação das imagens. As simulações 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-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 potencial nos estudos em planejamento urbano. Assim, este trabalho é um dos exemplos dentre as diversas possibilidades das metodologias empregadas.

Os resultados indicaram que o aumento da impermeabilização devido a expansão da área urbana do município de Rio Claro foi o principal responsável pelos primeiros eventos de inundação. Assim, apesar da classificação hidrológica dos solos e da baixa probabilidade natural de concentração de escoamento, refletida pelo baixo índice de circularidade, a topografia plana quando submetida a impermeabilização dificulta o escoamento das águas, criando situações de inundação. Dessa forma, a pesquisa realizada permitiu avaliar quantitativamente de que forma a evolução das áreas impermeabilizadas interfere nas inundações, apresentando resultados que podem dar suporte ao planejamento urbano por meio da simulação de cenários de ocupação e seus efeitos no hidrograma de inundação.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à CNPq pelo suporte financeiro deste trabalho (Processo nº 475291/2009-3) e a CAPES pela cessão da bolsa de Mestrado a Isabel Cristina de Moraes.

## Referências Bibliográficas

- CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005, 302 p.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Ed. Blucher, 1980. 188 p.
- CONCEIÇÃO, F. T., BONOTTO, D. M. Weathering rates and anthropogenic influences in a sedimentary basin, São Paulo State, Brazil. **Applied Geochemistry**, 19(4):575-591, 2004.
- 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.
- EM-DAT/CRED - Emergency Events Database. **Center for Research on the Epidemiology of Disasters**. 2011. Disponível em: < <http://www.emdat.be/>>. Acesso em: 02 jan. 2012.
- IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo, 1981.
- MORUZZI, R.B.; OLIVEIRA, S.C. de. Relação entre intensidade, duração e frequência de chuvas em Rio Claro, SP: métodos e aplicação. **Revista Teoria e Prática na Engenharia Civil**, v. 9, n. 13. 2009.
- 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.
- 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.
- 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.
- SCHAFER, 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. XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. **Anais...** - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE 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.
- 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.
- TROPMAIR, H. **Rio Claro: ontem e hoje**. Secretaria Municipal de Educação (2008). p.105.
- 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. (org.) **Hidrologia: Ciência e aplicação**; 4ª ed. Porto Alegre: ed. UFRGS/ ABRH, 2009. p.943.