

PREVISÃO DA VAZÃO EM MACROBACIAS URBANAS: ARROIO DILÚVIO EM PORTO ALEGRE

Néstor A. Campana

Depto Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia, UNB
Campus Universitário - Asa Norte, CEP 70910-900 Brasília, DF
mnestor@unb.br

Carlos E. M. Tucci

Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS
Caixa Postal 15029 - CEP 91501-970 Porto Alegre, RS
tucci@if.ufrgs.br

RESUMO

A urbanização aumenta o pico do hidrograma e o volume do escoamento superficial, além de reduzir o tempo de concentração. Para controlar o impacto deste processo através de um planejamento urbano mais adequado é necessário prever estas alterações no hidrograma.

A estimativa do escoamento na macrodrenagem é realizada sem os detalhes da densificação urbana, já que o Plano Diretor Urbano geralmente especifica apenas a densidade e o tipo de ocupação.

Neste estudo é apresentada a relação entre parâmetros de modelos hidrológicos e de planejamento urbano. O modelo hidrológico-hidrodinâmico, IPH4, associado a um Sistema Geográfico de Informações foi utilizado para prever o impacto da urbanização numa macrobacia urbana.

O modelo foi aplicado a bacia do Arroio Dilúvio, onde foi ajustado e verificado com dados observados. Com o modelo foram realizados prognósticos de hidrogramas com diferentes tempos de retorno para a situação do Plano Diretor Urbano. Os resultados mostraram que para a enchente de 25 anos ocorrem alguns alagamentos, principalmente devido a obstrução de ponte

INTRODUÇÃO

A expansão urbana no Brasil ocorre geralmente dentro de cenários espontâneos devido ao relevo, ações políticas ou implementação de projetos específicos. O acompanhamento deste processo envolve o uso de modelo de Planejamento Urbano que permite estimar diferentes cenários potenciais.

Este processo é acompanhado por ações municipais que usualmente não incluem preven-

ções contra o impacto sobre a drenagem. Como o país encontra-se num estágio em que não existe regulação no controle da ampliação das vazões de cheia devido à urbanização, a tendência é dos prejuízos aumentarem em taxas exponenciais.

A diferença entre controlar este impacto antes do desenvolvimento da bacia e após a sua urbanização é tão grande que a maioria dos municípios não têm condições econômicas para controlar neste último estágio. O controle preventivo é realizado prognosticando os impactos potenciais e simulando as medidas de controle possíveis para incorporar no Planejamento Urbano, minimizando os custos e prejuízos futuros.

Os impactos principais devido à urbanização sobre o sistema de drenagem são o aumento do pico de vazão de cheia, a antecipação no tempo desta vazão máxima e o aumento do escoamento superficial.

Para estabelecer este prognóstico são utilizados modelos hidrológicos *precipitação-vazão*. Na literatura existem vários exemplos deste tipo de modelo aplicado a bacias urbanas (SCS, 1975; Crawford e Linsley, 1966). Os dados básicos necessários para o prognóstico são:

- a. a precipitação de projeto, usualmente adotada com estatísticas estacionárias;
- b. as características físicas da bacia, como área, comprimento, tipo de solo, cobertura natural, entre outros;
- c. condições da urbanização: sistema de canalização e áreas impermeáveis. Este último conjunto permite definir os cenários de urbanização.

Quando uma bacia hidrográfica encontra-se no seu estado natural e o processo de urbanização inicia-se, é o momento de estabelecer os controles adequados do escoamento no contexto do planejamento territorial.

Os impactos e os controles são quantificados através do modelo hidrológico. Os cenários analisados de planejamento urbano são identificados pela densidade habitacional e o tipo de ocupação prevista para cada área econômica da cidade. O modelo hidrológico utiliza a área impermeável e as características da drenagem para simulação da drenagem. No item seguinte é analisada a ligação entre estes elementos.

RELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS HIDROLÓGICOS E DE URBANIZAÇÃO

Os parâmetros fundamentais, que no modelo hidrológico, retratam as alterações devido a urbanização são: (a) parcela da bacia impermeável, entendido aqui como toda superfície na qual a precipitação escoar diretamente para condutos e canais, gerando escoamento superficial; (b) tempo de concentração da bacia ou velocidade média de escoamento da mesma, que é diretamente influenciado pela introdução de condutos e canais na rede de drenagem.

Áreas impermeáveis

O modelo SCS (1975) utiliza o parâmetro CN de separação do escoamento superficial e da infiltração a condição da superfície urbana. O parâmetro é tabelado segundo o tipo de solo e as características da ocupação, como tamanho de lote, área comercial, industrial, entre outros. Esta tabela foi gerada com base em condicionamentos urbanos americanos.

Tucci et al. (1989) apresentaram uma equação relacionando faixas de densidade habitacional, que é o parâmetro de planejamento urbano e a percentagem de áreas impermeáveis da bacia. Esta relação foi obtida com base em dados de onze bacias na região metropolitana de São Paulo. O valor da taxa de áreas impermeáveis foi obtido de forma indireta através do ajuste do modelo IPH II aos dados observados. Numa seqüência de artigos (Motta e Tucci, 1984 e Campana e Tucci, 1994) obtiveram a relação entre densidade habitacional através de dados medidos inicialmente em ortofotos e depois com o uso de Sensoriamento Remoto com base na ocupação de São Paulo, Porto Alegre e Curitiba. Esta relação é apresentada na Tabela 1. As limitações desta relação são as seguintes: (a) aplicável a bacias com área superior a 2 km²; (b) não distingue o tipo de ocupação urba-

na, portanto admite uma ocupação média de áreas residenciais e comerciais com predominância das primeiras; (c) não deve ser aplicado quando existe relevo acidentado, onde a distribuição pode variar muito.

Tabela 1. Áreas impermeáveis (Campana e Tucci, 1994).

Densidade habitacional (hab/ha)	Fração de área impermeável (%)
25	11,3
40	26,7
60	36,7
80	46,6
100	49,0
120	53,4
140	57,2
160	60,4
180	63,2
200	65,8

Tempo de concentração

O tempo de concentração (ou o tempo de pico) nas condições urbanas é tratado geralmente de forma empírica pelo ajuste de uma equação a dados de bacias urbanas (Diaz, 1987; Porto et al, 1993). Estas equações apresentam grande utilidade, mas nem sempre retratam adequadamente as condições locais específicas, já que foram estimadas por ajuste de uma amostra, muitas vezes reduzida.

Para estimar o tempo de concentração de uma bacia, esta pode ser idealizada como sendo formada por planos e canais de escoamento, predominando o escoamento em planos. Assim, as duas componentes do escoamento são avaliadas separadamente e o tempo de concentração será a soma do tempo de viagem no canal. Embora os componentes do escoamento, isto é, escoamento no plano e o escoamento do canal sejam calculados separadamente, eles constituem um sistema seqüencial.

O modelo de onda cinemática usualmente representa bem o escoamento superficial em bacias devido a predominância do termo de declividade sobre os de pressão e inércia (Tucci, 1998) e permite relacionar a velocidade do escoamento com as características físicas do caminho seguido pela água na bacia (percurso, declividade e rugosidade), além das características da precipitação (intensidade e duração).

Tempo de concentração no plano -

Tucci (1998) demonstra que o tempo de concentração para um plano pode ser obtido pelo modelo de onda cinemática, considerando que: (a) a precipitação tem intensidade constante p e duração t_r , menor ou igual ao tempo de concentração da bacia t_c ; (b) no início, $t = 0$; não existe lâmina de água na superfície; (c) a largura do escoamento é semi-infinita; (d) a equação de Manning retrata a declividade de atrito S_f . Esta equação é a seguinte:

$$t_{cb} = t_r + \frac{L}{a} \frac{(pt_r)^b}{(pt_r)^b} \quad (1)$$

onde L é o comprimento do plano (m); p é a precipitação (m/s); t_{cb} é o tempo de concentração (s); t_r é o tempo de duração da precipitação (s); $a = S^{1/2}/n$; S é a declividade do plano (m/m); n é a rugosidade de Manning ($s^{1/3}/m$); $b = 0,6$.

Esta equação pode ser transformada para unidades mais adequadas.

Tempo de escoamento no canal - O tempo de deslocamento pode ser estimado diretamente das equações de Manning onde:

$$T_{cc} = \frac{L_c}{v} \quad (2)$$

onde t_{cc} é o tempo de deslocamento no conduto ou canal ou mesmo na bacia natural (s); L_c é comprimento do trecho (m) e v a velocidade (m/s), obtida pela equação de Manning.

O tempo de concentração da bacia é a soma do tempo de concentração do plano da bacia mais o tempo de concentração por condutos ou canais.

$$t_c = t_{cb} + t_{cc} \quad (3)$$

Estimativa do percurso do escoamento

- Existe uma grande heterogeneidade nas características de uma bacia, muito mais numa bacia urbana. Para retratar este processo é necessário introduzir as variabilidades espaciais dentro de cenários próximos da realidade.

Para representar o caminho do escoamento foi utilizado o algoritmo proposto por Jensen e Domingue (1988) de modelo digital de terreno (DTM). A bacia é representada por uma malha de células quadradas. Neste estudo, a malha utilizada

foi de 30 x 30 m. Para determinar as linhas ou canais de drenagem o algoritmo necessita a definição, a posição de saída da rede de drenagem e a localização de uma célula de partida. Para cada célula exceto a da saída, é determinada a declividade com relação aos oito vizinhos mais próximos dentro de uma janela de 3 x 3 células. A célula central da janela é movida para o vizinho que apresentar maior declividade, o qual é marcado, e o acúmulo de água, expresso como uma função do número de células atravessadas é atribuído a célula. O processo é repetido até que todas as células que compõem a bacia tenham sido marcadas. As linhas de drenagem podem ser codificadas de acordo com o "volume" de água que passe por elas.

Após a determinação do traçado do canal principal do escoamento, é possível calcular a distância percorrida pelo escoamento na superfície da bacia e a distância transitada no canal e na rede pluvial. A hipótese básica implícita nesta abordagem é de que o fluxo ocorre segundo a maior declividade.

Estes condicionantes são válidos para bacias rurais. Para bacias urbanas, devido ao traçado das ruas, a água não segue necessariamente o caminho da máxima declividade. O escoamento ocorre pelas ruas, até encontrar uma boca de lobo e deste pelos coletores pluviais.

Admitiu-se nas estimativas desta metodologia que:

- os coletores pluviais sejam paralelos as ruas;
- o escoamento nos condutos pluviais ocorre à superfície livre. Dentro de uma análise de macrobacia urbana estas simplificações são aceitáveis.

Com base em várias sub-bacias do Arroio Dilúvio e com as hipóteses mencionadas obteve-se uma relação entre o percurso do escoamento da bacia rural e urbana como sendo:

$$d_{urb} = 1,071 d_{rur} + 5,21 \quad (4)$$

onde d_{urb} é a distância na bacia urbanizada (m); d_{rur} é a distância na mesma bacia nas condições rurais (m). Esta relação foi obtida com excelente correlação, como pode ser observado na Figura 1.

Esta relação foi obtida com base em urbanização com quadras padrões (quadradas). Para cidades onde estes padrões variam muito, como por exemplo na forma de anéis concêntricos ou quadras totalmente irregulares estes resultados podem variar.

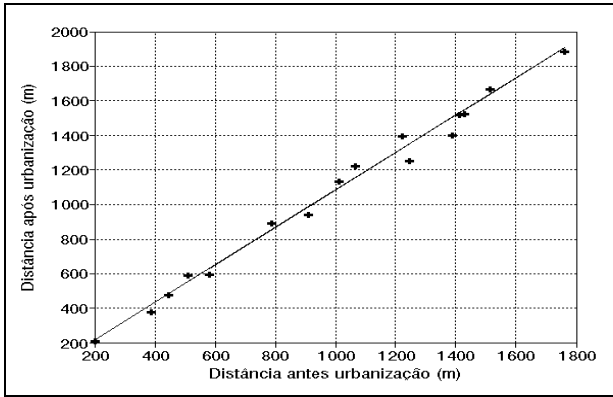


Figura 1. Relação percurso antes e após a urbanização.

Rugosidade - A rugosidade da superfície e do canal foram estabelecidas de acordo com a classificação realizada através de um modelo de mistura de imagens Landsat (Campana et al., 1992). Na Tabela 2 são apresentados os valores de rugosidade utilizados e os tipos de sistema identificados.

Resultados da estimativa - Para caracterizar a utilização desta metodologia de estimativa foram selecionadas três sub-bacias (1, 5 e 21) do

Arroio Dilúvio (Figura 2). Nesta análise foram utilizados três cenários: (a) condições de bacia rural; (b) situação atual; (c) com o Plano Diretor Urbano de Porto Alegre implementado (PMPA, 1979). A bacia 1 encontra-se num estágio intermediário entre o rural e o do Plano (Figura 3); a bacia 5 está na condição próxima de uma bacia rural (Figura 4); a bacia 21 encontra-se já no estágio próximo da saturação prevista no Plano (Figura 5).

Destes resultados pode-se observar que o tempo e concentração para intensidade acima de 20 mm/h tende de forma assintótica para um valor de tempo de concentração.

Tabela 2. Rugosidade.

Superfície/conduto	Rugosidade de Manning
Gramados	0,20
Áreas arborizadas	0,40
Áreas urbanizadas (solo e impermeabilizada)	0,1
Canal revestido	0,016
Canal natural	0,030
Condutos	0,020

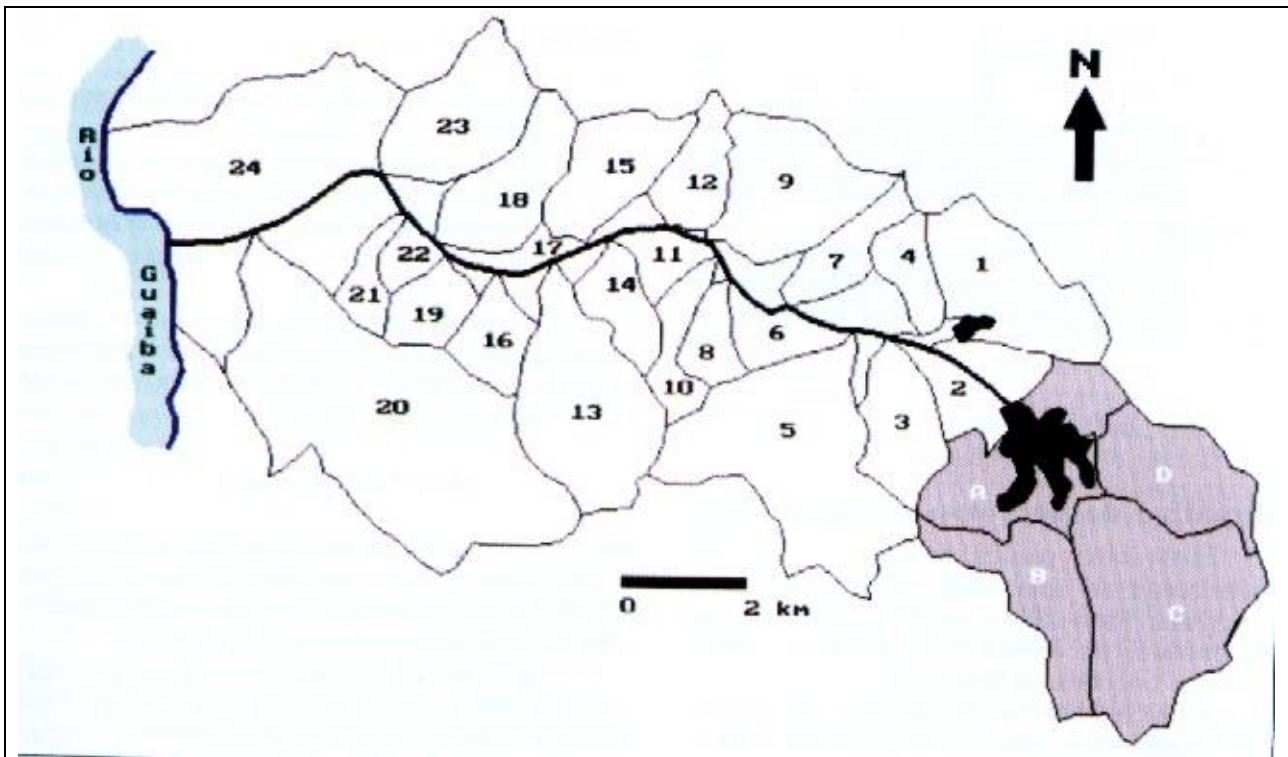


Figura 2. Principais sub-bacias da bacia do Arroio Dilúvio.

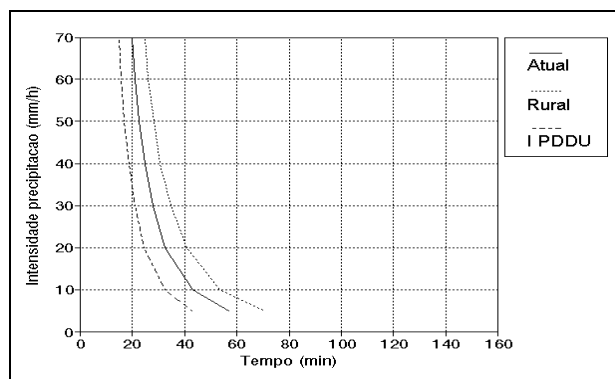


Figura 3. Alteração do tempo de concentração para a sub-bacia 1.

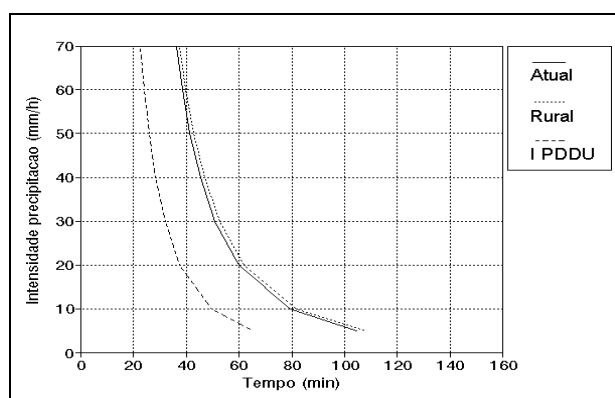


Figura 4. Alteração do tempo de concentração para a sub-bacia 5.

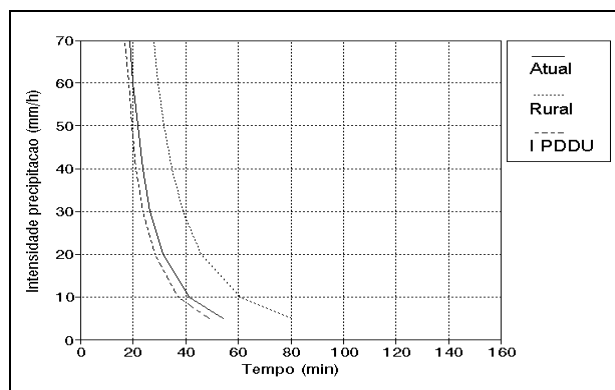


Figura 5. Alteração do tempo de concentração para a sub-bacia 21.

Histograma tempo-área

Conhecido o tempo de concentração, o histograma tempo-área é definido para um número de intervalos de tempo (Δt) de 1 a n , onde $n = tc/\Delta t$.

A primeira faixa de contribuição corresponde à área A_1 em que o tempo de contribuição à seção principal ocorre no intervalo $0 < t \leq \Delta t$. Para a faixa seguinte, a área A_2 contribui no intervalo $\Delta t < t \leq 2\Delta t$ e assim sucessivamente.

O histograma tempo-área é obtido por:

$$h_i = \frac{A_i}{A_T} \quad (5)$$

onde A_T é área total da bacia envolvida.

ESTIMATIVA DO HIDROGRAMA DE UMA BACIA URBANA

A estrutura da metodologia utilizada neste estudo é apresentada na Figura 6. Nesta estrutura existem três níveis principais: (a) fontes de informações e técnicas de apoio; (b) base de dados em SIG (Sistema de Informações Geográficas) e Sen; (c) modelo matemático hidrológico-hidrodinâmico.

Sistema de Informações Geográficas

O sistema, denominado de PROIMA, possui dois módulos: (a) rotinas de geoprocessamento; (b) rotinas de tratamento das imagens digitais.

No primeiro sistema são tratados os mapas de informação: topográficos, para preparação do modelo digital de terreno, tipo de solo e cobertura da bacia. Estes elementos são utilizados no modelo para determinação do tempo de concentração, histograma tempo-área, parâmetros de infiltração e áreas impermeáveis.

O sistema de tratamento de imagens digitais de satélite é utilizado para visualização e classificação das imagens através de diferentes algoritmos. Esta classificação é utilizada para determinação das áreas impermeáveis e características do solo.

Modelo hidrológico-hidrodinâmico

O modelo hidrológico-hidrodinâmico utilizado é denominado de IPH IV (Tucci et al. 1989) que possui dois componentes principais: (a) módulo hidrológico, que simula o processo chuva-vazão pela versão IPH II (Tucci et al. 1981); (b) o módulo hidrodinâmico que resolve as equações de Saint Venant com um esquema de diferenças finitas implícito.

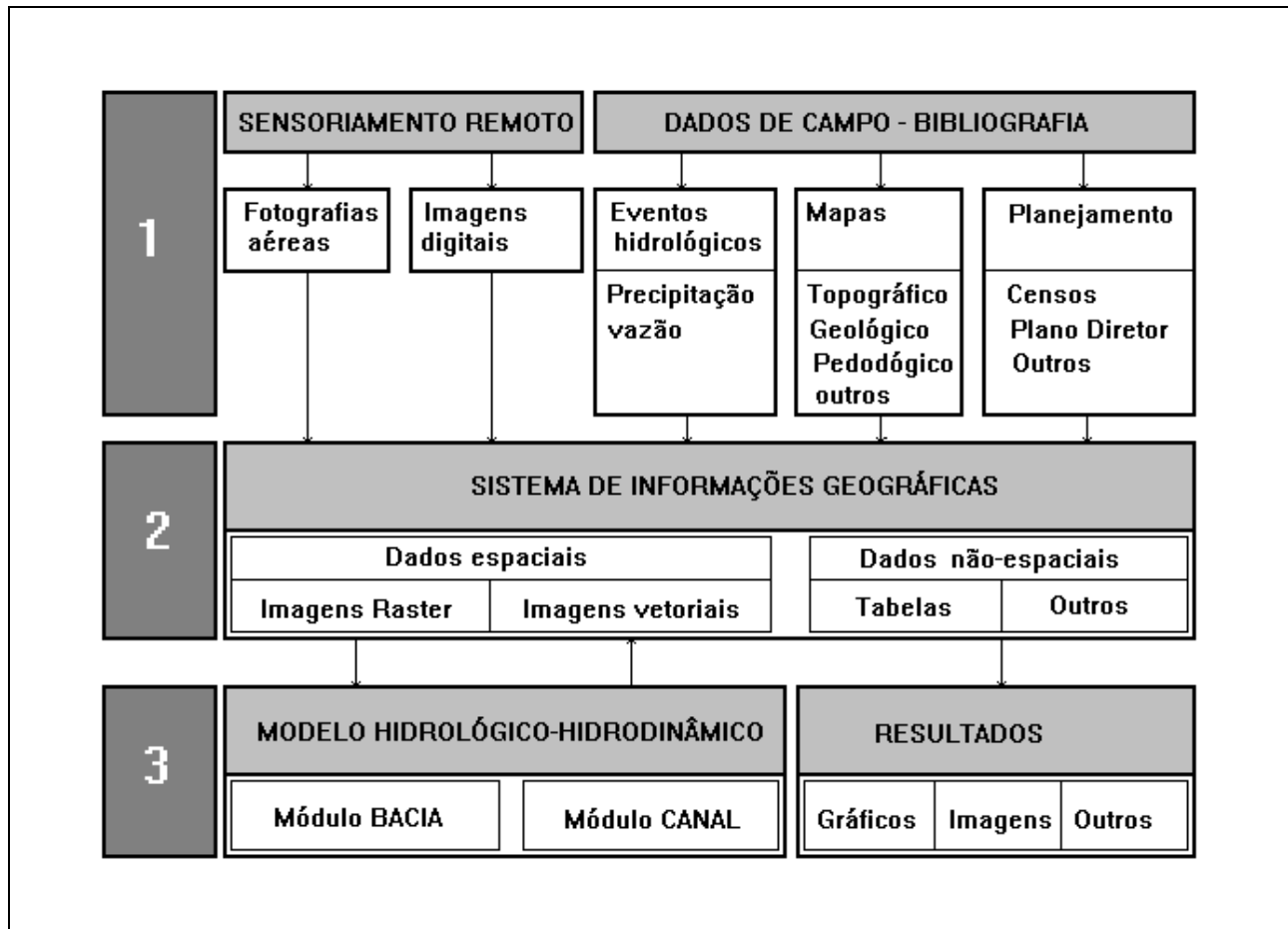


Figura 6. Estrutura básica da metodologia utilizada.

Módulo hidrológico - este módulo possui quatro algoritmos:

1. perdas por evapotranspiração e interceptação, para perdas iniciais da precipitação;
2. separação de escoamento: a precipitação sobre as áreas impermeáveis gera volume superficial; para a precipitação que ocorre sobre áreas permeáveis, a separação dos volumes é realizada pelo algoritmo de Horton modificado (Tucci 1979);
3. propagação superficial: é simulada pelo modelo Clark;
4. propagação subterrânea: é representada pelo modelo de reservatório linear simples. No primeiro algoritmo apenas a interceptação é importante e no último a vazão usualmente é desprezível na simulação de enchentes urbanas.

Os parâmetros principais deste modelo para áreas urbanas já foram suficientemente descritos na literatura (Tucci, 1979 e Tucci et al.,

1989) e são: R_{max} que representa a capacidade do reservatório de perdas iniciais; IMPV, a parcela de área impermeável da bacia, que também pode ser utilizada por área de influência de cada isócrona (Tucci e Campana, 1993); l_0 , l_b e h da equação de Horton; t_c é o tempo de concentração; histograma tempo área e; k_s parâmetro de amortecimento do escoamento superficial.

Módulo hidrodinâmico - As equações de continuidade e quantidade de movimento do escoamento gradualmente variado em rios (equações de Saint Venant) são utilizadas para representar a parte do escoamento da macrodrenagem. Estas equações são resolvidas por um esquema de diferenças finitas implícito (Tucci, 1978). Os dados de entrada deste modelo são:

1. as condições de contorno, níveis ou vazões no tempo no limite de jusante e de montante. Neste modelo a condição de montante pode ser fornecida pelo usuário ou gerada pelo modelo através do módulo

hidrológico. A condição de jusante pode ser também fornecida pelo usuário ou utilizada a curva-chave quando não existem efeitos de jusante;

2. contribuição lateral, que pode ser fornecida pelo usuário ou calculada pelo modelo através do módulo hidrológico;
3. características hidráulicas dos trechos simulados: área, largura, raio hidráulico, cotas.

O parâmetro de ajuste do modelo é a rugosidade da seção ou uma função da rugosidade com a cota em cada seção.

BACIA DO ARROIO DILÚVIO

A bacia do Arroio Dilúvio está localizada na região Metropolitana de Porto Alegre/RS (cerca de 2 milhões de habitantes) e tem área de drenagem de 76 km². O relevo é caracterizado por conjuntos de morros de altura de 300 m. O rio principal é o Dilúvio com extensão de 12 km. As sub-bacias do Dilúvio e seu curso principal são apresentados na Figura 2.

O desenvolvimento urbano da bacia vem ocorrendo no sentido de jusante para montante. No seu trecho inferior, próximo ao Guaíba, é uma área totalmente urbanizada. Na Figura 7 pode-se observar a distribuição da urbanização (em preto áreas imper-

meáveis, em branco áreas naturais e em cinza a graduação).

O PDDU da cidade de Porto Alegre (PMPA, 1979) tenta disciplinar o crescimento da cidade de forma ordenada, atendendo principalmente aspectos viários e de infra-estrutura, além de alguns critérios de embelezamento paisagístico, mas não considera o impacto sobre a drenagem.

O PDDU estabelece a taxa máxima de ocupação (percentagem máxima da área do lote que pode ser construído) e a obrigatoriedade de recuos para ajardinamento (frontal, laterais e de fundo). Isto é previsto com o objetivo de favorecer uma melhor insolação, além de atender a necessidades primárias dos moradores. Estas áreas livres contribuiriam para aumentar a infiltração, diminuindo o impacto do crescimento urbano sobre o escoamento. No entanto, estas áreas muitas vezes são impermeabilizadas.

Caracterização do sistema

Solos - Na Figura 8 é apresentado o mapa de solos da bacia (Campana e Mediondo, 1994), de acordo com a classificação do SCS (SCS, 1975) obtido de: (a) interpretação de mapas geológicos contendo informações sobre rochas minerais e estruturas; (b) análise de imagens digitais de sensoriamento remoto; (c) visita de campo.

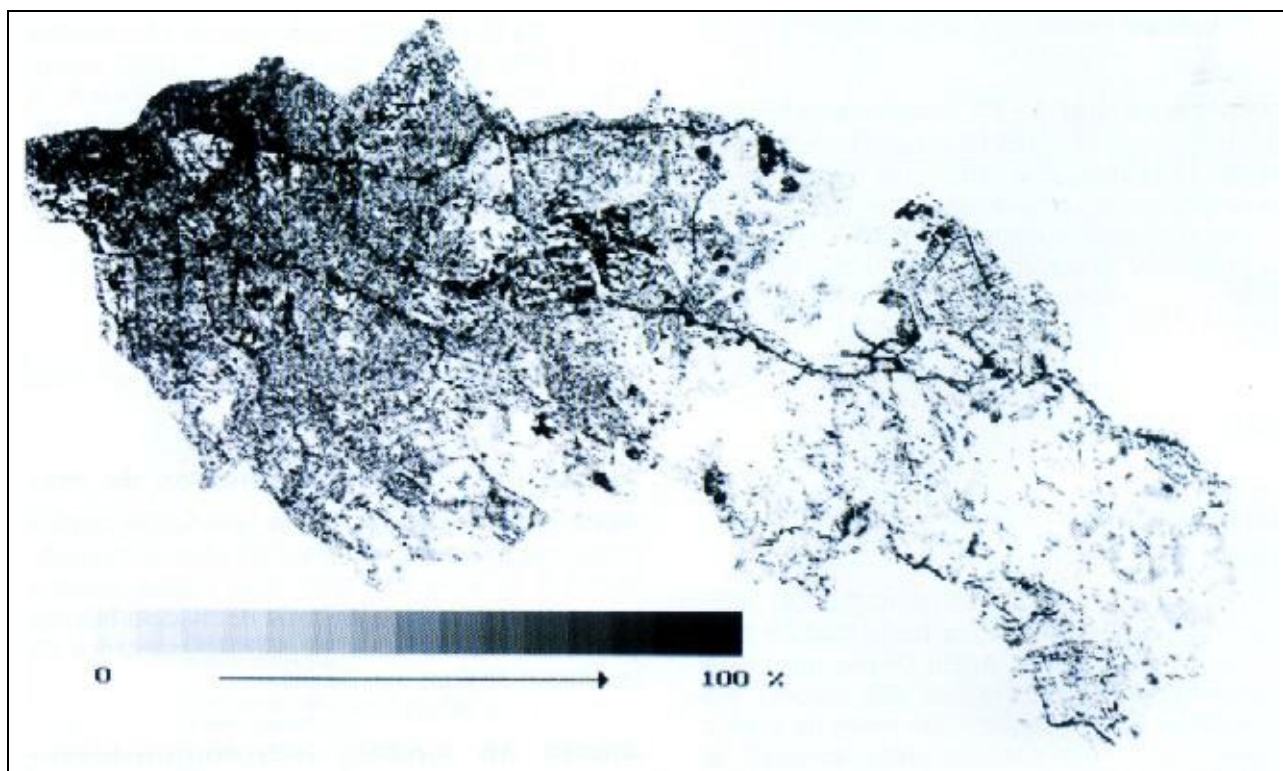


Figura 7. Taxa de ocupação (áreas impermeáveis) observada em 1990.

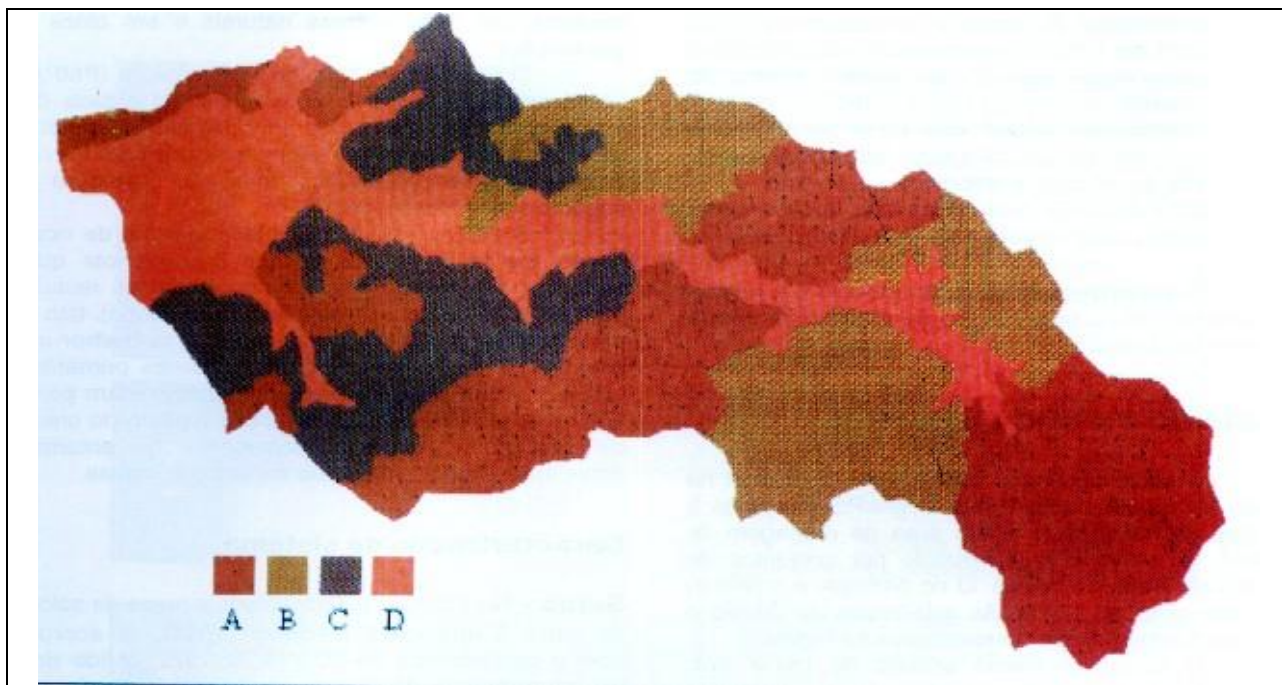


Figura 8. Mapa de solos da bacia do Arroio Dilúvio (Campana e Mendiondo, 1994).

Topografia - Na Figura 9 é apresentada a topografia da bacia a partir da digitalização de cartas topográficas em escala 1: 40.000.

Ocupação urbana - De acordo com o I PDDU foram mapeadas as taxas de ocupação. Este fator deve ser entendido aqui como área impermeável. Este fator foi obtido considerando que 25% da área é ocupada com sistema viário e 75% por lotes. Esta proporção foi considerada em função de estudos de rendimentos em loteamentos de São Paulo (Mascaró, 1994).

SIMULAÇÃO

Discretização da bacia

Na Figura 10 são apresentadas as sub-bacias (total de 24), no qual a bacia total foi subdividida, e as seções do Arroio Dilúvio no qual a macrodrenagem foi discretizada (25 seções). Na discretização foram consideradas todas as pontes existentes com seus condicionantes (posição de pilares e longarinas, indicados na Figura 11).

Dados hidrológicos

Na bacia existiu uma rede de pluviômetros (14) e linígrafos (11) que operou durante quatro anos. Atualmente existem apenas um linígrafo e um pluviômetro em funcionamento. Os dados disponíveis foram utilizados para ajustar o modelo. Os postos existentes no eixo do Dilúvio estão indicados na Figura 10 (PUC, CPRM e FOZ).

Ajuste dos parâmetros

O ajuste do modelo foi realizado em duas etapas:

Ajuste inicial dos parâmetros do modelo hidrológico - Nesta fase foram identificados três eventos em sub-bacias com dados (sub-bacias 5, 9, 13 e 23). Com base nestes eventos foram ajustados os parâmetros do modelo hidrológico. Nas Figuras 12 e 13 são apresentados os resultados de duas sub-bacias.

Ajuste do modelo hidrológico-hidrodinâmico - O ajuste foi realizado com base em

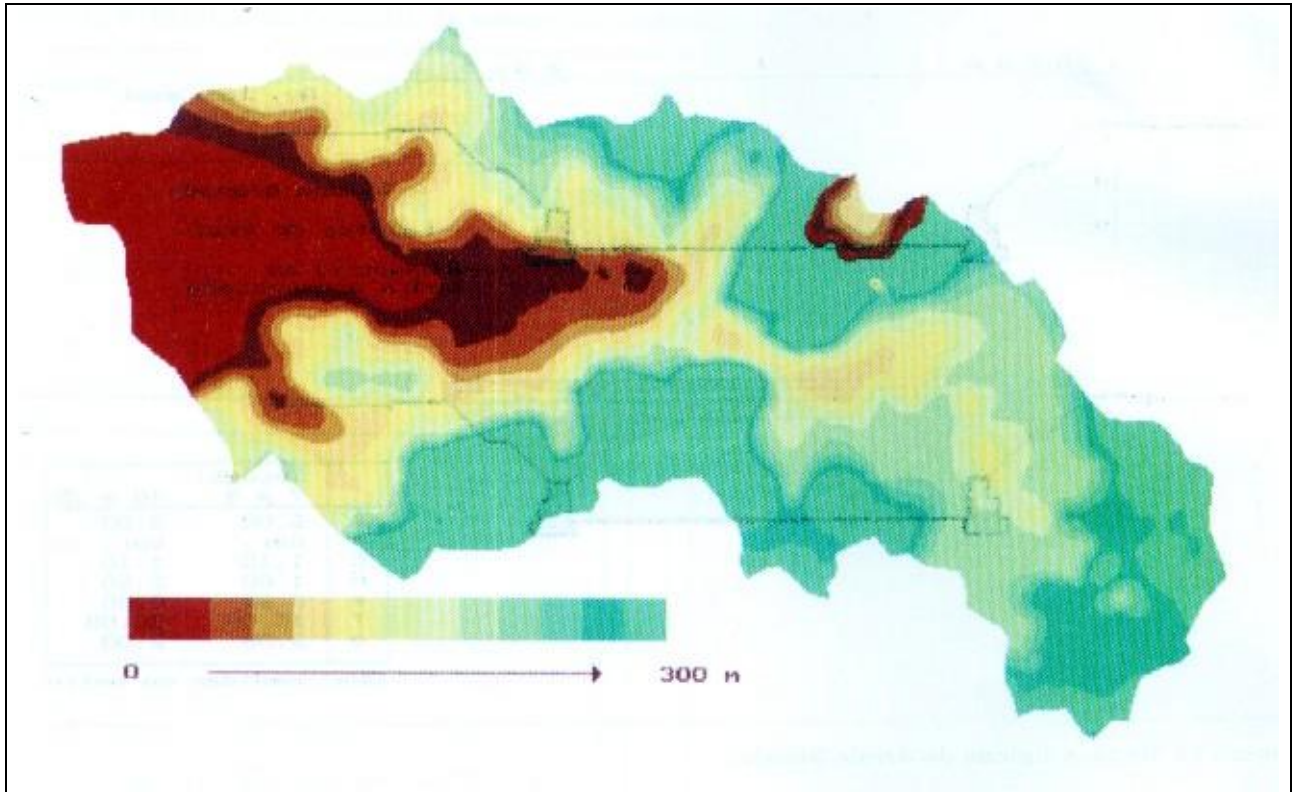


Figura 9. Topografia da bacia do Arroio Dilúvio (Campana, 1995).

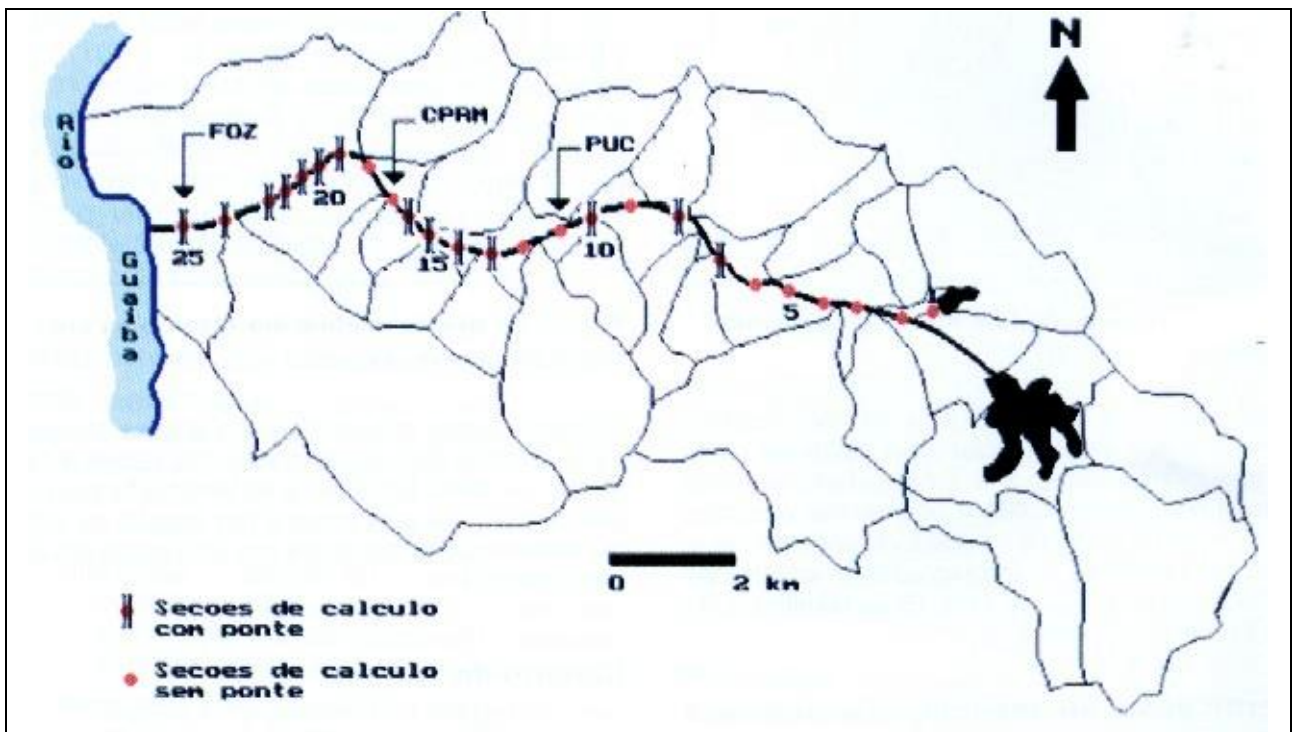


Figura 10. Discretização da bacia do Arroio Dilúvio.

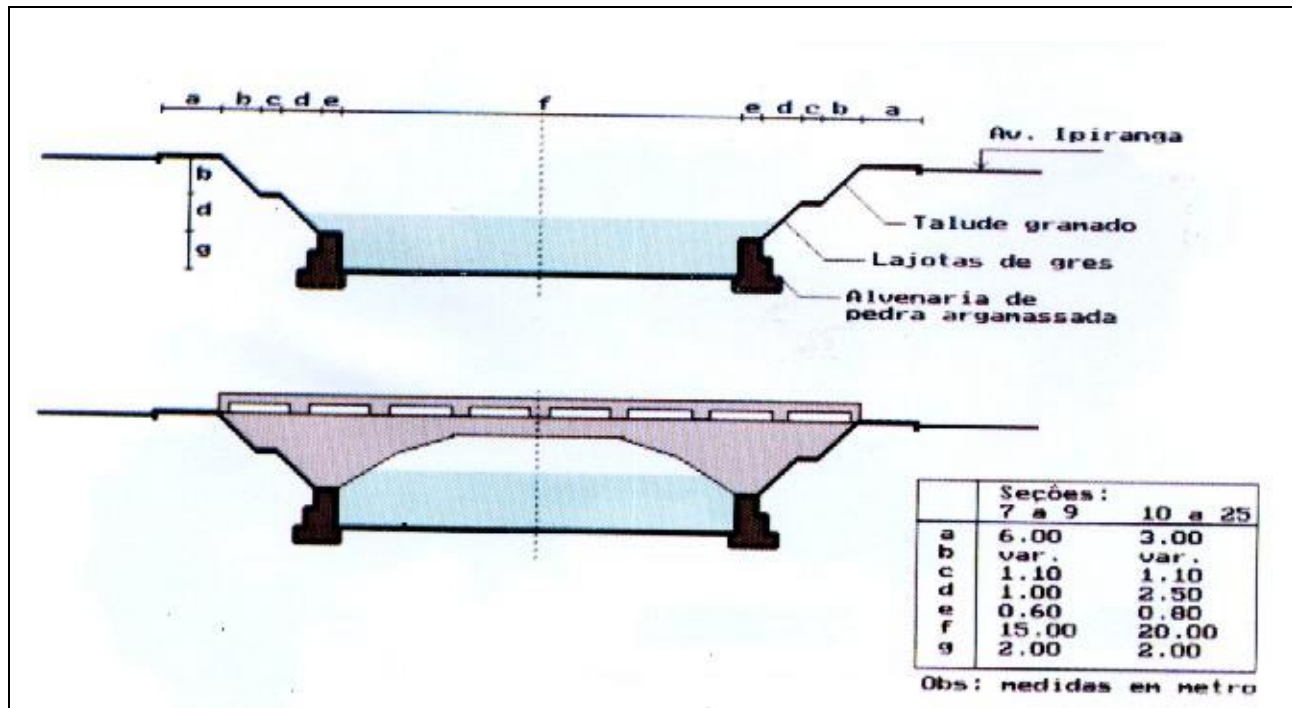


Figura 11. Seções típicas do Arroio Dilúvio.

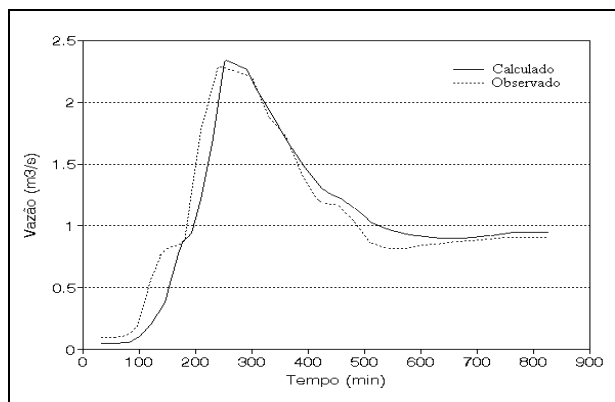


Figura 12. Ajuste módulo hidrológico na sub-bacia 13 (evento 2).

duas seções do Dilúvio PUC e CPRM, nos três eventos. Para as sub-bacias sem dados os parâmetros foram estimados e a rugosidade do canal natural adotada em 0,030 e nos trechos canalizados em 0,016. O ajuste foi realizado por tentativa e erro. Na Tabela 3 são apresentadas as estatísticas do ajuste e nas Figuras 14 e 15 os resultados de um evento nas duas seções.

Verificação do modelo - Os parâmetros adotados para a verificação foram os médios do ajuste dos três eventos. Para verificação foram

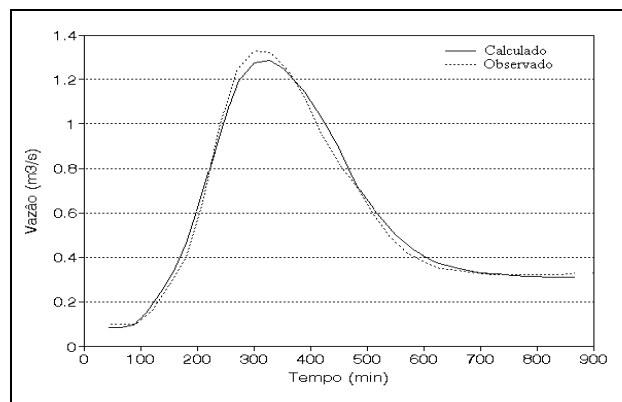


Figura 13. Ajuste módulo hidrológico na sub-bacia 23 (evento 2).

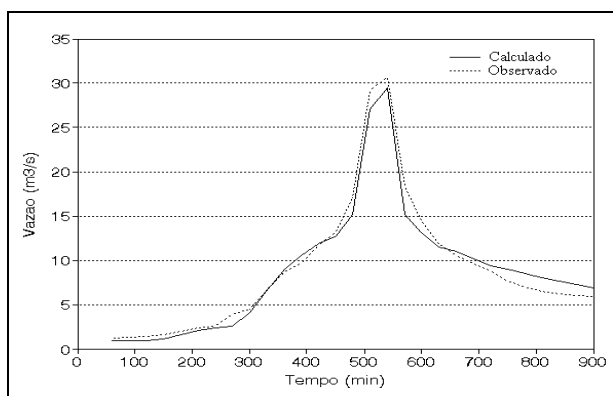
utilizados outros três eventos e a análise foi realizada sobre os dois locais citados. Na Tabela 4 são apresentadas as estatísticas da verificação para os três eventos nos dois locais e nas figuras, os valores observados e calculados nos dois locais em um dos eventos.

Cenário de análise

A avaliação do impacto da urbanização foi realizada por meio da simulação do comporta-

Tabela 3. Estatística do ajuste do modelo hidrológico-hidrodinâmico.

Evento	Seção de controle	Erro na vazão pico (%)	Erro no tempo ao pico (%)	Erro no volume escoado (%)	Desvio padrão (m ³ /s)	Coefic. Determin. R ²
1	PUC	4,20	0,00	1,51	1,088	0,979
	CPRM	5,02	0,00	8,79	1,686	0,980
2	PUC	3,36	0,00	5,03	0,423	0,957
	CPRM	5,16	0,00	-9,08	0,330	0,992
3	PUC	1,31	0,00	2,00	1,390	0,903
	CPRM	2,76	0,00	-4,95	0,944	0,975

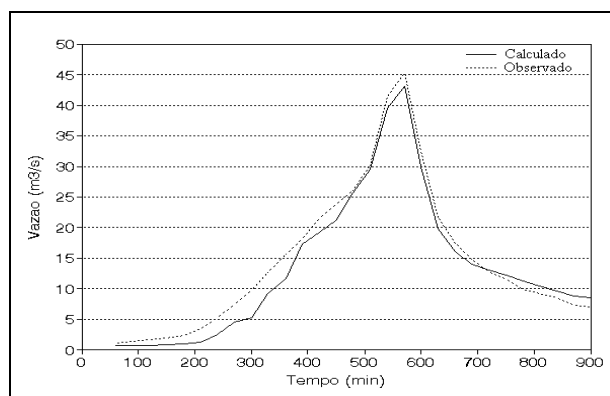
**Figura 14. Hidrogramas observado e calculado na seção PUC, evento 1.**

mento da bacia para as condições atuais e futuras, além de uma situação do passado, considerada como de referência. A elaboração dos diversos cenários de análise envolve a definição do risco e do horizonte de projeto. Escolhido o risco, é definida a precipitação de projeto utilizada como entrada no modelo. O horizonte de projeto define os condicionantes de alteração da bacia hidrográfica.

Alternativas de desenvolvimento urbano analisadas - Como a finalidade de avaliar o impacto do crescimento urbano sobre a macrodrenagem foram escolhidas quatro alternativas:

Alternativa 1: condição de urbanização da bacia do Arroio Dilúvio em 1979, considerada como a situação de referência (do período de dados utilizados no ajuste).

Alternativa 2: corresponde ao estágio de desenvolvimento do Dilúvio em 1990 (data da imagem de satélite disponível) e próximo das condições atuais.

**Figura 15. Hidrogramas observado e calculado na seção CPRM, evento 1.**

Alternativa 3: cenário de ocupação baseado no I PDDU com taxa máxima de ocupação e o restante do lote permeável.

Alternativa 4: cenário baseado no I PDDU com taxa máxima de ocupação e o restante do lote com 50% de áreas impermeáveis.

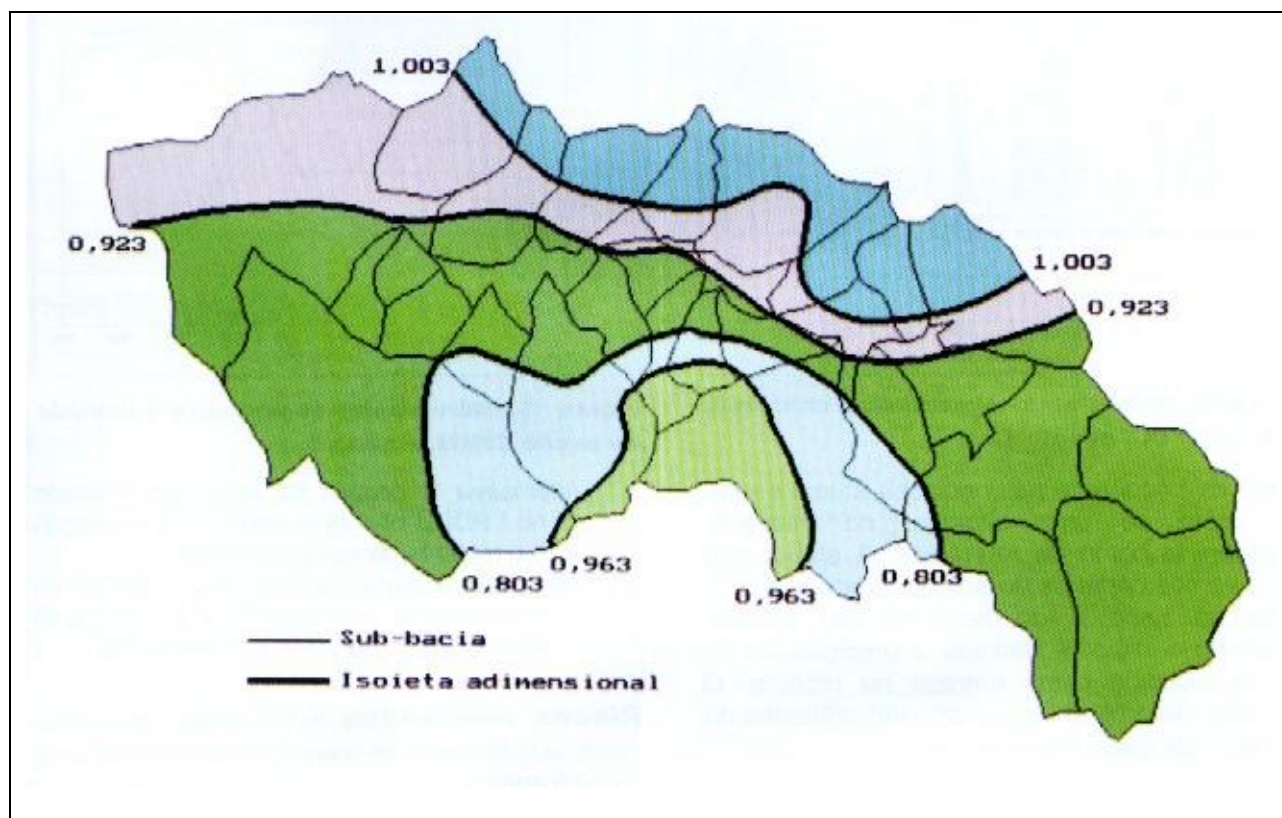
Riscos analisados - Os riscos analisados neste estudo foram os usuais em drenagem: 2, 5, 10 e 25 anos.

Precipitação de projeto - A precipitação de projeto foi obtida da curva de intensidade - duração - frequência do posto da bacia com maior série histórica e distribuído espacialmente de acordo com o maior evento ocorrido na mesma (Figura 16). A distribuição temporal adotada utilizou o método do US Bureau of Reclamation (Tucci, 1993).

Previsões - Os parâmetros para os diferentes cenários foram estimados com base nos critérios mencionados. Na Tabela 5 são apresentados os valores máximos de vazão para as quatro alternativas e diferentes riscos. Nas Figuras 17 e 18 são

Tabela 4. Estatística da verificação do modelo hidrológico-hidrodinâmico.

Evento	Seção de controle	Erro na Vazão pico (%)	Erro no tempo ao pico (%)	Erro no volume escoado (%)	Desvio padrão (m ³ /s)	Coefic. Determin. R ²
4	PUC	-4,03	0,00	-4,90	1,356	0,957
	CPRM	4,30	-3,80	3,09	1,905	0,939
5	PUC	7,60	0,00	-4,54	1,289	0,951
	CPRM	7,50	0,00	-13,59	2,530	0,912
6	PUC	6,25	0,00	6,28	0,904	0,962
	CPRM	1,40	-3,70	3,46	0,986	0,973

**Figura 16. Distribuição espacial da chuva de projeto.**

apresentados os hidrogramas para um dos riscos. Na Figura 19 pode-se observar a área alagável para o cenário 4, o mais desfavorável para o risco de 25 anos num dos trechos do Dilúvio.

Os resultados mostram que para os demais riscos e nos diferentes cenários não ocorrem extravasamento, exceto para 25 anos nos cenários 3 e 4, onde existiria inundação entre as seções 16 e 21 do Dilúvio. Estas condições ocorrem principalmente devido às pontes existentes que contribuem para redução da seção de escoamento.

CONCLUSÕES

Como descrito ao longo deste trabalho, um dos principais desafios do planejador é de se antecipar e controlar os impactos antes que os mesmo sejam realidade. Numa cidade os impactos da urbanização sobre a drenagem podem produzir efeitos para os quais o custo de controle sejam tão altos que seu controle torne-se quase inviável.

Para se antecipar a este problema nas cidades é necessário estimar o hidrograma para os futuros cenários com base em indicadores de de-

Tabela 5. Resumo da simulação com diversas chuvas de projeto.

Seção	Tempo retorno chuva projeto (anos)	Vazão do escoamento superficial (m ³ /s)				Acréscimo na vazão do escoamento superficial (%)		
		Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3	Alt. 4	Alt. 2	Alt. 3	Alt.4
PUC	2	61,8	73,3	91,2	94,0	18,6	47,6	52,1
CPRM	2	84,8	100,9	116,1	120,7	19,0	36,9	42,3
PUC	5	85,1	96,7	115,5	122,6	13,6	35,8	44,1
CPRM	5	109,3	132,7	152,8	161,7	22,0	40,2	48,6
PUC	10	111,1	116,1	133,0	139,4	4,5	19,8	25,2
CPRM	10	148,2	155,2	174,5	181,4	4,7	17,9	22,6
PUC	25	135,0	142,0	156,0	163,0	5,2	15,6	20,7
CPRM	25	180,0	186,5	202,0	209,5	3,6	12,2	16,4

Alternativa 1: Urbanização observada em 1979 (situação de referência p/comparação).

Alternativa 2: Urbanização observada em 1990.

Alternativa 3: Ocupação máxima fixada pelo I PDDU, com recuo permeável.

Alternativa 4: Ocupação máxima fixada pelo I PDDU, com 50% do recuo impermeável.

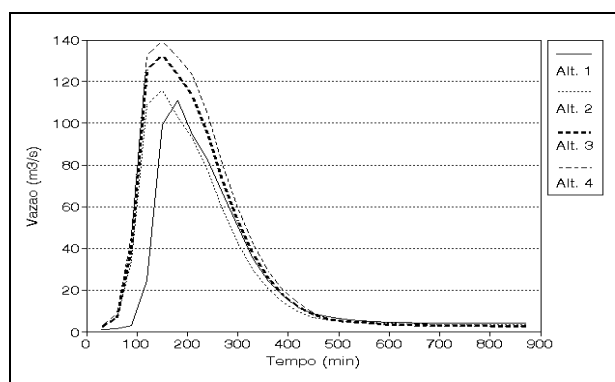


Figura 17. Hidrogramas simulados para as quatro alternativas de desenvolvimento urbano, seção 11 - PUC (Tr=10 anos).

envolvimento urbano de modo que controles possam ser previstos, tanto no próprio planejamento quanto na reserva de áreas de amortecimento para contenção da ampliação das cheias.

A urbanização de uma bacia pode ser identificada principalmente com base nos parâmetros de área impermeável e a velocidade de escoamento na bacia ou tempo de deslocamento do escoamento superficial. Neste estudo foi apresentada uma metodologia para estimativa destes parâmetros com base no desenvolvimento urbano atual e previsto através do uso de técnicas de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento.

Estes parâmetros, que fazem parte da estrutura de um modelo matemático precipitação-

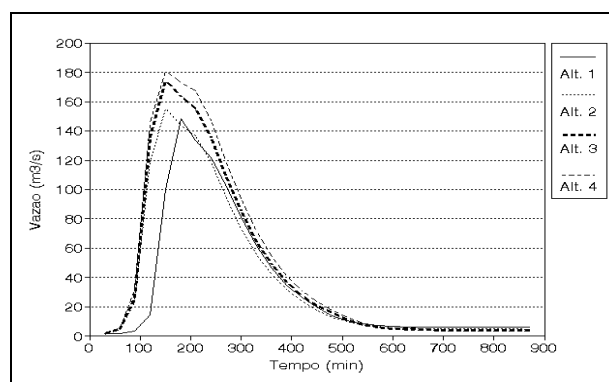


Figura 18. Hidrogramas simulados para as quatro alternativas de desenvolvimento urbano, seção 17 - CPRM (Tr=10 anos).

vazão foram utilizados para o prognóstico do hidrograma com diferentes cenários potenciais de urbanização na bacia do Arroio Dilúvio em Porto Alegre.

Os resultados mostraram que apesar da grande capacidade de escoamento na bacia existe uma área que está sujeita a inundação devido às pontes existentes sobre o canal. Este impacto pode ser controlado através da reforma destas pontes.

Estes resultados buscaram fundamentalmente demonstrar a potencialidade das ferramentas utilizadas para o planejamento da macrodrenagem de bacias urbanas.

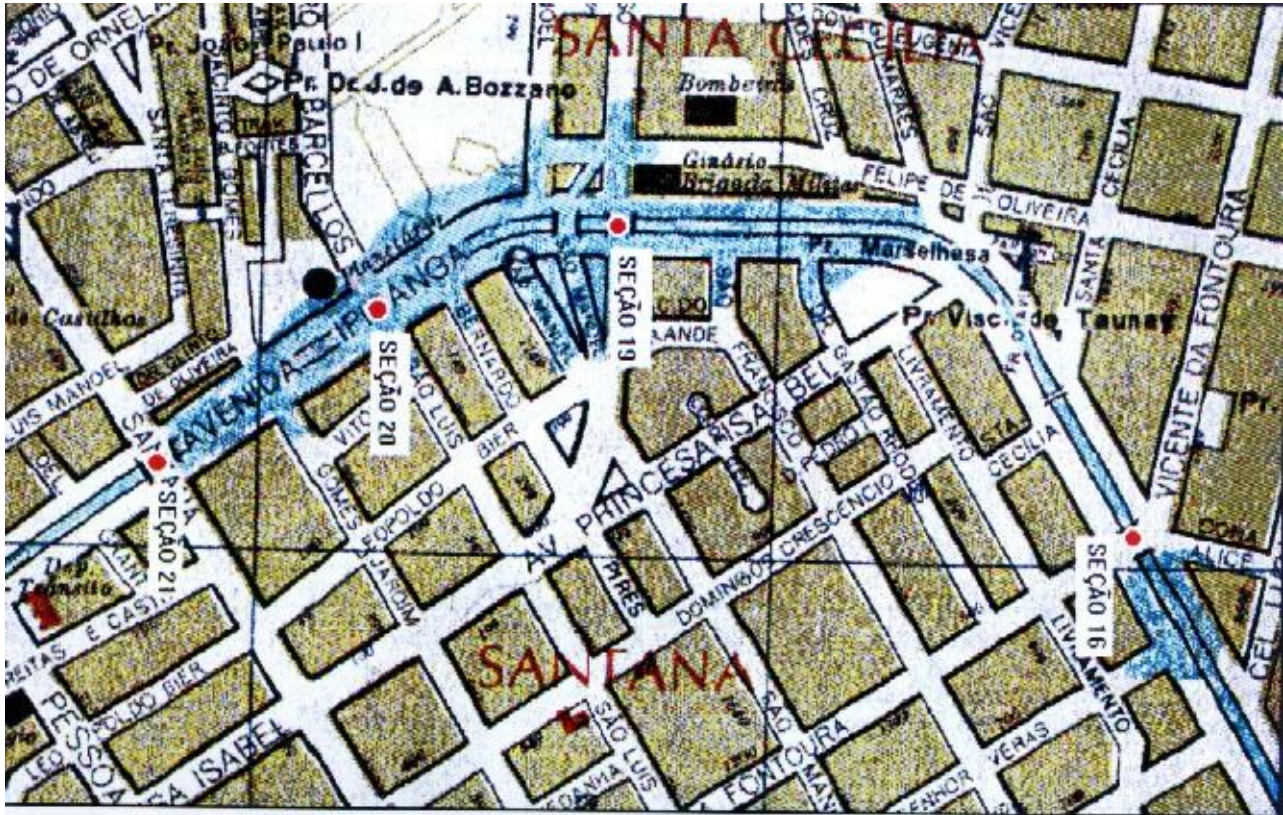


Figura 19. Representação esquemática da área atingida pelo extravazamento do Arroio Dilúvio, para a alternativa 4 (chuva de 25 anos de reto).

REFERÊNCIAS

- CAMPANA, N. A.; HAERTEL, V.; TUCCI, C. E. M. (1992). Estimativa de Áreas Impermeáveis através de Sensoriamento Remoto. *RBE Caderno de Recursos Hídricos* v10 n.2 p51-59.
- CAMPANA, N. A.; MENDIONDO, E. M. (1994). Uma estratégia alternativa para el estudio de cuencas urbanas. I Congreso Nacional de Percepición Remota Cordoba Argentina. *Anais*
- CAMPANA, N. A.; TUCCI, C. E. M. (1994). Estimativa de área Impermeável de macro bacias urbanas. *RBE, Caderno de Recursos Hídricos* v12 n.2 p79-94.
- CRAWFORD, L.; LINSLEY, J. (1966). *Digital Simulation in Hydrology Stanford IV Watershed Model. Technical Report n.39* Department of Civil Engineer Stanford University.
- DIAZ, A. (1987). *Precipitação de Projeto e Regionalização de Hidrograma Unitário para bacias Urbanas Brasileiras*. Dissertação de Mestrado. IPH/UFRGS.
- JENSEN, S. K.; DOMINGUE, J. O. (1988). Extracting topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrametric Engineering and Remote Sensing*. v54 n.11 p1593-1600.
- MASCARÓ, J. L. (1994). *Manual de Loteamentos e Urbanização* Ed. Sagra – DC Luzatto Porto Alegre. p237.
- MOTTA, J. C.; TUCCI, C. E. M., (1984). Simulation of Urbanization effect in Flow. *Hydrological Science Journal*. v29 n.2.
- PMPA (1979). *Primeiro Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano de Porto Alegre I PDDU*. Prefeitura Municipal de Porto Alegre.
- PORTO, R. L.; ZAHEL F., K.; TUCCI, C. E. M.; BIDONE, F. (1993). Drenagem Urbana. In: *Hidrologia: Ciência e Aplicação* TUCCI, C. E. M. (org.) Editora da UFRGS, EDUSP, ABRH. p805-847.
- SCS, (1975). *Urban Hydrology for Small Watersheds*. Washington. U. S. Dept. Agr. (Technical Release, n.55).
- TUCCI, C. E. M. (1978). *Hydraulic and Water Quality Model for a River Network* PhD Dissertation Colorado State University, Fort Collins, Co.

- TUCCI, C. E. M. (1979) Análise de Sensibilidade dos Parâmetros do Algoritmo de Infiltração, III Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos *Anais*, Brasília.
- TUCCI, C. E. M. (1993). *Hidrologia Ciência e Aplicação* Editora da UFRGS EDUSP ABRH p952.
- TUCCI, C. E. M. (1998). *Modelos Hidrológicos*. Editora da UFRGS ABRH. p650.
- TUCCI, C. E. M.; SANCHEZ, J.; SIMÕES LOPES, M. (1981). *Modelo Matemático Precipitação – Vazão IPHII* Recursos Hídricos n.3. IPH-UFRGS.
- TUCCI, C. E. M.; BRAGA, B.; SILVEIRA, A. L. L. (1989). Avaliação do Impacto da urbanização nas cheias urbanas *RBE Caderno de Recursos Hídricos* v7 n.1.
- TUCCI, C. E. M.; CAMPANA, N. (1993). Simulação Distribuída com IPH II – Nova versão. X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e I Simpósio de Recursos Hídricos do Cone Sul Gramado. *Anais*.

Flow Forecasting in Large Urban Basins

ABSTRACT

Urbanization increases the hydrograph peak, surface runoff volume and decreases the concentration time. To control this impact through the Urban Planning it is necessary to forecast the hydrograph for future developments.

Flood hydrographs forecasts in main drainage is done without future urban details since the Urban Master Plan specifies only type of occupation and densification

In this study is presented the relationship between the hydrologic models and Urban Plan parameters. Hydrologic model IPH IV and GIS were used to forecast the hydrograph from some urbanization scenarios..

This model was applied to Diluvio Creek in Porto Alegre, Brazil. The model was fitted and verified with recorded data. The model was used to forecast the hydrograph of various recurrence times for the Urban Master Plan of the city. The results showed that for 25 years of recurrence time there are some flooded areas, mainly due to obstruction by bridges.