

## Custo da Incerteza na Macrodrenagem Urbana I: Determinação dos Parâmetros mais Sensíveis na Modelagem de Macrodrenagem Urbana

Daniel G. Allasia

Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS  
hidrologia@gmx.net

Adolfo O. N. Villanueva

Instituto de Hidrologia de Llanuras  
avillanueva@faa.unicen.edu.ar

Recebido: 01/02/05 – revisado: 07/06/05 – aceito: 15/12/06

---

### RESUMO

Numa série de dois artigos mostra-se como a inexistência de dados hidrológicos, ou a pobre qualidade dos mesmos, têm como consequência redes de macrodrenagem urbana mal dimensionadas, resultando em grandes custos de investimento para a sociedade. Estes custos poderiam ser economizados com o correto dimensionamento.

Neste primeiro artigo é analisada a forma em que as incertezas na determinação dos parâmetros de algumas das metodologias usadas nos projetos de redes de macrodrenagem urbana influem sobre a vazão e custo da rede de drenagem. A análise da incerteza foi realizada através da análise de sensibilidade das metodologias estudadas, escolhidas dentre as mais comuns em estudos de macrodrenagem urbana quando existe escassez de dados. O estudo foi aplicado numa bacia da cidade de Porto Alegre que apresenta condições típicas de bacias urbanas brasileiras. A partir dos resultados obtidos no trabalho pode-se concluir que há baixa sensibilidade das metodologias analisadas a erros na estimativa do tempo de concentração e posição do pico da chuva, e por outro lado, há alta sensibilidade ao parâmetro CN e à escolha da relação IDF para o cálculo do hidrograma de projeto.

**Palavras-chave:** Drenagem Urbana; Incerteza; Macrodrenagem.

---

### INTRODUÇÃO

Existem atualmente vários modelos hidrológicos que permitem uma representação muito boa dos processos naturais. No entanto, a aquisição de dados para o melhor entendimento dos próprios processos não tem acompanhado o ritmo de crescimento da quantidade de modelos de simulação. Em forma um tanto irônica, L. von Bertalanffy (1966) dizia que "... hoje em dia, a construção de modelos converteu-se num esporte *fashion* e generosamente remunerado".

Melhorar a qualidade das ferramentas de simulação é importante, sendo, no entanto, mais importante melhorar a qualidade e quantidade de dados existentes. Numa série de dois artigos mostra-se como a inexistência de dados hidrológicos, ou a pobre qualidade dos mesmos, têm como consequência redes de macrodrenagem urbana mal dimensionadas, resultando em grandes custos de investimento para a sociedade.

Neste primeiro artigo é analisada a forma em que as incertezas na determinação dos parâmetros de algumas das metodologias usadas nos projetos de redes de macrodrenagem urbana geram erros na estimativa da vazão de pico e no custo da rede de drenagem. Estes artigos formam parte de uma pesquisa muito maior, parte da qual pode ser encontrada em Allasia (2002), disponível em <http://galileu.iph.ufrgs.br/aguasurbanas>.

Para o presente estudo adotou-se a definição de incerteza apresentada por Kundzewicz (1995), que definiu incerteza como a diferença entre o valor correto ou de referência, e o valor simulado.

O estudo da incerteza nos parâmetros é consequência de que as incertezas nas distintas etapas do dimensionamento de uma rede de macrodrenagem (dados de entrada, modelo e técnicas inadequadas para a estimativa dos parâmetros), se refletem na estimativa dos parâmetros das metodologias de simulação (Haan, 1989).

A qualidade e complexidade dos modelos atuais e das técnicas de estimativas de parâmetros permite afirmar que a maior parte das incertezas existentes na estimativa dos parâmetros são produto da falta ou incorreta informação. Por exemplo, incerteza na estimativa da área impermeável por erros na estimativa da urbanização; parâmetros errados por falta de dados hidrológicos para calibrar o modelo; registro inexistente ou de baixa qualidade de chuvas.

A avaliação destas incertezas permite orientar sobre os limites de utilização dos modelos e direcionar os esforços na obtenção da informação dos parâmetros ou valores mais sensíveis.

As metodologias analisadas foram selecionadas por ser muito comuns entre os projetistas de drenagem urbana, para situações de escassez de dados. Elas são:

- Métodos de Clark e Hidrograma Unitário Triangular (SCS) para a propagação de vazão.
- Blocos alternados e relação intensidade-duração-frequência (IDF) na determinação da chuva de projeto;
- “Curva Número” do SCS para determinação da precipitação efetiva;
- Dentro destas metodologias os parâmetros analisados são;
- Parâmetro de forma ( $n$ ) do Histograma Tempo-Área sintético (HTA) (HEC, 1974) utilizado no método de Clark que utiliza uma equação de potência para estimar o tempo de percurso do ponto em estudo à seção principal (Tucci, 1998);
- Tempo de concentração nas metodologias de propagação do escoamento superficial do SCS (Hidrograma Unitário Instantâneo) e Clark;
- Parâmetro de propagação do reservatório linear simples ( $K$ ), no método de Clark;
- Posição do pico da chuva, na distribuição temporal da chuva;
- Relação IDF usada no cálculo;
- CN no método da Curva Número (SCS).

Para determinar quais os parâmetros mais sensíveis e avaliar melhor os impactos da incerteza, foram utilizados a vazão de pico e o custo da rede como medida da incerteza. A utilização do custo permite o estabelecimento de uma linguagem comum com outros profissionais, especialmente com tomadores de decisão, de forma de descrever-lhes

com maior clareza as consequências da carência de informação.

## METODOLOGIA

O processo de avaliação da sensibilidade das metodologias escolhidas a erros na estimativa dos parâmetros começa com a definição dos valores de base na comparação. Estes são os valores característicos ou de referência dos parâmetros (também entendidos como valores “corretos”) para um determinado cenário de ocupação da bacia.

Por conveniência, os valores de referência para cada sub-bacia foram os utilizados na Bacia do Arroio da Areia no Plano Diretor de Drenagem Urbano de Porto Alegre (Porto Alegre, 2002). Nesta bacia, na falta de dados medidos, foi realizada uma calibração qualitativa (calibração a partir de valores secundários, como ser, o alagamento esperado para um determinado evento). Desta forma, este trabalho constitui uma forma de avaliação dos possíveis erros cometidos na elaboração do Plano.

Definidos os valores de referência, a bacia é simulada utilizando estes parâmetros, procedendo-se ao cálculo da vazão resultante, assim como ao dimensionamento da rede de macrodrenagem.

Terminado o dimensionamento inicial, escolhe-se um dos parâmetros dentre os analisados (CN,  $t_c$ ,  $n$  (Clark),  $k$  (Clark), etc), para posteriormente modificar seu valor em cada sub-bacia dentro de um intervalo de variação (que será analisado mais na frente), a partir do valor de referência. No intervalo de variação foram escolhidos  $N$  valores uniformemente separados (Por exemplo, o valor de referência e 4 valores entre este e os limites superior e inferior), de forma de amostrar completamente o intervalo. Para cada valor assim escolhido foi realizada a simulação e dimensionamento da rede.

A modificação de forma uniforme dos parâmetros, embora não reflita o que acontece na realidade, onde os erros cometidos na estimativa de um parâmetro variam para cada sub-bacia, serve como indicação do parâmetro mais relevante da simulação.

Completada a simulação de um parâmetro, repetiu-se o procedimento para cada um dos outros parâmetros, até completar todos os ciclos de simulação e dimensionamento.

O passo seguinte consistiu na análise da mudança experimentada nos valores da vazão de pico (ou vazão máxima) e do custo da rede, como consequência da variação experimentada por cada

um dos parâmetros de forma de estimar o parâmetro mais sensível.

O custo das tubulações da rede foi calculado considerando que no dimensionamento as tubulações comerciais circulares seriam utilizadas até um diâmetro de 1,50m. Para capacidades maiores foram utilizadas galerias retangulares pré-fabricadas até a capacidade equivalente a uma galeria de 1,7mx1,7m. Para capacidades superiores foram consideradas galerias construídas *in loco*. As galerias, exceto quando indicado, têm as suas dimensões variando de 5 em 5 cm (Por exemplo as medidas poderiam ser 1,5 – 1,55 – 1,60m). A forma de estimativa do custo apresentada anteriormente é utilizada pelo Departamento de esgotos Pluviais de Porto Alegre nos projetos de drenagem urbana. (Cruz, 2001)

O intervalo de variação para cada um dos parâmetros foi adotado em função de valores apresentados na literatura. Estes valores são comentados a seguir:

**Tempo de concentração (tc):** De acordo com Singh (1988), e baseado nos resultados de Meynink (1978, *apud* Singh, 1988), o intervalo de variação usual das estimativas com equações empíricas do tempo de concentração, é entre a metade e o dobro do valor de referência. Os resultados obtidos por Bertoni (2001) nas cidades argentinas de Rafaela e Carlos Paz, sendo a segunda de bastante similaridade com Porto Alegre, confirmam os valores de Singh. De esta forma foi adotado um intervalo de variação para os valores do tempo de concentração, de entre 0,5 e 2 vezes o valor de referência.

**Variação do parâmetro de propagação no reservatório (k) da Metodologia de Clark:** O parâmetro do reservatório ( $K$ ) teve sua variação definida em função do tempo de concentração devido à constatação da existência de uma relação entre  $K$  e  $t_c$ .

Dooge (1955, *apud* Tucci, 1998) utilizou os dados de O'Kelly de 10 bacias de Irlanda com área variando entre 56 e 366 milhas quadradas e obteve as seguintes relações:

$$T_c = 1,75 \frac{A^{0,41}}{S^{0,17}} \quad (1)$$

$$K = 80,75 \frac{A^{0,23}}{S^{0,70}} \quad (2)$$

onde :  $T$  é o tempo de concentração em horas;  $K$  o parâmetro do reservatório na metodologia de Clark em horas,  $A$  é a área da bacia em  $Km^2$  e  $S$  é a declividade em partes por 10000.

Da relação entre a equação 1 e a equação 2, tem-se a primeira relação estabelecida:

$$T_c = 46,14 A^{0,18} S^{0,53} * K \quad (3)$$

Uma outra relação entre ambos valores surge do estudo dos resultados obtidos por Germano *et al.* (1998), na calibração do modelo IPH II para 28 bacias urbanas e suburbanas brasileiras de cinco cidades (Curitiba, Joinville, Porto Alegre, Rio de Janeiro e São Paulo). Destas, 60% com área impermeável maior que 20% e 71% com área inferior a 30  $km^2$ .

Analizando os resultados obtidos por Germano *et al.* (1998), foi possível observar que para as regiões com características similares à área em estudo (um total de 11 bacias com características similares) é possível estabelecer a seguinte relação média:

$$K \cong 0,5 t_c \quad (4)$$

A relação 4 é particularmente verificada em bacias muito semelhantes à bacia em estudo, sendo, portanto, adotada a segunda relação para estimar o valor de  $K$ .

Determinado de que forma seria estimado o valor  $K$  o procedimento de variação do valor de  $K$  baseou-se em modificar o valor do  $t_c$  da forma definida anteriormente, e obter  $K$  em função do valor de  $t_c$ .

**Variação do parâmetro de forma do HTA sintético ( $n$ ):** Neste trabalho foi escolhido o histograma tempo-área sintético desenvolvido pelo HEC (1974) na forma apresentada por Tucci (1998), por ser um dos mais utilizados para estimativa do hidrograma de projeto em estudos de macrodrenagem urbana na cidade de Porto Alegre.

O HTA do HEC tem um único parâmetro. Dependendo da forma da bacia analisada, o valor do parâmetro do HTA sintético escolhido varia entre 1 e 2, sendo o menor valor para bacias de resposta mais lenta e o maior para as de resposta rápida. Desta forma esse foi o intervalo utilizado para definir a variação do parâmetro.

**Variação da posição do pico da chuva:** O pico da chuva, ou intervalo de máxima intensidade para o

cálculo dos hidrogramas de projetos na cidade de Porto Alegre, foi adotado na metade da duração da chuva, sendo este o critério utilizado no Plano Diretor de Drenagem Urbano (Porto Alegre, 2002). No entanto, resultados obtidos por Bemfica (1999) situam o pico da chuva ligeiramente adiantado relação ao valor de referência em Porto Alegre. Como forma de observar possíveis erros, o pico da chuva foi considerado variando entre 25% e 75% da duração total da chuva.

**Variação do valor do CN:** A existência de numerosa bibliografia tratando do parâmetro CN para condições de projeto, junto com a familiaridade dos hidrólogos com a metodologia, indica que dificilmente um hidrólogo experiente (com vários anos no projeto de estruturas de drenagem urbana em funcionamento) teria variações superiores a  $\pm 10\%$  na estimativa do parâmetro. Hawkins (1975), em função de observações na cidade de Wasatch Front-EUUU realizou uma observação similar, servindo portanto de base para a estimativa dos limites de variação do parâmetro.

**Mudança da curva Intensidade-Duração-Frequência (IDF) para o cálculo:** A utilização de distintas IDF visa fornecer uma idéia do impacto na vazão e no custo da rede, gerada pela carência de informação. Por exemplo em cidades grandes que possuem uma única estação de medição ou nenhuma, onde deve-se extrapolar valores de bacias vizinhas, com o desconhecimento real da aplicabilidade da informação.

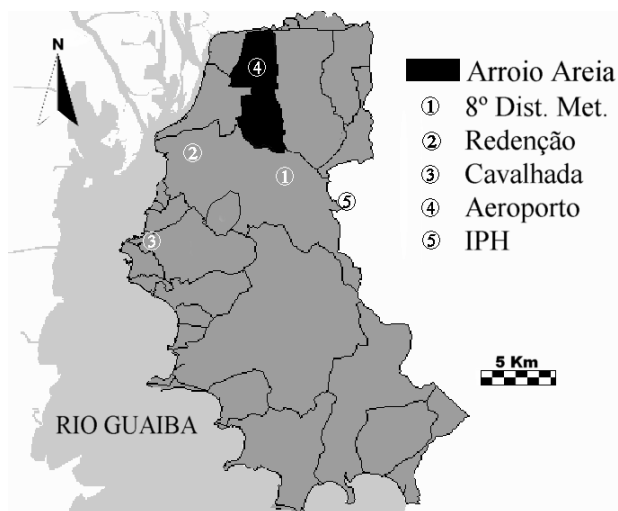


Figura 1 - Localização da bacia do Arroio da Areia e dos postos pluviométricos existentes em Porto Alegre.

No trabalho foram realizadas simulações usando as relações IDF obtidas em distintos postos

pluviográficos da cidade de Porto Alegre, analisando os impactos na vazão e no custo da rede, quando são utilizadas as distintas relações.

Atualmente 3 estações pluviográficas encontram-se funcionando na cidade de Porto Alegre: O posto pertencente ao 8º Distrito do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e os postos instalados no Bairro Cavallhada (na zona Sul da cidade) e no IPH (Figura 1), os mais antigos da cidade, o situado no Parque da Redenção e no Aeroporto Salgado Filho, deixaram de fornecer dados para avaliação das series de chuva.

Da análise das curvas Precipitação-Duração-Frequência (PDF) na Figura 2 é possível concluir que os postos Aeroporto e IPH, têm comportamento similar, assim como os posto 8º Distrito e Redenção entre eles, existindo diferenças significativas de volumes precipitados entre ambos grupos (no 8º Distrito a precipitação chega a ser 15mm maior que no Aeroporto, ou em outros termos, a diferença pode chegar até 60 anos no tempo de retorno) embora a distância entre os postos não supere os 10 Km, e as séries utilizadas na avaliação não difiram significativamente (21 e 23 anos de dados) e grande parte do período compartilhado (1974 a 1987).

As causas destas diferenças escapam ao escopo deste trabalho, onde simplesmente quer se apresentar os erros que poderiam ser cometidos no caso em que existisse um único posto pluviométrico na cidade. Maiores informações sobre as diferenças podem ser encontradas em Silveira (1997).

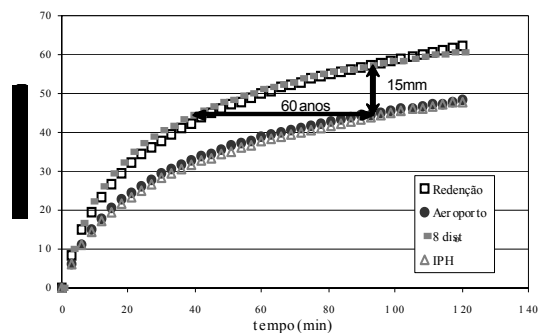


Figura 2- Curvas PDF usadas na cidade de Porto Alegre para TR=10 anos.

#### Bacia analisada

A bacia do Arroio da Areia se situa no setor norte da cidade de Porto Alegre (Figura 1).

O arroio da Areia tem sua origem em seis nascentes na parte Sul da bacia, recebendo diversas contribuições de pequenos canais ao longo do seu curso. O comprimento do Arroio é de 5,4 km até o

Aeroporto Salgado Filho, e possui um desnível de 121 m.

Na bacia observam-se duas regiões com ocupação urbana bem distinta: a parte mais baixa da bacia é a zona chamada de “corredor de desenvolvimento”, onde se localizam as principais atividades industriais e a área impermeável alcança valores consideráveis; a parte da cabeceira apresenta uma ocupação mais rarefeita, em virtude de que o processo de densificação urbana mais intenso tenha começado somente a partir da década de 1980, apresentando ainda, muitas glebas e lotes vazios.

Na figura 3 é apresentada a rede de condutos da bacia, junto com a divisão das sub-bacias e obras de controle da drenagem previstas (reservatórios de retenção), e na tabela 1 uma descrição das principais características das sub-bacias.

**Tabela 1 - Características das sub-bacias do Arroio Areia-Situação Atual.**

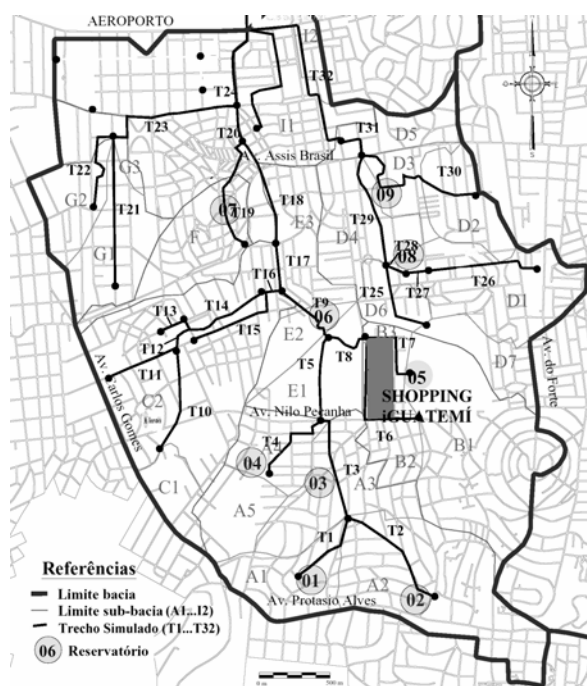
Sub-bacia	Área km <sup>2</sup>	Densidade Hab/h	Área Imp %	CN <sup>1</sup>	Tc min	K Clark
A1	0,338	46,0	29,2	81	4,5	2,25
A2	0,969	72,4	40,8	84	7,0	3,51
A3	0,507	51,6	32,2	82	4,3	2,16
A4	0,3	39,1	25,2	80	5,4	2,7
A5	0,255	21,5	10,0	76	5,7	2,85
B1	0,933	41,3	26,5	80	10,6	5,34
B2	0,273	66,6	38,6	84	4,0	2,0
B3	0,154	93,4	47,2	86	4,6	2,3
C1	0,179	21,5	10,0	76	6,4	3,2
C2	1,395	35,0	38,0	84	8,2	4,1
D1	0,666	104,6	50,0	87	5,7	2,8
D2	0,281	105,1	50,2	87	7,2	3,2
D3	0,198	102,8	49,6	87	3,7	1,8
D4	0,311	92,4	46,9	86	7,2	3,6
D5	0,233	87,0	45,4	86	7,5	3,7
D6	0,131	95,4	47,7	86	3,9	1,9
D7	0,278	104,3	50,0	87	6,9	3,4
E1	0,349	0,00	0,00	70	6,0	3,0
E2	0,121	0,00	0,00	70	6,2	3,1
E3	0,402	90,2	46,3	86	4,8	2,4
F	0,377	84,6	44,7	86	5,8	2,9
G1	0,445	88,2	45,8	86	3,7	1,8
G2	0,27	85,2	44,9	86	4,6	2,3
G3	0,027	89,2	46,0	86	3,4	1,7
H	0,627	89,7	46,2	86	7,0	3,5
I1	0,592	60,6	36,2	83	6,1	3,0
I2	0,143	60,6	36,2	83	4,0	2,0

<sup>1</sup> Valores determinados com a metodologia descrita em Campana e Tucci (1995) para umidade antecedente na condição AMCII.

Neste estudo, as vazões calculadas a partir da modificação dos valores dos parâmetros tiveram sua sensibilidade avaliada nas junções da rede (nós de cálculo) situadas imediatamente a jusante de cada sub-bacia.

Os resultados correspondem a dois tipos de simulação:

- A simulação distribuída da bacia: realizando a simulação por sub-bacias de Área < 1km<sup>2</sup> (sub-bacias apresentadas na tabela 1)



**Figura 3 - Discretização da bacia do Arroio da Areia.**

Simulação concentrada da bacia: neste caso é realizado o agrupamento de sub-bacias (Por exemplo de 2, 5, 10 sub-bacias -tabela 2). Neste caso as bacias são simuladas considerando parâmetros médios.

No caso da simulação concentrada resultam bacias embutidas (Por exemplo, a sub-bacia 7 é o agrupamento das sub-bacias 3, 6 e a E definida na tabela 1), o que permite avaliar de certa forma o possível efeito de escala derivado da utilização de bacias de distinto tamanho (1km<sup>2</sup> <Área<10 km<sup>2</sup>). Nesta situação o ponto de avaliação corresponde à junção imediatamente a jusante da bacia resultante do agrupamento.

Os locais de avaliação do custo da rede, para simplificar a apresentação de resultados, foram escolhidos coincidentes com os pontos de análise do escoamento na simulação concentrada. Isso significa que é avaliado o custo da rede de macrodrenagem necessária a montante do ponto de análise.

**Tabela 2 – Características das sub-bacias de simulação concentrada.**

Sub-bacia	Trecho de análise	Sub-bacias agrupadas	Área km <sup>2</sup>	Dens. (hab/ha)	CN <sup>1</sup> atual	Tc	K (Clark) (min)
1	19	F	0,4	54,5	81,8	10,3	5,16
2	23	G	0,7	46,8	81,4	8,3	4,14
3	8	B	1,4	87,2	86,0	14,7	7,38
4	16	C	1,6	33,5	83,1	19,5	9,72
5	31	D	2,2	55,8	82,4	16,6	8,28
6	5	A	2,4	84,7	86,0	15,8	7,92
7	9	A+B+E	4,2	52,3	81,5	25,8	12,9
8	18	A+B+C+E	6,2	100,1	86,7	28,1	14,04
9	20	A+B+C+E+F+H	7,2	51,4	80,9	32,0	15,96
10	24	A+B+C+E+F+G+H	7,9	52,6	82,1	31,1	15,54
11	32	A+B+C+D+E+F+G+H	10,9	64,8	83,3	32,3	16,14

<sup>1</sup> O valor de CN é a média espacial dos CNs indicados na tabela 1.

## RESULTADOS

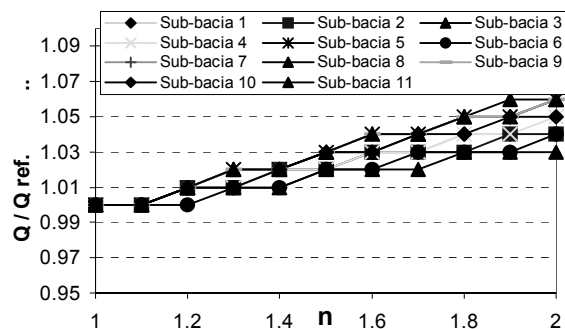
Os resultados para as 11 sub-bacias a seguir indicam se a metodologia analisada possui alta ou baixa sensibilidade à variação de um parâmetro dentro do intervalo adotado. Uma metodologia possui baixa sensibilidade quando a sua variação provoca uma mudança menor a 20% na vazão de pico a 10% no custo estimado da rede de drenagem. Um erro de 10% no custo corresponde a um valor aceitável (mais não desejável) num projeto de engenharia. Devido à limitação quanto ao número de páginas do presente artigo, são apresentados resultados gerais sobre a sensibilidade geral da simulação de macrodrenagem aos parâmetros analisados (feixes de curvas). Esse procedimento, no entanto, não prejudica a qualidade dos resultados, uma vez que pode-se dizer que o comportamento foi homogêneo

em todas as sub-bacias exceto quando indicado em contrário.

### Método de Clark.

#### Parâmetro de forma do histograma tempo-área ( $n$ )

Inicialmente foi analisada a sensibilidade do método de Clark a variações do parâmetro de forma do histograma tempo-área ( $n$ ), resultando que a metodologia mostrou-se pouco sensível às mudanças no parâmetro (Figura 4). A variação máxima foi de 5% na vazão de pico quando o parâmetro foi modificado dentro de todo o intervalo de variação possível na simulação concentrada. As variações da vazão de pico como consequência das mudanças do valor de  $n$  podem considerar-se abaixo do erro cometido por arredondamento e truncamento de valores.



**Figura 4 - Resposta na vazão das 11 sub-bacias à variação de  $n$  no método de Clark (simulação concentrada)**

#### Tempo de concentração ( $t_c$ ).

A influência da magnitude do tempo de concentração no valor da vazão máxima é dada pela sensibilidade da metodologia de propagação do escoamento superficial ao  $t_c$ , indicando, portanto, que os resultados apresentados somente são válidos para as metodologias analisadas: o método de Clark e o método do Hidrograma Unitário Triangular (SCS).

Embora fora constatada uma relação entre  $t_c$  e  $K$ , uma primeira análise desconsidera este fato, analisando simplesmente a sensibilidade da vazão a perturbações no  $t_c$  entre 0,5 a 2 vezes o valor de referência (figura 5). Os resultados mostraram baixa sensibilidade da metodologia à variação do tempo de concentração quando utilizada em macrodrenagem urbana.

### Parâmetro de reservatório (K)

Foi incorporado ao estudo o parâmetro do reservatório (K), utilizando a relação expressada na equação 4, para analisar o efeito conjunto do  $t_c$  e K, sobre a vazão e o custo da rede.

A primeira avaliação correspondeu à observação dos resultados nas sub-bacias simuladas em forma concentrada, com a finalidade de observar a variabilidade da vazão em bacias de tamanhos diferentes.

O resultado da simulação concentrada nas sub-bacias de análise mostra que dentro do intervalo de variação dado ao tempo de concentração, e conseqüentemente K, tem-se uma variação aproximada de  $\pm 40\%$  no valor da vazão máxima (figura 6). A variação foi maior nas sub-bacias maiores.

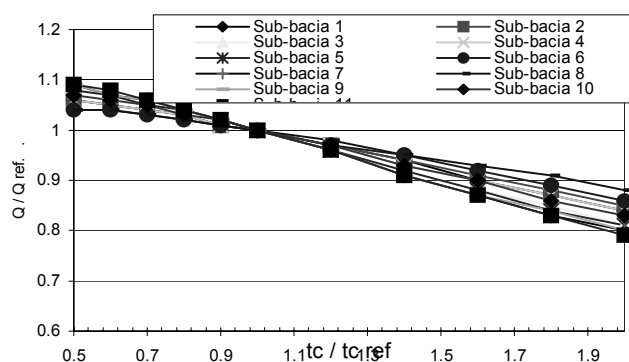


Figura 5 - Resposta na vazão das sub-bacias simuladas em forma concentrada à variação do  $t_c$  no método de Clark.

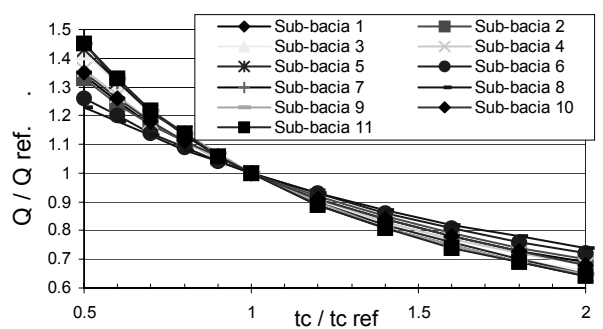


Figura 6. - Resposta na vazão na simulação concentrada da bacia à variação do  $t_c$  e k no método de Clark.

Quando realizada a simulação distribuída da rede (figura 7), para uma mudança de  $t_c$  e k entre 0,5 a 2 vezes o valor de referência resulta uma variação de aproximadamente 20% no valor da vazão

máxima. Como na simulação distribuída da bacia, as sub-bacias de simulação são menores, os valores obtidos confirmam a existência de uma sensibilidade distinta conforme muda a área da bacia.

O custo da rede de drenagem muda em aproximadamente 10% para o intervalo de variação dado aos parâmetros  $t_c$  e k (figura 8).

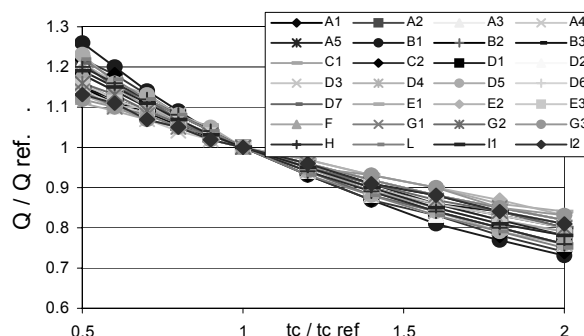


Figura 7- Resposta das sub-bacias de simulação à variação do  $t_c$  e k no método de Clark na simulação distribuída.

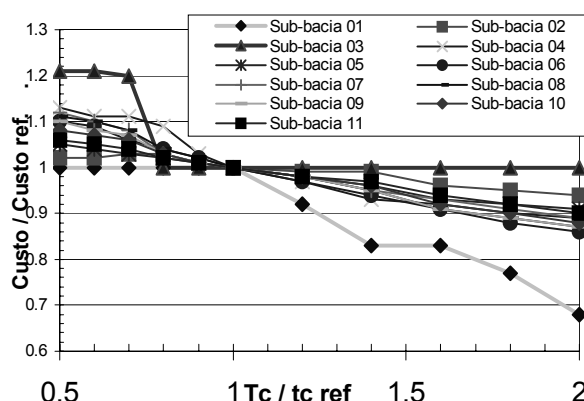


Figura 8 - Variação relativa do custo na rede para uma variação relativa entre 0,5 e 2 vezes o valor do  $t_c$  e K.

O comportamento particular apresentado por alguns trechos de rede na análise de custo (bacia 1 com marcador losango e bacia 3 com marcador triangular na figura 8) se deve em alguns casos à existência de pequenos diâmetros iniciais; ou seja, qualquer aumento ou diminuição relativa do diâmetro da tubulação representa grandes mudanças no custos. Em outros casos, observa-se que um aumento ou diminuição da vazão, não necessariamente vem acompanhado de mudanças no diâmetro da tubulação (e conseqüentemente no custo da tubulação), devido ao superdimensionamento involuntário exis-

tente nas redes de macrodrenagem como consequência da necessidade de adotar o diâmetro comercial imediatamente superior ao necessário.

As bacias que tiveram uma variação mais homogênea na figura 8 correspondem as bacias maiores, devido a que nestas existe uma tendência a respostas mais uniformes à variação da vazão, devido ao maior quantidade de situações de dimensionamento presentes.

### Hidrograma Unitário Triangular do Soil Conservation Service (HU-SCS).

O método do hidrograma unitário triangular mostrou alta sensibilidade às variações de  $t_c$ , seu único parâmetro (figura 9), com valores similares aos obtidos na variação conjunta de  $t_c$  e  $K$  na metodologia de Clark.

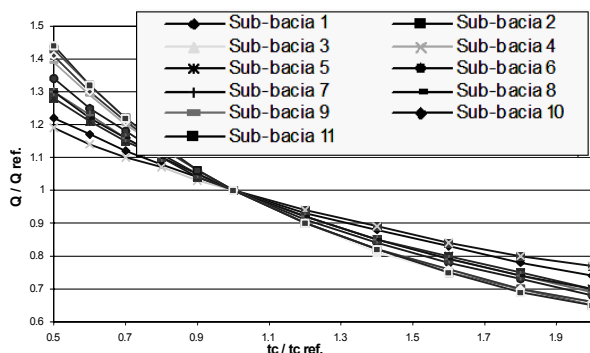


Figura 9 - Resposta na vazão na simulação concentrada à variação do  $t_c$  no método HU-SCS.

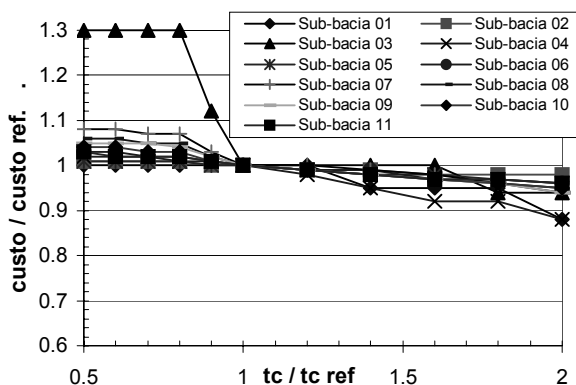


Figura 10 - Variação relativa do custo da rede das sub-bacias de análise com relação à variação de 100% no valor do  $t_c$ .

Verifica-se também que nesta metodologia aumenta a sensibilidade ao  $t_c$  conforme aumenta o tamanho da bacia, sendo visível uma maior dispersão nos resultados que aqueles encontrados na metodologia de Clark, principalmente na análise do custo da rede (figura 10).

Também neste caso a bacia 3 (marcador triangular) teve um comportamento anômalo devido ao superdimensionamento involuntário.

### Comparação entre os resultados obtidos com HU-SCS e Clark

Nos itens anteriores foi analisada a sensibilidade das metodologias de Clark e HU-SCS, em bacias simuladas em forma distribuída e em forma concentrada.

Na simulação concentrada, a influência de mudanças no valor do tempo de concentração foi sensivelmente superior à registrada na simulação distribuída, como consequência do fato de as bacias maiores terem maior sensibilidade a mudanças no valor tempo de concentração.

Na figura 11 observa-se o erro (em porcentagem) na vazão de pico para uma variação de 100% no valor de  $t_c$  em sub-bacias de distinto tamanho. Na figura é evidente que o impacto de erros na estimativa de  $t_c$  na estimativa da vazão de pico aumenta com a área da bacia até ser aproximadamente constante no valor de 45% para sub-bacias maiores a 3,0  $\text{Km}^2$ .

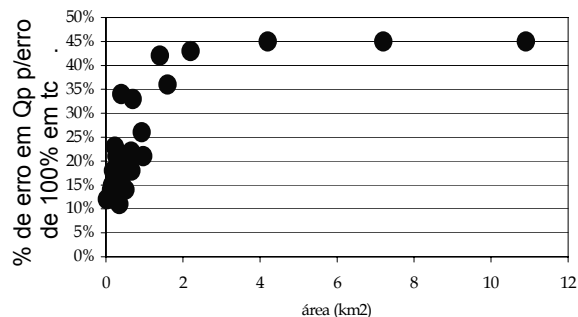


Figura 11 - Percentagem de erro na vazão para uma variação de 100% no valor de  $t_c$  em sub-bacias de distinto tamanho (simulação das bacias concentradas do estudo).

Vale lembrar que na simulação concentrada, o tempo de traslado d'água nas sub-bacias e tubulações é englobado dentro do parâmetro  $t_c$ , diferindo da simulação distribuída onde o tempo de concentração representa somente o tempo de traslado nas sub-bacias. Em outras palavras, na simula-



ção distribuída ganha importância o tempo de traslado nas tubulações que basicamente está governado pelas características da rede (declividade, rugosidade, planície de inundação, etc.). podendo ser esta a razão pela qual a variação do tempo de concentração perde importância a partir de um determinado valor.

A variação de 20% nos valores da vazão de pico na simulação distribuída quando o  $t_c$  muda entre 0,5 e 2 vezes o valor de referência, significa menos de 10% de diferença nos custos. De esta forma pode considerar-se que existe baixa sensibilidade da metodologia aplicada na sub-bacia do arroio da Areia a erros na estimativa do tempo de concentração.

A sensibilidade apontada correspondeu à variação relativa experimentada por cada metodologia, porém, para todas as sub-bacias de análise, a metodologia do SCS apresentou sistematicamente valores de vazão (e custo) inferiores à metodologia de Clark (figura 12). As diferenças entre as metodologias foram superiores à variação em cada uma delas devido à variação do  $t_c$ . Por exemplo: a variação média da vazão devido a mudanças do  $t_c$  em cada metodologia foi de 20%, e a diferença entre os valores de ambas metodologias foi de 33%. Essa diferença utilizando o custo como indicador da sensibilidade significa variações entre elas de 10% e 20%.

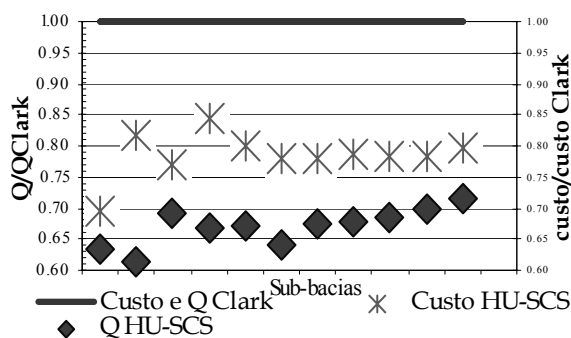


Figura 12 - Comparação dos valores de referência de vazão e custo obtidos com a metodologia de Clark e do HU-SCS.

O método do Hidrograma Unitário (SCS) possivelmente estaria subestimando a vazão de pico, porque o método supõe um coeficiente amortecimento de pico constante  $C_p=0,75$  (coeficiente que influi diretamente no tempo ao pico e no tempo de base do HU), que segundo Porto (1995), resulta baixo para bacias urbanas, onde a alta densidade de redes de drenagem acelera consideravelmente o

escoamento. A respeito do método de Clark, poucas conclusões com relação aos valores obtidos podem ser discutidas por falta de dados medidos na bacia em estudo, embora o uso de parâmetros baseado em pesquisas sobre bacias similares (Germano *et al.*, 1998) leve a pensar que não existiria um grande afastamento da realidade.

A falta de dados medidos impede a determinação de qual é o afastamento de cada valor com relação ao valor correto, mas indica a necessidade de novos estudos para determinar, por um lado, a validade das mesmas, e por outro os parâmetros corretos para a simulação da macrodrenagem urbana.

#### Variação da posição do pico da chuva na metodologia dos Blocos Alternados.

Quando o pico da chuva (intervalo de maior intensidade de precipitação) situa-se mais próximo do final da duração da chuva, resultam maiores vazões como consequência de que a primeira parte da chuva ao penetrar no solo vai saturando a camada superior do solo, reduzindo a permeabilidade. De esta forma, o pico (que se encontra mais atrasado) sofre uma menor infiltração, e aumenta.

Para sub-bacias com maior CN, ou seja, para as bacias mais impermeáveis, as diferenças na posição do pico têm um menor impacto sobre a vazão e custo, devido à diminuição do efeito da primeira parte da chuva sobre a permeabilidade.

A colocação do pico da chuva no 75% da duração da chuva incrementa em média 20% a vazão e 8% os custos. Já o pico no 25% da duração da chuva significa uma diminuição de 24% na vazão, e pouco mais do 15% no custo.

Estes resultados médios variam conforme as características de cada sub-bacia, no entanto, mostram que o desconhecimento da localização exata do pico da chuva não resulta num sério problema para aplicação da metodologia analisada.

#### Variação da IDF utilizada no cálculo da chuva de projeto.

Existe uma diferença notável nos totais precipitados registrados nos postos pluviométricos na cidade de Porto Alegre, embora não exista grande distância entre eles, e as séries de dados terem durações similares (21 e 23 anos) e grande parte do período compartilhado (1974 a 1987). Encontrar a origem da diferença não é o escopo do presente trabalho (para este fim referir-se a Silveira, 1997), e

sim as consequências da extrapolação de dados, mesmo de postos muito próximos.

A diferença de chuva registrada encontrada em Porto Alegre significa que as vazões geradas com uma chuva de duração de 2 horas gerada a partir da curva IDF que corresponde ao posto Redenção são superiores (70% em média), às geradas com base no posto Aeroporto. A diferença entre os postos de 8º Distrito de Meteorologia e o Aeroporto, são ainda superiores a 80 % (figura 13).

Em termos de custo, as diferenças representam em ambos casos, variações superiores a 40% no custo, embora o efeito do superdimensionamento involuntário devido ao escalonamento comercial dos diâmetros mascare os resultados em algumas sub-bacias.

Os resultados indicam que as incertezas relacionadas com a estimativa da chuva podem ser muito grandes, devido à possibilidade de grande variabilidade nos registros em locais relativamente próximos. A variabilidade tem um impacto muito importante sobre o custo, e, o que talvez seja mais importante, sobre a confiabilidade da rede, indicando que deve ser prevista a coleta de dados que permita reduzir a incerteza sobre a chuva na bacia.

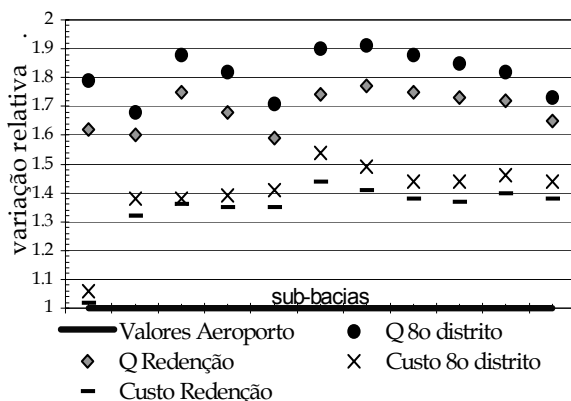


Figura 13 - Variação relativa da vazão e do custo da rede para a modificação da IDF usada no cálculo.

### Variação do CN

Na figura 11, são apresentadas as vazões resultantes da variação do CN dentro da faixa que produz escoamento ( $60 < CN < 100$ ), divididas pela vazão no mesmo ponto para  $CN = 85$  (valor médio do parâmetro CN no cenário analisado).

Na figura 14 é possível observar, que a variação aplicada ao CN gera uma resposta não linear da

vazão (pode considerar-se linear para variações menores a 10 %) para as chuvas utilizadas, e que a diferença dos resultados obtidos com o tempo de concentração, o comportamento da variação não se modifica com o aumento da área da sub-bacia (no tempo de concentração se observava um feixe de curvas que descreviam o comportamento médio, e não curvas coincidentes como neste caso). A não existência de um efeito de escala era esperado porquanto a área não intervém nas equações da metodologia do SCS.

Analisando com maior detalhe a figura 14, adverte-se que partindo de qualquer valor de referência, dentro do intervalo usual de CN em estudos de macrodrenagem urbana ( $75 < CN < 95$ ), para uma variação relativa de  $\pm 10\%$  do valor de referência do CN, a variação no CN é amplificada resultando na alteração relativa do valor original de  $Q_{\max}$  entre 45% e 80%. Em outras palavras, dentro do intervalo usual, pequenas mudanças no CN, produzem grandes impactos na vazão.

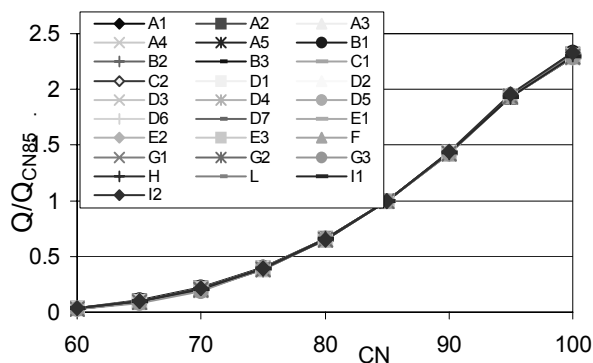


Figura 14 - Resposta na vazão das sub-bacias de simulação (27 sub-bacias) à variação do CN.

Este resultado simplificado pressupõe que todas as sub-bacias têm o mesmo valor de CN; como isto não ocorre na realidade, foram realizadas novas simulações levando em conta o CN real de cada sub-bacia. Modificando o parâmetro CN dentro do intervalo de variação adotado ( $\pm 10\%$  de variação), as simulações mostraram que a variação experimental na vazão na saída das sub-bacias (figura 15), por exemplo, fica entre 45% e 195% o valor original (a variação é de quase 100%!).

Também foi verificado que a sensibilidade do volume escoado à variação de CN é semelhante à sensibilidade da vazão de pico.

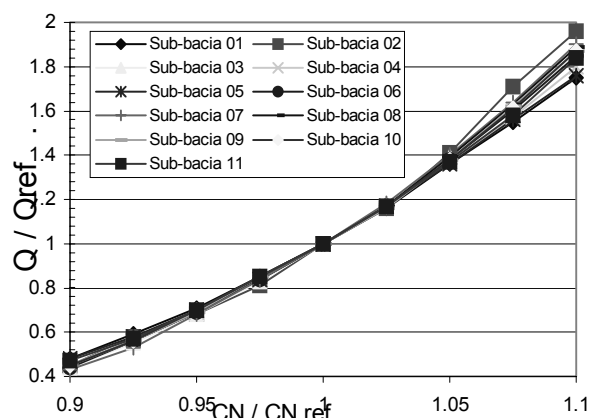


Figura 15 - Variação relativa da vazão em distintos pontos da rede devido à variação do parâmetro CN em  $\pm 10\%$ .

Até aqui foi visto que existe uma grande influência de mudanças no parâmetro CN sobre o valor da vazão de pico.

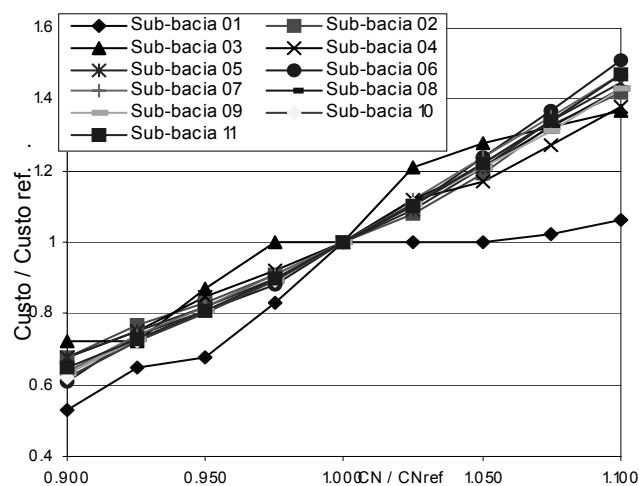


Figura 16 - Variação relativa do custo da rede das sub-bacias de análise para uma variação relativa do 10% no CN.

Quando utilizado o custo da rede como indicador, foi verificado um incremento em média de 45% no valor para um incremento de 10% no parâmetro CN, e uma diminuição de 35% para um decréscimo da mesma grandeza (figura 16). Em valores absolutos, essa quantia significa que caso tenha sido cometido um erro de 10% na estimativa do CN R\$ 20.000.000 de dinheiro público teriam sido mal investidos na bacia do Arroio da Areia. Estes valores diminuem linearmente, de forma que,

por exemplo, para 5% de erro na estimativa do CN, o impacto no custo é a metade do apresentado anteriormente.

Na figura 16 pode-se observar um grande efeito do superdimensionamento involuntário mencionado anteriormente.

## CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos no trabalho pode-se concluir que há baixa sensibilidade da metodologia aplicada na sub-bacia do arroio da Areia, a erros na estimativa do tempo de concentração e posição do pico da chuva, e por outro lado, há alta sensibilidade a erros na escolha do parâmetro CN e da relação IDF para o cálculo do hidrograma de projeto.

Em grande parte a baixa sensibilidade ao  $t_c$  depende do tipo de simulação realizado. No caso em que a bacia foi dividida em uma série de pequenas sub-bacias da ordem de 30-100ha, permitindo a simulação distribuída da bacia, não houve sensibilidade ao erro no  $t_c$ . Nas sub-bacias de maior área, onde a simulação pode ser considerada como concentrada, houve influência significativa dos erros no tempo de concentração sobre a vazão.

A diferença de vazão de pico encontrada entre as metodologias de Clark e HU-SCS, superiores à possível variação devida à estimativa errada do tempo de concentração, indica que pelo menos uma delas se afasta da realidade, devendo ser estudada a validade das metodologias para sua aplicação em macrodrenagem urbana; e se aplicável, quais os parâmetros para esta situação.

A existência de mais de um posto pluviográfico em Porto Alegre permitiu verificar que a existência de diferentes padrões de chuva sobre a cidade pode influir significativamente sobre a vazão gerada; o impacto no custo do dimensionamento com a curva errada, pode chegar a 100% do custo da rede (caso tivesse sido dimensionada a rede com dados do posto Aeroporto e o correto fosse o 8º Distrito de Meteorologia).

Isto chama a atenção sobre o uso de curvas extrapoladas de outros locais, ou, dentro de uma mesma área urbana, sobre o uso de um único posto pluviográfico, principalmente quando se suspeitam efeitos orográficos ou, do próprio efeito urbano de reforço do processo convectivo.

A IDF é um dado que depende dos registros de chuva existentes, ou seja, adotada do posto mais próximo à bacia (ou quando mais, interpolada me-

diantes polígonos de Thiessen em caso de existir mais de um posto vizinho). Desta forma, a relação IDF é o único dos parâmetros analisados que não pode ser melhorado com outros dados a serem recolhidos durante um projeto normal de drenagem urbana, como ser fotografias aéreas. Dentre os parâmetros nos quais a incerteza poderia ser diminuída o CN é o parâmetro de maior impacto na vazão, e conseqüentemente no custo da rede, dentre todos os analisados.

Foi mostrado como dentro do intervalo usual do CN em trabalhos de macro drenagem urbana ( $75 < CN < 95$ ); por cada incremento de uma unidade no CN é de esperar um crescimento de aproximadamente 8-10% no volume escoado e vazão de pico, o que equivale a 5% no custo de investimento da rede de macro drenagem.

É importante destacar que na análise da incerteza mostrada neste primeiro artigo da série, foi avaliada a sensibilidade na saída do modelo devido a modificações na entrada do mesmo, servindo de estimativa da robustez do modelo. Porém, a análise de sensibilidade não inclui os custos resultantes da escolha errada do parâmetro (por exemplo, sobre-custo praticado, custo de construção de uma tubulação auxiliar que evite alagamentos quando a principal foi subdimensionada, etc). Para se ter uma idéia, pode indicar que é de se esperar como mínimo um investimento adicional de R\$ 0,40 por cada real investido numa obra mal dimensionada devido a erros na estimativa do parâmetro CN. Os valores detalhados sobre a questão serão tratados no próximo artigo da série.

## AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer aos revisores anônimos que contribuíram significativamente para a melhora deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ALLASIA, D. G. 2002. Impacto das incertezas no custo de uma rede de macro drenagem urbana. Dissertação de Mestrado. IPH-UFRGS. Porto Alegre. Disponível em <http://galileu.iph.ufrgs.br/aguasurbanas/>
- BEMFICA, D. 1999. Análise da aplicabilidade de padrões de chuva de projeto a Porto Alegre. Dissertação de mestrado. Porto Alegre, IPH-UFRGS.
- BERTONI J. C., 2001. Etude hydrologique et analyse des incertitudes sur trois bassins versants semi urbanisés de la région centrale d'Argentine. Thèse. Université Montpellier II, Montpellier. 305 p.
- CRUZ, M. A. S. 2001. Metodologia de estimativa de custos de Drenagem Urbana do DEP- RS. Comunicação interna. IPH-UFRGS.
- GERMANO, A. O.; TUCCI, SILVEIRA, A. L. LOPES da. 1998. Estimativa dos parâmetros do modelo IPH-II para algumas bacias urbanas brasileiras. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 3 - n. 4 Out/Dez 1998.
- HAAN, C. T. 1989. Parametric Uncertainty in Hydrological Modeling. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, St. Joseph, v.32, n. 1, p. 137-145.
- HAWKINS, R.H. 1975. The importance of accurate Curve Numbers in the estimation of Storm Runoff. In *Water Resources Bulletin*. AWRA V. 11, n. 5.
- HYDROLOGICAL ENGINEERING CORPS. 1974. Training Course on Urban Hydrology. Exército dos EUA.
- KUNDZEWICZ, Z. W. 1995. Hydrological uncertainty in perspective. In: KUNDZEWICZ, Z. W., ed. *New Uncertainty Concepts in Hydrology and Water Resources*. Cambridge University Press, Cambridge. 322p., Cap. I, p3-10.
- PORTO ALEGRE. Prefeitura Municipal. Departamento de Esgotos Pluviais. 2002. Plano Diretor de Drenagem Urbana de Porto Alegre - Volume IV: Bacia do Arroio Areia. Porto Alegre, RS. 205p.
- PORTO, R. 1995. Escoamento superficial direto. In: TUCCI, C.E.M.; PORTO, R; de BARROS, M. T. org.. *Drenagem Urbana*. Porto Alegre, R.S:ABRH. Editora da Universidade. UFRGS. 428p. Cap. 2, p36-37.
- SILVEIRA, A. L. LOPES da. 1997. Provável efeito urbano nas relações IDF das chuvas de Porto Alegre. In: Rb-rh : Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre, RS vol. 2, n. 2 (jul./dez.1997), p. 93-107
- SINGH, V.P. 1988. Hydrologic systems-rainfall-runoff modeling, v I, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ.
- TUCCI, C.E.M. 1998. Modelos Hidrológicos. Porto Alegre. Editora da Universidade. ABRH/UFRGS 669p.
- VON BERTALANFFY L. (1966), *General System Theory*, Braziller, New York
- The Cost Of Uncertainty In Urban Macro-Drainage I: Determination Of The Most Sensitive Parameters In Urban Macro-Drainage Modeling***

## ABSTRACT

*In a series of two papers it is shown how the lack or poor quality of hydrologic data leads to badly designed*

*urban macro-drainage networks resulting in higher costs. These costs could be saved by designing the networks correctly.*

*The first article analyzes how uncertainties in the determination of the parameters of some urban drainage design methodologies influence discharges and the cost of the drainage network. The uncertainty was quantified by means of sensibility analysis of the studied methodologies, chosen among the most common ones in the design of urban macro-drainage networks. The study was performed in a basin of the city of Porto Alegre-Brazil that presents typical conditions of Brazilian urban basins. The results obtained in the study show that the methodologies analyses have a low sensibility to errors in estimating concentration time and the rainfall time to peak. On the other hand, there is high sensibility to the parameter CN and to the intensity-duration-frequency relationship used in the computation of the design hydrograph.*

*Key-words: Urban Drainage, Uncertainty, Macro-drainage*